

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE
PELLETS EN CHILE
UN CASO DE ESTUDIO DE LOS COSTOS DE
PRODUCCIÓN**

Por:

Rodrigo Alejandro Segura Fuentes

Profesor Guía:

Dr. Jorge Jiménez Del Río

Concepción, Marzo de 2018

Tesis presentada a la

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**



Para optar al grado de

MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

RESUMEN

SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS EN CHILE UN CASO DE ESTUDIO DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN

Rodrigo Alejandro Segura Fuentes
Marzo 2018

PROFESOR GUÍA: Dr. Jorge Jiménez Del Río
PROGRAMA: Magíster en Ingeniería Industrial

Tras el desabastecimiento de pellets de madera sufrido el año 2012, Chile ha experimentado un fuerte desarrollo en la industria productora de pellets. Frente a este escenario, muchas empresas, en su mayoría aquellas ligadas al sector forestal, invirtieron en tecnología para la producción de pellets de madera, con el objetivo de satisfacer la demanda producto de la implementación de una serie de planes de descontaminación ambiental impulsados por el gobierno en ciudades del sur del país que presentan altos niveles de contaminación atmosférica producto del uso de calefactores a leña. Debido a la escasa información que disponen los fabricantes de pellets de madera en Chile, en esta tesis se evalúan los costos relacionados a la producción de pellets de madera de una fábrica de una capacidad de 1 ton/h y otra de 3 ton/h, las cuales utilizan biomasa seca y húmeda, se ubican en 3 localidades representativas y operan con tecnología de origen Español y China. La metodología de cálculo utilizada para determinar los costos de producción fue adoptada de la literatura. Se obtuvo que los costos más relevantes en la producción de pellets de madera en Chile es la materia prima, la electricidad, el pago del capital y la mano de obra. En tanto, la fábrica de 3 ton/h utilizando residuos secos presentó los menores costos de producción, costos competitivos con mercados Europeos.

Palabras Claves: Pellets de madera, Costos de Producción, Planes de Descontaminación Ambiental, Biomasa.

ABSTRACT

SUSTAINABILITY OF THE PRODUCTION OF PELLETS IN CHILE A CASE OF STUDY OF THE PRODUCTION COSTS

Rodrigo Alejandro Segura Fuentes
March 2018

THESIS SUPERVISOR: Dr. Jorge Jiménez Del Río
PROGRAM: Master in Industrial Engineering

After the shortage of wood pellets suffered in 2012, Chile has experienced a strong development in the wood pellet industry. Faced with this scenario, many companies, mostly those related to the forestry sector, invested in technology for production of wood pellets in order to meet the demand resulting from the implementation of a series of air production management plans, in cities in the south of the country that present high levels of air pollution due to the use of wood heaters. Due to the lack of information available to wood pellet manufacturers in Chile, this thesis evaluates the costs related to the production of wood pellets from a factory with a capacity of 1 ton/h and another of 3 ton/h. which use dry and wet biomass, are located in 3 representative localities and operate with technology for Spain and China. The calculation methodology used to determine production costs was adopted from the literature. It was obtained that the most relevant costs in the production of wood pellets in Chile are the raw material, electricity, capital payment and labor. Meanwhile, the factory of 3 ton/h using dry waste presented lower production costs, which are costs that compete with European markets.

Key words: Wood Pellets, Production Costs, Environmental Decontamination Plans, Biomass

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|---|------------|
| RESUMEN | II |
| ABSTRACT | III |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS | 2 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL | 2 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO | 3 |
| CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE | 4 |
| 2.1 PELLET DE MADERA | 4 |
| 2.2 MERCADO GLOBAL DEL PELLETS DE MADERA | 5 |
| 2.3 PRODUCCIÓN DE PELLET DE MADERA EN CHILE | 8 |
| 2.4 DISPONIBILIDAD DE MATERIA PRIMA EN CHILE | 11 |
| 2.5 COSTO DE PRODUCCIÓN DE PELLET DE MADERA | 15 |
| 2.6 PRODUCCIÓN DE PELLET DE MADERA A TRAVÉS DE LA COGENERACIÓN | 19 |
| 2.7 COSTOS DE PRODUCCIÓN DE PELLETS DE MADERA | 21 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA | 27 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO | 27 |
| 3.2 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS FÁBRICAS | 28 |
| 3.3 SELECCIÓN DE LAS LOCALIDADES DEL ESTUDIO | 29 |
| 3.4 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA LA PLANTA DE ELABORACIÓN DE PELLETS | 35 |
| 3.5 COSTOS DE INVERSIÓN | 35 |
| 3.6 COMPARACIÓN CON CASOS INTERNACIONALES | 38 |

CAPÍTULO 4. COSTOS DE PRODUCCIÓN

39

| | |
|--|-----------|
| 4.1 CONDICIONES GENERALES | 39 |
| 4.1.1 PRECIO DE LA ELECTRICIDAD | 40 |
| 4.1.2 TASA DE INTERÉS DEL CRÉDITO | 45 |
| 4.1.3 DISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS | 45 |
| 4.1.4 FACTOR DE SIMULTANEIDAD INSTALACIONES ELÉCTRICAS | 46 |
| 4.1.5 VIDA ÚTIL DE LAS INSTALACIONES | 46 |
| 4.1.6 COSTO DE MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES | 47 |
| 4.1.7 VIDA ÚTIL DE OFICINAS Y PROCESAMIENTO DE DATOS | 47 |
| 4.1.8 COSTO DE SERVICIOS, MANTENIMIENTO DE OFICINAS Y PROCESAMIENTO DE DATOS | 47 |
| 4.1.9 PERIODO DE INTRODUCCIÓN AL MERCADO | 47 |
| 4.1.10 OTROS COSTOS | 47 |
| 4.2 MATERIA PRIMA | 49 |
| 4.2.1 VIRUTA DE PINO RADIATA | 49 |
| 4.2.2 ASERRÍN DE PINO RADIATA | 51 |
| 4.3 SECADO DE MATERIA PRIMA | 53 |
| 4.3.1 SECADORES DE BANDA | 54 |
| 4.3.2 SECADORES DE TAMBOR ROTATORIO | 55 |
| 4.3.3 COMBUSTIBLE | 57 |
| 4.4 MOLIENDA | 61 |
| 4.5 PELLETIZACIÓN | 62 |
| 4.6 ENFRIAMIENTO Y TAMIZADO | 64 |
| 4.7 ALMACENAMIENTO | 65 |
| 4.8 EQUIPAMIENTO PERIFÉRICO | 66 |
| 4.9 PERSONAL | 67 |
| 4.10 MANTENIMIENTO | 70 |



CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

73

| | |
|--|-----------|
| 5.1 RESULTADOS | 73 |
| 5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD | 77 |
| 5.2.1 SENSIBILIDAD A LOS COSTOS DE MATERIA PRIMA | 77 |
| 5.2.2 SENSIBILIDAD A LOS COSTOS DE ELECTRICIDAD | 78 |
| 5.2.3 SENSIBILIDAD A LOS COSTOS DE MANO DE OBRA | 79 |
| 5.3 COMPARACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DE PELLETS CON EXPERIENCIAS INTERNACIONALES | 81 |
| 5.3.1 COMPARACIÓN DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN CON AUSTRALIA Y SUECIA | 81 |
| 5.3.2 COMPARACIÓN DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN CON ARGENTINA | 84 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES | 86 |
| CAPÍTULO 7. REFERENCIAS | 88 |
| CAPÍTULO 8. ANEXOS | 94 |
| 8.1 COSTOS MENSUALES DE CAPITAL POR TONELADA DE PELLETS | 94 |
| 8.2 COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR TONELADA DE PELLETS | 94 |
| 8.3 COSTO DE OTROS COSTOS POR TONELADA DE PELLETS | 94 |
| 8.4 COSTO DE VIRUTA EN FUNCIÓN DE LAS TONELADAS DE PELLET | 95 |
| 8.5 COSTO DE ASERRÍN POR TONELADA DE PELLETS | 95 |
| 8.6 COSTO DE COMBUSTIBLE POR TONELADA DE PELLETS | 95 |
| 8.7 COSTO EN MANO DE OBRA POR TONELADA DE PELLETS | 96 |
| 8.8 COSTOS DE MANTENIMIENTO POR TONELADA DE PELLETS | 96 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Producción mundial de pellets de madera en millones de toneladas | 6 |
| Figura 2: Demanda mundial de pellet proyectada al año 2025 | 7 |
| Figura 3: Distribución mundial de consumo de pellets de madera en miles de toneladas. | 7 |
| Figura 4: Oferta v/s demanda de pellets de madera en Chile..... | 9 |
| Figura 5: Destino de los residuos energéticamente aprovechables obtenido de las industrias del aserrío en Chile. | 11 |
| Figura 6: Capacidad de generación eléctrica instalada en Chile 2017 | 13 |
| Figura 7: Proceso típico de producción de pellet de madera..... | 16 |
| Figura 8: Costos de producción de pellet de madera por tonelada métrica en Austria. | 18 |
| Figura 9: Costos de producción de pellet de madera por tonelada métrica en Estados Unidos | 18 |
| Figura 10: Costos de energía en la producción de pellets en un proceso de integración. | 20 |
| Figura 11: Comparación entre los costos de producción de la tonelada de pellet de madera en Austria y Suecia. | 22 |
| Figura 12: Distribución de los costos de producción de la tonelada de pellet de madera en Austria y Suecia..... | 22 |
| Figura 13: Costo de producción de pellets por país para dos modelos de plantas, utilizando materia prima seca y húmeda..... | 23 |
| Figura 14: Costo de producción de pellets en Portugal, Alemania y Suecia para tamaños de planta de 100 mil y 10 mil toneladas anuales. | 25 |
| Figura 15: Producción de pellets en Chile año 2015 (ton/año)..... | 30 |
| Figura 16: Precio del pellets en Chile a nivel retail y mayorista (\$/kg)..... | 31 |
| Figura 17: Precio promedio de aserrín de pino radiata húmedo \$/m ³ | 32 |
| Figura 18: Planes de recambio de calefactores según PDA para las zonas urbanas de las diferentes regiones de Chile..... | 34 |
| Figura 19: Costos mensuales de capital por tonelada de pellets producido en cada escenario y localidad en estudio evaluado en un periodo de 8 años | 37 |
| Figura 20: Costo de energía eléctrica CLP por tonelada de pellets producido para los escenarios propuestos en el estudio (\$/ton). | 44 |
| Figura 21: Otros costos por tonelada de pellets producido para cada escenario (\$/ton). | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 22: Costo CLP de la viruta por tonelada de pellets producido (\$/ton)..... | 51 |
| Figura 23: Costo CLP de materia prima por tonelada de pellets producido | 53 |
| Figura 24: Diagrama de flujo proceso de secado de biomasa mediante secador de tambor rotatorio. | 55 |
| Figura 25: Costo CLP de combustible en función de la producción de pellets para los escenarios que requieren secado (\$/ton)..... | 60 |
| Figura 26: Prensa peletizadora de matriz plana. | 62 |
| Figura 27: Prensa peletizadora de matriz anular. | 63 |
| Figura 28: Enfriador de contracorriente..... | 64 |
| Figura 29: Almacenamiento de materia prima bajo techo abierto. | 65 |
| Figura 30: Almacenamiento del pellets producido. | 66 |
| Figura 31: Costo CLP en mano de obra por tonelada de pellets producido para los escenarios en estudio (\$/ton). | 70 |
| Figura 32: Costos CLP de mantenimiento por tonelada de pellets para los escenarios en estudio (\$/ton)..... | 71 |
| Figura 33: Costo CLP de variables de producción de pellets de madera para cada escenario según localidad en estudio (\$/ton)..... | 74 |
| Figura 34: Costos CLP de producción de pellets de madera para las localidades en estudio en función de los escenarios planteados (\$/ton)..... | 76 |
| Figura 35: Aumento del costo de materia prima por tonelada de pellets. | 78 |
| Figura 36: Aumento de los costos de producción de la tonelada de pellets tras el aumento del costo de la electricidad en 20 \$/kWh..... | 79 |
| Figura 37: Reducción de los costos de producción de pellets tras disminuir el personal de envasado debido a la adquisición de una envasadora y paletizadora automática (\$/ton)..... | 80 |
| Figura 38: Aumento de costos de producción de pellets en los diferentes escenarios luego de realizar el análisis de sensibilidad (\$/ton). | 81 |
| Figura 39: Costos de producción de pellets en Austria y Suecia 2004, actualizados al año 2017 (€/ton)..... | 82 |
| Figura 40: Costos de producción de pellets de madera en Chile año 2017 (€/ton). | 83 |
| Figura 41: Costos de producción de pellets en Argentina 2009, actualizados al año 2017 (€/ton)... | 84 |
| Figura 42: Costos de producción de pellets de madera en Chile año 2017 (€/ton). | 85 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Valores límites para la comercialización de pellet de madera. | 5 |
| Tabla 2: Empresas productoras de pellet de madera en Chile..... | 10 |
| Tabla 3: Proyección de disponibilidad de biomasa año 2015 en Toneladas. | 12 |
| Tabla 4: Tamaño de fábricas seleccionadas en el estudio. | 28 |
| Tabla 5: Parámetros asociados a los diferentes tamaños de fábricas y escenarios propuestos. | 29 |
| Tabla 6: Superficie de plantaciones forestales por región y especie acumuladas año 2014 ha..... | 33 |
| Tabla 7: Producción de madera Aserrada en 2015 por región, según tipo de aserradero y rango de producción m ³ | 33 |
| Tabla 8: Costos de la maquinaria para los tipos de fábrica seleccionados y países proveedores..... | 36 |
| Tabla 9: Condiciones generales de las instalaciones a considerar en cada escenario. | 39 |
| Tabla 10: Tarifas eléctricas Alta Tensión 4.3 para las ciudades en estudio. | 40 |
| Tabla 11: Potencia eléctrica instalada en fábrica 1 y fábrica 2 según proveedor. | 41 |
| Tabla 12: Variables eléctricas consideradas y condiciones de operación para las ciudades en evaluación. | 42 |
| Tabla 13: Cálculo de los costos eléctricos mensuales para una producción de 1 ton/h según proveedor, consumo y tarifas eléctricas en las ciudades en evaluación. | 43 |
| Tabla 14: Cálculo de los costos eléctricos mensuales para una producción de 3 ton/h según proveedor, consumo y tarifas eléctricas en las ciudades en evaluación. | 43 |
| Tabla 15: Condiciones generales a considerar en los escenarios propuestos. | 49 |
| Tabla 16: Caracterización de virutas de pino radiata seca. | 50 |
| Tabla 17: Precio CLP de viruta de pino radiata en las ciudades en estudio. | 50 |
| Tabla 18: Consumo y costo CLP de viruta por escenario para las ciudades en evaluación. | 50 |
| Tabla 19: Caracterización de aserrín de pino radiata húmedo. | 51 |
| Tabla 20: Precio CLP del aserrín de pino radiata en las ciudades en estudio. | 52 |
| Tabla 21: Consumo y costo CLP de aserrín por escenario para las ciudades en evaluación. | 52 |
| Tabla 22: Datos requeridos para calcular los costos de secado para los escenarios propuestos en el estudio. | 54 |
| Tabla 23: Materia prima húmeda requerida para los escenarios propuestos en el estudio..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Tabla 24: Masa de combustible requerido para los escenarios que requieren secado de la materia prima. | 58 |
| Tabla 25: Características de la corteza de pino radiata. | 59 |
| Tabla 26: Precio de la corteza de pino radiata para las ciudades en estudio. | 59 |
| Tabla 27: Costo mensual de combustible para cada escenario según localidades en estudio. | 59 |
| Tabla 28: Costo mensual de combustible para cada escenario según localidades en estudio. | 61 |
| Tabla 29: Datos de pelletizado. | 63 |
| Tabla 30: Variables de enfriamiento y tamizado. | 65 |
| Tabla 31: Datos de almacenamiento. | 66 |
| Tabla 32: Datos de equipos periféricos. | 67 |
| Tabla 33: Datos del personal. | 67 |
| Tabla 34: Personal necesario para operar las fábricas de pellets en estudio en 2 turnos diarios. | 68 |
| Tabla 35: Sueldo personal fábrica de pellets. | 68 |
| Tabla 36: Costo de mano de obra (\$/mes) para cada una de las fábricas según proveedor y capacidad. | 69 |
| Tabla 37: Costo de mantenimiento anual en función del costo de inversión de los equipos. | 71 |
| Tabla 38: Costos mensuales de capital por tonelada de pellets producido en cada escenario. | 94 |
| Tabla 39: Costo de energía eléctrica por tonelada de pellets producido. | 94 |
| Tabla 40: Costo de otros costos por tonelada de pellets producido. | 94 |
| Tabla 41: Costo de viruta en función de las toneladas de pellets producido. | 95 |
| Tabla 42: Costo de aserrín por tonelada de pellets producido. | 95 |
| Tabla 43: Costo de combustible en función de la producción de pellets. | 95 |
| Tabla 44: Costo en mano de obra por tonelada de pellets producido. | 96 |
| Tabla 45: Costos de mantenimiento de los equipo en los escenarios en estudio. | 96 |

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

El aumento del consumo de energía en Chile (INE, 2008) sumado al cambio de legislación ambiental de las ciudades del centro sur del país (AMBIENTE, 2014) ha impulsado el uso de energías renovables. Misma situación ocurrida en los países desarrollados hace unos 15 años (REN21, 2014). El desarrollo de fuentes de energías renovables a partir de biomasa se muestra como una excelente alternativa producto a su alta disponibilidad y bajos niveles de emisión de gases de efecto invernadero (Energía, 2016). En este sentido, Chile en los últimos 6 años ha está experimentando un fuerte desarrollo en la industria del pellet de madera, tanto en la producción como en el consumo (Salazar, 2016).

El plan de descontaminación de Temuco y Padre de las Casas planteado en la estrategia de descontaminación ambiental Chile para los años 2014 y 2018 (AMBIENTE, 2014), han generado una oportunidad de negocio a las empresas relacionadas a la comercialización de calefactores y calderas a pellet. Estos artefactos habían estado ingresado al país desde el año 2008, sin embargo, no habían experimentado una expansión significativa, principalmente debido a su alto costo de adquisición de los equipos y la baja disponibilidad de pellets (Aduanas, 2016). El ingreso de estos artefactos a pellets, sin una comunicación fluida entre las empresas distribuidoras de equipos a pellets y empresas fabricantes de pellets de madera, produjo un desabastecimiento de pellet de madera en Chile en los años 2012 y 2014, desabastecimiento de 2.144 y 5.740 toneladas al año respectivamente (Salazar, 2016).

Frente a este escenario, muchas empresas ligadas al sector forestal chileno, y que poseen disponibilidad de materias primas adecuadas para la producción de pellet de madera, invirtieron en tecnología relacionada a la producción de pellet de madera (Martín, 2016). En paralelo, los actuales productores de pellet de madera aumentaron su capacidad de producción (NEGOCIOS, 2014) con tal de abastecer el mercado en crecimiento. Durante el año 2015, entraron muchas empresas al mercado productor de pellets de madera, generando un sobre stock de la producción

(Salazar, 2016) y una caída considerable en los precios en el año 2016. La caída del precio ha generado que los productores se vean obligados a revisar sus costos de producción, los cuales son representados principalmente por el costo de la energía eléctrica, adquisición de materias primas, mantenimiento, mano de obra y costos de despacho (Thek & Obernberger, 2004). Frente a este escenario las empresas chilenas productoras de pellets actualmente se encuentran evaluado si sus costos de producción podrán ser competitivos en Europa, ya que otros países como Argentina exportan anualmente entre 6.000 y 10.000 toneladas (Arana, 2013).

1.2 Hipótesis de Trabajo

Las condiciones locales para la producción de pellets en Chile tienen un efecto significativo en los costos medios de producción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar el costo de producción de pellets de madera en Chile para diferentes localidades y condiciones de operación.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar cuáles son las variables más relevantes en la producción de pellets que influyen en la estructura de los costos de producción de pellets.
- Calcular los costos medios de producción de pellets para las localidades seleccionadas.
- Identificar las variables tecnológicas del proceso de producción que tienen incidencia en los costos de producción de pellets.
- Comparar los costos de producción de pellet de madera de Chile con experiencias internacionales.

1.4 Estructura del trabajo

Este trabajo está constituido por 4 puntos centrales: revisión del estado del arte, selección de localidades y tamaño de fábricas, cálculo de los costos de producción y análisis de resultados.

- Revisión bibliográfica de estudios realizados en países donde se hayan estudiado los costos de producción de pellets de madera, países como: Austria, Suecia, Alemania, Finlandia, Noruega, EEUU y Argentina.
- Se seleccionarán 3 ciudades que presenten un alto potencial para la producción de pellets de madera en Chile, para lo cual se estudiará la disponibilidad de materia prima y el costo del pellets. Además se seleccionarán 2 tamaños de fábricas representativas a las capacidades de producción de las fábricas existentes en Chile y se cotizará el suministro de a maquinaria a un proveedor Europeo y a un proveedor Chino.
- Se calcularán los costos asociados a la producción de pellets para los 2 tamaños de fábricas de los 2 proveedores de tecnología diferentes, en las 3 localidades en estudio. Para ello se tomará como base unos de los trabajos estudiados en la revisión bibliográfica relacionado a los costos de producción de pelles y se replicará dicho trabajo con la información disponible en Chile, además de incorporar variables internas relevantes.
- Obtenidos los resultados, se realizará un análisis de los costos de producción más relevantes en la producción de pellets de madera en Chile permitiendo validar o rechazar la hipótesis planteada en el presente estudio. También se compararán dichos resultados con los costos de producción de pellets en otros países.

Capítulo 2. Estado del Arte

2.1 Pellet de madera

Los pellets de madera son pequeños cilindros (6-8 mm de diámetro por 1-3 cm de largo) de madera altamente prensada a un bajo porcentaje de humedad (< 10%) y son considerados como un combustible limpio y renovable, en su mayoría son producidos de aserrín altamente comprimido, también de residuos de la industria manufacturera y en menor medida de corteza (Society, 2011).

Actualmente por muchos este combustible es considerado como uno de los sustitutos de los combustibles fósiles (Zhang et al., 2014). Estos cilindros de madera poseen grandes ventajas respecto otros biocombustibles sólidos como las astillas y virutas de madera en cuanto a su reducido porcentaje de humedad, alta densidad energética, capacidad de transporte y fácil almacenamiento (Ryu et al., 2006). Estas características hacen que los pellets de madera sean la materia prima preferida por los usuarios a pequeña y medianas escala para usos en centros de calefacción y hornos. En tanto en aplicaciones industriales se utiliza en combinación con carbón para la generación eléctrica, tanto es así, que en algunos países se ha sustituido completamente el carbón (Spelter & Toth, 2009).

La Asociación Europea de Biomasa (AEBIOM, 2017) desde el año 2010 regula la comercialización de pellet de madera a través de la certificación EN Plus, la cual exige ciertos parámetros que deben cumplir los pellets de madera y dependiendo de las características se estandarizan en tres categorías:

ENplus-A1: Representa pellets de madera virgen y residuos madera sin tratar químicamente, con bajos contenidos en cenizas, nitrógeno y cloro.

ENplus-A2: Representa pellets de madera con un contenido más alto en cenizas, nitrógeno y/o cloro.

EN-B: Representa pellets de madera reciclada y residuos industriales aunque en ambos orígenes no se acepta maderas que hayan sido tratadas químicamente.

Los valores límites para los parámetros del pellets que se comercializa se atribuye a la siguiente tabla.

Tabla 1: Valores límites para la comercialización de pellet de madera.

| Parámetro | Unid.s | ENplus-A1 | ENplus-A2 | EN-B | Norma de ensayo |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|
| Diámetro | mm | 6 or 8 | | | EN-16127 |
| Longitud | mm | $3.15 \leq L \leq 40$ ³⁾ | | | EN-16127 |
| Humedad | p-% ¹⁾ | ≤ 10 | | | EN-14774-1 |
| Cenizas | p-% ²⁾ | ≤ 0.7 | ≤ 1.5 | ≤ 3.0 | EN-14775 (550 °C) |
| Durabilidad mecánica | p-% ¹⁾ | $\geq 97,5$ ⁴⁾ | | ≥ 96.5 ⁴⁾ | EN-15210-1 |
| Finos (< 3.15 mm) | p-% ¹⁾ | < 1 | | | EN-15210-1 |
| Poder Calorífico Inferior | MJ/kg ¹⁾ | $16,5 \leq Q \leq 19$ | $16,3 \leq Q \leq 19$ | $16,0 \leq Q \leq 19$ | EN-14918 |
| Densidad aparente | kg/m ³ | ≥ 600 | | | EN-15103 |
| Nitrogeno | p-% ²⁾ | ≤ 0.3 | ≤ 0.5 | ≤ 1.0 | EN-15104 |
| Sulfur content | p-% ²⁾ | ≤ 0.03 | | ≤ 0.04 | EN-15289 |
| Cloro | p-% ²⁾ | ≤ 0.02 | | ≤ 0.03 | EN-15289 |
| Fusibilidad cenizas ⁴⁾ | °C | ≥ 1200 | ≥ 1100 | | EN-15370 |

1) Base húmeda 2) Base seca

Fuente: Council (2013)

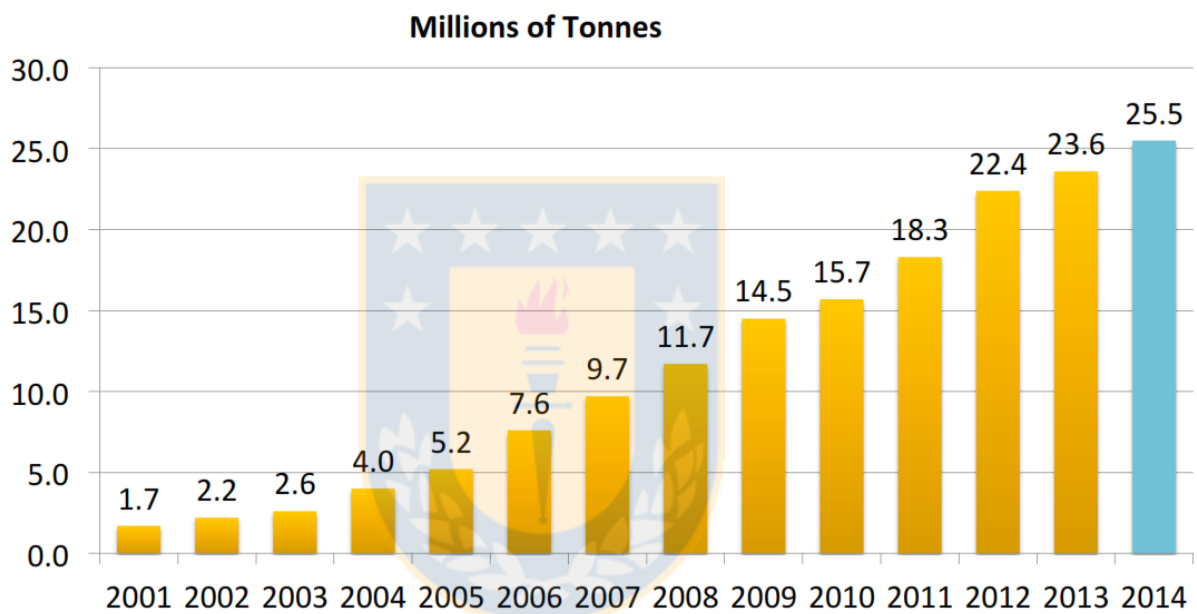
Otros países como Canadá y Estados Unidos han introducido esta normativa con el objetivo de estandarizar su pellet producido y poder comercializarlo libremente en los mercados extranjeros.

2.2 Mercado global del pellets de madera

Durante las últimas décadas muchos países han estado realizando fuertes inversiones en fábricas procesadoras de pellets de madera, destacan Austria, Alemania, Suecia, Canadá, Rusia y Estados Unidos. Entre el año 2000 y 2008 la producción creció rápidamente. Sin embargo en el año 2008 se estancó en algunos países como Austria, Suecia y Noruega, pero la producción total continuó creciendo en el año 2010 (AEBIOM, 2010). Actualmente Estados Unidos, Canadá, Suecia,

Alemania y Rusia son los mayores productores de pellets del mundo. Mientras que Suecia, Estados Unidos, Italia, Alemania y Dinamarca son los mayores consumidores (Mergner, 2014).

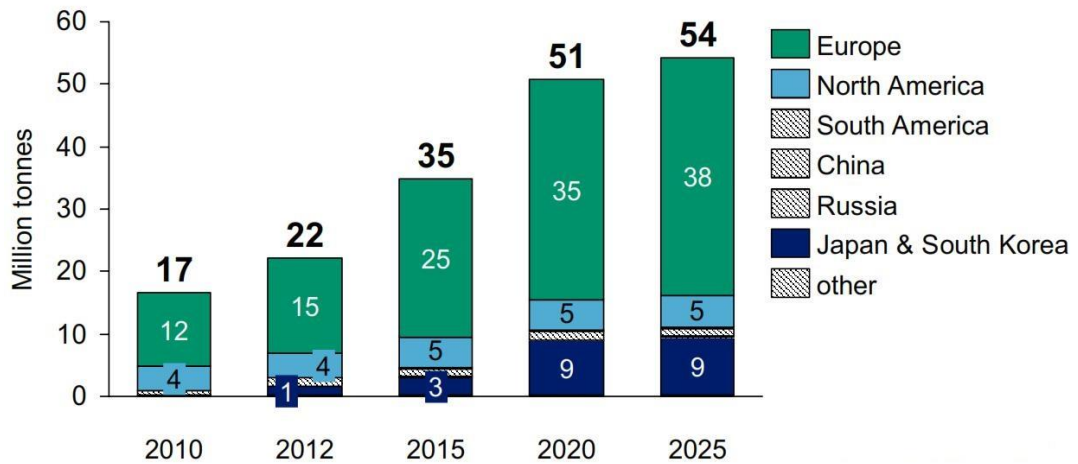
En el año 2012 la producción mundial de pellets ascendió a 22 millones de toneladas (REN21, 2014). Europa y Norteamérica representan casi la totalidad de la producción mundial con 66 y 31% respectivamente y con un consumo de pellets de 80 y 17% respectivamente (FAO, 2014). En tanto el 2013 la producción de pellets de madera fue impulsada por políticas europeas relacionadas al consumo de bioenergéticos, creciendo hasta un máximo histórico de 23.6 millones de toneladas (REN21, 2014).



Fuente: Gordon (2014)

Figura 1: Producción mundial de pellets de madera en millones de toneladas

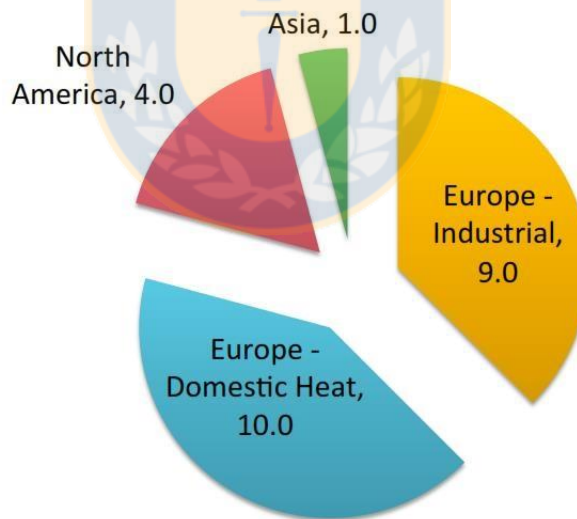
El año 2013 la producción de pellets estuvo dominado por Europa y Norteamérica, que abarcaron casi toda la producción mundial un 62 y 34 % respectivamente y el consumo de 81 y 15 % respectivamente (FAO, 2014). La figura 2 muestra estudios internacionales donde se aprecia la proyección de la demanda mundial de pellets hasta el año 2025 (Mergner, 2014). Bajo este favorable escenario, aparece la necesidad de investigar si los costos de producción de pellets de los productores chilenos alcanzaran precios competitivos en mercados extranjeros.



Fuente: Mergner (2014)

Figura 2: Demanda mundial de pellet proyectada al año 2025

A continuación la figura 3 presenta la distribución mundial de consumo de pellets de madera en millones de toneladas. Se observa que el mercado se concentra mayoritariamente en Europa tanto a nivel doméstico como residencial.



Fuente: Mergner (2014)

Figura 3: Distribución mundial de consumo de pellets de madera en miles de toneladas.

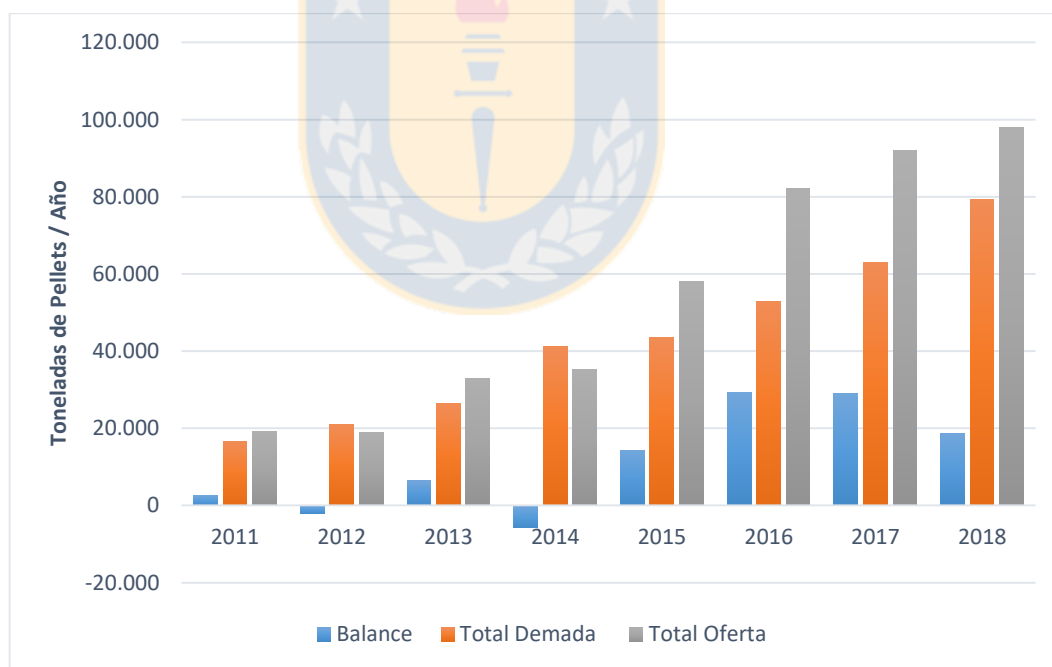
2.3 Producción de pellet de madera en Chile

La producción de pellet en Chile la inició la multinacional japonesa Sumitomo asociados 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 (NEGOCIOS, 2014). 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 (Andesbiopellets, 2016).

Una de las principales medidas de los Planes de Descontaminación Ambiental (PDA) de varias ciudades del centro sur del país apunta a restringir el uso de la leña húmeda e impulsar el recambio de calefactores. Entre ellos destaca el PDA de Temuco y Padre de las Casas publicado en el año 2010, el cual contempló restricciones del uso de la leña, trayendo consigo el ingreso al país de calefactores a pellet para usos residencial. Cabe señalar que estos artefactos habían estado ingresando al país desde el año 2008 (Aduanas, 2016), sin embargo, no habían alcanzado una expansión significativa, principalmente debido a su alto costo de adquisición y baja oferta de pellets. Desde el 2010 a la fecha en la Región de la Araucanía el gobierno regional ha establecido programas de recambio de calefactores, bonificando la adquisición de artefactos a Parafina, Gas y Pellets (AMBIENTE, 2014). Este proceso de recambio se ha estado replicando en varias ciudades de la región de O'Higgins, Talca y Maule, Chillán y Chillan Viejo, Valdivia, Osorno y Coyhaique (AMBIENTE, 2014) en estas zonas urbanas se cambiaran entre 10.000 a 26.000 calefactores antiguos por calefactores menos contaminantes en un periodo de 5 a 10 años. Por ejemplo en la Región de O'Higgins el requisito es entregar el artefacto más un 100.000 pesos y el gobierno le entrega un calefactor a Pellets, Gas o Parafina (AMBIENTE, 2014). En forma paralela se está desarrollando el PDA de Talca y Maule, donde la meta del gobierno consiste en reemplazar 13 mil artefactos en un periodo de 10 años (1.300 anuales) (AMBIENTE, 2014).

Producto de lo anterior, una cantidad importante de calefactores a pellet han estado ingresando al país pudiendo generar un déficit considerable en la oferta local de pellet, esto ya se está evidenciando debido a que en el año 2012 y 2014 los productores de pellets tuvieron que racionalizar la venta de pellet, generando escasez y un alza en el precio hasta en un 30% (NEGOCIOS, 2014). Tal fue la demanda que en el año 2014 que fue necesario importar unas 65.000 toneladas de pellet desde Brasil (MDIC, 2015).

Se tiene como antecedente histórico que Chile en los años 2011 y 2012 exportaba a Italia 1.000 y 3000 toneladas anuales de pellets de madera respectivamente (Aduanas, 2016). Sin embargo, en el año 2013 se tuvieron que detener las exportaciones, debido al aumento de demanda de pellets local tras la implementación de planes de descontaminación ambiental. A continuación la figura 4 presenta la oferta y demanda de pellets de madera en Chile desde el 2011 al 2015 y una proyección para los años 2016, 2017 y 2018. En él se aprecia que el año 2014 la demanda superó a la oferta, sin embargo desde el 2015 en adelante se proyecta que la oferta supere a la demanda debido a la incorporación de nuevos productores de pellets (Salazar, 2016).



Fuente: Salazar (2016)

Figura 4: Oferta v/s demanda de pellets de madera en Chile

Producto del visible aumento de demanda de pellet y disponibilidad de materia prima, muchas empresas ligadas a la industria forestal chilena decidieron invertir en fábricas procesadoras de pellets, la mayoría de ellas inicialmente con bajas producciones entre 500 y 2.000 toneladas anuales (Martín, 2016). La tabla 2 muestra que al año 2015 ingresaron al mercado 6 empresas con producciones mayores a 3.000 toneladas anuales. Estas empresas son: Maderas Prosperidad Ltda., Maderas Radiata Ltda., Proenergy S.A, Biopower Spa., Recuperadora de maderas Ltda. y Traiguen Energy SA. Estas 6 empresas más las existentes y otras 15 empresas pequeñas, generando en conjunto una producción de pellets al año 2015 mayor a 90.000 toneladas anuales.

Tabla 2: Empresas productoras de pellet de madera en Chile.

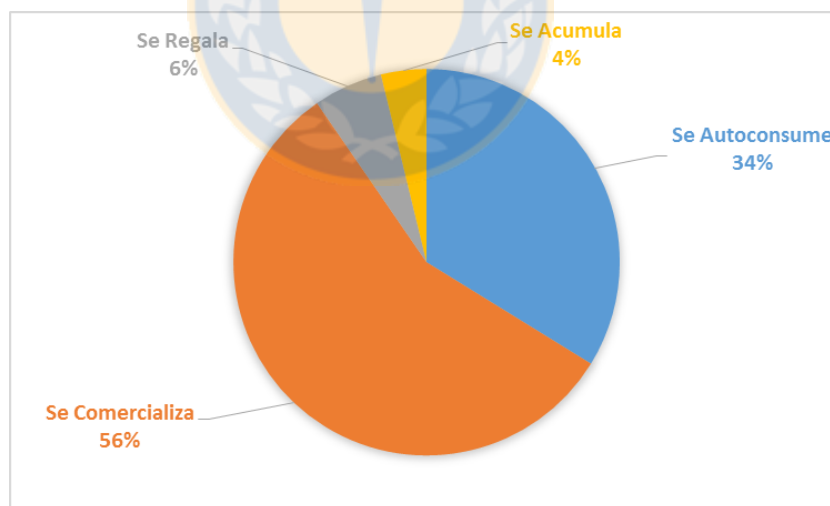
| ID | Empresa Fabricante | Producción (Ton/Año) | Región | Ciudad |
|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|--------|--------------|
| 1 | Promasa S.A (Ecomas) | 33.000 | VIII | Los Ángeles |
| 2 | Full Madera Ltda. | 86 | RM | Santiago |
| 3 | Alto Pellet Ltda. | 180 | IX | Temuco |
| 4 | Forestal Acza S.A | 960 | RM | Santiago |
| 5 | Calor Chile Ltda. | 307 | X | Osorno |
| 6 | Maderas Prosperidad Ltda. | 3.000 | VII | Talca |
| 7 | 3 Volcanes Ltda. | 2.400 | VII | Talca |
| 8 | Maderas Radiata Ltda. | 3.000 | VIII | Chillán |
| 9 | Davison Trading Ltda. | 1.800 | VIII | Coronel |
| 10 | Borda y del rio energy Ltda | 480 | VIII | Coronel |
| 11 | Climandef | 2.400 | VIII | Los Ángeles |
| 12 | Pro energy Ltda. | 6.000 | VIII | Los Ángeles |
| 13 | Biopower Spa. | 4.560 | VIII | Coronel |
| 14 | Andes Bio Pellet S.A | 12.000 | VIII | Los Ángeles |
| 15 | Recuperadora de maderas Ltda. | 3.000 | X | Puerto Varas |
| 16 | Belletti Ltda. | 300 | VIII | Los Ángeles |
| 17 | 2d electronica S.A | 3.000 | RM | Santiago |
| 18 | Traguen Energy S.A | 5.400 | IX | Traiguén |
| 19 | Muebles Romero | 2.160 | IX | Villarrica |
| 20 | Pellet Energy Ltda. | 1.200 | IX | Temuco |
| 21 | Sur Pellet Ltda. | 1.200 | X | Puerto Montt |
| 22 | Patagonia Pellet | 360 | XI | Coyhaique |
| 23 | Forestal y Agrícola Puyehue Ltda. | 720 | X | Osorno |
| 24 | Forestal Flor del Lago S.A | 2.400 | IX | Villarrica |
| 25 | Maderas San Vicente Ltda. | 1.440 | XII | Punta Arenas |
| 26 | Forestal Rio Calle Calle S.A | 360 | XIV | Valdivia |
| Producción Total: | | 91.713 | | |

Fuente: Salazar (2016)

2.4 Disponibilidad de materia prima en Chile

Según el INFOR, hoy en Chile existen 2.396.562 hectáreas de plantaciones forestales, de ellas, un 58,4% corresponde a plantaciones de Pino Radiata y un 24,1% de Eucalyptus Globulus, 10,8% Eucalyptus Nitens, 2,5% Atriplex sp, 1,0% Pinus Ponderosa, 0,7% Pseudotsuga menziesii y 2,5% de otras especies. El consumo industrial de madera en trozas de estas especies alcanza 29.652 millones de metros cúbicos de sólidos sin corteza de Pino Radiata y 12.056 millones de metros cúbicos de sólidos sin corteza de Eucalipto (INFOR, 2016).

La Comisión Nacional de Energía junto con el Instituto Forestal en la publicación (CIF, 2009) del aserrío en Chile y su producción de residuos con potencial de utilización energética, detallan las ubicaciones de las plantaciones, sus producciones de madera aserrada y los residuos energéticamente aprovechables provenientes de dicha industria. Se reporta un volumen anual de 5.542.649 metros cúbicos de sólidos sin corteza, con su equivalente en unidades de peso de 3.253.724 toneladas. Sin embargo, dicha cantidad no se encuentra disponible en su totalidad, debido a que gran parte de ella es autoconsumida para la producción de calor y energía por las mismas empresas, o comercializada a papeleras y otras empresas.



Fuente: INFOR (2016)

Figura 5: Destino de los residuos energéticamente aprovechables obtenido de las industrias del aserrío en Chile.

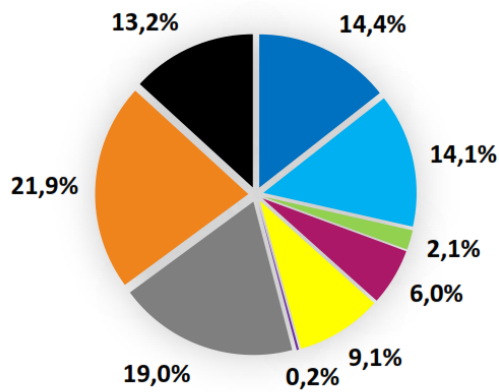
Por otro lado, en la presentación de la empresa Enap Refinerías en el “seminario internacional de biocombustibles y su futuro en la matriz energética” desarrollado en noviembre de 2009 en la Universidad de Chile, se mostró una proyección de la disponibilidad de biomasa en las principales regiones forestales del país, con el fin de evaluar la implementación de un proyecto de biocombustible en la Región del Biobío.

Tabla 3: Proyección de disponibilidad de biomasa año 2015 en Toneladas.

| | V | VI | VII | VIII | IX | X | Total |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
| Desechos de plantaciones | 114.251 | 149.216 | 233.900 | 276.232 | 205.450 | 148.454 | 1.127.503 |
| Corteza | 6.644 | 37.115 | 96.946 | 83.319 | 51.217 | 30.604 | 305.844 |
| Desechos de aserraderos | | | | | | | - |
| Aserrín | 2.669 | 19.237 | 67.378 | 133.683 | 30.872 | 37.752 | 291.590 |
| Astillas | 4.003 | 28.855 | 101.067 | 200.525 | 46.308 | 56.628 | 437.385 |
| Chapas | - | - | - | 56.545 | 18.060 | 14.405 | 89.010 |
| Remanufactura | 792 | 6.322 | 48.647 | 184.984 | 29.092 | 26.936 | 296.772 |
| Bosque nativo | - | - | 147.061 | 521.010 | 572.940 | 1.338.532 | 2.579.543 |
| Total | 128.358 | 240.744 | 694.999 | 1.456.297 | 953.938 | 1.653.310 | 5.127.647 |

Fuente: CIF (2009)

Al mes de noviembre 2017, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) posee una potencia instalada de generación de 23.601,5 MW, los que corresponden a más del 99% de la capacidad instalada nacional (sistemas medianos como Aysén y Magallanes y sistemas aislados son menos del 1%). Las Energías Renovables No Convencionales en Chile han tenido un auge los últimos años, tanto es así, que al 2017 la capacidad instalada en Solar, Eólicas, Hidroeléctrica de embalse, Hidroeléctrica de pasada, Biomasa y Geotérmica, correspondió a un 45.9% de la Matriz Nacional, alcanzando 10.838,6 MW (EnergíaAbierta, 2017).



| SEN | Capacidad [MW] |
|----------------------|-----------------|
| Renovable | |
| 10.838,6 | |
| ■ Hidro. Embalse | 3.402,0 |
| ■ Hidro. Pasada | 3.334,8 |
| ■ Biomasa | 485,6 |
| ■ Eólico | 1.419,7 |
| ■ Solar | 2.141,5 |
| ■ Geotérmica | 55,0 |
| No Renovable | |
| 12.762,9 | |
| ■ Gas Natural | 4.481,0 |
| ■ Carbón | 5.164,6 |
| ■ Derivados Petróleo | 3.117,3 |
| Total | 23.601,5 |

Fuente: Energía Abierta (2017)

Figura 6: Capacidad de generación eléctrica instalada en Chile 2017

Como se presenta anteriormente, en Chile la biomasa tiene una fuerte participación en la generación de energía eléctrica, lo cual conlleva a que las plantas generadoras de electricidad sean la mayor competencia que deben enfrentar las empresas productoras de pellets, en cuanto se refiere a la adquisición/venta de biomasa. En este sentido, actualmente en Chile la comercialización de la biomasa (aserrín y corteza de pino radiata húmedos) desde los aserraderos a las empresas generadoras de electricidad se vende a unos 3500 CLP el metro cubico (Astaburuaga, 2016). Por lo que las empresas interesadas en producir pellets de madera deberán evaluar la rentabilidad que les generará la producción de pellet respecto a seguir vendiendo su biomasa a las empresas generadoras de electricidad.

En el año 2010 la empresa Comasa S.A. instaló una planta de energía en base a biomasa forestal en Lautaro, Región de La Araucanía, en un lugar con un radio considerable para tener abastecimiento de materia prima (radio de 350 km). Antes de instalar la planta se evaluaron todos los aserraderos de la zona y las plantaciones, llegando a un dimensionamiento de fábrica de 25 MW, la cual consume 960.000 metros cúbicos de biomasa al año. Este se basó en la cantidad de biomasa que se podía recolectar en la zona. En el diseño se tomó como precaución que en caso de que hubiera un problema de abastecimiento, se inyectaría hasta un 15% de paja, situación que ocurrió en el segundo año de existencia de la planta. En esa zona no existe más

biomasa forestal, ya que se debe tener en cuenta que no todos los aserraderos venden corteza y aserrío, debido a que tienen secadores, en los que usan los residuos para generar calor (Comasa, 2016).

Por otro lado, también es importante considerar el aprovechamiento de biomasa proveniente de bosques nativos, un estudio publicado por investigadores de la Universidad de la Frontera (Altamirano et al., 2015) cuantificaron la disponibilidad de biomasa forestal de bosque nativo de Chile en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos del centro-sur de Chile. El estudio consideró una extracción basada en intervenciones silviculturales, restricciones ambientales y legales, estimando la distribución espacial y el potencial energético de la biomasa. Al considerar las restricciones ambientales y legales, la superficie potencialmente manejable se redujo de 1.330.460 a 754.435 hectáreas, y la biomasa potencial disponible se estimó en 31 mil Toneladas. El potencial de energía eléctrica y calórica equivale a 26 GWh y 54 GWh, respectivamente. En este sentido, se dispone de alrededor de 21 mil toneladas de biomasa para la producción de pellets de madera, cifra baja, considerando que una planta de pellet de tamaño medio produce anualmente 50 mil toneladas.

Por otra parte, según un estudio dado a conocer a fines del 2014, realizado por el ministerio de energía, la corporación nacional forestal (Conaf) y la Universidad Austral de Chile, entre las Regiones de Coquimbo y Los Lagos, existe un considerable potencial de biomasa. El estudio tomó toda la superficie de bosques nativos de Chile, excluyendo lo que corresponde a parques nacionales y superficies que poseen restricción, en total 13 millones de hectáreas, de las cuales el 49% (6,5 millones de hectáreas netas) son manejables una vez consideradas todas las restricciones destinadas a preservar el bosque nativo de Chile. A esto se le agregó la superficie factible de ser utilizada para plantar bosques destinados a la extracción específica de biomasa, que a nivel país suman 3 millones 759 mil hectáreas, sin embargo, de estas hectáreas el total aprovechable corresponde a solo a 383 mil.

El estudio considero plantaciones entre las regiones entre Coquimbo y Aysén, pero eliminó aquellas zonas que presentan problemas de abastecimiento hídrico y cuya superficie tiene alto

valor para la agricultura. De esta forma, se estableció que las zonas ideales para esta clase de plantaciones se encuentran en las Regiones de Los Lagos y Los Ríos. Considerando todos estos valores, se estableció un valor anual en biomasa seca de 9,5 millones de toneladas, lo que en términos de potencia eléctrica instalable alcanza 2.595 MWe. A esta cifra se le descontó la biomasa que se destina al consumo de leña nativa, arrojando una potencia técnica neta de 2.129 MWe. Este escenario parece mucho más atractivo para las empresas interesadas en desarrollar proyectos eléctricos y de pelletizado de madera, para ambos casos, se deberá evaluar qué proyecto generará mayor rentabilidad.

2.5 Costo de producción de pellet de madera

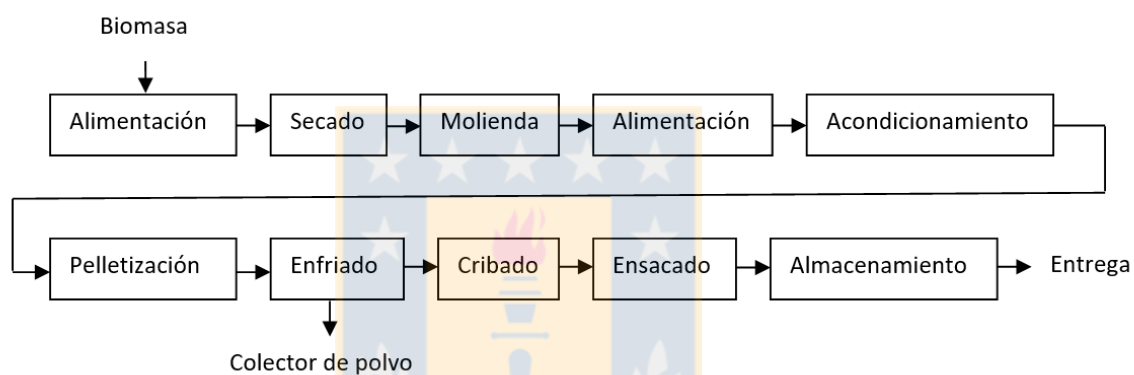
A pesar que existen varias fábricas de pellets instaladas en Chile, es difícil obtener información fiable sobre los costos de producción, debido a que éstas poseen diferentes capacidades, trabajan con diversas materias primas y poseen diferente procedencia de tecnologías. En los países desarrollados este tipo de variables están medianamente resueltas, por ejemplo en Europa (Thek & Obernberger, 2004) desarrollaron diferentes modelos de costeos de producción de pellets de madera, también en Canadá (Hoque et al., 2006) y en Estados Unidos (Pirraglia, Gonzalez, & Saloni, 2010).

Son muchos los parámetros que influyen en la determinación de costos de producción de pellets, tipos de materia prima, tecnología utilizada, consumo de energía y mano de obra (Thek & Obernberger, 2004). Estas variables se deben adecuar a la realidad económica de cada país, por ejemplo el costo de la energía eléctrica en Chile es mucho mayor que en Estados Unidos (Salazar, 2016). Sin embargo, el costo de la mano de obra es considerablemente menor (OIT, 2015). Lo anterior afecta el tipo de fábrica a implementar, desde el punto de vista de mano de obra y opciones de tecnología para el proceso.

Los pellets de madera pueden ser fácilmente producidos a partir de cualquier residuo de madera, astillas, aserrín, corteza, virutas, entre otros subproductos (Zerbe, 2008). Por lo que al momento de realizar un modelo comparativo es importante definir los tipos de biomasa a utilizar. Otro aspecto importante para la producción de biocombustibles sólidos es la densificación que posee

el pellet (Ryu et al., 2006). En este sentido, los pellets de madera proporcionan un alto contenido energético por unidad de volumen, optimizan el transporte en largas distancias, poseen un bajo contenido de humedad, generan una combustión completa y eficiente, con bajo contenido de cenizas y bajo nivel de emisión de material particulado. Es posible utilizarlos en una gran variedad de aplicaciones a pequeña escala, en la calefacción residencial o a gran escala en co-combustión de centrales térmicas de carbón (Junginger, 2017).

El primer paso para el desarrollo de un modelo tecno-económico para determinar los costos de producción de pellets es la identificación de todos los procesos individuales necesarios para la fabricación de pellets (Pirraglia et al., 2010).



Fuente: Pirriaglia et al. (2009)

Figura 7: Proceso típico de producción de pellet de madera

Los procesos en la Figura 7 son típicos de una planta de producción de pellets. Procesos tales como la molienda o el secado dependerán de las características de las materias primas, si la materia prima viene seca o el tamaño de partícula es adecuado, entonces no son necesarios estos procesos. Se deja fuera de este esquema, el traslado de la biomasa hasta la fábrica de pellets, es decir, que pueden ser realizados por otra empresa, o por otra división de la misma empresa, y el costo de la biomasa esté entregado a la puerta de la fábrica.

En el año 2009 el centro de investigación (GmbH, 2016) Austria, dedicado a la investigación, desarrollo, planificación y optimización de procesos y plantas para el uso de la biomasa para la

calefacción y la electricidad, publicó un artículo relacionado al cálculo detallado de los costos de producción de pellets, el cual considera los siguientes aspectos relevantes:

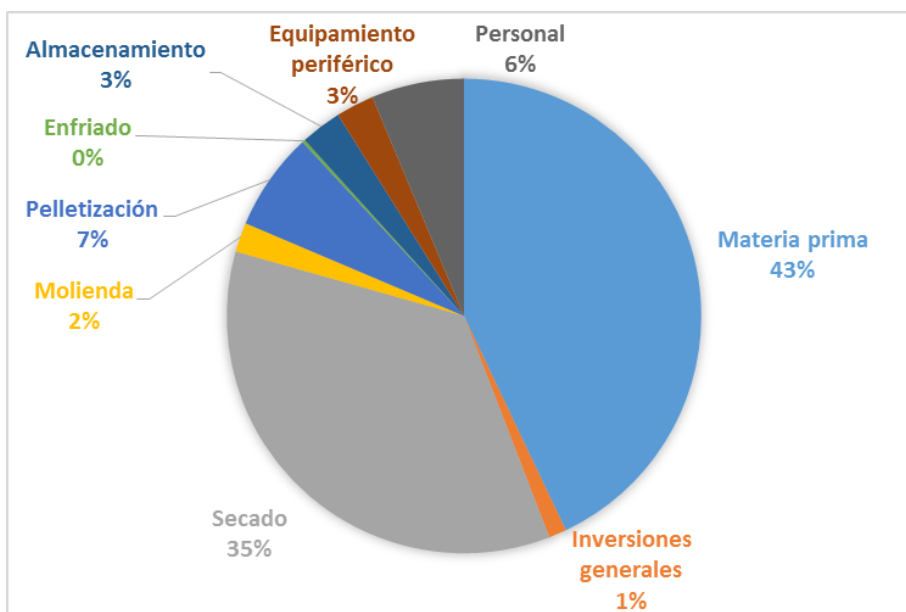
Los costos de inversión de todas las unidades del proceso de producción de pellets (incluyendo el tratamiento previo de materias primas, que depende de la materia prima utilizada). La construcción, las infraestructuras y la planificación, así como los períodos de utilización y los costos de mantenimiento de todas las unidades e instalaciones.

El precio de la electricidad y la propia demanda de electricidad de la planta de producción generalmente calculada en base a la energía eléctrica necesaria para todas las instalaciones eléctricas y un factor de simultaneidad, que considera el hecho de que no todas las instalaciones eléctricas operan a plena carga al mismo tiempo.

Los costos de almacenamiento de materias primas secas y húmedas, así como para pellets, dependiendo de la capacidad de almacenamiento y el tipo de sistema de almacenamiento utilizado (almacenamiento al aire libre, almacenamiento en galpón o almacenamiento en silos).

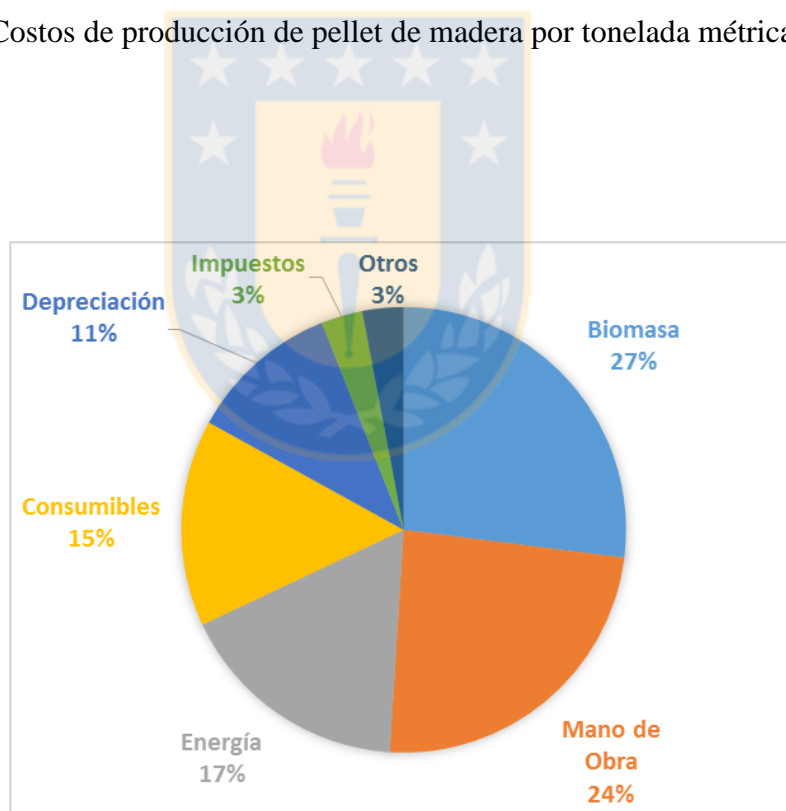
Los costos en mano de obra, tanto para la producción, como comercialización y administración y el tipo de trabajo por turnos. La tasa de producción anual de pellets, considerando el contenido de agua y la densidad aparente de los pellets producidos.

Por otro lado, Pirraglia et al. (2010) desarrollaron un modelo técnico-económico para determinar los costos de producción de pellets de madera en Estados Unidos. El modelo determinó que los costos más significativos los representa el costo de adquisición de la biomasa con un 27% y el costo de la mano de obra con un 24%. El costo energético representa el 17% de la planta de pellet (Figura 8). Desde este punto de vista se vuelve necesario estudiar los costos de producción en Chile, ya estos dependen exclusivamente de la realidad de cada país.



Fuente: Thek & Obernberger (2004)

Figura 8: Costos de producción de pellet de madera por tonelada métrica en Austria.



Fuente: Pirriaglia et al. (2009)

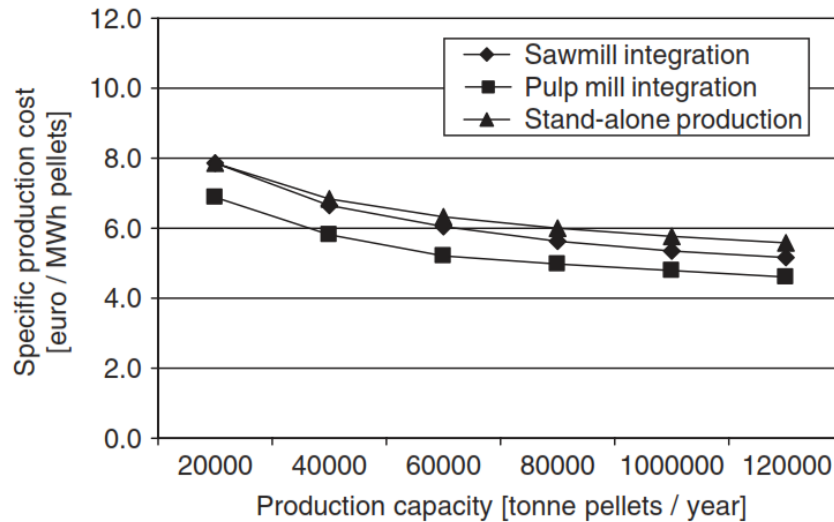
Figura 9: Costos de producción de pellet de madera por tonelada métrica en Estados Unidos

Los costos de producción de pellets de madera son significativamente influenciados por los costos de la materia prima y el secado, para el caso de materias primas húmedas. Ambos costos implican más de dos tercios del costo de la producción total de pellets (Polagye et al., 2007).

2.6 Producción de pellet de madera a través de la cogeneración

Los grandes productores de pellets en Chile basan su producción en materia prima seca proveniente de remanufactura como virutas, polvo de lija y aserrín seco (Salazar, 2016). Sin embargo, la disponibilidad de esta materia prima es limitada y por ello incorporan equipos de secado a sus procesos. En este sentido (Wolf et al., 2006) analizaron diferentes metodologías eficientes en la producción de pellets de madera, como la integración de la planta de pellet para aprovechar el calor residual proveniente de otro proceso, con el fin de utilizar este calor para secar aserrín húmedo. También hacen mención sobre el aprovechamiento de subproductos secos como virutas y polvo de lija, lo cual ya se hace en Chile. Otro aspecto importante que destacan es la existencia de un mercado comprador de pellet cercano a la fábrica. En Chile la producción de pellets se concentra en la ciudad de Los Ángeles, donde se emplazan las tres empresas productoras de mayor capacidad del país (Ecomas, Proenergy y Andes Bio Pellet), esta concentración en la producción hace que el costo del pellet sea mayor a medida que se aleja de la fábrica, afectando a los clientes del sur de Chile. Por último, el estudio coincidió que el riesgo de inversión se minimiza utilizando tecnologías probadas y de calidad. Estos han sido los principales problemas que han debido lidiar los pequeños productores de pellet que se han instalado Chile tras el auge de pellets sufrido los años 2013 y 2014, ya que muchos compraron maquinaria China de bajo costo y sin mayores garantías, lo cual se tradujo rápidamente en reinversiones de maquinaria de calidad, aumentando su inversión inicial (Martín, 2016).

Wolf et al. (2006) estudiaron los costos de producción (sin incluir el costo de la materia prima) de pellets de madera de una planta independiente, con respecto al costo de producción de pellets en un proceso de integración con un aserradero y una planta de celulosa. La figura 10 muestra los costos de producción para las diferentes configuraciones, donde la diferencia la genera la cantidad de energía recuperada de la integración.



Fuente: Wolf et al. (2006)

Figura 10: Costos de energía en la producción de pellets en un proceso de integración.

Sin embargo, la demanda de energía de la producción de pellets se puede minimizar a través de integración con otros procesos, tales como plantas de celulosa, aserraderos (Wolf et al., 2006) y la cogeneración de calor y electricidad (CHP) plantas (Wahlund et al., 2002). La integración con otros procesos también ofrece posibilidades de mejorar aún más la eficiencia, la reducción de los costos de producción y el aumento de la capacidad en comparación con las plantas de producción de pellets independientes.

Song et al. (2011) simuló tres procesos de producción de pellet asociados a un sistema de integración de una planta de cogeneración de biomasa existente, en el modelo utilizaron diferentes materias primas (astillas de madera y residuos sólidos de hidrólisis):

Opción 1: Producción de pellets de madera integrado con una planta de cogeneración, empleando vapor para el proceso de secado de astillas.

Opción 2: Producción de pellets integrado con una planta de cogeneración, empleando vapor y gases de combustión para el proceso de secado de astillas.

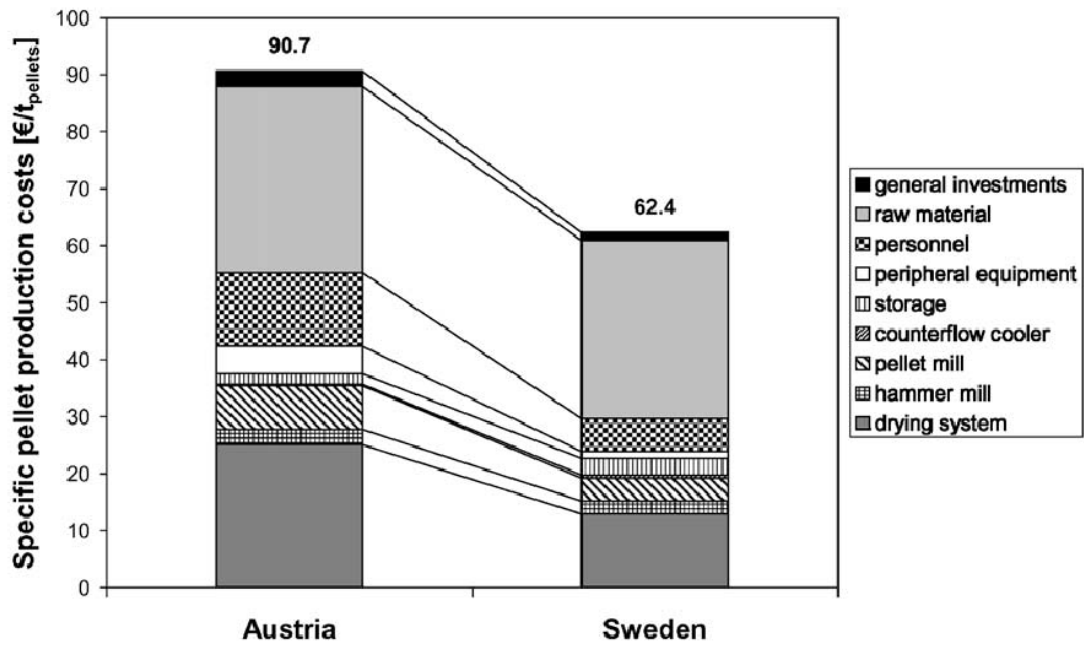
Opción 3: Producción de pellets integrado con una planta de cogeneración, empleando vapor y gases de combustión para el proceso de secado de residuos sólidos provenientes del proceso de hidrólisis en la producción de bioetanol.

La opción 2 fue la alternativa que mejor resultado entregó, alcanzando un costo de producción de pellets de 105 €/ton de pellet producido, retornando la inversión en un periodo menor a 2 años. Otros aspectos importantes a considerar son las barreras detrás del desarrollo del mercado de la bioenergía como, economías de escala, la competencia en el sector de la bioenergía con otros negocios, la política nacional y la integración (Mahapatra, et al., 2004).

2.7 Costos de producción de pellets de madera

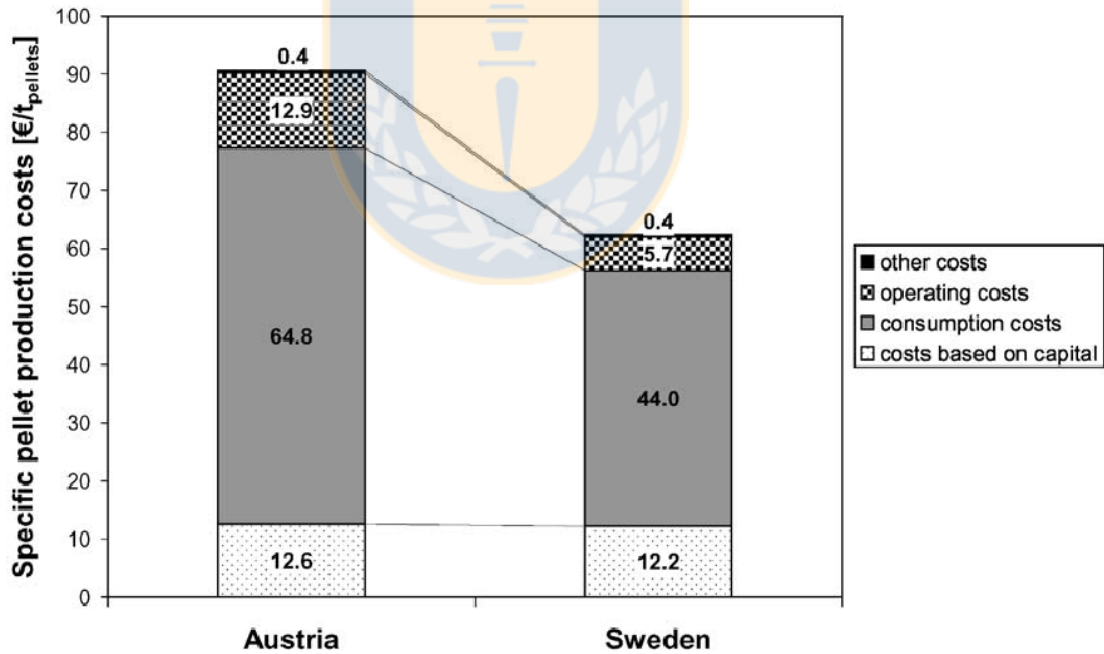
Como se ha presentado anteriormente, es fundamental conocer los costos de producción antes de entrar al negocio del pellets. En la mayoría de las fábricas los costos de producción de pellets de madera son principalmente influenciados por los costos de las materias primas y el costo de secado. Otros parámetros importantes que influyen en los costos de producción de pellets son el factor de utilización de la planta (número de turnos por semana), así como la disponibilidad de la planta. Es fundamental una operación continua, con 3 turnos al día y 7 días por semana. Manteniendo siempre una disponibilidad de la planta mayor 85-90%, deteniendo el proceso solo para realizar mantenciones anuales.

Thek & Obernberger (2004) compararon los costos de producción de pellet de madera entre Austria y Suecia, considerando diferentes escenarios de trabajo y todos los factores relacionados a la producción (inversión, adquisición de materia prima, secado, electricidad, mano de obra, impuestos, mantenimiento, tipo de tecnología, horas de operación, etc.) parámetros que dependerán del tamaño de la planta y de las condiciones de cada país.



Fuente: Thek & Obernberger (2004)

Figura 11: Comparación entre los costos de producción de la tonelada de pellet de madera en Austria y Suecia.

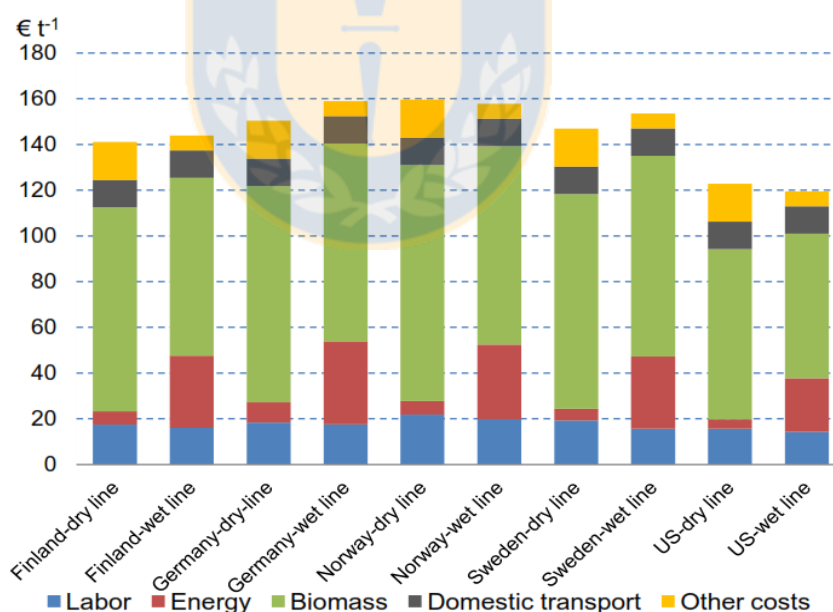


Fuente: Thek & Obernberger (2004)

Figura 12: Distribución de los costos de producción de la tonelada de pellet de madera en Austria y Suecia.

El estudio arrojó que los costos de producción de pellets de Suecia son considerablemente más bajos que los de Austria (62,4 y 90,7 €/ton, respectivamente) debido principalmente a que la capacidad de la planta de Suecia la cual era de 80.000 toneladas al año y la de Austria de 24.000 toneladas al año, lo cual refleja el efecto de economías de escala. Además la planta de Suecia utilizaba energía proveniente de cogeneración, lo cual reducía considerablemente sus costos de secado (44 y 68,8 €/ton, respectivamente). Otra diferencia entre las condiciones ambos países el precio de electricidad donde el precio de Austria casi duplica el costo de Suecia (27,1 y 50,87 €/MWh, respectivamente).

Otro estudio compara los costos de producción de pellet de madera de Finlandia, Alemania, Noruega, Suecia y los EE.UU, el cual se basó en dos plantas modelo (Trømborg et al., 2013) La primera (Dry-Line) representa tecnologías comunes para producción de pellets a pequeña escala (20.000 toneladas anuales), considerando como materia prima residuos secos procedentes de la producción de madera aserrada. Mientras que la segunda (planta-proceso) representa la producción a gran escala (120.000 toneladas anuales), utilizando materiales secos y húmedos como materia prima.



Fuente: Trømborg et al. (2013)

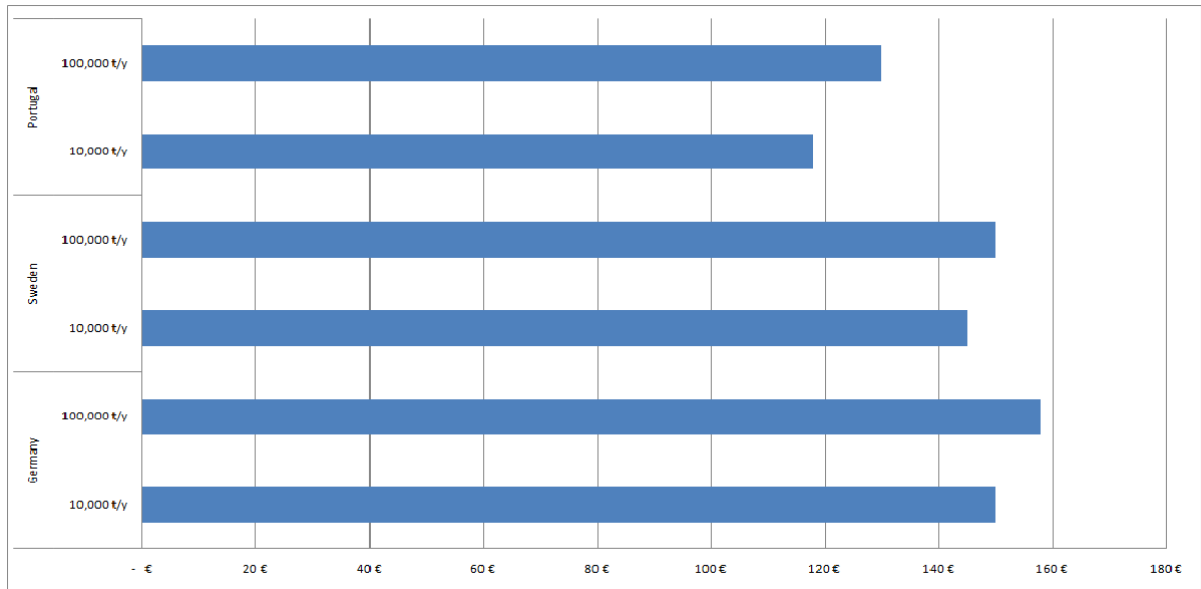
Figura 13: Costo de producción de pellets por país para dos modelos de plantas, utilizando materia prima seca y húmeda.

De la figura 13 se observa que no se produjeron economías de escala ya que la planta de 120.000 toneladas anuales debió generar menores costos de producción que la planta de 20.000 toneladas, lo anterior se explica ya que en la segunda utilizó materia prima seca, proveniente de remanufactura, ahorrando costos significativos en energía.

Los resultados muestran cómo las diferencias en los costos de materia prima, energía y mano de obra pueden afectar a la rentabilidad de la producción de pellets. El costo de materia prima seca y húmeda de los productores de pellets en los Estados Unidos (79 y 63 €/ton, respectivamente) alcanza costos menores que los productores de Finlandia, Alemania, Noruega y Suecia (95 y 83, 101 y 90, 110 y 90, 101 y 90 €/ton de residuos secos, respectivamente). También el costo de la energía eléctrica es menor en Estados Unidos (48.3 €/MWh) que en los países Europeos (66,1, 100,5, 57,3, y 59,6 €/MWh, respectivamente). Por último, el costo de la mano de obra también es menor en Estados Unidos (30,2 €/h) que en los países Europeos (33,9, 35,6, 42,2, y 33,7 €/h, respectivamente).

La sostenibilidad económica para los productores de pellets de la Unión Europea depende en gran medida de sus mercados internos, ya que el comercio internacional tiene precios de pellets inferiores que sus costos de producción. Este podría ser el caso de Chile ya que el costo de transporte hasta Europa o Estados Unidos podría afectar el precio final del pellet chileno. Sin embargo, el costo de la materia prima en Chile es 15.500 CLP la tonelada de aserrín húmedo (21 €/Tonelada) al igual que el costo de la mano de obra, lo cual podría equiparar los costos de transporte hasta mercados extranjeros.

Recientemente un estudio realizado por universidades y centro de investigación de Portugal, compararon los costos de producción de pellets de madera de Portugal con Alemania y Sueca, basándose en dos modelos de planta (Nunes et al., 2014). El análisis se basa en dos tamaños de fábricas (10.000 y 100.000 ton/año), la primera representa tecnologías comunes para la producción a pequeña escala, utilizando en fuentes de serrín seco, y la segunda utiliza aserrín húmedo.



Fuente: Nunes et al. (2014)

Figura 14: Costo de producción de pellets en Portugal, Alemania y Suecia para tamaños de planta de 100 mil y 10 mil toneladas anuales.

Los resultados muestran cómo las diferencias en los costos de Portugal, Alemania y Suecia de materias primas (84, 90 y 92 €/ton seca, respectivamente), energía (90, 100 y 60 €/MWh, respectivamente) y mano de obra (20, 36 y 34 €/ton, respectivamente) afecta la producción de pellets de madera.

Como se mostró anteriormente, la sostenibilidad económica para los productores de pellets de la Unión Europea depende en gran medida de sus mercados internos (Trømborg et al., 2013). Sin embargo, según los resultados presentados por (Nunes et al., 2014), mostraron que Portugal es una excepción, debido a que posee menores costos de mano de obra y materias primas, permitiéndole alcanzar mercados internacionales con mayor competitividad. Del estudio también se deduce que el futuro de la producción de pellet de madera en Europa, se basará en materia prima húmeda, como troncos y aserrín. Cabe señalar que, estas materias primas también son demandadas por la industria de la celulosa y el papel, lo cual podría generar cierto tipo de conflicto entre ambas industrias. Situación similar a la que podría ocurrir en Chile, pero en este

caso sería más relevante la demanda de la biomasa por parte de las centrales generadoras de energía.



Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, con el fin de poder validar las hipótesis planteadas. Para ello se estudiarán dos tamaños de fábricas de pellets localizadas en tres ciudades representativas, es decir, en aquellas ciudades donde exista la implementación de planes de descontaminación ambiental y por ende existe una mayor demanda de pellets, así como también disponibilidad de materia prima.

Otra variable relevante en la evaluación de los costos producción de pellets es la procedencia de la maquinaria que se utilizará en cada uno de los escenarios propuestos. Para el presente estudio se considera el uso de tecnología tradicional utilizada en España, país con vasta experiencia en la fabricación de pellets de madera. Así como también tecnología de origen China, debido a que varias empresas Chilenas adquirieron esta tecnología para producir pellets de madera.

3.1 Descripción del caso

El problema a investigar deriva de la reducida información disponible para establecer la rentabilidad para una planta de producción de pellets de madera en Chile, en específico se estudiará los costos de diferentes tamaños de fábricas de producción de pellets en distintas localidades de Chile. El tamaño de las fábricas de pellets a estudiar será representativa a las capacidades de producción instaladas actualmente en Chile. En tanto las localidades serán seleccionadas de acuerdo a la demanda de pellets y disponibilidad de materia prima.

El presente proyecto estudiará dos tamaños de fábrica de pellets, 1 y 3 ton/h de producción. Estas fábricas serán instaladas en las ciudades de Peralillo en la Región de O'Higgins, Arauco en la Región del Biobío y Valdivia en la Región de los Ríos. Estas ciudades fueron seleccionadas debido a que presentan un alto potencial para producir pellets de madera, es decir, cuentan con materia prima disponible y existe una alta demanda de pellets ya sea en la ciudad o en sus alrededores. A continuación se describe en detalle la selección de estas ciudades.

3.2 Selección del tamaño de las fábricas

Las fábricas de pellets propuestas en el presente estudio, tienen relación con el tamaño de las fábricas instaladas actualmente en Chile, las cuales según la tabla 2, las capacidades de producción varían desde las 86 a 33.000 toneladas anuales. Se conoce que la fábrica pequeña posee una jornada laboral de 8 horas diarias de lunes a viernes, alcanzando 2.340 horas de operación anual. Mientras que la fábrica grande posee un una jornada laboral de 2 turnos diarios de 9,5 horas por turno de lunes a sábado, alcanzando 5.928 horas de operación anual. Basado en los datos anteriormente planteados, tenemos que la capacidad de producción de la fábrica más pequeña es de 0,37 ton/h y la fábrica más grande es de 5,57 ton/h.

Por otro lado, basado en la información entregada por los fabricantes de tecnología utilizada para producir pellets de madera, se tiene que los tamaños de fábrica recomendados inician desde los 1 ton/h, tamaños menores se recomiendan solo para ensayos de laboratorio ya que no son rentables (Pallés, 2016). Tras la información propuesta anteriormente, el presente estudio evaluará 2 tamaños de fábricas: 1 y 3 ton/h.

Además de la capacidad de producción se debe determinar las horas de operación anual que poseerá cada una de las fábricas mencionadas. En este sentido y dada la experiencia de algunos fabricantes, se considerarán 2 turnos diarios de lunes a sábado para cada una de las fábricas propuestas, es decir de 8:30 a 18:00 horas y de 23:00 a 8:30 horas, alcanzando 5.928 horas de operación anual. El motivo por el cual los fabricantes poseen este horario de trabajo se debe ya que entre el 01 de abril y el 30 de septiembre el costo de la electricidad es mayor entre las 18:00 y 23:00 horas.

Tabla 4: Tamaño de fábricas seleccionadas en el estudio.

| Parámetros | Unidad | Fábrica 1 | Fábrica 2 |
|----------------------------|---------|-----------|-----------|
| Capacidad de producción | ton/h | 1 | 3 |
| Horas anuales de operación | h/año | 5928 | 5928 |
| Producción anual | ton/año | 5928 | 17784 |

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, también se considera el estado de la materia prima, es decir, si ésta se encontrará seca o húmeda, lo anterior es sumamente influyente en los costos de producción, ya que en caso de estar húmeda, se deben incorporar equipos de secado y sumar el costo del secado. Para el presente estudio se considerarán ambas opciones para cada una de las fábricas propuestas.

Finalmente, el factor de planta para las fábricas de origen Español fue considerado en 90% y 70% para las fábricas de origen Chino. El factor de planta combina la producción real que generan las máquinas y el porcentaje de tiempo en que la fábrica de pellets se encuentra en funcionamiento (Thek & Obernberger, 2004). El factor de producción para la maquinaria de origen Chino es menor, ya que todas las experiencias de las empresas Chilenas que adquirieron esta tecnología, obtuvieron una producción considerablemente menor a la indicada en la placa característica de los equipos. Además de las detenciones por mantenimiento son mucho más frecuente que la maquinaria de origen Europeo (Martín, 2016). A continuación la tabla 5 resume los tamaños de fábrica propuestos y los parámetros asociadas a cada una de ellas.

Tabla 5: Parámetros asociados a los diferentes tamaños de fábricas y escenarios propuestos.

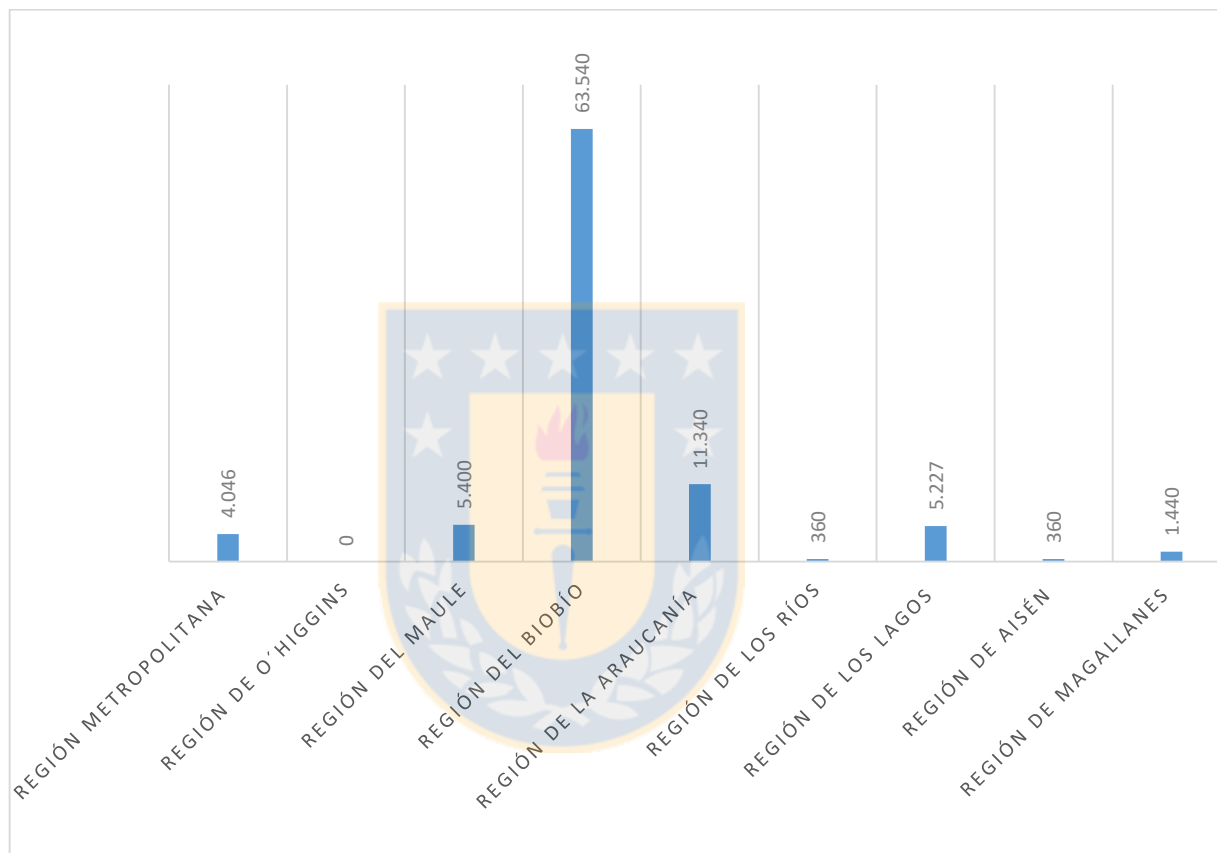
| Parámetros | Unidad | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|--------------------------|---------|-----------|--------|---------|---------|-----------|--------|---------|---------|
| | | Esc. 1 | Esc. 2 | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 5 | Esc. 6 | Esc. 7 | Esc. 8 |
| Escenario | | Esc. 1 | Esc. 2 | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 5 | Esc. 6 | Esc. 7 | Esc. 8 |
| Turnos día | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Tecnología | origen | España | China | España | China | España | China | España | China |
| Capacidad de producción | ton/h | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Materia prima | tipo | Viruta | Viruta | Aserrín | Aserrín | Viruta | Viruta | Aserrín | Aserrín |
| Humedad | % (w.b) | 10 | 10 | 50 | 50 | 10 | 10 | 50 | 50 |
| Factor de producción | % | 90 | 70 | 90 | 70 | 90 | 70 | 90 | 70 |
| Horas de operación anual | h/año | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 |
| Producción anual (real) | ton/año | 5335 | 4150 | 5335 | 4150 | 16006 | 12449 | 16006 | 12449 |

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Selección de las localidades del estudio

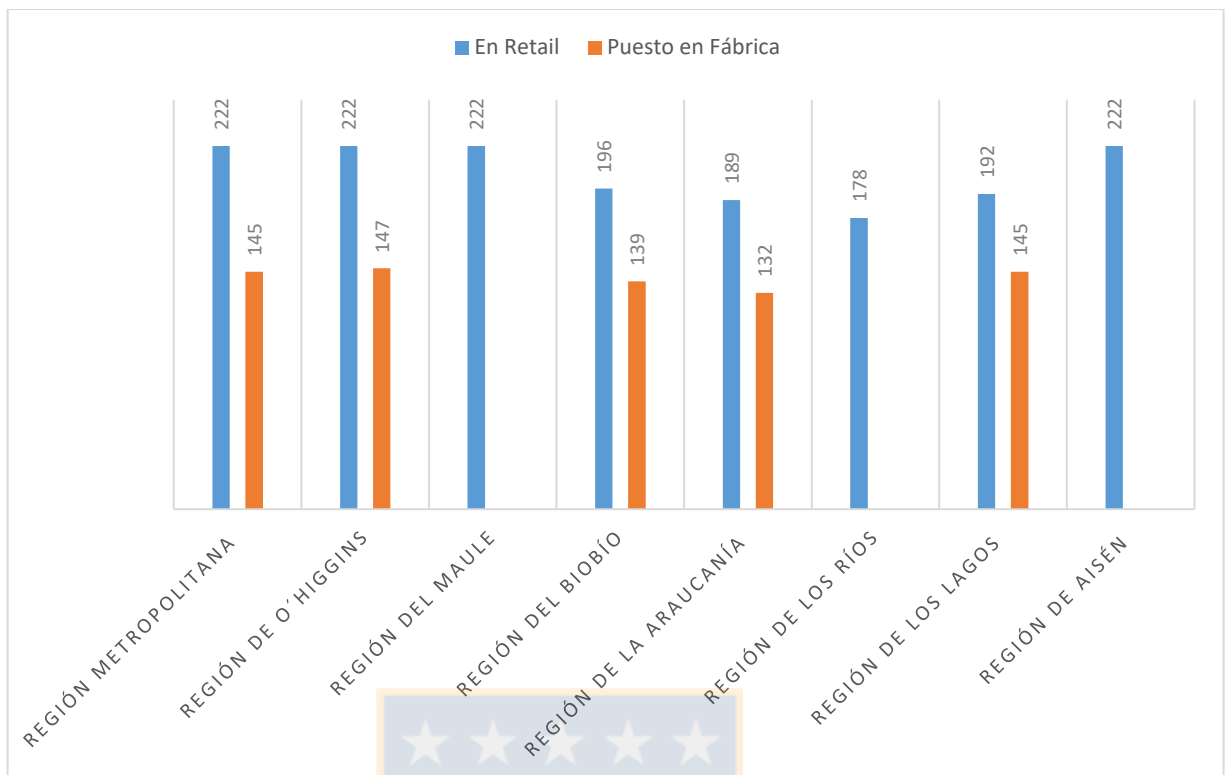
Este estudio contempla la selección de 3 localidades a nivel país que presenten las condiciones con mayor potencial para la producción de pellets de madera. Para ello se estudió la oferta de pellets existente en cada región, el precio del pellets tanto en el Retail como al por mayor, la disponibilidad de materia prima y su precio, y finalmente se estudió la proyección de demanda

de pellets basado en los planes de descontaminación atmosférico a implementarse en cada región, analizando específicamente el número de calefactores a recambiar en cada una de las regiones afectadas por contaminación ambiental. La figura 15 muestra la producción de pellets en el año 2015 en las diferentes regiones del país. La figura 16 presenta el costo del kilogramo de pellets durante el año 2017 en las diferentes regiones del país tanto en retail como a nivel industrial.



Fuente: Salazar (2016)

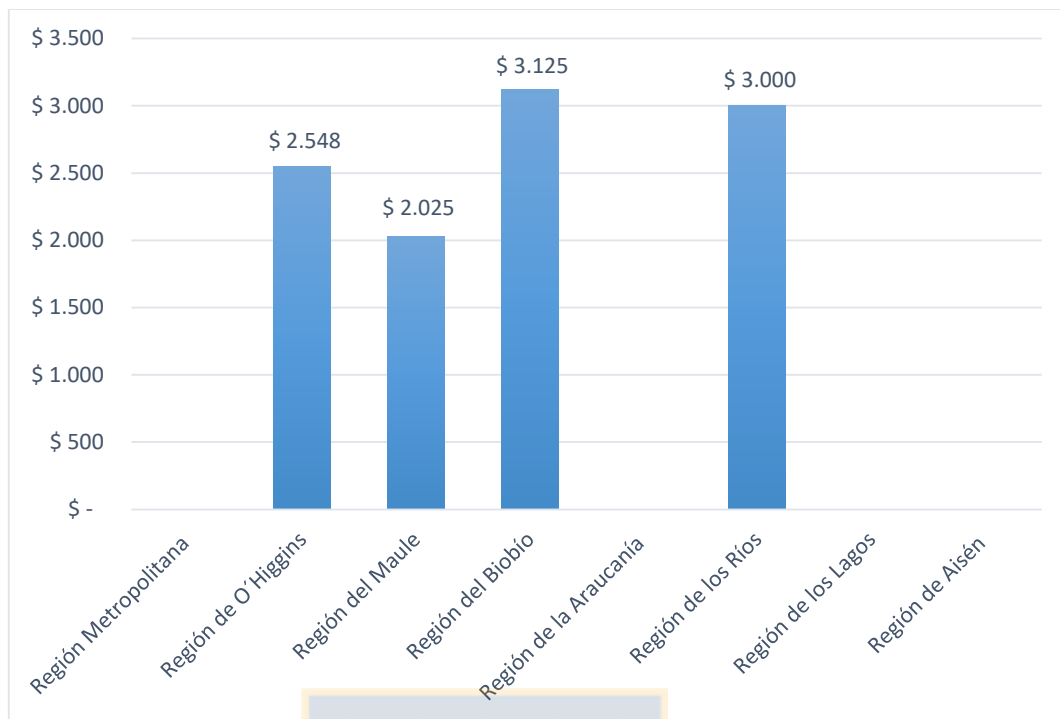
Figura 15: Producción de pellets en Chile año 2015 (ton/año).



Fuente: Sodimac (2017); Boletín 161 (2017)

Figura 16: Precio del pellets en Chile a nivel retail y mayorista (\$/kg).

De la figura 15 se observa que la mayor producción de pellets en el país se concentra en la Región del Biobío con 63.540 toneladas anuales, representando un 69,3% de la producción nacional. En contraste se observa que en la Región de O'Higgins no se produce pellets. Visto desde la perspectiva de los costos de venta del pellets, la figura 16 muestra que el mayor costo de pellets al por mayor lo presenta la Región de O'Higgins a 147 \$/kg



Fuente: Boletín 161 (2017)

Figura 17: Precio promedio de aserrín de pino radiata húmedo \$/m³

Por otro lado, si se evalúa el costo de la materia prima, se observa de la figura 17 que la Región del Maule y la Región de O'Higgins presentan los menores costos de materia prima. Tras los antecedentes presentados anteriormente, se selecciona a la Región de O'Higgins como una de las localidades en estudio, puntualmente se selecciona la ciudad de Peralillo de la Provincia de Colchagua, principalmente por encontrarse en una ubicación estratégica dentro de la región y contar con la mayor producción de madera aserrada de la región, con 84.000 m³ anuales (Boletín155, 2016).

A continuación se procede a evaluar la disponibilidad de materia prima en las diferentes regiones de Chile, para ello se revisa las plantaciones forestales y la producción de madera aserrada por región.

Tabla 6: Superficie de plantaciones forestales por región y especie acumuladas año 2014 ha.

| Región | <i>Atriplex spp</i> | <i>Eucalyptus globulus</i> | <i>Eucalyptus nitens</i> | <i>Pinus ponderosa</i> | <i>Pinus radiata</i> | <i>Pseudotsuga menziesii</i> | Otras especies | Total | (%) |
|------------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|----------------|------------------|---------------|
| Región de Coquimbo | 60.772 | 2.871 | - | - | - | - | 20.509 | 84.152 | 3,5% |
| Región de Valparaíso | - | 38.200 | - | - | 8.159 | - | 1.105 | 47.463 | 2,0% |
| Región Metropolitana | - | 5.957 | - | - | 17 | - | 521 | 6.495 | 0,3% |
| Región de O'Higgins | - | 49.745 | 14 | - | 75.656 | - | 1.891 | 127.306 | 5,2% |
| Región del Maule | - | 46.259 | 2.064 | - | 396.072 | 217 | 3.902 | 448.513 | 18,5% |
| Región del Biobío | - | 237.633 | 96.592 | 685 | 582.894 | 340 | 8.387 | 926.530 | 38,2% |
| Región de la Araucanía | - | 149.747 | 61.981 | 2.822 | 257.056 | 7.245 | 4.631 | 483.482 | 19,9% |
| Región de Los Ríos | - | 19.814 | 59.675 | 3 | 98.138 | 4.402 | 4.851 | 186.883 | 7,7% |
| Región de Los Lagos | - | 23.377 | 34.793 | 237 | 16.094 | 738 | 1.606 | 76.844 | 3,2% |
| Región de Aysén | - | - | 7 | 21.541 | - | 4.206 | 13.300 | 39.053 | 1,6% |
| Total | 60.772 | 573.602 | 255.126 | 25.287 | 1.434.085 | 17.148 | 60.703 | 2.426.722 | 100,0% |
| (%) | 2,5% | 23,6% | 10,5% | 1,0% | 59,1% | 0,7% | 2,5% | 100,0% | |

Fuente: Boletín155 (2016)

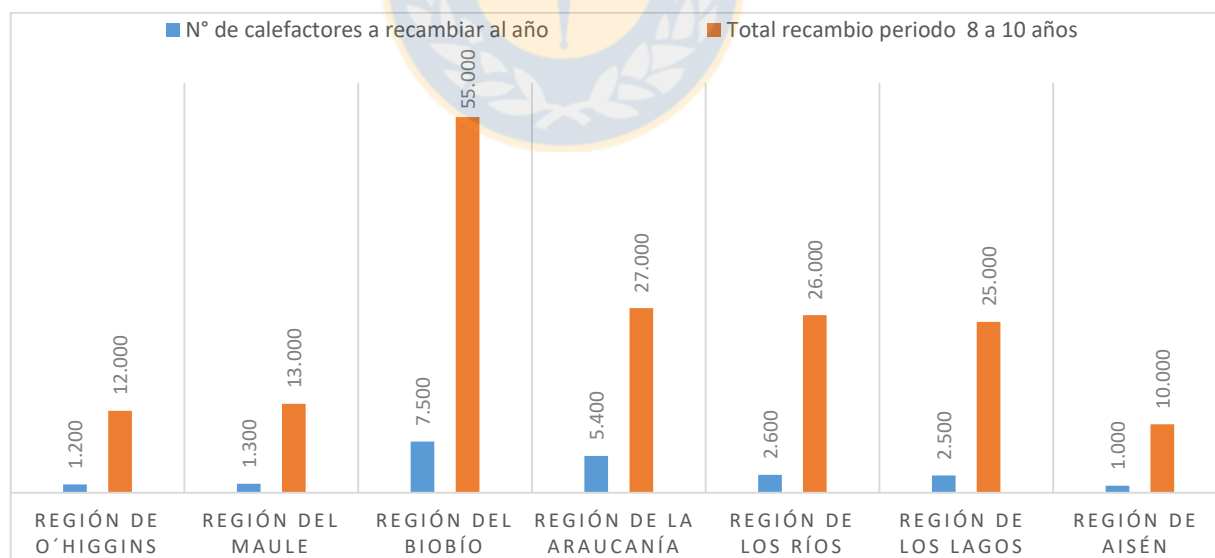
Tabla 7: Producción de madera Aserrada en 2015 por región, según tipo de aserradero y rango de producción m³.

| Tipo de aserradero | Total | V | RM | VI | VII | VIII | IX | XIV | X | XI | XII |
|------------------------------|------------------|---------------|------------|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| TOTAL | 8.372.219 | 32.664 | 845 | 220.809 | 1.984.742 | 4.277.645 | 985.373 | 667.832 | 158.365 | 9.741 | 34.203 |
| PERMANENTES | 8.067.252 | 27.633 | 124 | 212.613 | 1.938.835 | 4.214.938 | 904.453 | 635.990 | 99.364 | 3.307 | 29.995 |
| >300.000 | 2.246.795 | - | - | - | 365.627 | 1.389.063 | - | 492.105 | - | - | - |
| 200.001-300.000 | 1.177.791 | - | - | - | - | 1.177.791 | - | - | - | - | - |
| 100.001-200.000 | 1.198.536 | - | - | - | 340.372 | 556.974 | 301.190 | - | - | - | - |
| 50.001-100.000 | 577.673 | - | - | 60.000 | 145.844 | 211.174 | 160.655 | - | - | - | - |
| 20.001-50.000 | 981.012 | - | - | 32.268 | 356.145 | 373.250 | 133.372 | 47.577 | 38.400 | - | - |
| 10.001-20.000 | 853.802 | - | - | 43.159 | 398.159 | 207.510 | 166.425 | 24.925 | - | - | 13.623 |
| 5.001-10.000 | 541.938 | - | - | 16.082 | 235.289 | 182.720 | 57.711 | 20.692 | 21.463 | - | 7.980 |
| < 5.000 | 489.704 | 27.633 | 124 | 61.104 | 97.399 | 116.455 | 85.100 | 50.690 | 39.501 | 3.307 | 8.392 |
| MÓVILES TRADICIONALES | 87.768 | 4.845 | 520 | 6.918 | 22.764 | 29.789 | 16.081 | 520 | 4.815 | 312 | 1.002 |
| 5.001-10.000 | 17.113 | - | - | - | 8.866 | - | 8.247 | - | - | - | - |
| 3.001-5.000 | 3.299 | 3.299 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1.001-3.000 | 38.208 | - | - | 5.526 | 9.897 | 17.589 | 3.711 | - | 1.485 | - | - |
| < 1.000 | 29.148 | 1.546 | 520 | 1.392 | 4.002 | 12.200 | 4.122 | 520 | 3.330 | 312 | 1.002 |
| MÓVILES PORTÁTILES | 217.200 | 186 | - | 1.278 | 23.142 | 32.918 | 64.839 | 31.323 | 54.186 | 6.122 | 3.205 |
| 5.001-10.000 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3.001-5.000 | 21.138 | - | - | - | 12.371 | - | - | - | 8.767 | - | - |
| 1.001-3.000 | 65.266 | - | - | 1.031 | 5.649 | 8.749 | 28.388 | 12.195 | 9.253 | - | - |
| < 1.000 | 130.796 | 186 | - | 247 | 5.122 | 24.169 | 36.451 | 19.128 | 36.166 | 6.122 | 3.205 |

Fuente: Boletín155 (2016)

De la tabla 6 se observa que la Región del Biobío posee el 38,5% de plantaciones forestales del país, en tanto, la tabla 7 muestra que posee la mayor producción de madera aserrada del país con 4.227.645 m³, confirmando el alto nivel de producción de pellets que presenta la región. Estas características, sumado al Plan de Descontaminación Atmosférico del Gran Concepción que entra en vigencia el año 2018 (Resolución Exenta 242, 2017) generan que la Región del Biobío sea una de las localidades seleccionadas en el presente estudio. Puntualmente se selecciona la Ciudad de Arauco, ya que en conjunto con la Ciudad de Curanilahue presentan una producción anual por sobre los 510.000 m³ de madera aserrada (Boletín 155, 2016). La ubicación de esta fábrica de pellets permitirá abastecer la demanda de pellets generada por las ciudades del Gran Concepción ya que actualmente el 89% de la producción de pellets de la región se concentra en la ciudad de Los Ángeles.

Por otro lado, se observa que la Región de Los Ríos representa el 7,7% de hectáreas plantadas a nivel país, sin embargo, posee 667.832 m³ de madera aserrada anualmente, valores considerables que permiten perfectamente la instalación de una fábrica de pellets. Además los planes de descontaminación ambiental requieren reemplazar como mínimo 26.000 calefactores y la ciudad de Valdivia y ésta solo cuenta con una pequeña producción de pellets de 360 ton/año.



Fuente: AMBIENTE (2014)

Figura 18: Planes de recambio de calefactores según PDA para las zonas urbanas de las diferentes regiones de Chile.

Tras los antecedentes presentados anteriormente, se selecciona a la Región de Los Ríos como la tercera localidad en estudio. Puntualmente se elige la ciudad de Valdivia ya que concentra la mayor cantidad de empresas forestales de la región (Boletín155, 2016).

3.4 Selección de la tecnología para la planta de elaboración de pellets

La tecnología seleccionada en el presente estudio corresponde a tecnología tradicional utilizada en España, país con experiencia en la fabricación de pellets de madera. Para lo cual se realizaron cotizaciones formales a diferentes proveedores:

- Ayerbe Plantas Industriales De Secado, S.L.
- Mabrik, S.A.

También se consideraron algunos proveedores Chinos como:

- Henan Kingman M&E Complete Plant Co., Ltd.
- Anyang Best Complete Machinery Engineering Co., Ltd
- Zhangqiu Yulong Machine Co., Ltd.

Cabe señalar que se considera en el análisis las máquinas de origen Chino debido la existencia de un gran número de empresas chilenas que utilizan equipos con tecnología China para la producción de pellets de madera. La diferencia de la tecnología China respecto a la tecnología Española, es que la primera presenta menor nivel de automatización de la maquinaria y menor durabilidad de los equipos. Sin embargo, los costos de adquisición son considerablemente menores que los provenientes de proveedores Españoles (Martín, 2016).

3.5 Costos de inversión

Los costos de inversión involucran todos los costos necesarios para dejar funcionando la fábrica de pellets, es decir costos de adquisición de maquinaria, implementación galpón y oficinas administrativas, importación de maquinaria, montaje y puesta en marcha de maquinaria.

La tabla 8 resume los costos mencionados anteriormente para los 2 tamaños de fábricas seleccionados y 2 proveedores de tecnología. Estos costos se obtuvieron tras realizar cotización a fabricantes españoles y fabricantes chinos.

Tabla 8: Costos de la maquinaria para los tipos de fábrica seleccionados y países proveedores.

| Parámetros | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Esc. 1 | Esc. 2 | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 5 | Esc. 6 | Esc. 7 | Esc. 8 |
| Escenarios | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Capacidad (ton/h) | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Origen | España | China | España | China | España | China | España | China |
| Secado | 0 € | 0 € | 355.230 € | 79.032 € | 0 € | 0 € | 609.370 € | 102.606 € |
| Molienda | 143.280 € | 22.358 € | 143.280 € | 22.358 € | 160.840 € | 35.742 € | 160.840 € | 35.742 € |
| Pelletización | 160.370 € | 53.781 € | 160.370 € | 53.781 € | 266.140 € | 92.247 € | 266.140 € | 92.247 € |
| Enfriamiento | 61.520 € | 16.835 € | 61.520 € | 16.835 € | 69.640 € | 16.835 € | 69.640 € | 16.835 € |
| Almacenamiento | 47.740 € | 9.947 € | 47.740 € | 9.947 € | 73.550 € | 9.947 € | 73.550 € | 9.947 € |
| Equipamiento Perif. | 92.480 € | 27.077 € | 127.150 € | 27.077 € | 207.270 € | 53.429 € | 247.430 € | 53.429 € |
| Total Maq. Exworks | 505.390 € | 129.998 € | 895.290 € | 209.029 € | 777.440 € | 208.201 € | 1.426.970 € | 310.807 € |
| Inversión Galpones | 202.156 € | 51.999 € | 358.116 € | 83.612 € | 310.976 € | 83.280 € | 570.788 € | 124.323 € |
| Importación Maq. | 126.348 € | 32.499 € | 223.823 € | 52.257 € | 194.360 € | 52.050 € | 356.743 € | 77.702 € |
| Montaje Maq. | 75.809 € | 19.500 € | 134.294 € | 31.354 € | 116.616 € | 31.230 € | 214.046 € | 46.621 € |
| Total Euros | 909.702 € | 233.996 € | 1.611.522 € | 376.253 € | 1.399.392 € | 374.762 € | 2.568.546 € | 559.452 € |
| Total CLP | \$ 677.873.542 | \$ 174.364.280 | \$ 1.200.841.734 | \$ 280.368.732 | \$ 1.042.770.943 | \$ 279.257.306 | \$ 1.913.977.737 | \$ 416.881.281 |

Fuente: Elaboración Propia

Según la experiencia de los proveedores de la tecnología (Ayerbe, 2017), el costo de inversión de galpones y oficinas corresponde a un 40% del valor de la maquinaria, el costo de la importación se consideró en un 25% y el montaje y puesta en marcha un 15%.

Conocido el costo total de inversión, es posible determinar los costos basados en capital para cada uno de los escenarios propuestos. El costo mensual basado en capital se determina mediante el Factor de Recuperación de Capital propuesto en la ecuación 1:

$$CFR = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad Eq. 1$$

Dónde:

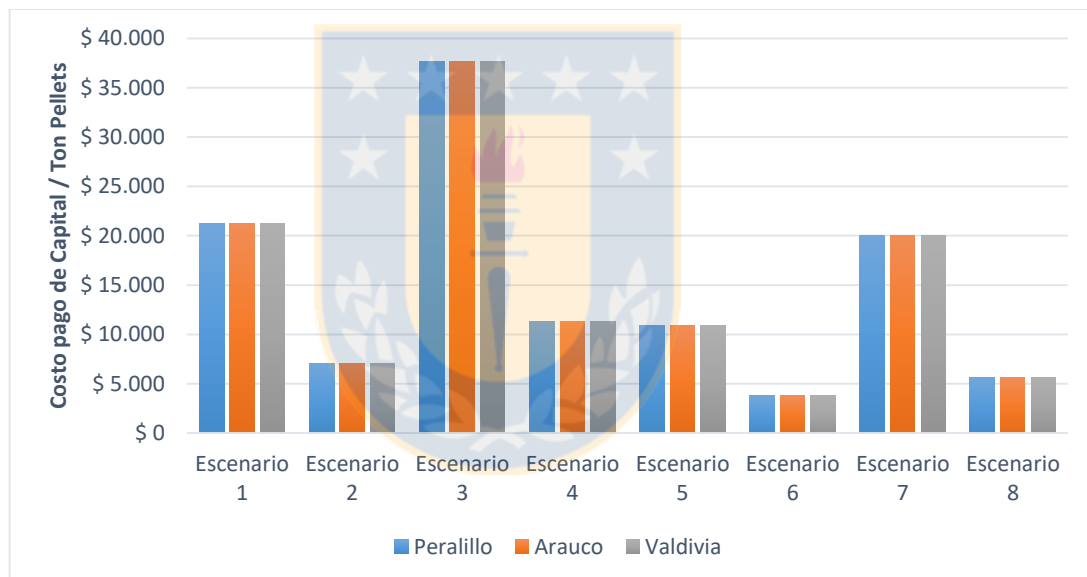
CFR: Factor de Recuperación de Capital

i = Tasa de interés anual

n= Periodo en años

Para efectos de este estudio se utilizó una tasa de interés de 7% anual y se solicitó un crédito a 8 años. Con estos antecedentes se tiene un factor de recuperación de capital de 0,1675 anual.

La tabla 38 anexa, presenta los resultados del cálculo del costo del pago del capital invertido por tonelada de pellet producido en cada escenario. A continuación la figura 19 muestra las diferencias para los escenarios en estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 19: Costos mensuales de capital por tonelada de pellets producido en cada escenario y localidad en estudio evaluado en un periodo de 8 años

Se observa que los escenarios de las fábricas de origen europeo (1, 3, 5 y 7) poseen un alto costo de pago de capital por tonelada de pellets. Puntualmente los escenarios 1 y 3 presentan los costos más elevados, lo cual afectará de forma considerable a los costos medios de producción de pellets en estos escenarios.

En general los costos de pago de capital de las fábricas de origen Chino (escenarios 2, 4 6 y 8) son bajos, a excepción del escenario 4 que alcanza un valor de \$11.317 por tonelada de pellets producido.

3.6 Comparación con casos internacionales

Para comparar los costos de producción de los estudios presentados en la revisión bibliográfica presentada en el capítulo 2, con los costos de producción obtenidos en el presente estudio, se debe actualizar el valor del dinero en el tiempo a través del uso de la ecuación 2:

$$VF = VP(1 + i)^n \quad \text{Eq. 2}$$

Donde:

VF: Valor futuro

VP: Valor presente

i: Tasa de interés equivalente a la variación del IPC entre los dos periodos

n: Número de periodos entre el valor presente y valor futuro

Para ello se utilizan como fuente de datos las estadísticas de inflación e IPC (índice de precios al consumidor) que provee la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2017).

Capítulo 4. Costos de Producción

La evaluación de los costos de producción de pellets contempla el estudio de una serie de variables que influyen en la estructura de costos según el tamaño de la planta y su localización, por lo que se vuelve fundamental estudiar en detalle cada una de estas variables. Las cuales poseen la siguiente estructura: condiciones generales que involucran la construcción de galpón, oficinas, procesamiento de datos y costo de electricidad, y condiciones internas de planta como: secado, molienda, pelletización, enfriamiento, almacenamiento, equipamiento periférico, personal y materia prima.

4.1 Condiciones generales

Las condiciones generales son los factores que influyen en los costos de producción de forma indirecta, tales como el precio de la electricidad, la tasa de interés del crédito, disponibilidad de los equipos, factor de simultaneidad, vida útil de la fábrica, costos de mantenimiento, vida útil de oficinas y procesamiento de datos, costos de servicios y periodo de introducción al mercado. Estas condiciones variarán de acuerdo a las condiciones locales de las diferentes localidades del estudio. Thek & Obernberger (2004) estudiaron la información base que se debe conocer para determinar los costos de producción de las condiciones generales.

Tabla 9: Condiciones generales de las instalaciones a considerar en cada escenario.

| Condiciones generales | Unidad |
|--|---------------|
| Precio de electricidad | \$/MWh |
| Tasa de interés | % p.a. |
| Disponibilidad de los equipos | % |
| Factor de simultaneidad (instalaciones eléctricas) | % |
| Vida útil de las instalaciones | a |
| Costos de mantenimiento de instalaciones | % |
| Vida útil de oficinas y procesamiento de datos | a |
| Costo de servicios, mantenimiento de oficinas y procesamiento de datos | % |
| Periodo de introducción al mercado | a |
| Otros costos | % p.a. |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

4.1.1 Precio de la electricidad

Uno de los factores más determinantes en los costos de producción de pellets es el costo de electricidad, debido a que existe maquinaria de alto consumo de electricidad. Por este motivo se estudiaron las tarifas eléctricas correspondientes a las diferentes localidades en estudio. En Chile el valor de las tarifas eléctricas se define de acuerdo a lo estipulado en los Decretos Tarifarios emitidos por el Ministerio de Energía (SEC, 2017). Los precios son diferenciados por tarifa y por variables que afectan al suministro. Las tarifas reguladas son:

- BT-1: Tarifa Simple en Baja Tensión.
- BT-2/AT-2: Tarifa de Potencia Contratada
- BT-3/AT-3: Tarifa de Demanda Máxima Leída
- BT-4/AT-4: Tarifa Horaria
 - Tarifa BT-4.1 y AT-4.1: Tarifa Horaria Opción 1
 - Tarifa BT-4.2 y AT-4.2: Tarifa Horaria Opción 2
 - Tarifa BT-4.3 y AT-4.3: Tarifa Horaria Opción 3

A nivel industrial es habitual utilizar las tarifas BT-4/AT-4 estas tarifas dependen de los niveles de consumo y horario de funcionamiento de la industria. Como se indicó en el punto 3.1.1 para este estudio el horario de trabajo no contempla el horario punta, por lo que la tarifa más conveniente para esta metodología de trabajo es la tarifa AT-4.3. No se considera la tarifa BT 4.3 debido a que ésta es de Baja Tensión y los equipos utilizados en una fábrica de pellets consumen 360 Volt. A continuación se presenta la tabla 10 con las tarifas eléctricas para las ciudades seleccionadas en el presente estudio.

Tabla 10: Tarifas eléctricas Alta Tensión 4.3 para las ciudades en estudio.

| Ciudad | Empresa | Tarifa | Cargo Fijo (\$/cliente) | Cargo uso sistema troncal (\$/kWh) | Cargo Energía (\$/kWh) | Cargo Potencia Leída Suministrada (\$/kW/mes) | Cargo Potencia Leída hora punta (\$/kW/mes) |
|-----------|---------|--------|-------------------------|------------------------------------|------------------------|---|---|
| Peralillo | CGE | AT 4.3 | \$ 2.080,22 | \$ 1,48 | \$ 78,73 | \$ 1.866,80 | \$ 6.464,90 |
| Arauco | FRONTEL | AT 4.3 | \$ 1.255,68 | \$ 1,48 | \$ 69,49 | \$ 3.007,59 | \$ 10.226,54 |
| Valdivia | SAESA | AT 4.3 | \$ 2.457,41 | \$ 1,48 | \$ 76,00 | \$ 1.714,45 | \$ 7.494,39 |

Fuente: SEC (2017)

De la tabla 10 se observa que la ciudad de Arauco presenta el menor costo de energía de 69,49 \$/kWh, haciéndola más competitiva comparativamente con Valdivia y Peralillo. Sin embargo, Peralillo presenta el menor costo de potencia leída suministrada de 1.866,8 \$/kW/mes.

A continuación la tabla 11 presenta el consumo de electricidad de las fábricas seleccionados en el presente estudio. Los consumos eléctricos fueron obtenidos de las cotizaciones realizadas a las empresas proveedoras de la tecnología.

Tabla 11: Potencia eléctrica instalada en fábrica 1 y fábrica 2 según proveedor.

| Parámetros | Unidad | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|---------------------------------|-----------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| | | Esc. 1 | Esc. 2 | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 5 | Esc. 6 | Esc. 7 | Esc. 8 |
| Capacidad instalada | ton/h | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Proveedor | país | España | China | España | China | España | China | España | China |
| Secado | kW | 0,0 | 0,0 | 58,1 | 33,0 | 0,0 | 0,0 | 121,9 | 36,0 |
| Molienda | kW | 79,0 | 61,2 | 79,0 | 61,2 | 163,0 | 92,6 | 163,0 | 92,6 |
| Pelletización | kW | 119,7 | 108,8 | 119,7 | 108,8 | 271,5 | 209,0 | 271,5 | 209,0 |
| Enfriamiento | kW | 11,2 | 13,0 | 11,2 | 13,0 | 21,3 | 13,0 | 21,3 | 13,0 |
| Almacenamiento | kW | 9,2 | 4,0 | 9,2 | 4,0 | 11,5 | 4,0 | 11,5 | 4,0 |
| Equipamiento periférico | kW | 0,0 | 5,5 | 6,0 | 5,5 | 0,0 | 9,2 | 7,4 | 9,2 |
| Potencia total instalada | kW | 219,1 | 192,45 | 283,2 | 225,5 | 467,3 | 327,8 | 597 | 363,8 |

Fuente: Elaboración propia

Se observa que en general los equipos de origen Español poseen un mayor consumo de electricidad que los equipos de origen Chino, para una misma capacidad de producción.

A continuación se procede a calcular el costo de electricidad para ambos tamaños de fábrica de acuerdo a su proveedor. Es importante mencionar que en este punto se debe considera el factor

de simultaneidad de los equipos eléctricos. Este factor es el cociente entre la potencia eléctrica máxima instalada y la potencia utilizada. Para este estudio se utilizó un factor de simultaneidad de 85% para todos los escenarios en estudio.

Tabla 12: Variables eléctricas consideradas y condiciones de operación para las ciudades en evaluación.

| Ubicación de Fábricas | Horas de Operación (h/mes) | Factor de simultaneidad (%) |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Peralillo | 494 | 85% |
| Arauco | 494 | 85% |
| Valdivia | 494 | 85% |

Fuente: Elaboración propia

El cálculo del costo eléctrico para cada fábrica en las diferentes ciudades viene representados por la siguiente ecuación:

$$C_{\text{eléctrico}} = C_f + [C_{st} \times P_i \times H_o \times F_s] + [C_{pls} \times P_i] + [C_e \times P_i \times H_o \times F_s] \quad \text{Eq. 3}$$

Dónde:

$C_{\text{eléctrico}}$: Costo eléctrico (\$/mes)

C_f : Costo fijo (\$/mes)

C_{st} : Costos uso sistema troncal (\$/kWh)

H_o : Horas de operación de la fábrica (h/mes)

F_s : Factor de simultaneidad de equipos eléctricos (%)

CLP : Costo potencia leída suministrada (\$/kW/mes)

P_i : Potencia instalada (kW)

C_e : Costo de energía (\$/kWh)

Tabla 13: Cálculo de los costos eléctricos mensuales para una producción de 1 ton/h según proveedor, consumo y tarifas eléctricas en las ciudades en evaluación.

| Parámetros de Operación | Fábrica 1 | | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Esc. 1 | | Esc. 2 | | Esc. 3 | | Esc. 4 | |
| Escenarios | Esc. 1 | | Esc. 2 | | Esc. 3 | | Esc. 4 | |
| Materia prima | Viruta | | Viruta | | Aserrín | | Aserrín | |
| Origen tecnología | España | | China | | España | | China | |
| Producción real (ton/h) | 0,9 | | 0,7 | | 0,9 | | 0,7 | |
| Horas de operación mes (h/mes) | 494 | | 494 | | 494 | | 494 | |
| Producción real mensual (ton/mes) | 445 | | 346 | | 445 | | 346 | |
| Ubicación de fábricas/Potencia eléctrica y consumo mensual | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) |
| Peralillo | 219,1 | \$ 7.790.147 | \$ 192,5 | \$ 6.842.854 | 283,2 | \$ 10.066.851 | 225,5 | \$ 8.015.863 |
| Arauco | 219,1 | \$ 7.189.372 | \$ 192,5 | \$ 6.315.053 | 283,2 | \$ 9.290.690 | 225,5 | \$ 7.397.699 |
| Valdivia | 219,1 | \$ 7.506.260 | \$ 192,5 | \$ 6.593.543 | 283,2 | \$ 9.699.864 | 225,5 | \$ 7.723.737 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Cálculo de los costos eléctricos mensuales para una producción de 3 ton/h según proveedor, consumo y tarifas eléctricas en las ciudades en evaluación.

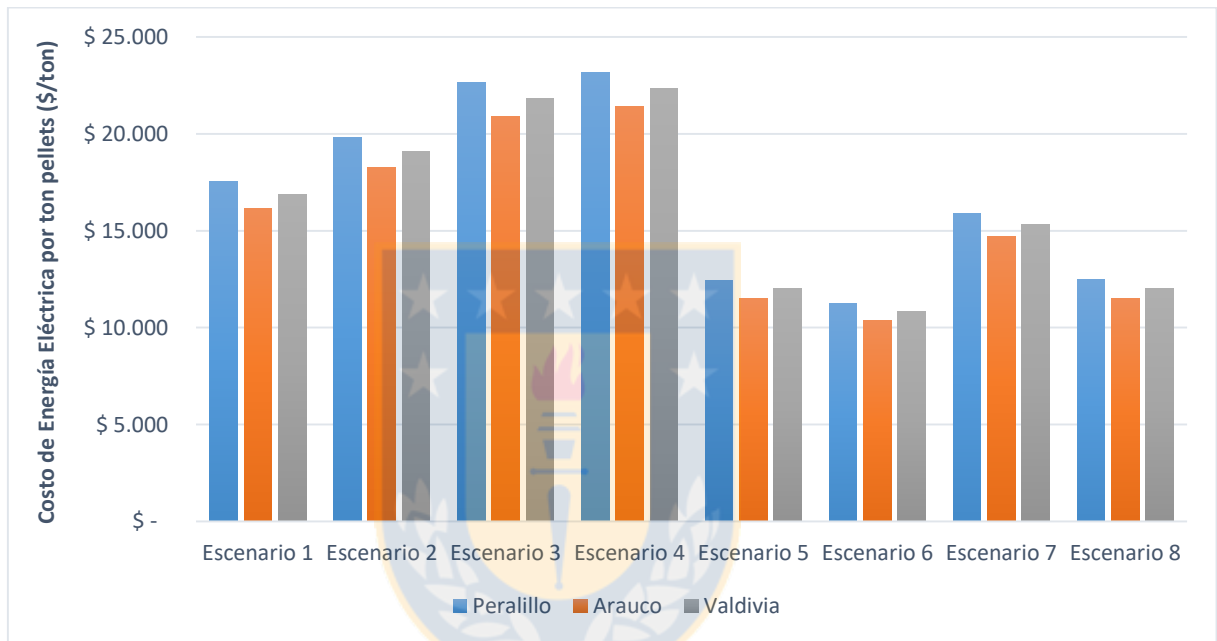
| Parámetros de Operación | Fábrica 2 | | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Esc. 5 | | Esc. 6 | | Esc. 7 | | Esc. 8 | |
| Escenarios | Esc. 5 | | Esc. 6 | | Esc. 7 | | Esc. 8 | |
| Materia prima | Viruta | | Viruta | | Aserrín | | Aserrín | |
| Origen tecnología | España | | China | | España | | China | |
| Producción real (ton/h) | 2,7 | | 2,1 | | 2,7 | | 2,1 | |
| Horas de operación mes (h/mes) | 494 | | 494 | | 494 | | 494 | |
| Producción real mensual (ton/mes) | 1334 | | 1037 | | 1334 | | 1037 | |
| Ubicación de fábricas/Potencia eléctrica y consumo mensual | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) | Potencia instalada (kW) | Costo eléctrico (\$/mes) |
| Peralillo | 467,3 | \$ 16.610.818 | 327,8 | \$ 11.653.967 | 597 | \$ 21.206.879 | 363,8 | \$ 12.933.613 |
| Arauco | 467,3 | \$ 15.330.545 | 327,8 | \$ 10.755.544 | 597 | \$ 19.572.551 | 363,8 | \$ 11.936.613 |
| Valdivia | 467,3 | \$ 16.004.976 | 327,8 | \$ 11.229.050 | 597 | \$ 20.433.281 | 363,8 | \$ 12.461.989 |

Fuente: Elaboración propia

De las tablas 13 y 14 presentadas anteriormente se obtienen los siguientes comentarios:

- Existe una diferencia considerable de los costos eléctricos mensuales entre los equipos de fábricas de origen Chino respecto a los equipos de origen Español.
- En general se observa que la ciudad de Arauco es la localidad que presenta los menores costos de energía mensual para ambos tamaños de fábrica y proveedor.

A continuación la figura 20 presenta el costo eléctrico en función de la producción de pellets. Este cálculo permite evaluar con mayor detalle la selección de la localidad que presente los menores costos de energía. La tabla 39 anexa, presenta el detalle del cálculo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Costo de energía eléctrica CLP por tonelada de pellets producido para los escenarios propuestos en el estudio (\$/ton).

Se observa claramente que los escenarios 1, 2, 3 y 4 poseen mayores costos de energía eléctrica comparativamente con los escenarios 5, 6, 7 y 8. Esto se debe a que la capacidad de producción de la planta que es 3 veces menor que los escenarios 5, 6, 7 y 8, es decir, que la capacidad de fábrica 1 es menor que la fábrica 2.

Comparados los escenarios 1 y 2 con los escenarios 5 y 6 que producen pellets a partir de viruta seca, se observa que existe una considerable reducción de los costos de producción de los segundos, es decir, de la fábrica 2.

Misma situación que los puntos anteriores ocurre, si se compara los escenarios 3 y 4 con los escenarios 7 y 8 que producen pelles a partir de aserrín húmedo.

Otra comparación es la tecnología, en este sentido, se observa que en la fábrica 1, la tecnología Española es más eficiente que la China, ya los costos de energía de los escenarios 1 y 3 son más bajos que los escenarios 2 y 4 respectivamente. En contraste, para la fábrica 2, los costos de los proveedores Chinos tienen ventaja sobre los proveedores Europeos.

Finalmente, se observa que la ciudad Arauco que presenta los menores costos de electricidad por tonelada de pellets producido para todos los escenarios en evaluación.

4.1.2 Tasa de interés del crédito

Para estos efectos se consideró un préstamo por el 100% de la inversión y una tasa anual del orden del 7% cotizada en el Banco de Chile. El crédito debe cubrir tanto la inversión en maquinaria como implementación de obras civiles, infraestructura y oficinas.

4.1.3 Disponibilidad de los equipos

La disponibilidad de los equipos o factor de utilización de la fábrica depende en gran medida del origen de la tecnología y en menor medida del mantenimiento y condiciones de operación. En general para equipos de origen Español se considera una disponibilidad del 90% (Thek & Obernberger, 2004). En tanto, para la tecnología de origen Chino, se dispone de la experiencia de empresas chilenas que adquirieron esta tecnología y las mejoras que tuvieron que realizar para poder lograr operar en forma continua. Básicamente los problemas que presenta la tecnología de origen Chino son los siguientes:

- Problemas de diseño en equipos principales como, Prensa Pelletizadora y Secador de materia prima húmeda
- Menor capacidad producción respecto a la indicada en placa característica de equipos
- Materiales de baja calidad y durabilidad
- Reducida automatización
- Limitado servicio post venta

Este tipo de problemas afecta directamente a la disponibilidad de la maquinaria, así como los tiempos para la puesta en marcha de los equipos tardó más de 1 año. Finalmente, tras mejorar lo equipos en Maestranzas Nacionales, se estima que la disponibilidad de estos equipos no supera el 70%, implicando además costos adicionales que oscilan entre un 10 y 30% del costos de inversión (Martín, 2016).

4.1.4 Factor de simultaneidad instalaciones eléctricas

Es cociente entre la potencia eléctrica máxima que puede entregar una instalación eléctrica, y la suma de las potencias nominales de todos los receptores que pueden conectarse a ella. Este estudio consideró un 85%, mismo factor que el utilizado por (Thek & Obernberger, 2004). De la misma forma se consideró un factor de consumo de un 85% que tiene relación con los consumos conectados simultáneamente sobre el total.

4.1.5 Vida útil de las instalaciones

Se refiere al periodo de utilización que tendrán los galpones construidos de material sólido albañilería de ladrillo, de concreto armado y estructura metálica. En Chile según tabla de vida útil fijada por el Servicio de Impuestos Internos para bienes físicos del activo inmovilizado (Resolución43, 2002) con vigencia a partir del 01-01-2003 la vida útil para depreciación normal es de 40 años.

4.1.6 Costo de mantenimiento de las instalaciones

Según Thek & Obernberger (2004), este costo se calcula en función del valor de la inversión de los galpones, el cual corresponde a un 1%.

4.1.7 Vida útil de oficinas y procesamiento de datos

En Chile según tabla de vida útil fijada por el Servicio de Impuestos Internos para bienes físicos del activo inmovilizado (Resolución43, 2002) con vigencia a partir del 01-01-2003 la vida útil para depreciación normal es de 10 años.

4.1.8 Costo de servicios, mantenimiento de oficinas y procesamiento de datos

Según Thek & Obernberger (2004), este costo se calcula en función del valor de la inversión de las oficinas y procesamiento de datos, el cual corresponde a un 1%.

4.1.9 Periodo de introducción al mercado

Thek & Obernberger (2004), indican que el periodo de introducción al mercado es de 10 años, sin embargo en este estudio se considerará la experiencia de la empresa Chilena Innapel Spa (Valenzuela, 2017) la cual fue de 2 años. Se toma como referencia esta empresa ya que posee una capacidad de producción representativa al mercado nacional.

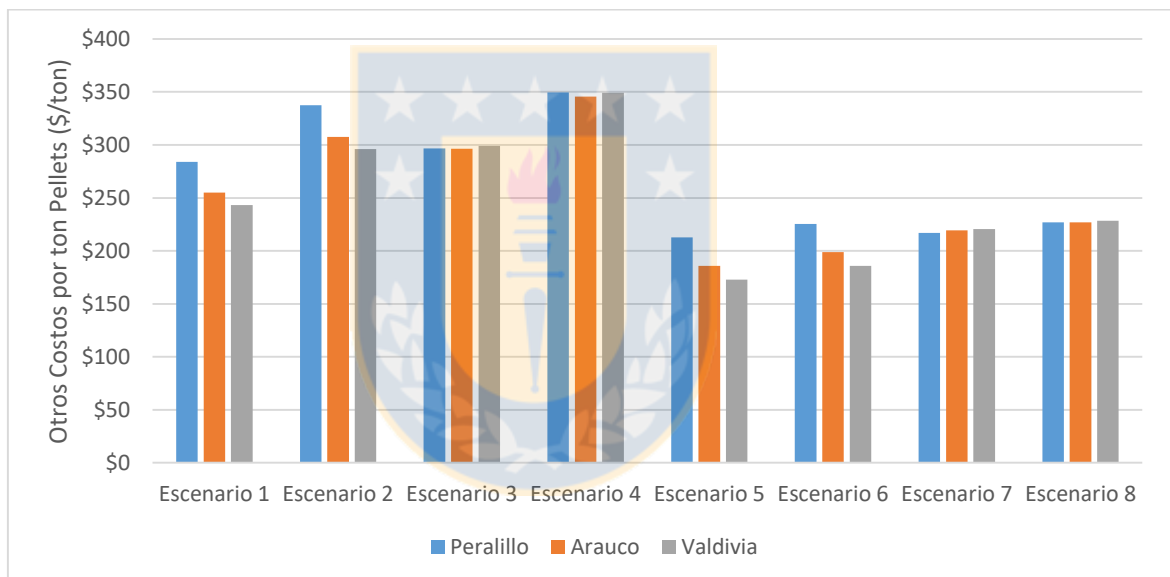
4.1.10 Otros costos

Corresponden a costos no mencionados en el los costos de inversión, costos variables, ni costos fijos de las fábricas de pellets en estudio (Valenzuela, 2017), tales como:

- Costos de envasado (bolsas y film plástico)
- Costos de despacho (pallets)

- Sistemas de seguridad de las instalaciones
- Combustible del cargador frontal y grúa horquilla
- Elementos de protección personal de los trabajadores
- Sistema de extinción de incendios
- Perdidas de pellets de baja calidad

Thek & Obernberger (2004) indican que este costo es un 0,5% anual de los costos totales de producción de pellets de las fábricas. A continuación la figura 21 muestra el cálculo de otros costos relacionados a la producción de pellets para cada escenario en estudio. La tabla 40 anexa presenta el detalle del cálculo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Otros costos por tonelada de pellets producido para cada escenario (\$/ton).

En general se aprecia que los costos asociados a otros costos son bajos en función de la producción.

4.2 Materia prima

Mayoritariamente las materias primas disponibles son aserrín de pino radiata húmedo y virutas secas de pino radiata provenientes de remanufactura. El uso que se le da actualmente a la viruta es la quema interna en calderas de proceso, venta para la utilización como combustible en centrales generadoras de electricidad y recientemente uso interno para la fabricación de pellets de madera (Boletín161, 2017).

La materia prima proveniente de remanufactura es ideal para la formación del pellets de madera debido a que posee la humedad exacta (entre el 8 y 12% w.b) para la formación del pellets, evitando utilizar equipos de secado, lo cual reduce considerablemente los costos de producción del pellets. Otra ventaja de esta materia prima es que proviene del corazón de la madera, generando un pellets Premium calidad Enplus A-1 ya que no contiene corteza (Council, 2013). Sin embargo, la disponibilidad de la materia prima proveniente de remanufactura es limitada, obligando a las empresas interesadas en producir pellets de madera a utilizar aserrín húmedo. El aserrín húmedo contiene un alto contenido de humedad que varía entre 40 y 60 % (w.b) lo cual obliga a los fabricantes a utilizar equipos de secado, aumentando los costos de inversión en maquinaria y costos de producción de pellets. A continuación la tabla 15 presenta las condiciones generales de la materia prima utilizada en el presente estudio.

Tabla 15: Condiciones generales a considerar en los escenarios propuestos.

| Datos de materia prima | Unidad |
|-------------------------------|--------------------------|
| Tipo de materia prima | Viruta, Aserrín |
| Contenido de agua | wt% (w.b.) |
| Densidad aparente | kg (d.b.)/m ³ |
| Precio de materia prima | \$/m ³ |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

4.2.1 Viruta de pino radiata

El presente estudio aborda el uso de virutas de pino radiata como materia prima seca para la producción de pellets en los escenarios 1, 2, 5 y 6. La tabla 16 caracteriza esta materia prima.

Tabla 16: Caracterización de virutas de pino radiata seca.

| Materia Prima | Granulometría (mm) | Humedad %(w.b) | Densidad Aparente (kg/m3) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Viruta de pino radiata | Fibras 0,5x20x50 | 10 | 130 |

Fuente: Valenzuela (2017)

Tabla 17: Precio CLP de viruta de pino radiata en las ciudades en estudio.

| Ubicación | Precio Viruta (\$/m3) | Precio Viruta (\$/ton) |
|------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Peralillo | \$ 3.100 | \$ 23.846 |
| Arauco | \$ 2.521 | \$ 19.392 |
| Valdivia | \$ 2.125 | \$ 16.346 |

Fuente: Aserradero AISA (2017)

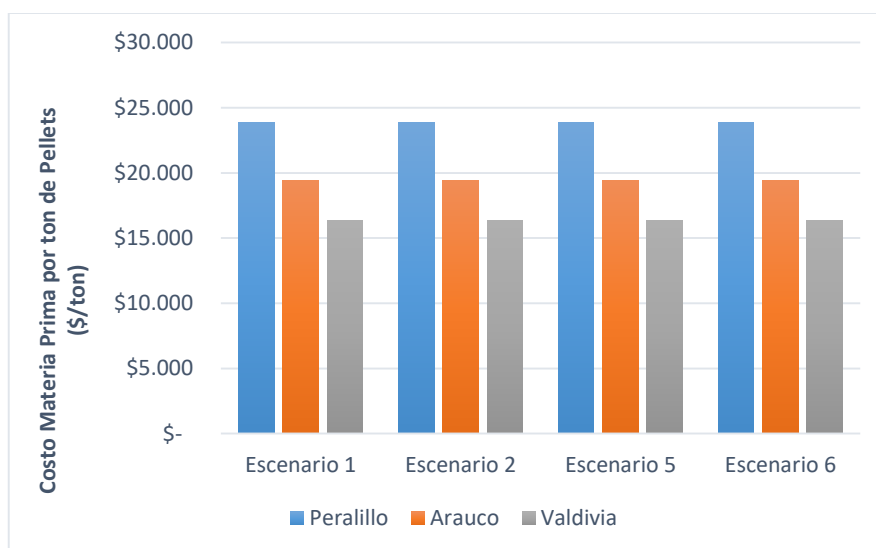
Con la información presentada anteriormente es posible calcular el costo conlleva el uso de viruta como materia prima en los escenarios 1, 2, 5 y 6 del presente estudio.

Tabla 18: Consumo y costo CLP de viruta por escenario para las ciudades en evaluación.

| Parámetros de operación | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|--|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Escenario 1 | | Escenario 2 | | Escenario 5 | | Escenario 6 | |
| Escenarios | Viruta | | Viruta | | Viruta | | Viruta | |
| Materia prima | España | | China | | España | | China | |
| Origen tecnología | España | | China | | España | | China | |
| Producción real hora ton/h | 0,9 | | 0,7 | | 2,7 | | 2,1 | |
| Horas de operación mes h/mes | 494 | | 494 | | 494 | | 494 | |
| Producción real mensual ton/mes | 445 | | 346 | | 1334 | | 1037 | |
| Ubicación de fábricas/Consumo mensual y Costo de materia prima | Consumo viruta (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) | Consumo viruta (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) | Consumo viruta (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) | Consumo viruta (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) |
| Peralillo | 3420 | \$ 10.602.000 | 2660 | \$ 8.246.000 | 10260 | \$ 31.806.000 | 7980 | \$ 24.738.000 |
| Arauco | 3420 | \$ 8.621.820 | 2660 | \$ 6.705.860 | 10260 | \$ 25.865.460 | 7980 | \$ 20.117.580 |
| Valdivia | 3420 | \$ 7.267.500 | 2660 | \$ 5.652.500 | 10260 | \$ 21.802.500 | 7980 | \$ 16.957.500 |

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el cálculo del costo que representa la viruta seca en función de las toneladas de pellets producido. El detalle del cálculo se encuentra en la Tabla 40 anexa.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Costo CLP de la viruta por tonelada de pellets producido (\$/ton).

Se observa que el costo de la viruta por tonelada de pellets producido es igual para los escenarios planteados para cada ciudad evaluada, esto se debe a que el volumen de viruta requerido es directamente proporcional a la producción de pellets. Sin embargo, se observa que la ciudad de Valdivia presenta una ventaja de precio considerable respecto a la ciudad de Arauco y más aún a Peralillo.

4.2.2 Aserrín de pino radiata

Debido a la alta disponibilidad de aserrín de pino radiata, esta materia prima se considera como una de las mejores alternativas para la producción de pellets de madera, con la salvedad que se debe secar ya que contiene un alto contenido de humedad. La tabla 19 caracteriza esta materia prima.

Tabla 19: Caracterización de aserrín de pino radiata húmedo.

| Materia Prima | Granulometría (mm) | Humedad %(w.b) | Densidad Aparente (kg/m3) |
|-------------------------|--------------------|----------------|---------------------------|
| Aserrín de pino radiata | < 10 | 50 | 280 |

Fuente: Valenzuela (2017)

Tabla 20: Precio CLP del aserrín de pino radiata en las ciudades en estudio.

| Ubicación | Precio Aserrín (\$/m3) | Precio Aserrín (\$/ton) |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| Peralillo | \$ 2.548 | \$ 9.100 |
| Arauco | \$ 3.125 | \$ 11.161 |
| Valdivia | \$ 3.000 | \$ 10.714 |

Fuente: Aserradero AISA (2017)

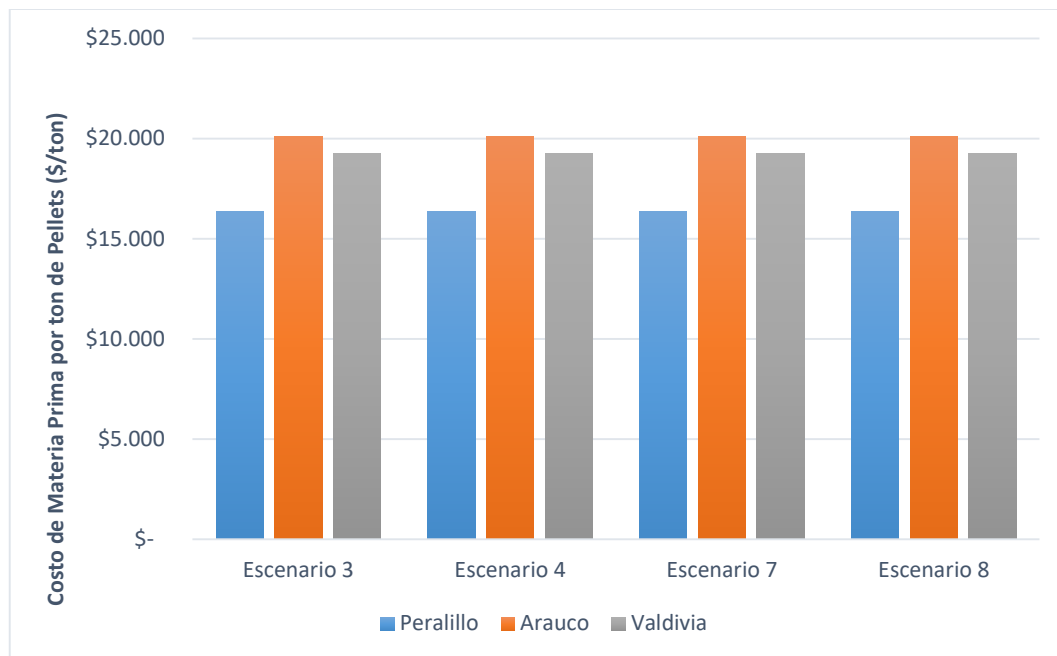
Con la información presentada anteriormente es posible calcular el costo conlleva el uso de aserrín como materia prima en los escenarios 3, 4, 7 y 8 del presente estudio.

Tabla 21: Consumo y costo CLP de aserrín por escenario para las ciudades en evaluación.

| Parámetros de operación | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|--|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | Esc. 3 | | Esc. 4 | | Esc. 7 | | Esc. 8 | |
| Escenarios | Esc. 3 | | Esc. 4 | | Esc. 7 | | Esc. 8 | |
| Materia prima | Aserrín | | Aserrín | | Aserrín | | Aserrín | |
| Origen tecnología | España | | China | | España | | China | |
| Producción real hora (ton/h) | 0,9 | | 0,7 | | 2,7 | | 2,1 | |
| Horas de operación mes (h/mes) | 494 | | 494 | | 494 | | 494 | |
| Producción real mensual de pellets (ton/mes) | 445 | | 346 | | 1334 | | 1037 | |
| Evaporación (agua evaporada) (ton/mes) | 356 | | 277 | | 1067 | | 830 | |
| Materia prima requerida (aserrín) (ton/mes) | 800 | | 622 | | 2401 | | 1867 | |
| Ubicación de fábricas/Consumo mensual y Costo de materia prima | Consumo Aserrín (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) | Consumo Aserrín (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) | Consumo Aserrín (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) | Consumo Aserrín (m3/mes) | Costo Viruta (\$/mes) |
| Peralillo | 2858 | \$ 7.282.548 | 2223 | \$ 5.664.204 | 8574 | \$ 21.847.644 | 6669 | \$ 16.992.612 |
| Arauco | 2858 | \$ 8.931.696 | 2223 | \$ 6.946.875 | 8574 | \$ 26.795.089 | 6669 | \$ 20.840.625 |
| Valdivia | 2858 | \$ 8.574.429 | 2223 | \$ 6.669.000 | 8574 | \$ 25.723.286 | 6669 | \$ 20.007.000 |

Fuente: Elaboración propia

A continuación la Figura 23 presenta el cálculo del costo que representa el aserrín húmedo en función de las toneladas de pellets producido. El detalle del cálculo se presenta en la tabla 42 anexa.



Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Costo CLP de materia prima por tonelada de pellets producido

Se observa que la ciudad de Peralillo presenta los menores costos de aserrín húmedo en todos los escenarios. También se observa que el costo del aserrín por tonelada de pellets producido es igual para los escenarios planteados para cada ciudad evaluada, esto se debe a que el volumen de aserrín requerido es directamente proporcional a la producción de pellets.

4.3 Secado de materia prima

La formación del pellets de madera ocurre sólo a una humedad de la biomasa entre 8 y 12% b.w, lo cual obliga a contar con biomasa a esta humedad. Los equipos más utilizados para el secado de biomasa en la producción de pellets, son los secadores de banda y los secadores de tambor rotatorios. A continuación la tabla 22 presenta los parámetros de secado que se deberán determinar en el presente estudio para la elaboración del modelo de costos.

Tabla 22: Datos requeridos para calcular los costos de secado para los escenarios propuestos en el estudio.

| Datos de secado | Unidad |
|---|-----------------------------|
| Tipo de secador | Secador de tambor rotatorio |
| Humedad de entrada de la materia prima | wt% (w.b.) |
| Humedad de salida de la materia prima | wt% (w.b.) |
| Potencia térmica necesaria | kW |
| Producción a la entrada (materia prima de entrada) | kg/h |
| Evaporación de agua | kg/h |
| Producción a la salida (materia prima de salida) | kg/h |
| Consumo de combustible con PCI 2.800 kcal/kg | kg/h |
| Energía eléctrica requerida (incluyendo alimentación) | kW |
| Periodo de utilización | a |
| Costos de servicios y mantenimiento | % |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

4.3.1 Secadores de banda

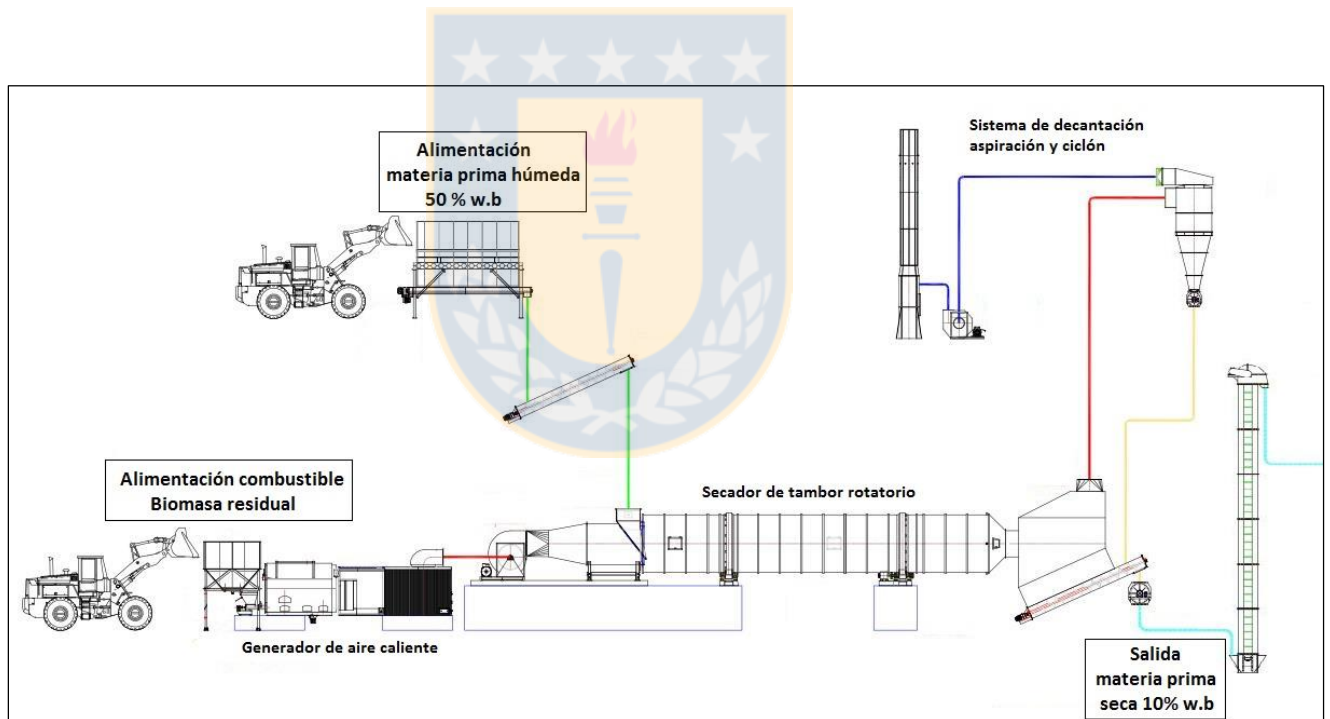
Este tipo de secadores generalmente se utiliza para productos que no pueden ser sometidos a fuertes incrementos de temperatura, y que no pueden desmenuzarse, trocearse, ni recibir una manipulación violenta. También son indicados para el aprovechamiento de grandes caudales de gases calientes a baja temperatura (70 y 200 °C), procedentes de cogeneraciones y/o aprovechamientos energéticos. Estas condiciones son ideales para secar biomasa para la producción de pellets de madera, sin embargo, solo un reducido número de empresas cuenta con esta condición, por lo que este estudio abordará sólo secadores del tipo tambor rotatorio.

Los secadores de banda consisten en una banda continua formada por láminas metálicas perforadas, encerrada en un túnel por el que se introduce el aire caliente. Normalmente los secadores contienen de 1, 2 ó 3 bandas superpuestas, sin embargo, lo habitual son los secadores de dos pisos que ofrecen una mayor eficiencia energética y una tasa muy baja de emisión de partículas sólidas a la atmósfera (Scolari, 2017).

4.3.2 Secadores de tambor rotatorio

Los secadores rotativos consisten básicamente en un tambor cilíndrico, horizontal y de movimiento rotativo en el que se introduce tanto el producto a secar como el fluido térmico de secado a una temperatura elevada de 300 a 800 °C. Los tambores rotativos pueden, según requiera el proceso, funcionar con calentamiento directo o indirecto. Este estudio contempla solo el uso de secadores rotativos de contacto directo ya que son los más comunes y eficientes.

El secado directo consiste en utilizar los gases calientes procedentes de cualquier foco de emisión de calor (quemadores de gas, fuel, gasoil, de biomasa, gases de escape de motores de cogeneración, etc.) directamente en el secador rotatorio. Este tipo de secadores es el más indicado para la producción de pelles debido a su alta eficiencia y capacidad de producción (Ayerbe, 2017).



Fuente: Ayerbe (2017)

Figura 24: Diagrama de flujo proceso de secado de biomasa mediante secador de tambor rotatorio.

A continuación se calcula la cantidad de materia prima (aserrín húmedo al 50% w.b) que se requiere anualmente para los escenarios 3, 4, 7 y 8 considerando que se secará hasta un 10% w.b. Primero se determina la masa de agua evaporada para los diferentes tamaños de fábrica, para ellos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{H_e - H_s}{100 - H_e} \times H_o \times F_u \times C_p \quad Eq. 4$$

Donde:

\dot{m}_{vapor} : Masa de agua evaporada $\left(\frac{ton}{año}\right)$

H_e : Humedad de entrada (% (w. b))

H_s : Humedad de salida (% (w. b))

H_o : Horas de operación anual (h)

F_u : Factor de utilización de la fábrica (%)

C_p : Capacidad de producción $\left(\frac{ton}{año}\right)$

En tanto la siguiente ecuación presenta la materia prima requerida para cada escenario:

$$M_{prima} = P_{pellets} + \dot{m}_{vapor} \quad Eq. 5$$

Donde:

M_{prima} : Materia prima húmeda requerida al 50% (w. b) $\left(\frac{ton}{año}\right)$

$P_{pellets}$: Producción anual de pellets $\left(\frac{ton}{año}\right)$

La tabla 23 resume la cantidad de materia prima requerida para cada uno de los escenarios propuestos que utilizan aserrín húmedo para producir pellets.

Tabla 23: Materia prima húmeda requerida para los escenarios propuestos en el estudio.

| Parámetros | Unidad | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 7 | Esc. 8 |
|---------------------------------------|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Materia prima | tipo | Aserrín | Aserrín | Aserrín | Aserrín |
| Capacidad de producción instalada | ton/h | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Factor de utilización de la fábrica | % | 90 | 70 | 90 | 70 |
| Producción hora de pellet (real) | ton/h | 0,9 | 0,7 | 2,7 | 2,1 |
| Horas anuales de operación | h/año | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 |
| Producción anual de pellet (real) | ton/año | 5335 | 4150 | 16006 | 12449 |
| Humedad entrada materia prima | % (w.b) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Humedad salida materia prima | % (w.b) | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Evaporación (Agua evaporada) | ton/año | 4268 | 3320 | 12804 | 9959 |
| Evaporación (Agua evaporada) | ton/mes | 356 | 277 | 1067 | 830 |
| Materia prima requerida (real) | ton/año | 9603 | 7469 | 28810 | 22408 |
| Materia prima requerida (real) | ton/mes | 800 | 622 | 2401 | 1867 |
| Materia prima requerida (real) | kg/h | 1620 | 1260 | 4860 | 3780 |

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Combustible

El costo de secado tiene directa relación con el consumo y costo del combustible empleado en el equipo generador de aire caliente. Por este motivo se calculará la biomasa necesaria para secar la materia prima requerida en los escenarios propuestos en la tabla 23. El combustible utilizado en el generador de aire caliente normalmente es biomasa no pelletizable como por ejemplo corteza, astillas con alto contenido de corteza, aserrín alto contenido de tierra, virutas de baja calidad e incluso pellets de baja calidad o contaminado. Según las especificaciones de los proveedores, el combustible debe cumplir con las siguientes restricciones:

- Tamaño de partículas menores a 50 mm
- Humedad de las partículas menor a 25 % (w.b)
- Poder calorífico inferior mayor a 2800 kcal/kg

A continuación se procede a calcular el volumen de combustible necesario para los escenarios propuestos en el presente estudio mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{m}_{vapor} \times [h_v - h_a]}{\eta_{combustión} \times PCI_{comb}} \quad Eq. 6$$

Dónde:

\dot{m}_{comb} : Masa de combustible $\left(\frac{kg}{año}\right)$

h_v : Entalpía del vapor $\left(\frac{kcal}{kg}\right)$

h_a : Entalpía del agua $\left(\frac{kcal}{kg}\right)$

$\eta_{combustión}$: Rendimiento de la combustión (%)

PCI_{comb} : Poder calorífico inferior del combustible $\left(\frac{kcal}{kg}\right)$

Para el cálculo se consideró un poder calorífico mínimo de 2800 kcal/kg, una entalpía del vapor de 610 kcal/kg y una entalpía del agua de 29 kcal/kg. Adicionalmente se consideró el rendimiento de la combustión y la eficiencia del sistema de secado, donde la primera está relacionada con el aprovechamiento del combustible y regulación de aire, en tanto, la segunda depende de la aislación térmica y pérdidas asociadas a los equipos de secado de cada fabricante (Martín, 2016).

Tabla 24: Masa de combustible requerido para los escenarios que requieren secado de la materia prima.

| Parámetros | Unidad | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 7 | Esc. 8 |
|---|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Factor de utilización de la fábrica | % | 90 | 70 | 90 | 70 |
| Horas anuales de operación | h | 5928 | 5928 | 5928 | 5928 |
| Horas anuales de operación (real) | h | 5335 | 4150 | 5335 | 4150 |
| Producción anual de pellet | ton/año | 5335 | 4150 | 16006 | 12449 |
| Evaporación (Agua evaporada) | ton/año | 4268 | 3320 | 12804 | 9959 |
| Materia prima requerida | ton/año | 9603 | 7469 | 28810 | 22408 |
| Rendimiento de la combustión | % | 85 | 85 | 85 | 85 |
| Eficiencia del secado | % | 80 | 60 | 80 | 60 |
| Masa de combustible requerido al año | ton/año | 1303 | 1351 | 3908 | 4053 |
| Masa de combustible requerido al mes | ton/mes | 109 | 113 | 326 | 338 |
| Masa de combustible requerido por hora | kg/h | 244 | 326 | 732 | 977 |

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 24 se observa que el escenario 4 requiere mayor cantidad de masa de combustible por hora comparativamente con el escenario 3, de la misma capacidad de producción. Misma situación ocurre con el escenario 8 y 7 respectivamente. A continuación se calcula el costo del combustible utilizado en los escenarios propuestos.

Tabla 25: Características de la corteza de pino radiata.

| Combustible | Granulometría (mm) | Humedad %(w.b) | Densidad Aparente (kg/m3) |
|----------------------|--------------------|----------------|---------------------------|
| Corteza pino radiata | < 50 | 25 | 190 |

Fuente: Arrieta y Teres (1993)

Tabla 26: Precio de la corteza de pino radiata para las ciudades en estudio.

| Ciudades en estudio | Precio Corteza (\$/m3) | Precio Corteza (\$/ton) |
|---------------------|------------------------|-------------------------|
| Peralillo | \$ 3.800 | \$ 20.000 |
| Arauco | \$ 2.216 | \$ 11.663 |
| Valdivia | \$ 2.550 | \$ 13.421 |

Fuente: Boletín 161 (2017)

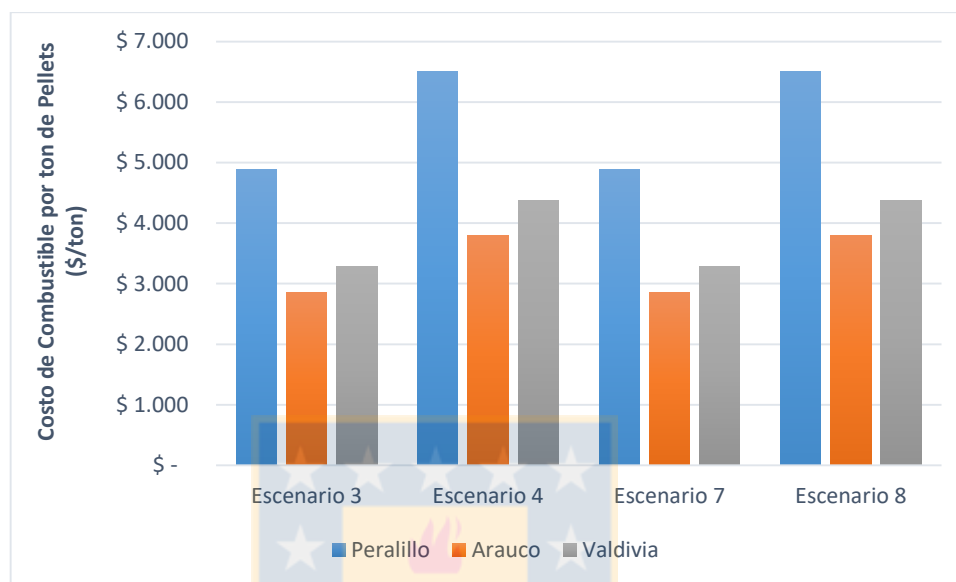
Con la información presentada en las tablas 24, 25 y 26 es posible calcular el costo del combustible empleado en los escenarios que utilizan materia prima húmeda.

Tabla 27: Costo mensual de combustible para cada escenario según localidades en estudio.

| Parámetros | Unidad | Fábrica 1 | | Fábrica 2 | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 7 | Esc. 8 |
| Escenarios | | Esc. 3 | Esc. 4 | Esc. 7 | Esc. 8 |
| Materia prima | | Aserrín | Aserrín | Aserrín | Aserrín |
| Origen tecnología | país | España | China | España | China |
| Producción real | ton/h | 0,9 | 0,7 | 2,7 | 2,1 |
| Horas de operación mes | h/mes | 494 | 494 | 494 | 494 |
| Producción real mensual | ton/mes | 445 | 346 | 1334 | 1037 |
| Masa de combustible requerido año | ton/año | 1303 | 1351 | 3908 | 4053 |
| Masa de combustible requerido mes | ton/mes | 109 | 113 | 326 | 338 |
| Masa de combustible requerido hora | kg/h | 244 | 326 | 732 | 977 |
| Peralillo | \$/mes | \$ 2.171.068 | \$ 2.251.478 | \$ 6.513.203 | \$ 6.754.433 |
| Arauco | \$/mes | \$ 1.266.075 | \$ 1.312.967 | \$ 3.798.226 | \$ 3.938.901 |
| Valdivia | \$/mes | \$ 1.456.901 | \$ 1.510.860 | \$ 4.370.702 | \$ 4.532.580 |

Fuente: Elaboración propia

Esta información permite calcular el costo que implica incorporar un proceso de secado en una fábrica de pellets. Los detalles del cálculo se encuentran en la tabla 43 anexa. A continuación la figura 25 presenta los costos de secado para cada escenario en función de la producción pellets por hora.



Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Costo CLP de combustible en función de la producción de pellets para los escenarios que requieren secado (\$/ton).

La figura 25 indica que para producir 1 tonelada de pellets en la ciudad de Peralillo, se requiere gastar 4.883 \$/ton en combustible en el escenario 3 y 6.511 \$/ton en combustible en el escenario 4.

El consumo de combustible es considerablemente mayor en el escenario 4 que en el escenario 3, misma situación ocurre en el escenario 7 y 8 respectivamente. Esta diferencia se debe a que la tecnología de origen Chino presenta una menor eficiencia en el equipo de secado que la fábrica de origen Español. En tanto, si se comparan diferentes capacidades de producción, es decir el escenario 3 de una capacidad de producción instalada de 1 ton/h y el escenario 7 de una

capacidad instalada de 3 ton/h se observa que los costos de secado son lineales, misma situación ocurre para los escenarios 4 y 8 respectivamente.

4.4 Molienda

Las pelletizadoras de madera son eficientes cuando el tamaño de las partículas es pequeño, es decir, partículas menores a 5 mm de diámetro. Tras la exigencia anterior la materia prima que posee tamaños superiores debe ser triturada en un molino. En el caso de las fábricas de pellets se utiliza el molino de martillos el cual posee un alto rendimiento y eficiencia. El principio mecánico consiste en rotación a alta velocidad de un rotor a 1500 rpm portador de martillos móviles que golpean la biomasa contra unas placas de choque de acero tratado. La biomasa triturada decanta a su vez en una criba de diámetro variable que solo permite la salida de porciones inferiores. El flujo de caída de la biomasa esta forzado por una corriente de aire generada por un ventilador externo que pasa por el interior del triturador y limpia las cribas con lo que la cámara de molienda mantiene una temperatura de seguridad y la producción aumenta. La decantación de la biomasa triturada se realiza mediante un ciclón entre el ventilador y la cámara de molienda (Rosal, 2017). A continuación la tabla 28 presenta las variables más relevantes en el triturado de materia prima requerida para la formación de pellets de madera.

Tabla 28: Costo mensual de combustible para cada escenario según localidades en estudio.

| Datos de molienda | Unidad |
|-------------------------------------|---------------------|
| Tipo de molino | Molino de martillos |
| Consumo eléctrico requerido | kW |
| Periodo de utilización | a |
| Costos de servicios y mantenimiento | % |

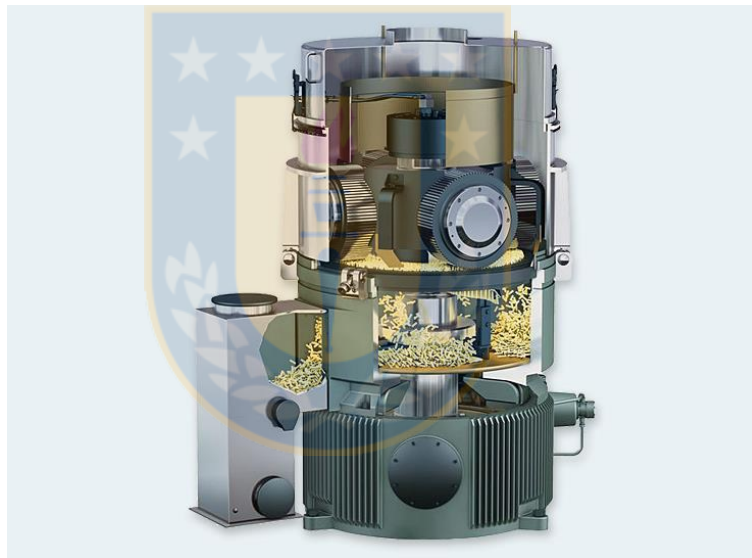
Fuente: Thek & Obernberger (2004)

Debido al trabajo mecánico que realiza este equipo, su mayor costo de producción está asociado al consumo de electricidad. Este consumo está expresado en la tabla 11 para las diferentes alternativas en evaluación. La vida útil de los molinos de martillos está directamente relacionada con el proveedor de la tecnología. Para este caso se utilizará un periodo de 10 años para los molinos de origen Español y Chino (Thek & Obernberger, 2004).

4.5 Pelletización

La pelletización ocurre en prensas que comprimen las partículas de madera unificándolas en pellets de diámetros homogéneos y largo constante, aumentando la densidad inicial entre 3 a 5 veces. Las prensas en su interior poseen rodillos móviles que generan presión sobre las partículas de madera permitiendo que el aserrín ingrese a los orificios y genere la producción de pellets. En el mercado mundial existen dos modelos de prensas pelletizadoras, prensas de matriz plana y prensas de matriz anular.

El funcionamiento de las prensas de matriz plana se basa en un disco fijo de acero perforado por el cual giran rodillos estriados que presionan el aserrín hasta hacerlo pasar por las perforaciones y salir en forma de pellets.



Fuente: Kahl (2017)

Figura 26: Prensa peletizadora de matriz plana.

En tanto las prensas de matriz anular poseen un anillo de acero perforado móvil que posee en su interior rodillos fijos que compactan al aserrín hasta hacerlo pasar por las perforaciones de la matriz y salir en forma de pellets.



Fuente: Mabrik (2017)

Figura 27: Prensa peletizadora de matriz anular.

Existe cierta ventaja de las prensas pelletizadoras de matriz anular respecto de las prensas peletizadoras de matriz plana, las cuales son:

- Mayor producción de pellets en función de la potencia del motor
- Mayor durabilidad de la matriz
- Menor costo de mantenimiento

Estas ventajas generan que el mercado ofrezca una mayor cantidad de fabricantes de prensas peletizadoras de matriz anulares que de matriz plana. Debido a esta razón, en el presente estudio se consideró solo el uso de prensas peletizadoras de matriz anular tanto para proveedores Españoles como para proveedores Chinos (Pallés, 2016). A continuación se presenta la tabla 29 con las variables consideradas en el presente estudio.

Tabla 29: Datos de pelletizado

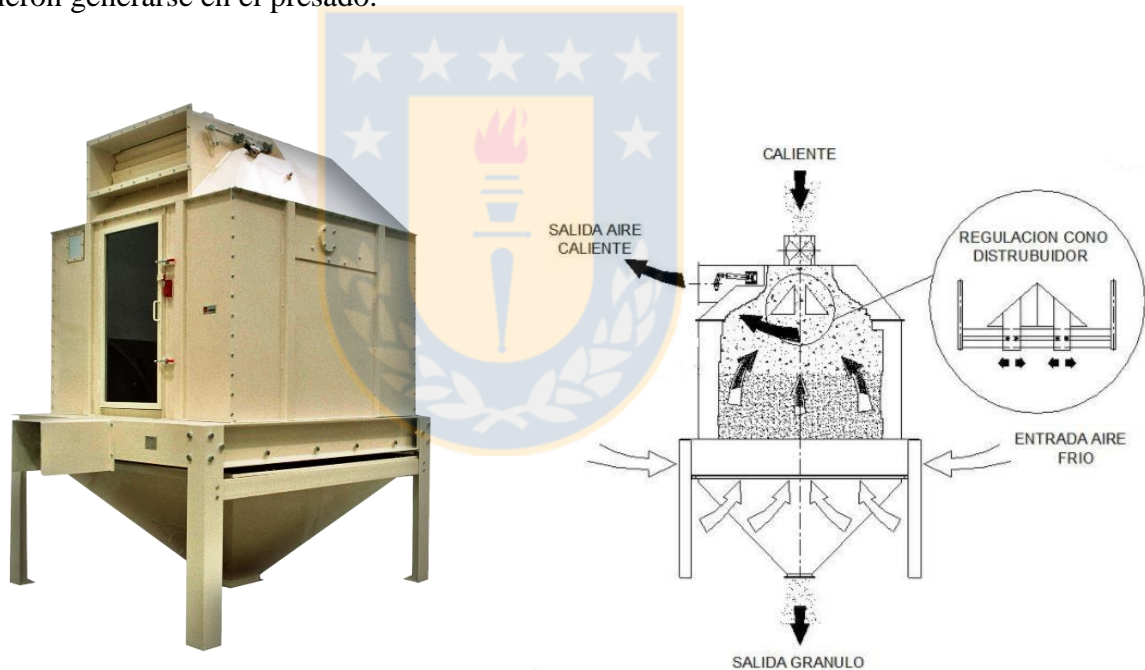
| Datos de pelletizado | Unidad |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Tipo de prensa pelletizadora | Pelletizadora del tipo anular |
| Consumo eléctrico requerido | kW |
| Periodo de utilización | a |
| Costos de servicios y mantenimiento | % |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

La vida útil de los equipos utilizados en este estudio se evaluará por un periodo de 10 años para todos los escenarios en estudio (Thek & Obernberger, 2004).

4.6 Enfriamiento y tamizado

La formación del pellets en las prensas pelletizadoras genera un considerable aumento de la temperatura producto de la fricción que se produce entre los rodillos y la matriz, generando que el pellets alcance temperaturas entre 80 y 100 °C. Antes de envasar se debe bajar la temperatura del pellets a temperatura ambiente ya que de lo contrario rompería las bolsas. El proceso de enfriamiento se realiza en enfriadores de aire en contraflujo en donde el aire ambiente es pasado por un lecho de pellets, el aire caliente es liberado al exterior de las instalaciones a través de un ventilador, por otro lado el pellets frio es pasado por un tamiz vibratorio que elimina finos que pudieron generarse en el presado.



Fuente: Mabrik (2017)

Figura 28: Enfriador de contracorriente

A continuación la tabla 30 presenta las variables que considera en presente estudio en referencia al proceso de enfriamiento y tamizado.

Tabla 30: Variables de enfriamiento y tamizado

| Datos de enfriamiento | Unidad |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Tipo de enfriador | Enfriador de contraflujo |
| Consumo eléctrico requerido | kW |
| Periodo de utilización | a |
| Costos de servicios y mantenimiento | % |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

4.7 Almacenamiento

Este ítem aborda el espacio disponible para almacenar la materia prima a pelletizar, el combustible utilizado en el secador y el almacenamiento del pellets producido. Normalmente la materia prima como el combustible son almacenados dentro de un galpón en pilas o a granel.



Fuente: Valenzuela (2017)

Figura 29: Almacenamiento de materia prima bajo techo abierto.

En tanto el pellets producido es almacenado en silos o bien en pallets de 72 bolsas bajo el mismo galpón de producción. El presente estudio se considerará el almacenamiento de la materia prima, combustible y pellets dentro del galpón o en una extensión del galpón en que se montará la maquinaria.



Fuente: Valenzuela (2017)

Figura 30: Almacenamiento del pellets producido.

A continuación la tabla 31 resume los datos considerados en el almacenamiento.

Tabla 31: Datos de almacenamiento

| Datos de almacenamiento | Unidad |
|---|----------------------------|
| Tipo de almacenamiento | Almacenamiento bajo galpón |
| Periodo de utilización | a |
| Costos de servicios y mantenimiento | % |
| Capacidad de almacenamiento (en % de la producción anual de pellet) | % |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

4.8 Equipamiento periférico

Son considerados como equipamiento periférico todos los equipos de transporte como, cintas de transporte, elevadores de cangilones, tornillos sin fin y pequeños silos intermedios. Así como también, cargador frontal para alimentar las tolvas de materia prima y combustible, y grúa para mover y cargar los pallets de pellets producido. El consumo de combustible de estos equipos fue considerado como otros costos generales y la vida útil es de 10 años según (Thek & Obernberger, 2004).

Tabla 32: Datos de equipos periféricos.

| Datos de los equipos periférico (transporte, almacenamiento) | Unidad |
|---|---------------|
| Consumo eléctrico requerido | kW |
| Periodo de utilización | a |
| Costos de servicios y mantenimiento | % |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

4.9 Personal

El costo del personal es uno de los costos más representativos dentro de los costos de producción de una fábrica de pellets, ya que se requieren varias personas para operar las líneas productivas además del personal de administrativo y ventas (Pirraglia et al., 2010). A continuación la tabla 33 presenta los datos considerados en la evaluación del personal requerido para operar una fábrica de pellets.

Tabla 33: Datos del personal

| Datos del personal | Unidad |
|-------------------------------------|---------------|
| Sueldo por hora | \$/h |
| Horas trabajadas por persona al año | h p.a. |
| Personal por turno | |
| Personal de respaldo por turno | |
| Personal de administración y ventas | |

Fuente: Thek & Obernberger (2004)

El sueldo por hora es variable ya que depende del rol que desempeñe cada trabajador dentro de la organización. Las horas trabajadas por cada persona al año se definen según la legislación Chilena, es decir 45 horas semanales y 15 días hábiles de vacaciones al año (Código del trabajo, dirección del trabajo gobierno de Chile). El personal de operaciones requerido en cada turno fue el número recomendado por los proveedores de las tecnologías en evaluación, así como el personal de respaldo. En tanto el personal administrativo y ventas fue el indicado por la empresa productora de pellets Innapel Spa (Valenzuela, 2017). A continuación la tabla 34 indica el número de operadores mínimo necesario para operar cada las fábricas en estudio.

Tabla 34: Personal necesario para operar las fábricas de pellets en estudio en 2 turnos diarios.

| Parámetros | Fábrica 1 | | Fábrica 2 | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | |
| Capacidad Instalada (ton/h) | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Origen Tecnología | España | China | España | China |
| Jefe de Operaciones | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Operador Cargador Frontal y Grúa Horquilla | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Alimentador Materia Prima | 0 | 2 | 0 | 4 |
| Encargado Control Automático | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Envasado | 2 | 4 | 4 | 6 |
| Gerente | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Secretaria | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Distribución y Despacho | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Personal de aseo | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Guardia | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Total | 12 | 16 | 16 | 22 |

Fuente: Ayerbe (2017); Nancy (2017)

Los sueldos asignados al personal se establecieron según encuesta realizada a la empresa Innapel Spa (Valenzuela, 2017). Los cuales se resumen en la tabla 35.

Tabla 35: Sueldo personal fábrica de pellets.

| Capacidad Instalada (Ton/h) | Sueldo Bruto |
|--|--------------|
| Jefe de Operaciones | \$850.000 |
| Operador Cargador Frontal y Grúa Horquilla | \$480.000 |
| Alimentador Materia Prima | \$330.000 |
| Encargado Control Automático | \$550.000 |
| Envasado y Paletizado | \$360.000 |
| Gerente de Planta | \$1.800.000 |
| Secretaria | \$400.000 |
| Distribución y Despacho | \$360.000 |
| Personal de Aseo | \$270.000 |
| Guardia | \$400.000 |

Fuente: Valenzuela R (2017)

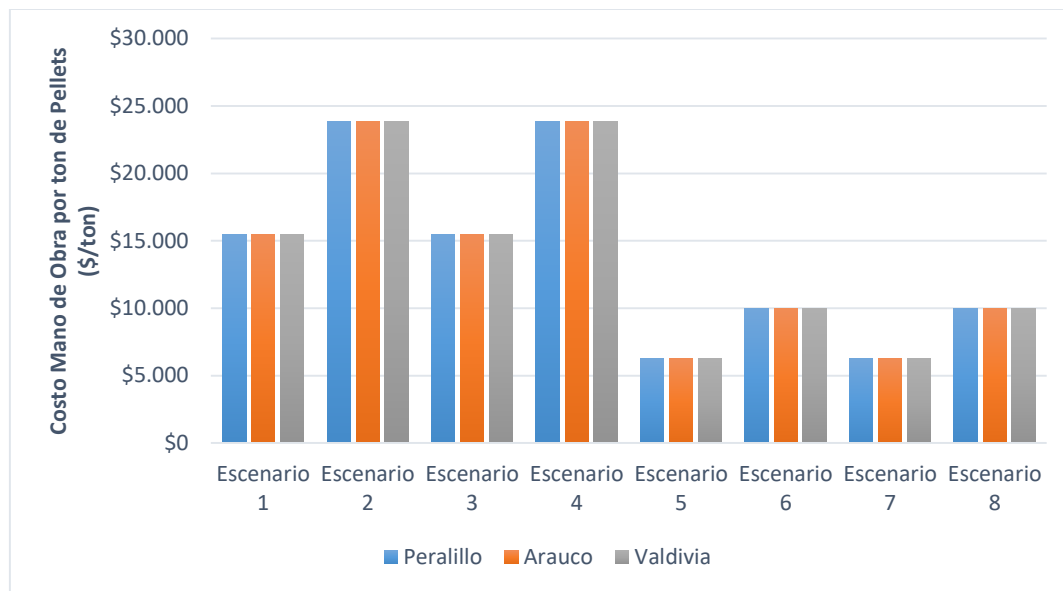
Conociendo los sueldos del personal es posible determinar el costo fijo que representa la mano de obra asociado a cada fábrica.

Tabla 36: Costo de mano de obra (\$/mes) para cada una de las fábricas según proveedor y capacidad.

| Parámetros | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|--|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|---------------------|
| | 1 | | 1 | | 3 | | 3 | |
| Origen Tecnología | España | | China | | España | | China | |
| Escenarios | 1 y 3 | | 2 y 4 | | 5 y 7 | | 6 y 8 | |
| Jefe de Operaciones | 1 | \$850.000 | 1 | \$850.000 | 1 | \$850.000 | 1 | \$850.000 |
| Operador Cargador Frontal y Grúa Horquilla | 2 | \$960.000 | 2 | \$960.000 | 2 | \$960.000 | 2 | \$960.000 |
| Alimentador Materia Prima | 0 | \$0 | 2 | \$660.000 | 0 | \$0 | 4 | \$1.320.000 |
| Encargado Control Automático | 2 | \$1.100.000 | 2 | \$1.100.000 | 2 | \$1.100.000 | 2 | \$1.100.000 |
| Envasado | 2 | \$720.000 | 4 | \$1.440.000 | 4 | \$1.440.000 | 6 | \$2.160.000 |
| Gerente | 1 | \$1.800.000 | 1 | \$1.800.000 | 1 | \$1.800.000 | 1 | \$1.800.000 |
| Secretaria | 1 | \$400.000 | 1 | \$400.000 | 1 | \$400.000 | 1 | \$400.000 |
| Distribución y Despacho | 1 | \$360.000 | 1 | \$360.000 | 2 | \$720.000 | 2 | \$720.000 |
| Personal de aseo | 1 | \$270.000 | 1 | \$270.000 | 1 | \$270.000 | 1 | \$270.000 |
| Guardia | 1 | \$400.000 | 1 | \$400.000 | 2 | \$800.000 | 2 | \$800.000 |
| Total | 12 | \$6.860.000 | 16 | \$8.240.000 | 16 | \$8.340.000 | 22 | \$10.380.000 |

Fuente: Elaboración propia

La figura 31 presenta el costo que representa la mano de obra en función de las toneladas de pellets producido. El detalle de este cálculo se encuentra en la tabla 44 anexa. Se asume el mismo sueldo para cada una de las localidades en estudio, por lo tanto el costo en mano de obra es el mismo para cada localidad en estudio.



Fuente: Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Costo CLP en mano de obra por tonelada de pellets producido para los escenarios en estudio (\$/ton).

Se observa que los costos en mano de obra de la fábrica de 1 tonelada hora son considerablemente mayores a los costos de la fábrica de 3 toneladas hora. También se observa que las fábricas chinas (escenarios 2, 4, 6 y 8) poseen mayores costos en mano de obra que las fábricas de origen Europeo (escenarios 1, 3, 5 y 7), esto se debe automatización de los equipos que posee un fabricante respecto a otro.

4.10 Mantenimiento

El costo de mantenimiento está relacionado al consumo de repuestos y fungibles de los equipos que conforman la fábrica de pellets. Por ejemplo, el costo de mantenimiento del molino de martillos está definido por el cambio de las cuchillas y criba, en tanto el costo de mantenimiento de la prensa peletizadora está asociado al reemplazo de rodillos, matriz y lubricación. De esta forma Thek & Obernberger (2004) definieron que los costos de mantenimiento son función del costo de inversión de cada equipo.

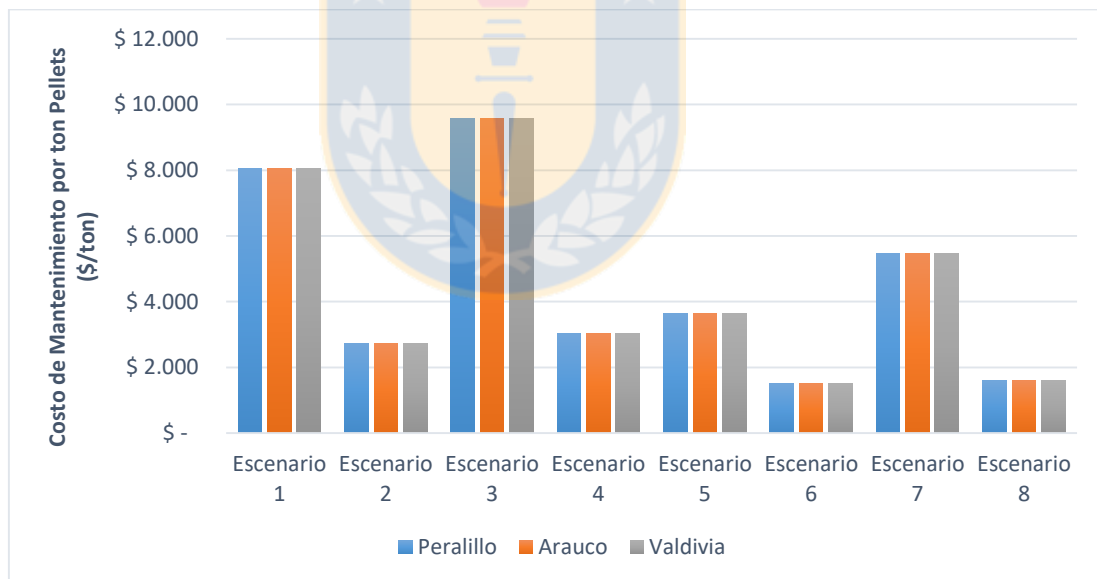
Tabla 37: Costo de mantenimiento anual en función del costo de inversión de los equipos.

| Equipos | Costos de Mantenimiento (% en función de la inversión) |
|-------------------------|--|
| Secado | 2,5 |
| Molienda | 18 |
| Pelletización | 10 |
| Enfriamiento | 2 |
| Almacenamiento | 2 |
| Equipamiento periférico | 2 |

Thek & Obernberger (2004)

La empresa Proenergy S.A (Rojas, 2017), empresa fabricante de pellets que posee maquinaria de origen Chino, indicó que la vida útil de los repuestos de origen Chino en promedio alcanza 50% de la vida útil de los repuestos europeos, por lo que se recalcula y actualizan los costos

La tabla 45 anexa presenta el cálculo del costo de mantenimiento por tonelada de pellets producido en fusión de los porcentajes indicados en la tabla 37.



Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Costos CLP de mantenimiento por tonelada de pellets para los escenarios en estudio (\$/ton).

Se observa que los escenarios que poseen maquinaria de origen Europeo (escenarios 1, 3, 5 y 7) poseen costos de mantenimiento considerablemente mayores a los costos de mantenimiento de las fábricas de los escenarios con maquinaria de origen Chino (escenarios 2, 4, 6 y 8), debido a que el costo de inversión es mucho menor.



Capítulo 5. Resultados y Análisis

Tras conocer los diferentes costos asociados a la producción de pellets, es importante agruparlos y determinar qué tamaño de fábrica es más conveniente y en qué localidad, para cada tecnología. Así como también poder conocer cuáles son los costos más relevantes en la producción de pellets de madera en Chile.

5.1 Resultados

A continuación la figura 33 agrupa los costos de las variables de producción para cada uno de los escenarios en estudio. Permitiendo observar cuales son los más representativos.

Desde el punto de vista de la materia prima, se aprecia que el costo de la adquisición de la materia prima representa en la mayoría de los escenarios (1, 2, 5, 6, 7, y 8) el mayor costo por tonelada de pellets producido. Este costo depende exclusivamente de los precios que puedan acordar los fabricantes de pellets con los proveedores de materia prima o bien el costo de mercado que alcance la materia prima en la localidad en que se ubique la fábrica de pellets, para los fabricantes que poseen su propia materia prima. Destacando el costo de los escenarios 5 y 6 con \$23.846 por tonelada de pellets producido.

Observando los costos de pago de capital, se aprecia que este costo es el más relevante en los escenarios 1, 3 y 7. En particular observándose que en el escenario 3 alcanza un costo de \$37.701 por tonelada de pellets producido. Este costo es mucho mayor en comparación con los demás costos incluyendo la electricidad, el cual alcanza los \$22.642 por tonelada de pellets. El elevado costo de pago de capital se debe a que el costo de inversión de la maquinaria Española es relevante, por ende, el pago de capital representa un alto costo para el proyecto. Puntualmente en el caso del escenario 3, se debe a que contempla la adquisición de un secador de tambor rotatorio adicional por \$270 millones de pesos, aumentando considerablemente el costo de inversión.

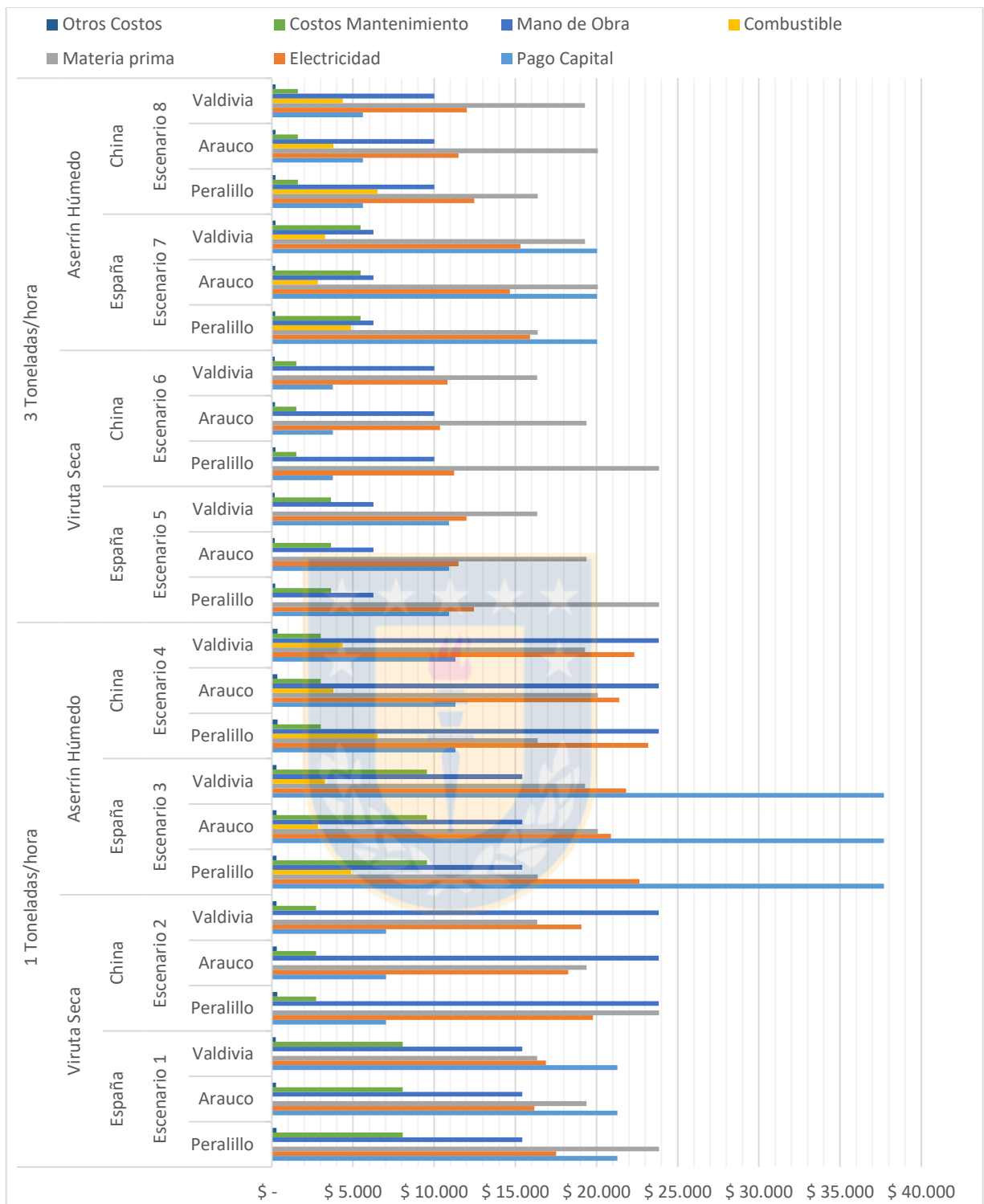


Figura 33: Costo CLP de variables de producción de pellets de madera para cada escenario según localidad en estudio (\$/ton).

Fuente: Elaboración propia

Analizando los costos de electricidad, se observa que los costos de electricidad por tonelada de pellets producido se encuentran en la misma proporción que el costo de la materia prima, inclusive en los escenarios 3 y 4 alcanzan los \$22.642 y \$23.181 respectivamente en la localidad de Peralillo. Estos costos están directamente relacionados con el tipo de tecnología ya que la maquinaria de procedencia Española posee motores con mayor consumo eléctrico que la maquinaria China. Por lo tanto los costos eléctricos de los escenarios 1, 3, 5 y 7 son mayores que los costos eléctricos de los escenarios 2, 4, 6 y 8.

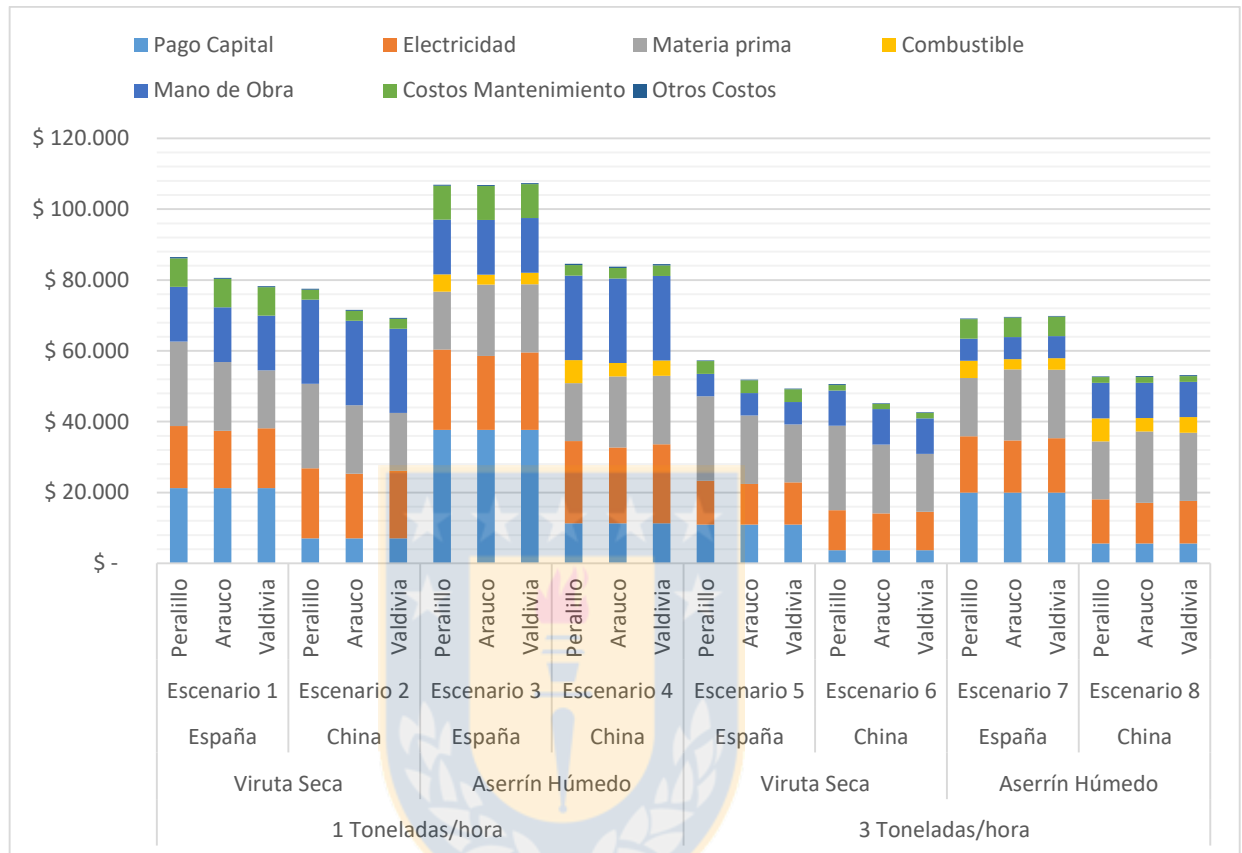
Estudiando la mano de obra involucrada en la producción de pellets, se observa que las fábricas de origen Chino poseen mayores costos en uso de mano de obra. Esto se debe a su baja automatización. Estos costos resultan muy elevados para la fábrica de 1 tonelada hora (escenarios 2 y 4) alcanzando valores de \$23.829 por tonelada de pellets producida en ambos escenarios.

Examinando los costos de mantenimientos, se observa que las fábricas de origen Español representan los mayores costos de mantenimiento por tonelada de pellets producido, ya que este costo se calculó en función de la inversión general de la fábrica. Escenarios 1, 3, 5 y 7 superan en 3 a 4 veces los costos de mantenimiento de las fábricas de origen Chino, escenarios 2, 4, 6 y 8.

Evaluando la participación del costo del combustible utilizado en el secado del aserrín en los escenarios 4, 5, 7 y 8, se tiene que este costo depende exclusivamente del precio del aserrín en las diferentes localidades. Se observa que estos costos son proporcionales al tamaño de la fábrica y que la localidad de Peralillo posee los mayores costos (\$6.511 por tonelada de pellets producido).

En cuanto a otros costos asociados a la producción de pellets, éstos oscilan en torno al 0,3 y 0,4% de participación para todos los escenarios ubicados en la localidad de Peralillo. Recordar que estos costos representan un 0,5% de los costos totales de producción.

A continuación se suman las variables presentadas anteriormente para cada uno de los escenarios propuestos con la finalidad de evaluar cuál de ellos presenta los menores costos medios de producción de pellets.



Fuente: Elaboración propia

Figura 34: Costos CLP de producción de pellets de madera para las localidades en estudio en función de los escenarios planteados (\$/ton).

En general se observa que las fábricas de 3 ton/h (escenarios 5, 6, 7 y 8) poseen menores costos de producción que las fábricas de 1 ton/h (escenarios 1, 2, 3 y 4). Esto se debe a que los costos de inversión no son lineales con la capacidad de producción, alcanzando economías de escala.

Se aprecia que el menor costo de producción de pellets lo posee la ciudad de Valdivia en el escenario 6 con la fábrica China de 3 toneladas hora, alcanzando un costo de \$42.623 por

tonelada de pellets producido. En contraste, el mayor costo de producción de pellets también se encuentra en la ciudad de Valdivia en el escenario 3 con la fábrica Española de 1 tonelada hora, alcanzando \$107.370 por tonelada de pellets producido.

Observando los escenarios que operan con viruta seca (escenarios 1, 2, 5 y 6), se aprecia que poseen menores costos de producción que los escenarios 3, 4, 7 y 8 que operan a partir de materia prima húmeda. Esta reducción de costos de operación se debe a que operar con materia prima húmeda requiere de inversión en equipos de secado, generando que el pago del capital sea mayor, y además se necesite combustible para generar el aire caliente necesario para el secado del aserrín húmedo.

Estudiando las tecnologías utilizadas, se aprecia que en todos los escenarios (2, 4, 6 y 8) que se utiliza maquinaria de origen Chino posee menores costos que los escenarios (1, 3, 5 y 7) que operan con maquinaria de origen Español, esto se debe principalmente al elevado costo de inversión y mayor consumo eléctrico de la maquinaria Española.

Analizando las tecnologías utilizadas en la producción de pellets, se observa que las fábricas de origen Chino (escenarios 2, 4, 6 y 8) presentan menores costos de producción de pellets que las fábricas de origen Español (1, 3, 5 y 7).

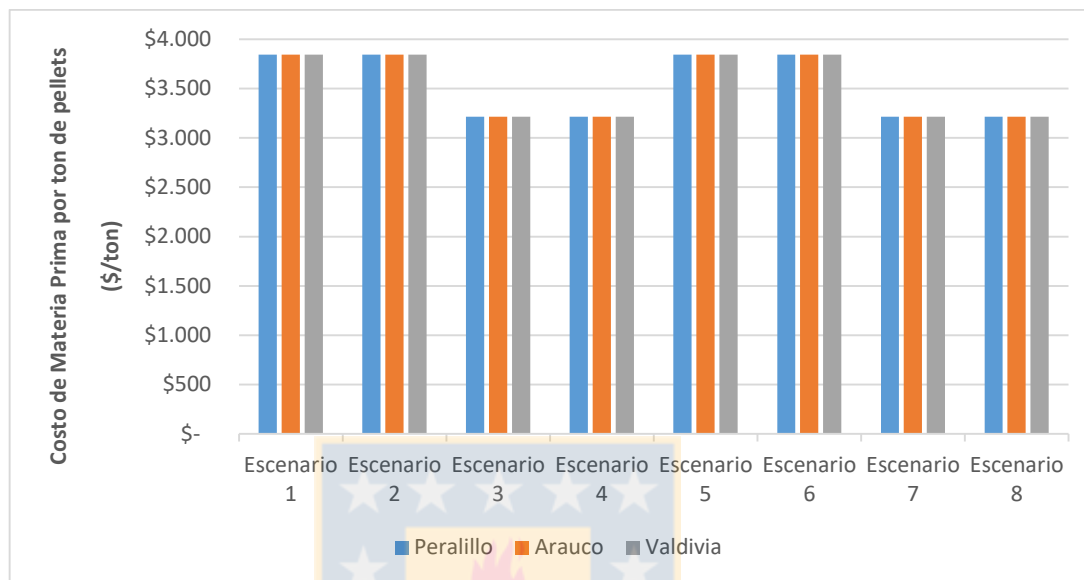
5.2 Análisis de sensibilidad

Basado en los resultados obtenidos de los costos de producción, se realiza un análisis de sensibilidad a las variables de mayor injerencia en los costos de producción de pellets, estas variables son la materia prima, electricidad y mano de obra. Lo anterior permitirá conocer cuál de estas variables de producción es la más influyente en los costos medios producción de pellets en Chile.

5.2.1 Sensibilidad a los costos de materia prima

El porcentaje de participación del costo de la materia prima es el más elevado entre las variables de producción y oscila entre un 21 y 49%. Por este motivo, se subirá el precio de adquisición de

la materia prima tanto húmeda como seca en \$500 por metro cúbico, lo anterior debido a que existe una alta probabilidad que el costo de la materia prima aumente producto de aumento de la demanda de la biomasa para la producción de pellets.



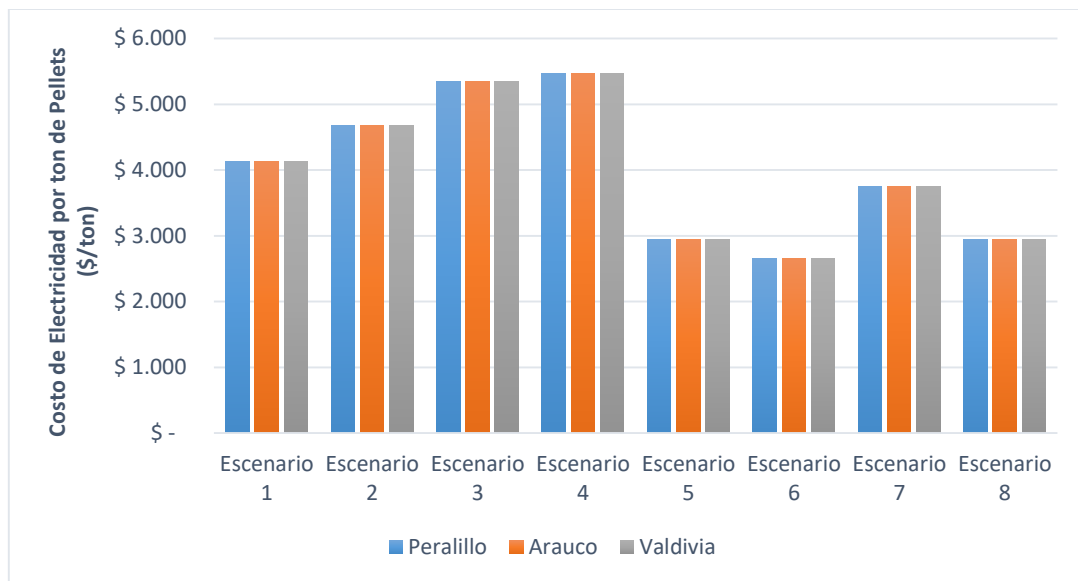
Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Aumento del costo de materia prima por tonelada de pellets.

Se observa que al aumentar en \$500 el costo de adquisición del metro cúbico de materia prima, el costo de producción de pellets aumentó en \$3.846 por tonelada de pellets para los escenarios 1, 2, 5 y 6, y en \$3.214 por tonelada de pellets en los escenarios 3, 4, 7 y 8.

5.2.2 Sensibilidad a los costos de electricidad

El costo de electricidad oscila entre el 23 y 31% de los costos de producción para los diferentes escenarios propuestos. Se subirá el precio de la electricidad en \$20 el kWh y recalculará el costo medio de producción para cada escenario.



Fuente: Elaboración propia

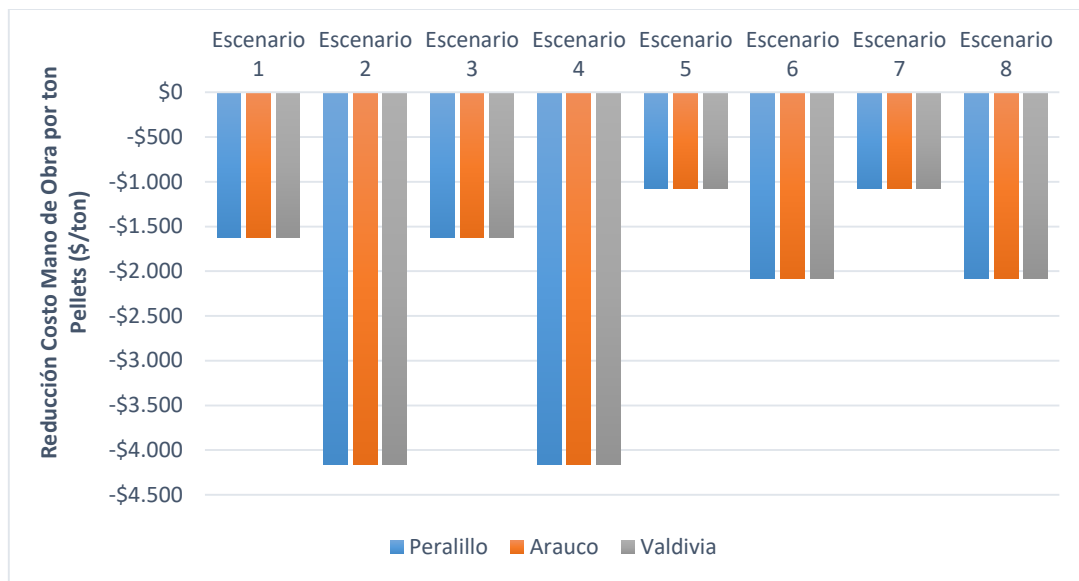
Figura 36: Aumento de los costos de producción de la tonelada de pellets tras el aumento del costo de la electricidad en 20 \$/kWh.

Se observa que los escenarios 1, 2, 3 y 4 correspondientes a la fábrica de 1 tonelada hora se ven fuertemente afectados tras un aumento del costo de la energía eléctrica. Sin embargo, si el precio bajara en la misma proporción se verían muy beneficiados.

Los escenarios correspondientes a la fábrica de 3 toneladas hora no son tan propensos a una variación de la tarifa eléctrica. Sin embargo, la variación es equivalente al aumento en el costo de la materia prima presentada en la figura 36.

5.2.3 Sensibilidad a los costos de mano de obra

El porcentaje de participación de la mano de obra varía mucho según el tipo de fábrica y oscila entre un 12 y 37%. Por este motivo, se aumentará la automatización de las fábricas con el objetivo de reducir estos costos permitiendo conocer la relevancia que tiene esta variable.



Fuente: Elaboración propia

Figura 37: Reducción de los costos de producción de pellets tras disminuir el personal de envasado debido a la adquisición de una envasadora y paletizadora automática (\$/ton).

Se observa que los escenarios 2 y 4 de la fábrica que produce 1 tonelada hora de origen Chino son muy sensibles a esta implementación. Lo anterior se debe a que se requería de 2 personas por turno para para ejecutar este trabajo, lo cual permite ahorrar 4 sueldos al mes. En los escenarios 6 y 8 ocurre una situación similar, pero con menor sensibilidad. La adquisición de esta envasadora y palletizadora automática genera que los costos basados en capital deban recalcularse y compararlo con los costos ahorrados en mano de obra. A continuación la figura 38 presenta la variación de costos de producción tras realizar el análisis de sensibilidad de las variables materia prima, electricidad y mano de obra.



Fuente: Elaboración propia

Figura 38: Aumento de costos de producción de pellets en los diferentes escenarios luego de realizar el análisis de sensibilidad (\$/ton).

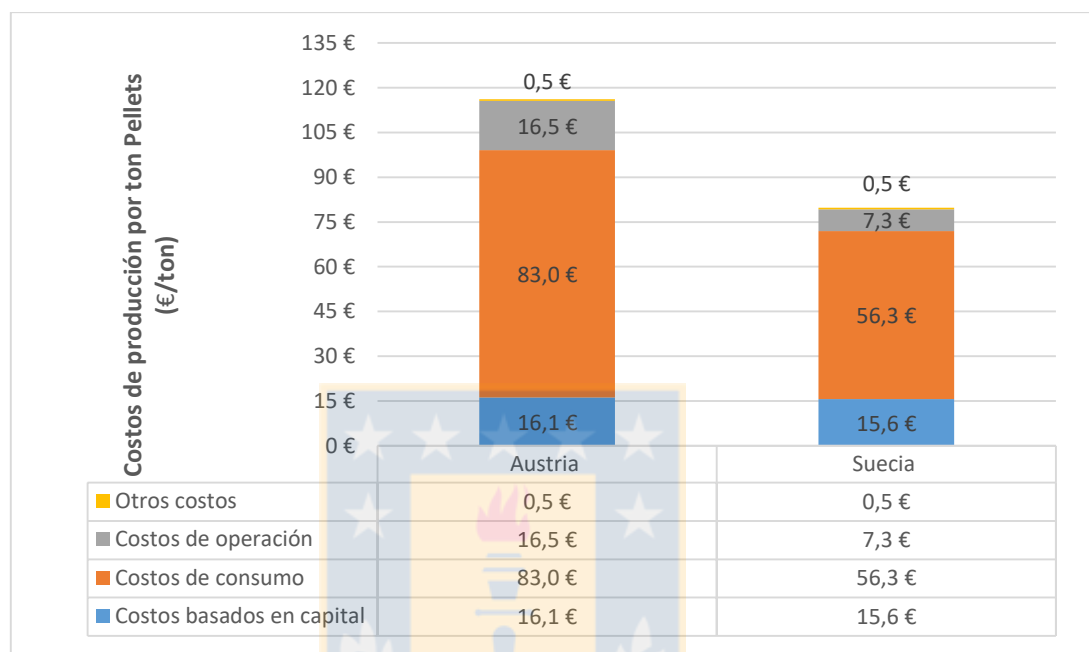
Se observa un aumento de los costos de producción luego de realizar el análisis de sensibilidad que oscila entre \$4.098 en el escenario 8 y \$6.978 en el escenario 3.

5.3 Comparación de costos de producción de pellets con experiencias internacionales

Con el objetivo de conocer la competitividad que tiene Chile como país exportador de pellets, a continuación se comparará los costos de producción de pellets en Chile con costos de países como Australia, Suecia y Argentina. Los costos de producción de pellets en los países anteriores fueron obtenidos tras la revisión bibliográfica.

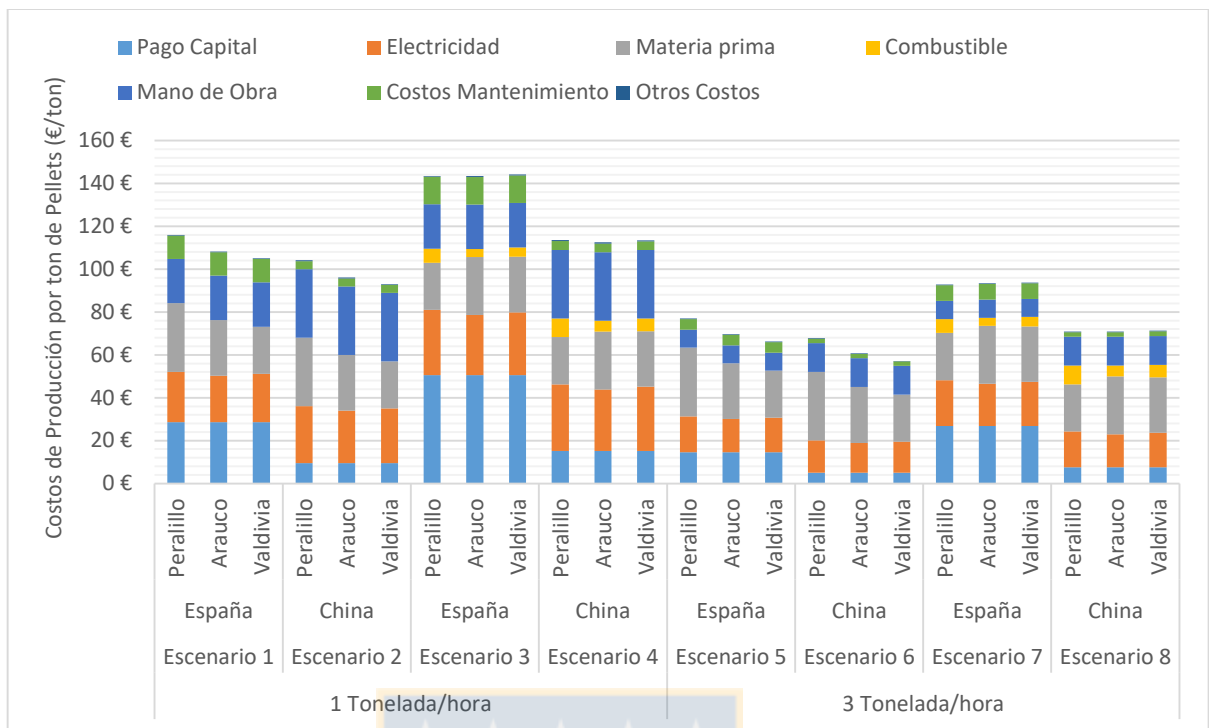
5.3.1 Comparación de los costos de producción con Australia y Suecia

A continuación la figura 39 presenta los costos de producción de pellets en Austria y Suecia para una capacidad de 24.000 y 80.000 toneladas año, operando 7.884 horas por año, es decir 3,04 y 10,15 ton/h respectivamente. Costos de producción que se proceden a comparar con los costos de producción de pellets obtenidos en Chile presentados en la figura 40.



Fuente: Fuente: Uasuf & Becker (2011)

Figura 39: Costos de producción de pellets en Austria y Suecia 2004, actualizados al año 2017 (€/ton).



Fuente: Elaboración propia

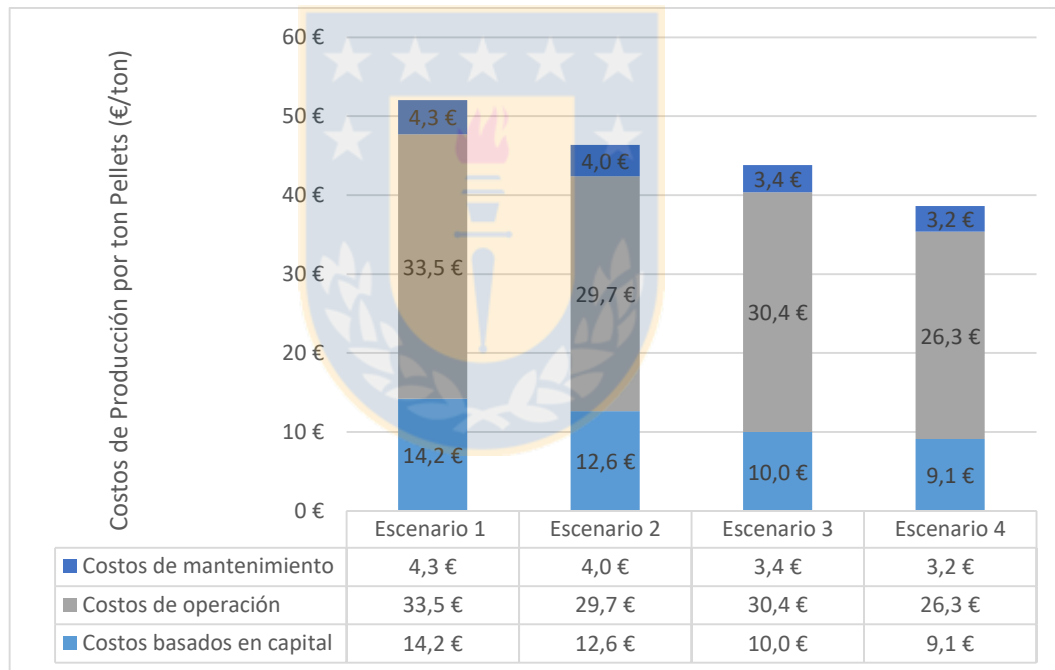
Figura 40: Costos de producción de pellets de madera en Chile año 2017 (€/ton).

Se observa que los costos de producción de pellets en Austria alcanzan los 116,1 (€/ton), mientras que en Chile en el escenario más desfavorable (escenario 4, localidad de Peralillo) alcanza los 143,5 (€/ton), generando una diferencia en desfavorable para Chile de 27,4 €. Sin embargo, para la fábrica de 3 toneladas hora la diferencia es en favor de Chile en el escenario 6 de la localidad de Valdivia el costo es de 57,6 (€/ton), generando una diferencia positiva de 58,5 (€/ton). En tanto los costos de producción de Suecia ascienden a 79,8 (€/ton), costos similares a los costos de producción de las fábricas chilenas de una capacidad de 3 toneladas hora.

5.3.2 Comparación de los costos de producción con Argentina

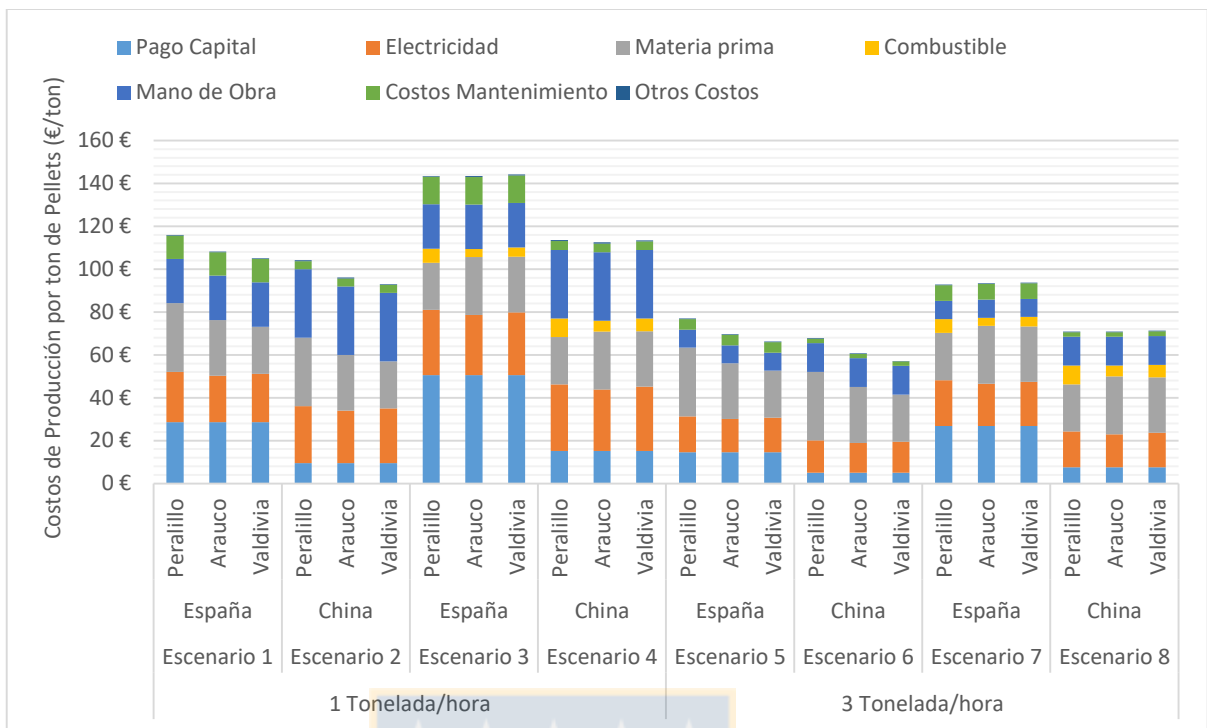
De la misma forma anterior, se presentan los costos de producción de pellets de madera en Argentina para 4 escenarios. El escenario 1 produce a partir de materia prima húmeda y tiene una capacidad de 3 ton/hora, el escenario 2 utiliza 50% de materia prima seca y 50% de materia prima húmeda y produce 3 ton/hora, el escenarios 3 produce a partir de materia prima húmeda y tiene una capacidad de 6 ton/hora y escenario 4 utiliza 50% de materia prima seca y 50% de materia prima húmeda y produce 6 ton/hora (Augusto et al., 2011).

La figura 41 presenta el valor actual de los costos de producción de pellets en Argentina, los cuales se proceden a comparar con los costos de producción de los obtenidos en Chile presentados en la Figura 33.



Fuente: Uasuf & Becker (2011)

Figura 41: Costos de producción de pellets en Argentina 2009, actualizados al año 2017 (€/ton).



Fuente: Elaboración propia

Figura 42: Costos de producción de pellets de madera en Chile año 2017 (€/ton).

El escenario 4 de una capacidad de 6 toneladas hora en Argentina genera los menores costos de producción de pellets, llegando a los 38,6 (€/ton). Valor inalcanzable por las fábricas chilenas ya que el mejor costo lo posee la fábrica de 3 toneladas hora en la ciudad de Valdivia con un costo de 57,6 euros la tonelada.

El escenario 1 de Argentina posee una capacidad de producción de pellets de 3 toneladas hora y sus costos de producción alcanzan los 52 (€/ton). Este valor se asemeja más a los valores generados por las fábricas chilenas que poseen la misma capacidad de producción (escenarios 5 y 6). Sin embargo, las fábricas chilenas operan a partir de residuos secos, en cambio la fábrica Argentina opera a partir de residuos húmedos, por lo tanto se concluye que los costos de producción de pellets en Argentina son más bajos que en Chile.

Capítulo 6. Conclusiones

El menor costo de producción de pellets de madera en Chile se logra utilizando biomasa seca y una fábrica de origen China de una capacidad de 3 ton/h ubicada en la ciudad de Valdivia, alcanzando un valor de 42.623 \$/ton. Coincidentemente, el mayor costo de producción también se encuentra en Valdivia, sin embargo se utiliza biomasa húmeda y una fábrica Española de 1 ton/h, alcanzando un valor de 107.370 \$/ton. Tras este resultado, se concluye que la humedad de la biomasa, la capacidad de producción y el origen de la tecnología juegan un rol fundamental en los costos de producción de pellets de madera.

En general se obtuvo que los costos más relevantes en la producción de pellets de madera en Chile son; la materia prima (viruta seca) en el escenario 6 de la ciudad de Peralillo que representa el 47,2% de los costos de producción, el pago del capital para la fábrica Española de 1 ton/h que representa hasta un 35,3% del el escenario 3 en la ciudad de Valdivia, la mano de obra que representa un 34,4% en la ciudad de Valdivia en el escenario 2 y el costo de la electricidad en el escenario 3 de la ciudad de Valdivia que alcanza hasta un 27,5% de los costos de producción.

Por economías de escala se concluye que los escenarios 5, 6, 7 y 8 que poseen una capacidad de producción de 3 ton/h generan menores costos de producción que las fábricas de los escenarios 1, 2, 3 y 4 que operan con 1 ton/h. Independiente de las condiciones locales de operación y tecnología utilizada.

Se concluye que los escenarios 1, 2, 5 y 6 que operan con biomasa seca (viruta al 10% de humedad) poseen menores costos de producción que los escenarios que operan con biomasa húmeda (aserrín húmedo al 50% de humedad).

Las fábricas de origen Chino (escenarios 2, 4, 6 y 8) generan menores costos de producción que las fábricas de origen Español (escenarios 1, 3, 5 y 7). Aunque se debe tener en cuenta que la maquinaria de origen Chino presenta menor tasa de producción, menor vida útil, mayor frecuencia de mantenciones y menor automatización. Sin embargo, su bajo costo hace que estas desventajas se amorticen.

Los costos de producción en Austria utilizando una fábrica de 3,04 ton/h alcanzan los 116,1 €/ton, mientras que en Chile los escenarios 5, 6, 7 y 8 que operan con una fábrica de 3 ton/h los costos oscilan entre 57,6 y 93,8 €/ton, observándose una diferencia favorable para las fábricas Chilenas. Concluyendo que Chile posee una ventaja considerable en los costos de producción de pellets comparado con Austria.

En tanto, los costos de producción de pellets en Suecia ascienden a 79,8 €/ton utilizando una fábrica de 10,15 ton/h, es decir, una producción 3 veces mayor a las fábricas chilenas consideradas en este estudio. Conociendo el promedio de los costos de producción de los escenarios 5, 6, 7 y 8 de las fábricas chilenas de 74,3 €/ton, se concluye que la producción de pellets en Chile posee una ventaja competitiva respecto a Suecia.

Finalmente, se compararon los costos de producción de pellets entre Argentina y Chile, obteniendo que el menor costo de producción en Argentina es 38,6 €/ton para una fábrica de 6 ton/h que opera con una mezcla de biomasa seca y húmeda, en tanto en Chile el menor costo de producción es 57,6 €/ton para una fábrica de una capacidad de 3 ton/h que opera con biomasa seca. Sin embargo, esta diferencia se reduce al comparar el escenario 2 de la fábrica Argentina, el cual alcanza un costo de producción de 46,3 €/ton, escenario que posee la misma capacidad de producción que los escenarios 5, 6, 7 y 8 de las fábricas Chilenas, es decir, 3 ton/h.

Este trabajo concluye que las condiciones locales, es decir, el costo de la materia prima, energía eléctrica, mano de obra y combustible, no tienen un efecto significativo en los costos medios de producción para las diferentes localidades en estudio. Por lo que la hipótesis del trabajo no se cumple. Sin embargo, el tamaño de la fábrica, el tipo de materia prima y la procedencia de la tecnología, si tienen un efecto significativo en los costos medios de producción de pellets en Chile. Por lo que se concluye que estas tres variables son fundamentales en la toma de decisión para la adquisición de una fábrica de pellets.

Capítulo 7. Referencias

- Aduanas. (2016). aduana.cl. Obtenido de <http://www.aduana.cl/cuadros-y-series-estadisticas/aduana/2016-09-14/143317.html>
- AEBIOM. (2010). annual report 2010. Renewable Energy House Rue d`Arlon 63-65 B-1040 Brussels.
- Altamirano, A., Schlegel, B., Thiers, Ó., Miranda, A., Pilquinao, B., Orrego, R., & Rocha, C. (2015). Disponibilidad y potencial energético de la biomasa del bosque nativo para el desarrollo de la dendroenergía en el centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 223-237. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200008>
- AMBIENTE, M. D. (2014). calefaccionsustentable. Obtenido de http://www.calefaccionsustentable.cl/?page_id=48
- ambiente, m. d. (08 de Agosto de 2014). Resolución 694 EXENTA. ANTEPROYECTO DE PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MP 2,5, PARA LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS Y DE ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN POR MP10, PARA LAS MISMAS COMUNAS. Temuco, Región de la Araucanía, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Andesbiopellets. (2016). <http://www.andesbiopellets.cl>. Obtenido de <http://www.andesbiopellets.cl/esp/nuestra-empresa>
- AISA, A. (13 de Octubre de 2017). Cotización de materia prima en las localidades en Peralillo, Arauco y Valdivia. (R. Segura, Entrevistador)
- Arana, V. M. (2013). SITUACIÓN ACTUAL DE DEMANDA DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA. TEMUCO: INFOR Instituto Forestal .

- Ayerbe, R. (02 de agosto de 2017). Cotización Fábrica de pellets de 1 y 3 toneladas hora. (R. Segura, Entrevistador)
- Boletín155. (2016). INFOR: La industria del Aserrio boletín N° 155 2016. Concepción: Instituto Forestal.
- Boletín161. (2017). INFOR: Precios Forestales Boletín N°161 Junio 2017. Concepción: Instituto Forestal.
- Council, E. P. (2013). Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos Versión 2.0. Calle Fray Luis de León 22, patio de las columnas 47002 Valladolid, España: c/o AEBIOM - AVEBIOM - Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa.
- Dineroeneltiempo. (22 de diciembre de 2017). Dinero en el tiempo.com. Obtenido de Dinero en el tiempo.com: <https://www.dineroeneltiempo.com/>
- Energía, M. d. (27 de 03 de 2016). <http://www.energia.gob.cl>. Obtenido de <http://www.energia.gob.cl>: <http://www.energia.gob.cl/energias-renovables>
- FAO. (18 de December de 2014). [fao.org](http://www.fao.org). Obtenido de <http://www.fao.org/news/story/en/item/273120/icode/>
- Filichkin, V. (2009). Análisis Relativo de Impacto y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica. Santiago: Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A.
- GmbH, B. B. (12 de enero de 2016). <http://www.bios-bioenergy.at/>. Obtenido de <http://www.bios-bioenergy.at/>: <http://www.bios-bioenergy.at/>
- Hoque, M., Sokhansanj, S., Bi, T., Mani, S., Jafari, L., Lim, J., ... Afzal, M. (2006). Economics of pellet production for export market. En *2006 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

- INE. (2008). Distribución y consumo energético en Chile. Santiago: ENFOQUE ESTADÍSTICO - Energía - Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadísticas.
- Kahl. (02 de octubre de 2017). www.akahl.de. Obtenido de www.akahl.de: <https://www.akahl.de/en/products/pelleting-of-biomass/machinesplants/detail//show/wood-pelleting/>
- Mabrik. (02 de octubre de 2017). mabrik.com. Obtenido de mabrik.com: <https://mabrik.com/productos.html?familia=8>
- Mahapatra, K., Gustavsson, L., & Madlener, R. (2004). Some reflections on the diffusion of pellet heating systems in Sweden. En *Proceedings of the 3rd European Congress on the Economics and Management of Energy in Industry*.
- Martín, G. J. (2 de Septiembre de 2016). Entrevista empresa Sociedad de Ingeniería Cading Chile Ltda. . (R. S. Fuentes, Entrevistador)
- Mergner, S. (2014). The Dynamics of Global Pellet Markets, Growth prospects and price scenarios. Pöyry Management Consulting Lutzstraße 2 80687 Munich Germany: Central European Biomass Conference .
- Murray, G. (2014). Internal Pellet Markets and anadian Pellet Industry Update. Prince George, BC: International Bioenergy Conferenceand exhibition, june 13, 2014 .
- Nancy. (28 de Septiembre de 2017). Cotizacion maquinaria para la produccion de pellets de madera 1 y 3 Ton/h. (R. Segura, Entrevistador)
- NEGOCIOS, E. Y. (20 de JULIO de 2014). EL BOOM DEL PELLETT PARA CALEFACCIÓN. Obtenido de <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=121578>

- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. (2014). Economic and sustainability comparative study of wood pellets production in Portugal, Germany and Sweden. En *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- OCDE. (21 de diciembre de 2017). <http://www.oecd.org>. Obtenido de <http://www.oecd.org>: <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/>
- Pallés, P. (26 de agosto de 2016). Cotización Prensa Pelletizadora . (R. Segura, Entrevistador)
- Pirraglia, A., Gonzalez, R., & Saloni, D. (2010). Techno-economical analysis of wood pellets production for US manufacturers. *BioResources*, 5(4), 2374–2390.
- Polagye, B. L., Hodgson, K. T., & Malte, P. C. (2007). An economic analysis of bio-energy options using thinnings from overstocked forests. *Biomass and Bioenergy*, 31(2-3), 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.02.005>
- REN21. (2014). RENEWABLES 2014 GLOBAL STATUS REPORT. REN21 Secretariat c/o UNEP15 rue de Milan 75441 Paris, France: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Resolución43. (2002). TABLA DE VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO. Santiago: Servicio de Impuestos internos.
- ResoluciónExenta242. (2017). Anteproyecto del Plan de prevención y Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concepción Metropolitano. Santiago: República de Chile Ministerio del Medio Ambiente.
- Rojas, F. (03 de marzo de 2017). Entrevista costos de operación de una fábrica de origen Chino. (R. Segura, Entrevistador)

- Rosal. (28 de agosto de 2017). www.rosal-feedmills.com. Obtenido de www.rosal-feedmills.com: <https://www.rosal-feedmills.com/productos/molino-vre-mra/>
- Ryu, C., Yang, Y. B., Khor, A., Yates, N. E., Sharifi, V. N., & Swithenbank, J. (2006). Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel*, 85(7-8), 1039-1046.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.019>
- Salazar, F. (2016). *El Mercado del Pellet*. Los Ángeles: Ecomas.
- Scolari. (16 de octubre de 2017). <http://www.solarisrl.com>. Obtenido de <http://www.solarisrl.com>:
http://www.solarisrl.com/essiccatoi_serie_t?Language=es_AR
- SEC. (02 de junio de 2017). <http://www.sec.cl>. Obtenido de <http://www.sec.cl>:
http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,3417541,33_3421567&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Sodimac. (12 de septiembre de 2017). <http://www.sodimac.cl>. Obtenido de <http://www.sodimac.cl>: <http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/2682478/Bolsa-Pellet-18-kilos/2682478?TAB=Bolsa%20Pellet%2018%20kilos&sTerm=pellet&sType=product&sScenario=Bolsa%20Pellet%2018%20kilos>
- Song, H., Dotzauer, E., Thorin, E., & Yan, J. (2011). Annual performance analysis and comparison of pellet production integrated with an existing combined heat and power plant. *Bioresource Technology*, 102(10), 6317-6325.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.042>

- Spelter, H., & Toth, D. (2009). North America's wood pellet sector.
- Thek, G., & Obernberger, I. (2004). Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 671-693. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.007>
- Trømborg, E., Ranta, T., Schweinle, J., Solberg, B., Skjevrak, G., & Tiffany, D. G. (2013). Economic sustainability for wood pellets production – A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. *Biomass and Bioenergy*, 57, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.030>
- Uasuf, A., & Becker, G. (2011). Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1357-1366. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.029>
- Valenzuela, R. (17 de Marzo de 2017). Entrevista Costos de Operacion de Innapel . (R. Segura, Entrevistad.
- Wahlund, B., Yan, J., & Westermark, M. (2002). A total energy system of fuel upgrading by drying biomass feedstock for cogeneration: a case study of Skellefte a bioenergy combine. *Biomass and Bioenergy*, 23(4), 271–281.
- Wolf, A., Vidlund, A., & Andersson, E. (2006). Energy-efficient pellet production in the forest industry—a study of obstacles and success factors. *Biomass and Bioenergy*, 30(1), 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.09.003>
- Zhang, W., Tong, Y., Wang, H., Chen, L., Ou, L., Wang, X., ... Zhu, Y. (2014). Emission of Metals from Pelletized and Uncompressed Biomass Fuels Combustion in Rural Household Stoves in China. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep05611>

Capítulo 8. Anexos

8.1 Costos mensuales de capital por tonelada de pellets

Tabla 38: Costos mensuales de capital por tonelada de pellets producido en cada escenario.

| Parámetros | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 5 | Escenario 6 | Escenario 7 | Escenario 8 |
| Total CLP | \$ 677.873.542 | \$ 174.364.280 | \$ 1.200.841.734 | \$ 280.368.732 | \$ 1.042.770.943 | \$ 279.257.306 | \$ 1.913.977.737 | \$ 416.881.281 |
| FRC (0,1675) | \$ 113.543.818 | \$ 29.206.017 | \$ 201.140.990 | \$ 46.961.763 | \$ 174.664.133 | \$ 46.775.599 | \$ 320.591.271 | \$ 69.827.615 |
| Costo Capital Anual | \$ 9.461.985 | \$ 2.433.835 | \$ 16.761.749 | \$ 3.913.480 | \$ 14.555.344 | \$ 3.897.967 | \$ 26.715.939 | \$ 5.818.968 |
| Producción Real (ton/mes) | 445 | 346 | 445 | 346 | 1334 | 1037 | 1334 | 1037 |
| Costo Capital Mensual | \$ 21.282 | \$ 7.038 | \$ 37.701 | \$ 11.317 | \$ 10.913 | \$ 3.757 | \$ 20.030 | \$ 5.609 |

Fuente: Elaboración propia

8.2 Costo de energía eléctrica por tonelada de pellets

Tabla 39: Costo de energía eléctrica por tonelada de pellets producido.

| Ciudades/Costo eléctrico por tonelada de pellets | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 5 | Escenario 6 | Escenario 7 | Escenario 8 |
| | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) | Costo eléctrico (\$/ton pellets) |
| Peralillo | \$ 17.522 | \$ 19.788 | \$ 22.642 | \$ 23.181 | \$ 12.454 | \$ 11.234 | \$ 15.900 | \$ 12.467 |
| Arauco | \$ 16.170 | \$ 18.262 | \$ 20.897 | \$ 21.393 | \$ 11.494 | \$ 10.368 | \$ 14.674 | \$ 11.506 |
| Valdivia | \$ 16.883 | \$ 19.068 | \$ 21.817 | \$ 22.336 | \$ 12.000 | \$ 10.824 | \$ 15.320 | \$ 12.013 |

Fuente: Elaboración propia

8.3 Costo de otros costos por tonelada de pellets

Tabla 40: Costo de otros costos por tonelada de pellets producido.

| | Fábrica 1 | | | | Fábrica 2 | | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 5 | Escenario 6 | Escenario 7 | Escenario 8 |
| Peralillo | \$284 | \$337 | \$297 | \$350 | \$213 | \$225 | \$217 | \$227 |
| Arauco | \$255 | \$307 | \$296 | \$346 | \$186 | \$199 | \$219 | \$227 |
| Valdivia | \$243 | \$296 | \$299 | \$349 | \$173 | \$186 | \$221 | \$228 |

Fuente: Elaboración propia

8.4 Costo de viruta en función de las toneladas de pellet

Tabla 41: Costo de viruta en función de las toneladas de pellets producido.

| Ciudades/Costo de virutas por tonelada de pellets producido | Fábrica 1 | | Fábrica 2 | |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 5 | Escenario 6 |
| | Costo de Viruta (\$/ton pellets) | Costo de Viruta (\$/ton pellets) | Costo de Viruta (\$/ton pellets) | Costo de Viruta (\$/ton pellets) |
| Peralillo | \$ 23.846 | \$ 23.846 | \$ 23.846 | \$ 23.846 |
| Arauco | \$ 19.392 | \$ 19.392 | \$ 19.392 | \$ 19.392 |
| Valdivia | \$ 16.346 | \$ 16.346 | \$ 16.346 | \$ 16.346 |

Fuente: Elaboración propia

8.5 Costo de aserrín por tonelada de pellets

Tabla 42: Costo de aserrín por tonelada de pellets producido.

| Ciudades/Costo de Aserrín por tonelada de pellets producido | Fábrica 1 | | Fábrica 2 | |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 7 | Escenario 8 |
| | Costo de aserrín (\$/ton pellets) | Costo de aserrín (\$/ton pellets) | Costo de aserrín (\$/ton pellets) | Costo de aserrín (\$/ton pellets) |
| Peralillo | \$ 16.380 | \$ 16.380 | \$ 16.380 | \$ 16.380 |
| Arauco | \$ 20.089 | \$ 20.089 | \$ 20.089 | \$ 20.089 |
| Valdivia | \$ 19.286 | \$ 19.286 | \$ 19.286 | \$ 19.286 |

Fuente: Elaboración propia

8.6 Costo de combustible por tonelada de pellets

Tabla 43: Costo de combustible en función de la producción de pellets.

| Ciudades/Costo de combustible por tonelada de pellets producido | Fábrica 1 | | Fábrica 2 | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 7 | Escenario 8 |
| | Costo combustible (\$/ton pellets) | Costo combustible (\$/ton pellets) | Costo combustible (\$/ton pellets) | Costo combustible (\$/ton pellets) |
| Peralillo | \$ 4.883 | \$ 6.511 | \$ 4.883 | \$ 6.511 |
| Arauco | \$ 2.848 | \$ 3.797 | \$ 2.848 | \$ 3.797 |
| Valdivia | \$ 3.277 | \$ 4.369 | \$ 3.277 | \$ 4.369 |

Fuente: Elaboración propia

8.7 Costo en mano de obra por tonelada de pellets

Tabla 44: Costo en mano de obra por tonelada de pellets producido.

| | Fábrica 1 | | Fábrica 2 | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Capacidad Instalada (ton/h) | | | | |
| Origen Tecnología | España | China | España | China |
| Escenarios | 1 y 3 | 2 y 4 | 5 y 7 | 6 y 8 |
| Producción Real Pellets (ton/mes) | 445 | 346 | 1334 | 1037 |
| Total sueldos al mes | \$6.860.000 | \$8.240.000 | \$8.340.000 | \$10.380.000 |
| Total (Mano de obra/ton Pellets) | \$15.430 | \$23.829 | \$6.253 | \$10.006 |

Fuente: Elaboración propia

8.8 Costos de mantenimiento por tonelada de pellets

Tabla 45: Costos de mantenimiento de los equipo en los escenarios en estudio

| Equipos | % Inversión | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 4 | Escenario 5 | Escenario 6 | Escenario 7 | Escenario 8 |
|--|-------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Secado | 2,5% | \$ - | \$ - | \$ 665.926 | \$ 49.295 | \$ - | \$ - | \$ 2.441.110 | \$ 49.295 |
| Molienda | 18% | \$ 1.933.902 | \$ 181.706 | \$ 1.933.902 | \$ 181.706 | \$ 2.170.915 | \$ 290.482 | \$ 2.170.915 | \$ 290.482 |
| Pelletización | 10% | \$ 1.202.540 | \$ 242.827 | \$ 1.202.540 | \$ 242.827 | \$ 1.995.660 | \$ 416.510 | \$ 1.995.660 | \$ 416.510 |
| Enfriamiento | 2% | \$ 92.262 | \$ 15.203 | \$ 92.262 | \$ 15.203 | \$ 104.440 | \$ 15.203 | \$ 104.440 | \$ 15.203 |
| Almacenamiento | 2% | \$ 71.596 | \$ 8.982 | \$ 71.596 | \$ 8.982 | \$ 110.303 | \$ 8.982 | \$ 110.303 | \$ 8.982 |
| Equipamiento periférico | 2% | \$ 288.544 | \$ 24.451 | \$ 288.544 | \$ 24.451 | \$ 478.751 | \$ 48.248 | \$ 478.751 | \$ 48.248 |
| Total | | \$ 3.588.843 | \$ 473.169 | \$ 4.254.769 | \$ 522.464 | \$ 4.860.069 | \$ 779.426 | \$ 7.301.179 | \$ 828.721 |
| Producción real pellets (ton/mes) | | 445 | 346 | 445 | 346 | 1334 | 1037 | 1334 | 1037 |
| Costo mantenimiento/ton pellets | | \$ 8.065 | \$ 1.368 | \$ 9.561 | \$ 1.510 | \$ 3.643 | \$ 752 | \$ 5.473 | \$ 799 |

Fuente: Elaboración propia