



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

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN SECADOR
DE LEÑA CON FUENTES GEOTERMALES EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

PAULINA ANDREA ÁVILA SALINAS

PROFESOR GUÍA

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

NICOLÁS HURTADO ARROYO

DIEGO MORATA CÉSPEDES

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA
POR: PAULINA ANDREA ÁVILA SALINAS
FECHA: OCTUBRE 2020
PROF. GUÍA: ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN SECADOR DE LEÑA CON FUENTES GEOTERMALES EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS

El desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades del presente, sin afectar las capacidades de las generaciones futuras, de satisfacer las propias. En el desarrollo sustentable no entra en juego solo el concepto ambiental, sino que es una sinergia entre lo social, económico y ambiental, siendo el estado el regulador y promotor de este desarrollo. Por esto, en este trabajo de título se busca evaluar la factibilidad técnica y económica de un secador de leña alimentado por fuente de energía renovable, como lo es la geotermia.

La leña es el combustible fósil más usado para calefacción en el sur del país un 74 % de los hogares consume leña. En particular en la Región de los Ríos, un 96 % de los hogares la utiliza. Pero la leña utilizada por los hogares de Chile es en su mayoría es leña húmeda, con porcentajes de humedad superiores al 25 %. Con estos porcentajes de humedad es ineficiente térmicamente y altamente contaminante.

Por esto se busca evaluar técnica y económicamente un secador de leña en la Región de los Ríos, en la localidad de Liquiñe, alimentado por una fuente geotermal. La zona de Liquiñe es rica en fuentes termales, debido a que en esta zona comienza la falla Liquiñe-Ofqui. El secador a diseñar será un secador de aire forzado caliente con retorno.

La metodología de este trabajo consiste en calcular la energía térmica necesaria para secar un volumen de leña determinado. De acuerdo a los resultados térmicos, se realizan simulaciones en ANSYS®, para estudiar el comportamiento térmico dentro de la cámara de secado, y como afecta la variación de la velocidad del aire de entrada en el secado de la leña.

Los resultados de los cálculos térmicos arrojan que la fuente termal puede secar un volumen de 26,4 [m³] en un tiempo de 4,2 días para leña de roble y 2,8 días para leña de eucalipto. De acuerdo a las simulaciones, cuando el aire entra a una menor velocidad, la transferencia de calor disminuye para un tiempo de secado determinado.

En cuanto a la evaluación económica, el proyecto para un horizonte de 10 años presenta un VAN = 4.305.961 [CLP] para el secado de roble y un VAN = 19.226.223 [CLP] para el secado de eucalipto.

Finalmente se concluye que el proyecto es técnicamente factible, aprovechando la energía térmica de la fuente termal Hipólito Muñoz. También es factible económicamente, al tener un VAN positivo. Además, es un proyecto con altos beneficios sociales, ya que presenta importantes externalidades positivas, como por ejemplo, el hecho de que disminuir la contaminación ambiental se traduce en una reducción en los gastos públicos por enfermedades respiratorias.

*A mi pequeña gran familia,
gracias por siempre confiar en mí.*

Agradecimientos

Definitivamente extrañaré la facultad, su gente, sus espacios, el ambiente. Fue un período de mi vida que siento que lo disfruté lo que más pude, pero ha llegado a su término. Para abrir nuevas oportunidades y aventuras, que ojalá sean mejores y tan enriquecedoras como la recién cerrada.

Primero quisiera agradecer a mi familia, sobretodo a mi madre, por siempre ayudarme, confiar en mí, guiarme cuando más lo necesitaba. Por tener la difícil tarea de ser madre y padre a la vez, infinitas gracias. A mis tatas, que ojalá fueran eternos. A mis tíos, por siempre cubrirme y apoyarme en cada locura que se me ocurriera. A mi prima, por realmente ser un pilar fundamental en vida, por aquella vez de querer limpiarme el rimel corrido pero eran ojeras. A mi primo, por siempre apoyarme. Y finalmente a mi hermana, a mi hermana favorita, que sin ella realmente no hubiera podido terminar este trabajo de título.

Agradecer a Brillan3, a cada persona que partió en el grupo, a cada persona que paso por el grupo y a las que quedan, al final son la familia que elegí y que han aportado en diferentes formas a mi crecimiento como persona y gracia a ustedes la universidad fue una gran etapa. Una mención especial a Ignacio, Guillermo, Scarlett, Bruno y Nadia.

Santiago y Yonjairo, el término de la carrera no hubiera sido posible sin ustedes, sobretodo cuando entre a la especialidad, fueron y son un apoyo incondicional para mí y realmente me faltaría espacio para agradecer todo lo que han hecho por mí. También agradecer al team de mecánica, a las chiquillas Vicky O., Vicky C. y Camila que sin ellas mecánica hubiera sido menos entretenido. A ti Kidel, por creer más en mí, que yo misma y estar para mí en un período que lo necesitaba.

Agradecer a Artemisas, a cada gran mujer que conforma a Artemisas, que sin duda lo que formamos dentro de la facultad quedara para siempre, aunque hayamos salido o estemos lejos. Lejos es el mejor club social y deportivo que paso por la facultad.

También agradecer a cada integrante de Challengers F.C., por ser siempre la distracción al estudio y por mantenerme cuerda en esta pandemia, las risas nunca faltaron y nunca faltarán.

Y finalmente agradecer a cada persona que no alcanzo a mencionar aquí, pero me acuerdo de cada una de ellas y realmente no hubiera sido posible sin la ayuda de ustedes.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Alcances	3
2. Marco teórico	4
2.1. Energía geotérmica	4
2.1.1. Tectónica de placas	4
2.1.2. Tipos de recurso geotérmico por temperatura	6
2.2. Localidad de Liquiñe	7
2.2.1. Falla Liquiñe-Ofqui	9
2.3. Uso de leña en la zona	10
2.3.1. Comercio y producción de la leña	11
2.4. Calidad de la leña	12
2.5. Curva de secado	15
2.6. Energía consumida en el secado de madera	18
2.7. Secadores de leña	21
2.8. Antecedentes termodinámicos	23
2.8.1. Humedad absoluta (Ha)	23
2.8.2. Humedad específica	23
2.8.3. Humedad relativa (Hr)	23
2.8.4. Temperatura del bulbo húmedo	23
2.8.5. Temperatura del bulbo seco	23
2.8.6. Carta psicrométrica	24
3. Metodología	25
3.1. Caracterización de la fuente geotermal	25
3.2. Dimensionamiento de equipos	26
3.2.1. Intercambiador de calor	26
3.2.2. Ventilador	27
3.2.3. Cámara de secado	28
3.3. Estudio CFD dentro de la cámara de secado.	30

4. Resultados	31
4.1. Selección de equipos	31
4.1.1. Intercambiador de calor	31
4.1.2. Ventilador centrífugo	33
4.1.3. Bomba centrífuga	34
4.1.4. Cámara de secado	34
4.2. Energía consumida en el secado de leña.	37
4.3. Curva de secado obtenida	41
4.4. Programa secado	42
4.5. Layout del secador	43
4.6. Estudio CFD dentro de la cámara de secado	45
4.6.1. Modelo CAD	45
4.6.2. Mallado	47
4.6.3. Simulaciones	50
4.6.3.1. Eucalipto	51
4.6.3.2. Roble	56
4.6.4. Comparación de temperaturas de las maderas	61
5. Análisis económico	62
5.1. Inversión	62
5.1.1. Equipos	62
5.1.2. Cámara de secado	63
5.1.3. Extras	63
5.1.4. Resumen de inversión	64
5.2. Costos operacionales	64
5.3. Flujo de caja	66
5.4. Análisis de sensibilidad técnico y económico	68
5.5. Evaluación social del proyecto	69
6. Conclusiones y comentarios	71
6.1. Conclusiones	71
6.2. Comentarios	73
Bibliografía	74
Anexo A. Coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador	77
Anexo B. Pérdida carga de cámara de secado	79
Anexo C. Capacitancia de la cámara de secado	81
Anexo D. Calculo de coeficientes convectivos.	82

Índice de Tablas

2.1.	Tipos de recurso geotérmico [5].	6
2.2.	Datos de temperatura y humedad relativa año 2019.	8
2.3.	Poder calorífico para distintas especies con distintos contenidos de humedad. Fuente: Ministerio de Energía.	14
3.1.	Características de la fuente termal principal de termas Hipólito Muñoz.	26
3.2.	Resumen del dimensionamiento y características de la cámara de secado.	29
3.3.	Tiempos de simulación.	30
4.1.	Características intercambiador de calor.	32
4.2.	Características ventilador centrifugo.	33
4.3.	Características bomba hidráulica.	34
4.4.	Dimensiones materiales.	34
4.5.	Tabla resumen de los calores de la Fase I y II del secado de madera.	40
4.6.	Tabla resumen del calor y potencia necesaria para el proceso de secado, com- parado con la potencia y el calor entregado por la fuente termal de Hipólito Muñoz.	40
4.7.	Resultados de la curva de secado para el roble y eucaliptos.	41
5.1.	Valores de los equipos principales del proyecto.	62
5.2.	Costos de los materiales de construcción, mano de obra y montaje.	63
5.3.	Costos de piping e instrumentación.	63
5.4.	Resumen inversión del proyecto.	64
5.5.	Costos de energía para realizar un secado de roble.	64
5.6.	Costos de energía para realizar un secado de eucalipto.	65
5.7.	Costos de operacionales de un secado de roble y de la temporada.	65
5.8.	Costos de operacionales de un secado de eucalipto y de la temporada.	65
5.9.	Flujo de caja para un secador de leña de roble, con un horizonte de 10 años.	66
5.10.	Flujo de caja para un secador de leña de eucalipto, con un horizonte de 10 años.	67
5.11.	Indicadores económicos de los proyectos.	67
5.12.	Análisis de sensibilidad técnico, para distintas capacidades de carga de la cámara de secado.	68
5.13.	Análisis de sensibilidad económico por secado de roble, para distintas capaci- dades de carga de la cámara de secado.	68
5.14.	Análisis de sensibilidad económico por secado de eucalipto, para distintas capa- cidades de carga de la cámara de secado.	68
5.15.	Indicadores económicos de los proyectos.	70
A.1.	Propiedades fluidos.	77
B.1.	Resumen calculo de pérdida de carga ductos.	80
C.1.	Resumen propiedades materiales [22] [26] y CAP's obtenidos.	81
C.2.	Resumen CAP's maderas y totales.	81

D.1. Propiedades aire a $60^{\circ}C$	82
---	----

Índice de Ilustraciones

2.1.	La configuración tectónica de placas de tipos comunes de vulcanismo. Los volcanes compuestos se forman en las zonas de subducción, ya sea en los límites convergentes océano-océano (izquierda) o en los límites convergentes océano-continente (derecha).	5
2.2.	1. Dorsales oceánicas 2. División intercontinental 3. Arcos de islas 4. Margen continental activo 5. Cuencas en retroceso 6. Basaltos de islas oceánicas. 7. Actividad intercontinental.	5
2.3.	Localidad de Liquiñe y sus alrededores, Región de los Ríos. Fuente: Google Maps.	7
2.4.	Climograma, izquierda. Diagrama de temperatura, derecha. Fuente: Climate-Data.org.	8
2.5.	Datos históricos de la zona de Liquiñe. Fuente: Climate-Data.org.	8
2.6.	Trazado del sistema de falla Liquiñe-Ofqui en color en amarillo, en cuadro rojo la zona de Liquiñe.	9
2.7.	Gráfico de material particulado fino MP2,5 Fuente: Estación de monitoreo de la calidad del aire, Valdivia, SINCA.	10
2.8.	Comparación por tipo de episodio crítico año 2019, frente a promedios de episodios de los últimos tres años (2016 a 2018). Fuente: GEC 2019.	11
2.9.	Estructura de la leña y humedad presente en su estructura. Fuente: Manual de técnicas para el secado y monitoreo de leña.	13
2.10.	Proceso de secado de leña. Fuente: Manual de técnicas para el secado y monitoreo de leña.	13
2.11.	Curvas de humedad de equilibrio de la madera. Fuente: Secado de madera al aire.	14
2.12.	Curvas de secado estándar.	15
2.13.	Curvas de velocidad de secado artificial de leña de roble y eucaliptos, astillas largas (1,0 [m]) y astillas cortas (0,33 [m]).	16
2.14.	Vista en corte mostrando posición del ventilador respecto a castillo de leña. Las flechas indican dirección del aire.	21
2.15.	Esquema del principio de funcionamiento del secado mediante aire forzado caliente con retorno.	22
2.16.	Dos capas de leña bajo madera aserrada en una cámara de secado artificial convencional de un aserradero en Finlandia [25].	22
2.17.	Carta psicrométrica.	24
3.1.	Diagrama de factor de corrección para flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado [22].	27
3.2.	Plano de la cámara de secado y la distribución de atriles.	29
4.1.	Curva característica del ventilador, con punto de operación en la cámara de secado.	33
4.2.	Red de resistencias térmicas para las paredes de la cámara de secado.	35
4.3.	Ejemplo de atriles metálicos utilizados en España [25].	36

4.4.	Evolución de los kilos de vapor por kilo de aire en la entrada y salida de la cámara de secado en la carta psicrométrica.	39
4.5.	Curva de secado obtenida.	41
4.6.	Programa de secado para el roble.	42
4.7.	Programa de secado para el eucalipto.	42
4.8.	Layout de la planta de secado.	43
4.9.	Vista de perfil de los intercambiadores de calor y sus conexiones.	44
4.10.	Modelo CAD de la cámara, en la izquierda se observa la vista isométrica del frente y en la derecha la vista isométrica posterior, en verde el cuerpo de la madera.	45
4.11.	Modelo CAD de la cámara, se observa la entrada del aire por el extremo izquierdo y la salida del aire por el extremo derecho.	45
4.12.	Modelo CAD de la madera, se observa el frente de la madera a la izquierda y a la derecha la vista isométrica.	46
4.13.	Características de mallado.	47
4.14.	Características del mallado refinado de las paredes y cielo.	48
4.15.	Mallado de la cámara de secado.	48
4.16.	Mallado de la madera, a la izquierda un corte transversal del cuerpo y el frente del cuerpo con el mallado.	49
4.17.	Detalle del mallado inferior de la madera.	49
4.18.	Temperatura dentro de la cámara de secado a 1 - 5 - 33 - 68 horas respectivamente.	51
4.19.	Comportamiento de la velocidad a 1 - 5 - 33 - 68 horas respectivamente.	51
4.20.	Evolución de la temperatura en la madera para 1 - 5 - 33 - 68 horas de secado respectivamente.	52
4.21.	Temperatura al interior de la cámara para 68 horas de secado, en la izquierda el plano horizontal central de la cámara y la derecha un plano vertical central.	53
4.22.	Evolución de la velocidad dentro de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].	53
4.23.	Evolución de la velocidad en el plano de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].	54
4.24.	Evolución de la temperatura en la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].	54
4.25.	Evolución de la temperatura en los distintos planos de la madera, de arriba hacia abajo corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].	55
4.26.	Temperatura dentro de la cámara de secado a 1 - 5 - 50 - 101 de secado horas respectivamente.	56
4.27.	Comportamiento de la velocidad a 1 - 5 - 50 - 101 horas de secado respectivamente.	56
4.28.	Evolución de la temperatura en la madera para 1 - 5 - 50 - 101 horas de secado respectivamente.	57
4.29.	Temperatura al interior de la cámara para 101 horas de secado, en la izquierda el plano horizontal central de la cámara y la derecha un plano vertical central.	58
4.30.	Evolución de la velocidad dentro de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].	58
4.31.	Evolución de la velocidad en el plano de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].	59
4.32.	Evolución de la temperatura en la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].	59

4.33.	Evolución de la temperatura en los distintos planos de la madera, de arriba hacia abajo corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].	60
4.34.	Comparación de las temperaturas del cuerpo de madera para un secado de 5 horas, con una velocidad del aire de entrada de 2,5 [m/s], arriba eucalipto y abajo roble.	61
5.1.	Hospitalizaciones por causas respiratoria Región de Los Ríos. Chile 2017 - 2019. Fuente: Campaña de Invierno 2019, Ministerio de Salud.	69
5.2.	Árbol de problemas, de efectos y causas de una alta tasa de enfermedades, en rojo la causa a resolver.	70
B.1.	División de ductos.	80

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

La energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la tierra, este calor es generado por la desintegración radiactiva en la corteza terrestre, el calor remanente de la formación de la tierra y el aporte solar que puede ser recuperado y explotado por el hombre. Es una energía renovable, “continua” y confiable, que no depende de las condiciones climáticas de la zona, requiere bajos costos de operación y mantenimiento además de poseer un alto factor de planta sobre el 90 % [1].

El gradiente geotérmico promedio de la tierra es aproximadamente 25 - 30 [°C/km], pero existen lugares en los cuales el gradiente térmico es mucho más alto debido a ciertas estructuras geológicas, como por ejemplo vulcanismo. Debido a esto, la capacidad geotermoeléctrica mundial se encuentra instalada mayoritariamente en el “Cinturón de fuego del Pacífico”, siendo las mayores potencias para fines del 2019 los países de Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía y Nueva Zelanda. La capacidad de generación de energía geotérmica total instalada a finales del año 2019 es de 15.406 MW [2].

Chile forma parte del “Cinturón de Fuego del Pacífico”, estando sobre la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, formando una zona de subducción. Debido a estas características geológicas se manifiestan numerosas termas, fumarolas, géiseres y más de 90 volcanes activos. Estas características permitieron que Chile posea la primera planta geotermal de Sudamérica, Cerro Pabellón, que se ubica en el desierto de Atacama, comuna de Ollagüe con una capacidad de 48 MW, que fue inaugurada en septiembre de 2017 y actualmente se encuentra en construcción la ampliación de la planta, que aumentaría la producción en 33 [MW], lo que daría un total de 81 [MW]. A pesar del alto potencial del país en la explotación de esta energía solo corresponde al 0,2 % de nuestra capacidad instalada y genera el 0,4 % del total de energía generada en la matriz energética [3].

Dentro de los usos de la energía geotérmica se encuentran: calefacción, usos industriales, generación de electricidad Las aplicaciones directas, como calefacción y usos industriales, tienen el atractivo de no estar restringidas a zonas volcánicas ya que se puede lograr con temperaturas del subsuelo menores a 150 °C. Actualmente unas de las principales aplicaciones de uso directo es el uso de bombas de calor.

1.2. Motivación

Buscando potenciar el uso de nuevas energías, de acuerdo a las políticas públicas del país y el mundo, disminuir el alto nivel de contaminación ambiental de la región de Los Ríos, que se debe mayoritariamente al consumo de leña en el sector residencial. Innovar en nuevas tecnologías para el secado de leña, aprovechando una fuente de poder común. De acuerdo a esto se plantea el estudio de factibilidad técnica y económica para un secador de leña con fuentes geotermales de la zona. Aprovechando la particularidad geológica de la zona, ya que por la falla Liquiñe-Ofqui la región posee una gran potencial térmico que no está siendo aprovechado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de título es estudiar la factibilidad técnica y económica de un secador de leña de roble y eucaliptos, alimentado con energía geotérmica de una fuente termal en la Región de los Ríos.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Estimar la capacidad energética de la fuente geotermal.
2. Obtener un secador de leña de acuerdo a la capacidad térmica que puede entregar la fuente geotermal, para tiempos de secado aceptados dentro de la literatura para secadores artificiales.
3. Dimensionar, seleccionar equipos y materiales necesarios para el funcionamiento de la planta de secado de leña.
4. Analizar el comportamiento de la temperatura al variar la velocidad del aire en el secado de leña.
5. Evaluación económica del proyecto.
6. Evaluación social del proyecto.

1.4. Alcances

Los alcances de este trabajo de título son:

- Caracterizar la fuente energética, que será desde el enfoque fluidodinámico de la fuente termal. No se realiza estudio geológico de las diferentes fuentes termales.
- Los componentes de la cámara de secado son intercambiadores de calor, bomba centrífuga, ventilador centrífugo y la cámara de secado como tal. Se deben secar dos tipos de maderas, una exótica y una nativa. La energía necesaria para que la madera sea secada, se realiza a través de un calculo analítico y se verifica si la fuente termal es capaz de secar un volumen de leña en un tiempo determinado. El comportamiento del secado es comprobado con una modelación dentro de la cámara de secado.
- Para el estudio económico se consideran los equipos relacionados al proceso de secado de leña, tales como bombas, intercambiadores de calor y ventiladores, además del costo de infraestructura e instalación. Elementos secundarios como válvulas, sensores u otro similar, no se considerarán. Si se considera la compra de los controladores fundamentales del proyecto.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Energía geotérmica

Según Stacey y Lopéz (1988), el flujo calórico total de la tierra se estima en 42×10^{12} [W], el cual se puede transmitir por conducción, convección y radiación. De ese total, 8×10^{12} [W] proviene de la corteza terrestre, que representa el 2% del volumen total de la tierra y es donde se encuentran los isótopos radiactivos de larga vida, tales como uranio (U^{238} , U^{235}), torio (Th^{232}) y potasio (K^{40}), que generan de forma continua la mayor cantidad de calor en la litosfera. Luego 32×10^{12} [W] proviene del Manto, que es 82% del volumen total y finalmente $1,7 \times 10^{12}$ [W] proviene del núcleo, que es 16% del volumen total de la tierra.

Se estima que el contenido total de calor de la Tierra, calculado a partir de una temperatura ambiente media estimada en 15°C es del orden de $12,6 \times 10^{24}$ MJ y que el calor contenido en la corteza es de $5,4 \times 10^{21}$ MJ. Aunque la temperatura del manto ha disminuido en unos $300 - 350^{\circ}\text{C}$ en 3 mil millones de años, quedando en su base unos 3.500°C .

A pesar de que la tierra se está enfriando lentamente, la energía térmica de la Tierra es abundante. Este calor geotérmico produce volcanes, áreas termales, fumarolas, divide y mueve placas tectónicas, entre otros procesos geológicos.

2.1.1. Tectónica de placas

Esta división y movimiento de placas tectónicas tiene una relación estrecha con los recursos geotérmicos. La capa superior de la Tierra es la litósfera, que contiene la corteza y el nivel superior del manto, se comporta de una manera rígida, teniendo un espesor entre los 80 y 200 km en áreas continentales [4]. Luego le sigue la astenósfera, con un espesor de 200 a 300 km, la cual no es tan “rígida”, pues se comporta en ciertos procesos como un fluido. . Esto presenta un fenómeno de convección del magma, que transporta grandes cantidades de energía térmica hacia partes superficiales de la corteza.

Este movimiento se asemeja a una correa transportadora, sube material del manto a lo largo de dorsales medio-oceánicas creando corteza oceánica y por otro lado baja material hasta las fosas submarinas, donde se produce subducción. En la Figura 2.1 se observan distintos puntos de la corteza terrestre, pudiendo clasificarse el tipo de vulcanismo de acuerdo a donde se desarrolla, que puede ser en placas convergentes, divergentes e intraplaca.

- Placas divergentes: la fragmentación continental estira y adelgaza la corteza, la roca fundida sube desde la astenósfera e inicia una cuenca oceánica en expansión. Hay del tipo apertura meso-oceánica (Islandia) y apertura continental (placa movimiento lateral, Norte América). Son de serie Toleítica que es típica de dorsales oceánicas, que corresponde al punto 1 en la Figura 2.2.
- Placas convergentes: son las zonas de subducción, hay hundimiento de la placa oceánica por debajo placa continental (oceánica - continental) (Sudamérica y Centroamérica) que genera una cadena volcánica continental como en el caso de Chile. Oceánica - oceánica es otra zona de subducción en arcos de islas como Nueva Zelanda, Japón, Filipinas. Y por último continental - continental, que se puede encontrar en Italia, Grecia y Turquía. De la Figura 2.2 corresponde al punto 3 y 4.
- Intraplaca: hay del tipo intraplaca oceánica y intraplaca continental (rift) que es el caso de Etiopía. De la Figura 2.2 corresponde al punto 5 y 2.

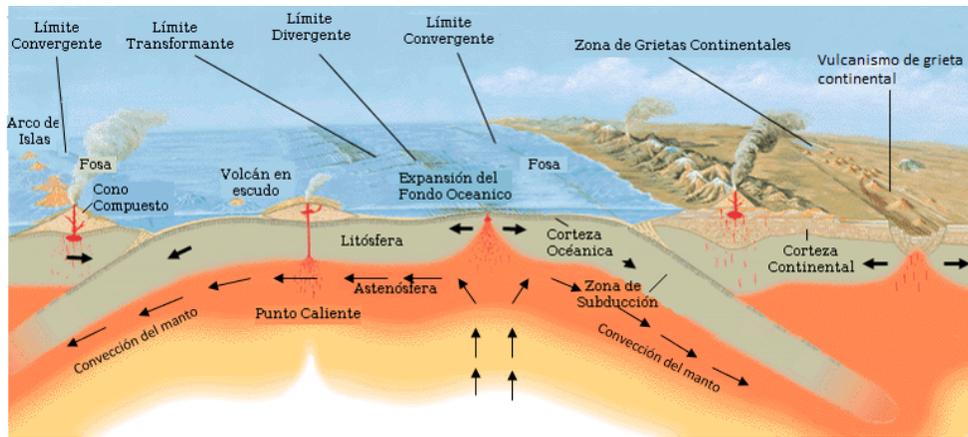


Figura 2.1: La configuración tectónica de placas de tipos comunes de vulcanismo. Los volcanes compuestos se forman en las zonas de subducción, ya sea en los límites convergentes océano-océano (izquierda) o en los límites convergentes océano-continente (derecha).

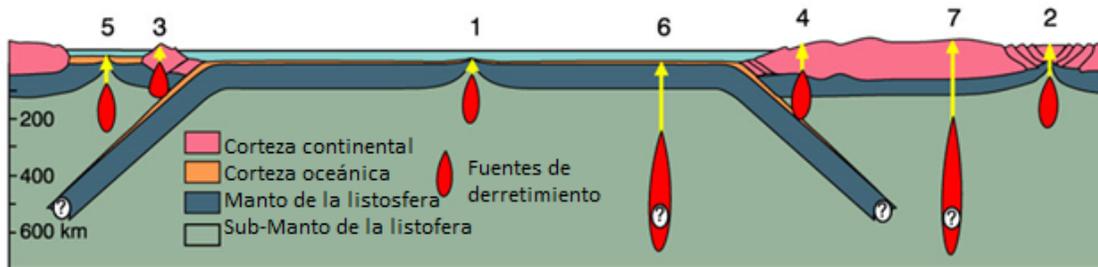


Figura 2.2: 1. Dorsales oceánicas 2. División intercontinental 3. Arcos de islas 4. Margen continental activo 5. Cuenclas en retroceso 6. Basaltos de islas oceánicas. 7. Actividad intercontinental.

2.1.2. Tipos de recurso geotérmico por temperatura

Los recursos geotérmicos se clasifican según la temperatura y las propiedades termodinámicas de los fluidos. Una de las propiedades es la entalpía, que es la cantidad de energía que puede intercambiar el fluido con su entorno. Hay tres tipos de clasificaciones, alta, media y baja entalpía, en la Tabla 2.1 se muestran los rangos de temperatura y sus principales usos.

Tabla 2.1: Tipos de recurso geotérmico [5].

Tipo de recurso	Temperatura	Usos
Alta	$>180^{\circ}\text{C}$	producción de electricidad
Media	$100 - 180^{\circ}\text{C}$	secado de productos agrícolas, en la producción de electricidad por fluidos binarios
Bajo	$<100^{\circ}\text{C}$	usos directos de climatización, agua caliente o invernaderos

Como se mencionó anteriormente Chile posee la primera planta geotérmica para la producción de electricidad en Sudamérica, aprovechando un recurso de alta entalpía. En el caso de recursos de baja entalpía, se tienen varias investigaciones y proyectos funcionando a lo largo del país, con principal foco en la zona sur. Algunos ejemplos de esto son:

- Termas de Puyehue Wellness & Spa Resort: ubicado en la X región, utiliza la energía geotérmica de la temperatura de sus aguas y el excedente existente de entre 3 a 8 litros de agua termal por segundo, fue aprovechado para calefaccionar las habitaciones y tener agua caliente sanitaria dentro del complejo. Lo que significó un ahorro en combustibles fósiles de 85.000.000 [CLP] anuales [6].
- Liceo Bicentenario Altos de Mackay de la ciudad de Coyhaique: el liceo que cuenta con más de 300 alumnos, se pudo calefaccionar aproximadamente 600 $[\text{m}^2]$, cerca de 11 salas con bombas de calor geotérmicas. Con la perforación de un pozo para captar agua subterránea, con un sistema abierto, donde se utiliza directamente las aguas del pozo extrayéndoles temperatura, pasando por la bomba de calor y finalmente se devuelve más fría al pozo. Mejorando las condiciones de confort térmico de los estudiantes, reemplazando una caldera a leña por energía geotérmica que es una energía limpia, eficiente y sin emisiones de material particulado [7].
- Condominio Frankfurt: ubicado en la ciudad de Temuco, es la primera central distrital geotérmica funcionando en Chile, la cual abastece de agua caliente para calefacción y agua caliente sanitaria a 34 viviendas. A través de una central térmica en base a bombas de calor satisfacen 27 $[\text{kWh}/\text{m}^2]$ año por concepto de calefacción, gracias a una construcción de las viviendas con un diseño estándar Passivhaus (envolvente térmica, hermeticidad, ventanas passivhaus, diseño libre de puentes térmicos y ventilación con recuperación de calor) que permite un 87% menos de consumo que un hogar común y corriente [8].
- Centro de Educación y Trabajo (CET) Valle Verde de Puerto Aysén: de acuerdo a la investigación de “EVALUACIÓN DEL USO DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN INVERNADEROS” [9], se realizó el proyecto de producir distintos tipos de lechuga, tomate, tomate cherry, zapallo italiano, rábanos y cilantro todo el año.

El proyecto fue calefaccionar 1.000 [m²] de invernaderos con bombas de calor y colectores horizontales, que de acuerdo a la investigación fueron factibles técnicamente, pero no era muy económicamente rentable para todos las verduras a largo plazo, por lo cual necesitaba financiamiento. El cual finalmente fue desarrollado gracias al Fondo de Acceso a la Energía 2016 del Ministerio de Energía [10].

2.2. Localidad de Liquiñe

Ubicada en la XIV Región de los Ríos, camino al Paso Internacional Carirriñe con Argentina, se encuentra la localidad de Liquiñe en el valle cordillerano formado por el río Liquiñe en la comuna de Panguipulli. Se puede observar el mapa de la zona en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Localidad de Liquiñe y sus alrededores, Región de los Ríos.
Fuente: Google Maps.

Liquiñe (ojos lagrimosos en mapudungún), se caracteriza por su artesanía, en el año 2018 fue declarada Ciudad Mundial De La Artesanía por el World Crafts Council [11], además de tener gastronomía mapuche y el desarrollo de actividades de recreación y aventura. Liquiñe cuenta con la mayor concentración de centros termales en la región, debido a la intensa actividad termal que produce la falla Liquiñe-Ofqui que se encuentra bajo esta zona. Actualmente sólo se da uso turístico a estas fuentes termales.

La zona tiene un clima generalmente cálido y templado, con una temperatura media anual de 11,5°C, con un total de 1.903 mm de lluvias durante el año. En la Figura 2.4 izquierda se observa que el mes con menor precipitación es febrero con un promedio de 54 mm y el mes con mayor precipitación es julio, con un promedio de 304 mm. En el caso de la temperatura, el mes más caluroso es enero con un promedio de 17°C y el mes más frío es julio con una temperatura cercana a los 6°C [12].

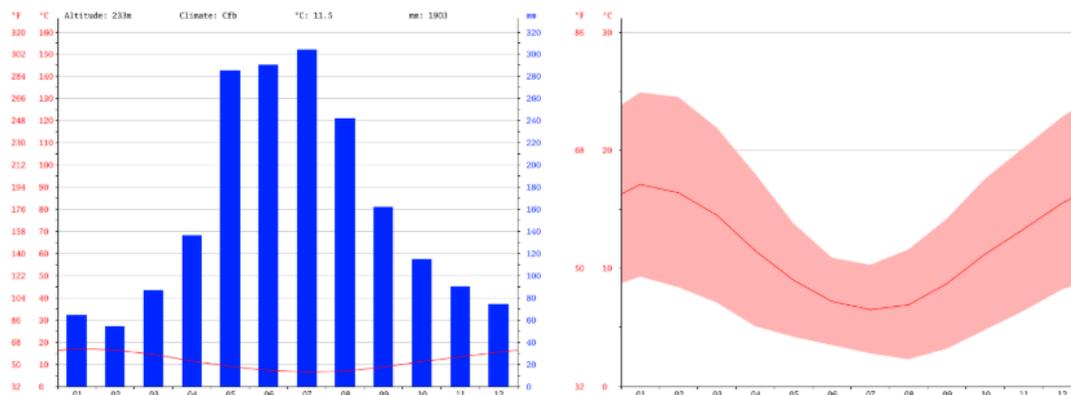


Figura 2.4: Climograma, izquierda. Diagrama de temperatura, derecha.
Fuente: Climate-Data.org.

De acuerdo a los datos históricos de la Figura 2.5, la diferencia de precipitaciones entre los meses más secos y más húmedos es de 250 mm. La variación en las temperaturas durante todo el año es de 10,6°C [12].

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	17.1	16.4	14.5	11.5	9	7.2	6.5	6.9	8.7	11.2	13.3	15.5
Temperatura min. (°C)	9.3	8.4	7.1	5.1	4.2	3.5	2.8	2.3	3.2	4.8	6.4	8.2
Temperatura máx. (°C)	24.9	24.5	21.9	18	13.8	10.9	10.3	11.6	14.2	17.6	20.2	22.8
Precipitación (mm)	64	54	87	136	285	290	304	242	162	115	90	74

Figura 2.5: Datos históricos de la zona de Liquiñe. Fuente: Climate-Data.org.

En la siguiente Tabla 2.2 se muestran los datos promedios de temperatura y humedad relativa por mes del año 2019.

Tabla 2.2: Datos de temperatura y humedad relativa año 2019.

	En	Feb	Mar	Abril	Mayo	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp [°C]	16,48	19,82	14,12	11,25	7,79	6,71	5,07	6,18	7,97	10,01	13,62	15,09
Hr [%]	68,92	67,59	71,07	82,44	87,71	88,02	90,03	81,78	72,51	71,47	72,11	70,79

2.2.1. Falla Liqueñe-Ofqui

Los sistemas geotermales y volcánicos del sur de Chile están principalmente controlados por el sistema de falla Liqueñe-Ofqui. Esta falla es el resultado de la subducción de las placas Sudamericana y Nazca desarrollando una zona de falla intra-arco con una extensión de 1.200 km de largo, entre los 38°S y 47°S de latitud (desde el istmo de Ofqui hasta Liqueñe), como se observa en la Figura 2.6 [13]. Dichos sistemas de fallas intra-arco ayudan a mejorar la permeabilidad de la corteza que albergan redes de fractura por fallas adecuadas para depósitos geotérmicos, mineralización hidrotérmica y/o actividad volcánica [14].

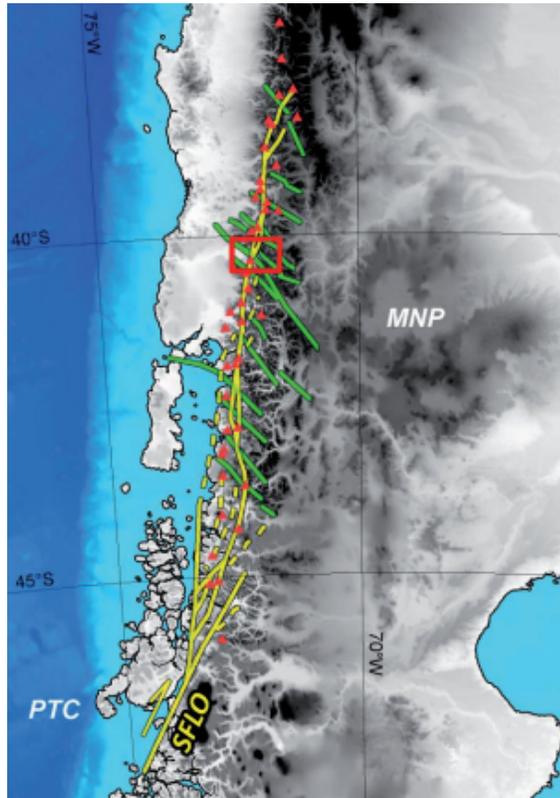


Figura 2.6: Trazado del sistema de falla Liqueñe-Ofqui en color en amarillo, en cuadro rojo la zona de Liqueñe.

2.3. Uso de leña en la zona

La leña es un combustible arraigado en la cultura del centro sur del país. El uso de la leña es la primera opción para los hogares a la hora de calefaccionar y cocinar alimentos, si se considera de la región de O'Higgins a la Región de Aysén, que concentra el 36 % de la población nacional, el 74 % de los hogares consume leña [15]. En el caso particular de la región de los Ríos, el 94 % de los hogares utilizan leña como fuente de energía térmica, consumiendo al año un total de 1,5 millones de $[m^3]$ de leña, con alrededor de un 55 % proveniente de bosques nativos. Además el mercado de la leña mueve más de \$38 mil millones de pesos anuales, generando más de 15.000 puestos de trabajo [16].

De la leña consumida en la zona solo el 4 % es leña certificada, leña que cumple con los estándares mínimos de calidad. El 96 % restante en su mayoría es leña húmeda que es la principal causa de contaminación atmosférica en la región. Esta contaminación es potenciada por la baja eficiencia, antiguas tecnologías de los calefactores y una mala aislación de las viviendas. Esta contaminación atmosférica está compuesta por material particulado respirable (PM10, PM2.5) del cual el 90 % viene de la quema residencial de leña y en episodios críticos durante el año, sobrepasan sus concentraciones exigidas en las normas de calidad ambiental [17]. En la Figura 2.7 se observa la cantidad de material particulado promedio mensual en la ciudad de Valdivia en los años 2018 y 2019, alcanzando *peak* de 80 $[ug/m^3]$ en el mes de junio para el año 2018 y 65 $[ug/m^3]$ en el mes de agosto del año 2019 [18].

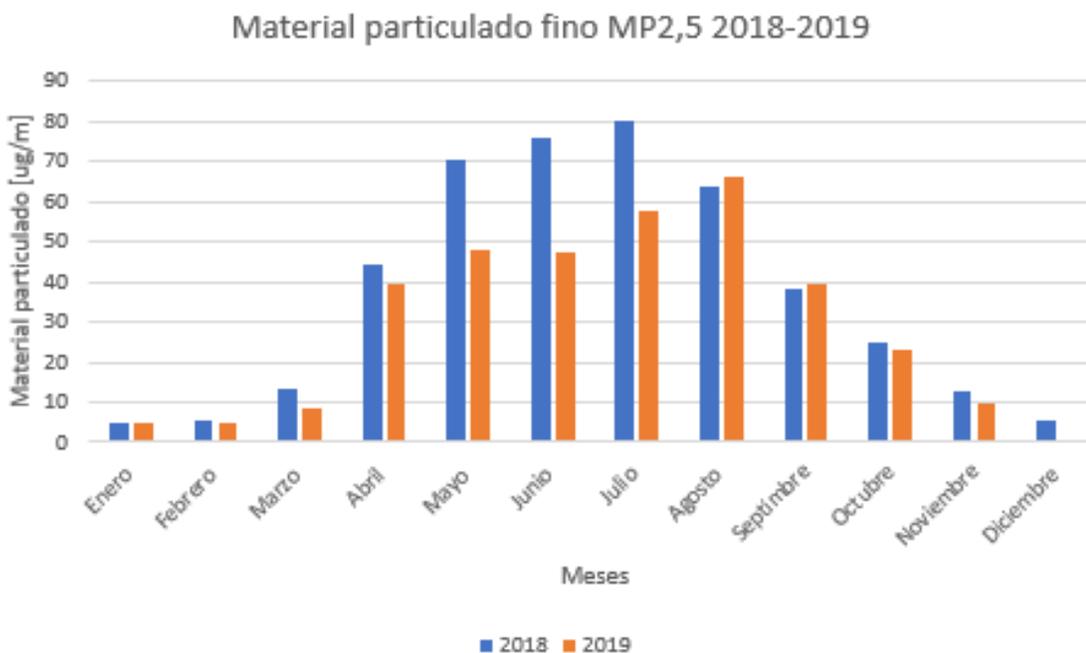


Figura 2.7: Gráfico de material particulado fino MP2,5 Fuente: Estación de monitoreo de la calidad del aire, Valdivia, SINCA.

De acuerdo a estos datos, en la Figura 2.8, se presentan la cantidad de episodios críticos de contaminación. Alerta ambiental se considera cuando las concentraciones se encuentran entre 80 - 109 $[ug/m^3]$; preemergencia cuando las concentraciones se encuentran entre 110 - 169 $[ug/m^3]$.

Y por último, emergencia con concentraciones mayores o iguales a 170 [ug/m³]. Los episodios de preemergencia ambiental observados durante el 2019 fueron 25, valor inferior en un 31 % frente al promedio de preemergencias observadas durante los últimos tres años (2016 a 2018).

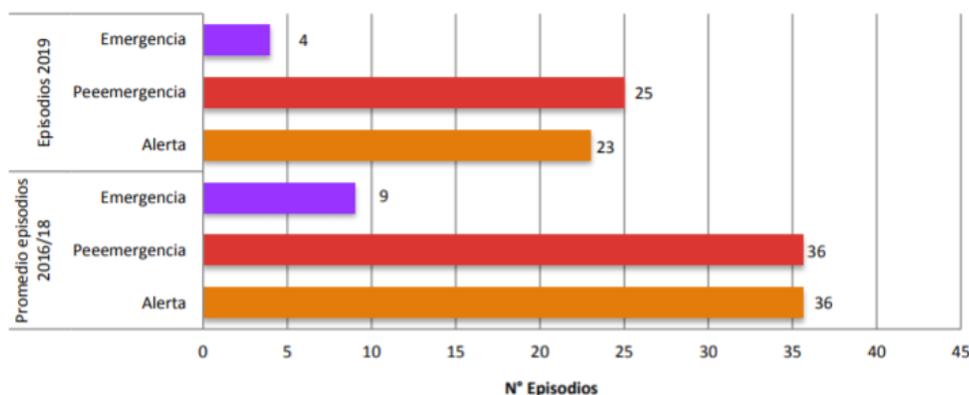


Figura 2.8: Comparación por tipo de episodio crítico año 2019, frente a promedios de episodios de los últimos tres años (2016 a 2018). Fuente: GEC 2019.

2.3.1. Comercio y producción de la leña

La fase de producción de la leña se estima a 5,2 meses de trabajo, donde los meses de mayor venta son de enero a abril con un 50,4% de ventas, le siguen los meses de septiembre a diciembre con un 29,9% [15] a un precio de venta mínimo promedio de \$25.000 por [m³ estéreos] de leña. El término volumen estéreo, en el rubro de la leña, considera el volumen de aire existente entre las piezas de la leña apilada, en este trabajo de título [m³ estéreos] será igual a [m³]. Dentro de las especies nativas más comercializadas son el roble y el ulmo. La especie exótica preferida por los consumidores es el eucalipto, en la Región de los Ríos [19].

Un bajo porcentaje de volumen de este mercado lleva planes de manejo forestal, aprobado por la Corporación Nacional Forestal, según el Decreto Ley N° 701 (1974) y su correspondiente reglamento técnico D.S. N° 259 (1980), lo que conlleva una degradación a los bosques nativos de la zona. Los productores de la zona, el 85% en promedio utiliza como método de cosecha la extracción selectiva (floreo) y el raleo. El porcentaje restante emplea tala rasa en terrenos que serán utilizados para otras actividades productivas, como la ganadera o agrícola, con las restricciones impuestas por la regulación. Para grandes productores, el negocio de la leña es un ingreso adicional, ya que estos tienen como objetivo obtener madera de mayor valor, como lo es la madera aserrada y pulpable [25].

Además, el mercado tiene sistemas productivos ineficientes, hay altos precios en transporte (estos aumentan al comercializar leña verde ya que posee más volumen que leña seca), bajo acceso a tecnologías, lo que en general se traduce en economías de “subsistencias”. Esto conlleva que producir leña de calidad, que cumpla las mínimas certificaciones, sea poco atractivo para los productores. Al año 2017, según un catastro del SERNAC, solo 16,7% de los proveedores de leña están adheridos al sistema nacional de certificación de leña (SNCL) y actualmente hay 23 comerciantes que cuentan con esta.

2.4. Calidad de la leña

La leña se puede clasificar de acuerdo a su contenido de humedad. La leña seca es aquella que tiene un contenido de humedad menor o igual al 25 % en base seca, según la Norma INN Nch2907/2005. Cuando la leña contiene una humedad entre un 25 % y un 30 % entra en la categoría de semi-húmeda y cuando es mayor al 30 % es leña húmeda o verde. Estas dos últimas son un producto de mala calidad, ya que la mitad del calor se pierde en evaporar el agua que contiene la leña, además de ser muy contaminante, por lo que el secado de leña es primordial para que el producto sea más eficiente y menos contaminante.

La leña esta compuesta por células transversales y longitudinales que le otorgan rigidez y fortaleza, a esto se le llama tejido leñoso. Un árbol vivo transporta gran cantidad de agua por el tejido, el cual se encuentra de tres formas [16]:

- Agua libre, X_l : ocupa las cavidades celulares. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros. Al comenzar el proceso de secado, el agua libre se va perdiendo por evaporación. Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Al llegar a este punto, la madera estará en lo que se denomina “punto de saturación de las fibras”, que corresponde a un contenido de humedad variable cercano al 30 %. Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes celulares están completamente saturadas de agua y sus cavidades vacías.
- Agua ligada o de impregnación o enlazada, X_i : es el agua que se encuentra en las paredes celulares, su existencia se debe a la naturaleza higroscópica de la madera. Durante el secado de la madera, cuando esta ha perdido su agua libre por evaporación y continúa secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio con la humedad ambiente, la cual depende de la estación de año. Es por ello, que la madera secada al aire libre solo puede alcanzar estos valores de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, se debe realizar un secado artificial para eliminar el resto del agua de saturación.
- Agua de constitución: Es el agua que forma parte de la materia celular de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implicaría la destrucción parcial de la madera.

Definiendo las variables del tipo de humedad, siendo $X\%$ la humedad total la cual se define en base seca, mediante la siguiente ecuación:

$$X = X_l + X_i \quad (2.1)$$

$$X = \frac{P_h - P_o}{P_o} \cdot 100(\%) \quad (2.2)$$

Donde:

P_h : peso de la madera húmeda.

P_o : peso de la madera totalmente seca.

En la Figura 2.9 se observa la estructura de la madera, tanto macro como celular (A y B) respectivamente y donde se encuentra los tipos de humedad dentro de las células de la madera (C). Para secar la leña se debe eliminar el agua libre celular y parte de del agua de impregnación. En la Figura 2.10, se observa el camino de liberación de agua de la madera, pasando por el punto de saturación de las fibras (PSF), donde se alcanza la saturación del agua para llegar al 25 % o menos de humedad y obtener leña seca.

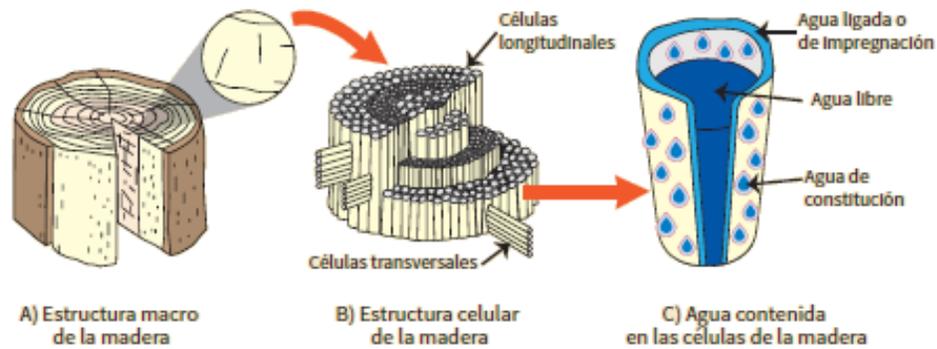


Figura 2.9: Estructura de la leña y humedad presente en su estructura. Fuente: Manual de técnicas para el secado y monitoreo de leña.



Figura 2.10: Proceso de secado de leña. Fuente: Manual de técnicas para el secado y monitoreo de leña.

Después de cortar un árbol y hacerla leña, la madera queda expuesta a las condiciones meteorológicas de la zona, en particular a la humedad. Si la madera queda protegida de la lluvia, no esta en contacto con el suelo o con agua en estado líquido, la madera lentamente comenzará a perder agua. Esta avanzará en su secado hasta llegar a una humedad de equilibrio, que corresponde a la humedad relativa del aire ambiente. En la Figura 2.11, se puede ver que a una humedad relativa del aire del 100 %, la madera alcanza una humedad de equilibrio aproximadamente del 30 %, el cual es punto de saturación de las fibras. También se puede observar que para una humedad relativa dada, la humedad de equilibrio disminuye con la temperatura.

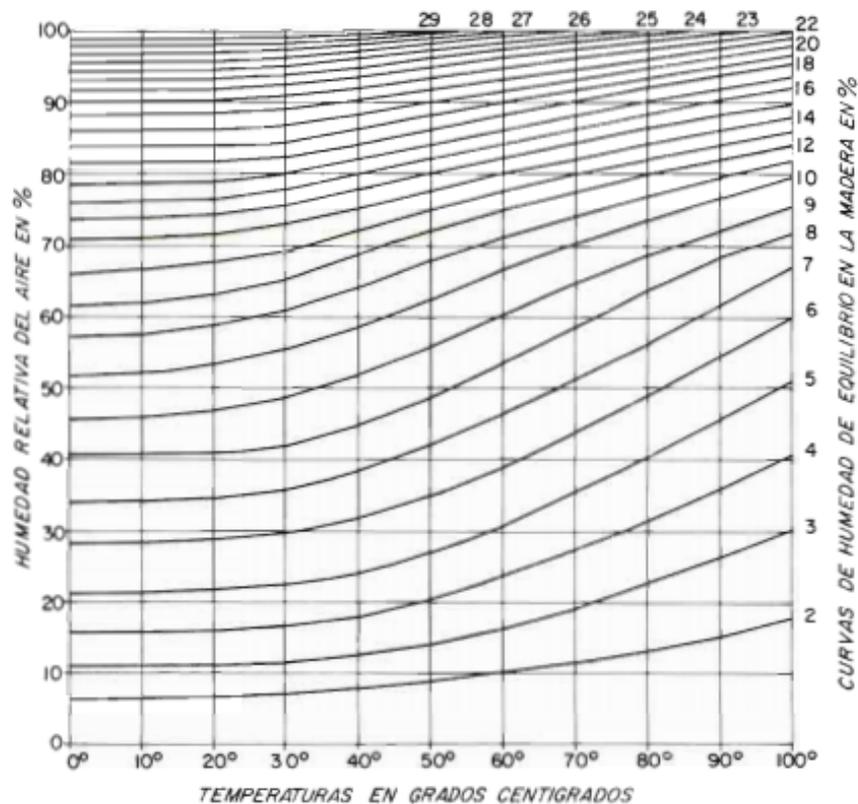


Figura 2.11: Curvas de humedad de equilibrio de la madera. Fuente: Secado de madera al aire.

Otro factor que influye en el secado de leña es la densidad de esta, la cual varía según la especie. Mientras más densa una madera mayor es su poder calorífico y menos agua contiene, pero, se demora más en secarse. La leña de roble, coihue, canelo y pino, se seca más rápido que la leña de luma, ulmo y trevo, puesto que éstas últimas son maderas más densas. En la Tabla 2.3, se expone el poder calorífico de diferentes especies.

Tabla 2.3: Poder calorífico para distintas especies con distintos contenidos de humedad. Fuente: Ministerio de Energía.

Poder calorífico neto [MJ/kg]								
Humedad [%]	Roble	Coigüe	Lingue	Eu Nitens	Eu Globulus	Aromo	Radal	Ulmo
18	16,58	14,99	15,81	16,12	14,56	15,78	16,8	15,3
25	14,96	13,51	14,26	14,54	13,11	14,23	15,16	13,78
33	13,1	11,8	12,47	12,73	11,45	12,45	13,28	12,05

2.5. Curva de secado

El proceso de secado de un cuerpo o sustancia, consiste en remover la humedad a través de transferencia de calor y masa. La transferencia de calor ocurre cuando el medio le entrega de calor al cuerpo y debido a esta transferencia el cuerpo pierde humedad, lo que provoca una transferencia de masa al medio. Las formas más usuales de secado es utilizar aire caliente forzado sobre el cuerpo, para evaporar el líquido del interior, que en general es agua. En la industria se utiliza el secado de cereales, frutas y verduras para alcanzar entre el 12-5 % de agua dependiendo el producto.

La velocidad de secado, que es la pérdida de humedad del sólido por unidad de tiempo, se puede determinar con el contenido de humedad libre en función del tiempo. Para medir esta humedad libre, la manera más usual es pesar la muestra al inicio del proceso de secado y luego ir midiendo a intervalos regulares esta variable, obteniendo así una curva de humedad versus tiempo, como se muestra en la Figura 2.12.

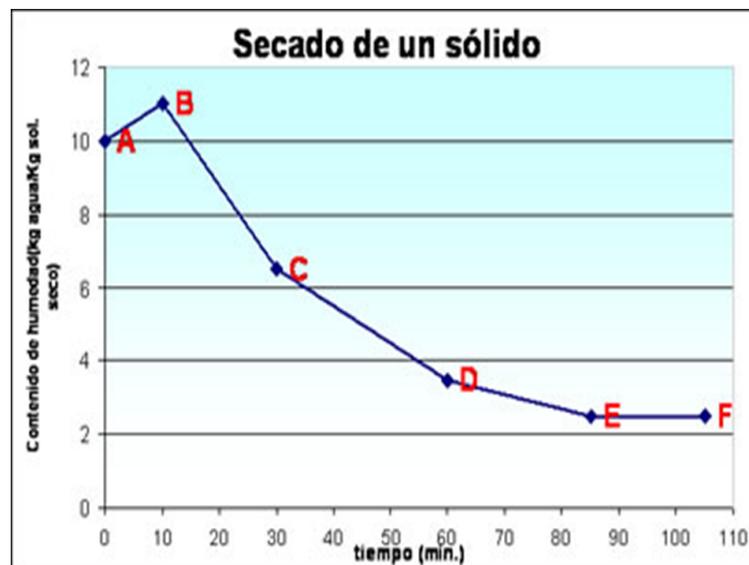


Figura 2.12: Curvas de secado estándar.

En la fase inicial del secado, el cuerpo se pone en contacto con el fluido caliente, el cual absorbe este calor y aumenta su temperatura hasta la fijada para el secado. Al mismo tiempo, el agua comienza a evaporarse y el cuerpo empieza a enfriarse. Después de la fase inicial, las velocidades de calentamiento y enfriamiento se igualan y la temperatura del cuerpo que se está secando se estabiliza. Este período de fase inicial se muestra en los segmentos AB de las Figura 2.11. Si el cuerpo inicial está calentado inicialmente a una temperatura mayor a la del secado esta se enfriará siguiendo el segmento A'B'. En el punto B la temperatura se estabiliza y permanecerá constante mientras la superficie del cuerpo permanezca una capa constante de humedad.

Entre los puntos B y C la humedad que se está evaporando desde la superficie está siendo reemplazada por la difusión del agua desde el interior del cuerpo a una velocidad igual a la velocidad de evaporación. La velocidad de secado es constante y el período BC se llama período de velocidad constante de secado.

En el punto C, la velocidad de secado comienza a decaer, ya que el capa de humedad constante en la superficie no se puede mantener. En este punto se puede apreciar zonas secas en el cuerpo, a esto se le denomina contenido de humedad crítica.

Entre los puntos C y D el número y área de las zonas secas continúan aumentando y la velocidad de secado decrece. En el punto D, finaliza el periodo de velocidad constante del secado, el agua superficial del cuerpo esta totalmente evaporada y la velocidad del secado ahora depende de la velocidad de difusión del agua a la superficie del cuerpo. Entre los puntos D y E, la velocidad de secado cae aún más rápidamente que en el primer período de velocidad decreciente. En el punto E, la velocidad de secado es cero (se llega a peso constante), pues se alcanza la humedad de equilibrio con el ambiente externo. Continuar secando después de este punto es tiempo y energía perdidos.

La velocidad de secado, se calcula con la siguiente ecuación:

$$m_{agua\ liberada} = \frac{m_i - m_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \left[\frac{Kg_{agua}}{s} \right] \quad (2.3)$$

Donde:

m_i : peso en el tiempo i .

El Laboratorio de Bioenergía y Biocombustibles de la Universidad de Chile, en su informe final “Modelos de Negocios para el Acopio y Secado de Leña” [25], realiza un estudio experimental con un secador piloto, con capacidad de $0,8 [m^3]$, para conocer los tiempos de secado artificial, a una temperatura de $80^\circ C$. El estudio lo realizan en dos tipos de madera, roble y eucalipto, obtenidas en Longaví, Región del Maule. Con dos dimensiones, astillas largas de $1 [m]$ y astillas cortas o leña picada de uso directo de $0,33 [m]$ de largo. En la Figura 2.13, se observa las curvas de secado resultantes de este estudio experimental.

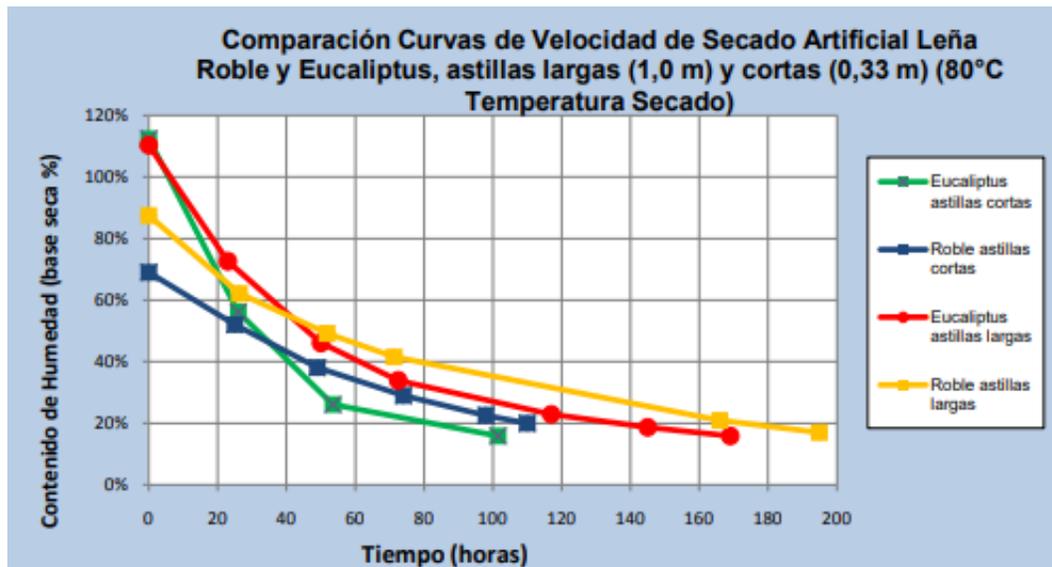


Figura 2.13: Curvas de velocidad de secado artificial de leña de roble y eucaliptos, astillas largas (1,0 [m]) y astillas cortas (0,33 [m]).

De la Figura 2.13 se puede concluir:

- Las astillas largas se demoran más en secarse que las astillas cortas. Con tiempos de secado de 8,1 y 5,3 días para las astillas largas de roble y eucaliptos respectivamente. Y 3 y 1,7 días para astillas cortas de roble y eucaliptos respectivamente.
- El secado de leña picada de eucaliptos se demora 53% menos que el secado de leña picada de roble para una reducción del contenido de humedad de 50% a 20%. Esta diferencia se debe a que el roble es más denso que el eucaliptos, por lo que se demora más en secarse, como se explico en la sección anterior.
- Las tasas de secado del roble, para una variación de humedad de 50% a 20% es de 0,35[%/hr] y para el eucaliptos 0,6 [%/hr].

2.6. Energía consumida en el secado de madera

La energía consumida en el secado de la madera dependerá del tipo de secador a usar, pero es esencial calcular el consumo de energía general en este proceso. Se identifican dos fases en el proceso, la fase de calentamiento inicial de la cámara, sus componentes y la madera, llamada Fase I y la fase de operación de secado, llamada Fase II. La fase inicial consta en elevar la temperatura al interior de la cámara hasta la temperatura de operación, para luego comenzar con el secado. En la primera fase la madera pierde porcentaje de humedad, pero es menor en comparación a la fase de operación. A continuación, se detalla la energía térmica involucrada para ambas fases, según “Dry Kiln Operator’s Manual” [20]:

1. Fase de calentamiento inicial de la cámara de secado, Fase I.

- Cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del aire al interior de la cámara de secado hasta la temperatura de operación, Q_1 .
Se necesitan los datos de volumen, densidad, calor específico del aire y la variación de temperatura desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación.

$$Q_1 = V_{aire} \cdot \rho_{aire} \cdot Cp_{aire} \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Donde:

V_{aire} : volumen de aire dentro de la cámara de secado.

ρ_{aire} : densidad del aire.

Cp_{aire} : calor específico del aire.

ΔT : variación de temperatura, desde la ambiental hasta la temperatura de operación.

- Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de la estructura de la cámara de secado, hasta la temperatura de operación, Q_2 .
Se necesita tener la cámara de secado ya dimensionada, ya que se necesita el volumen de las paredes, piso, cielo y conocer sus materiales, para obtener la capacitancia de la estructura y luego multiplicarlo por el delta de temperatura.

$$Q_2 = CAP \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Donde:

CAP : capacitancia de la estructura.

- Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de la madera hasta la temperatura de operación, Q_3 .
Es necesario calentar la agua libre de la estructura de la madera para que vaya perdiendo humedad y luego de pasar el punto de saturación de las fibras perderá el agua ligada.

$$Q_3 = H_i \cdot V_m \cdot \rho_m \cdot Cp_{mh} \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Donde:

H_i : humedad inicial de la madera.

V_m : volumen de madera.

ρ_m : densidad de la madera.

$C_{p_{mh}}$: calor específico de la madera húmeda.

El calor específico, según "Dry kiln operator's manual", depende de la humedad y la temperatura de la madera, no de la especie, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_{p_{mh}} = 4,186 \cdot \frac{0,25 + 0,0006 \cdot T + H_i}{1 + H_i} \quad (2.7)$$

Donde:

H_i : humedad inicial de la madera.

T: temperatura inicial de la madera.

- Cantidad de calor necesaria para evaporar el agua de la madera Q_4 .
Es el calor necesario para disminuir la humedad de la madera desde la inicial, hasta la que se desee. Cabe destacar que la cantidad de agua evaporada en esta fase es considerablemente menor a la fase de secado. Y la reducción importante de humedad ocurre en la fase de secado.

$$Q_4 = \left[T_I \cdot V_m \cdot \rho_m \cdot \frac{(H_i - H_f)}{T_{II}} \right] \cdot C.L.V \quad (2.8)$$

Donde:

T_I : tiempo de calentamiento de la cámara.

V_m : volumen de madera a secar.

H_f : humedad final de la madera.

$C.V.L$: calor latente de evaporación de la madera.

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor a través de la estructura, Q_5 . Se necesita calcular el coeficiente de transferencia global de la cámara de secado, considerando paredes, cielo y piso.

$$Q_5 = U \cdot A \cdot \Delta T \cdot T_I \quad (2.9)$$

$$Q_5 = \frac{\Delta T}{R_{total}} \cdot T_I \quad (2.10)$$

Donde:

U : coeficiente global de transferencia de la cámara de secado.

A : área interior de la cámara de secado.

R_{total} : red de resistencia térmicas de la estructura.

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor por las renovaciones de aire, Q_6 .
Debido a que se busca elevar la temperatura del aire hasta la temperatura de operación en la primera fase del secado, no deben haber renovaciones de aire. Por lo que la cantidad de calor necesaria será nulo en esta fase.

$$Q_6 = 0 \quad (2.11)$$

2. Fase de operación de la cámara de secado, Fase II.

- Cantidad de calor necesaria para evaporar el agua de la madera, Q'_4 . Este calor es el causante de obtener la humedad deseada en la madera, dependiendo de la humedad deseada se necesita evaporar el agua libre y el agua ligada. Como se dijo anteriormente, como el agua ligada es parte de las paredes celulares, se necesita más calor para evaporar esta agua.

$$Q'_4 = V_m \cdot \rho_m \cdot (H_i - H_f) \cdot C.L.V + \left[5 \left(\frac{kcal}{kg} \right) \cdot V_m \cdot \rho_m \right] \quad (2.12)$$

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor a través de la estructura, Q'_5 . Al igual que la fase anterior se necesita calcular el coeficiente de transferencia global de la cámara de secado, considerando paredes, cielo y piso. Comparado a la fase anterior este calor es considerable y solo varía el tiempo de secado.

$$Q'_5 = \frac{\Delta T}{R_{total}} \cdot T_{II} \quad (2.13)$$

Donde:

T_{II} : tiempo de secado de la cámara.

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor por las renovaciones de aire, Q'_6 .

El aire dentro de la cámara absorbe la humedad perdida por la madera y llega al punto de saturación, por lo que pierde la capacidad de secado. Para que esto no suceda se debe renovar el aire de la cámara, como este aire nuevo está a una temperatura menor a la temperatura de operación se pierde calor.

$$Q'_6 = \frac{Agua_{evaporada}}{Agua_{saliente} - Agua_{entrante}} \cdot Cp_{aire} \cdot \Delta T \quad (2.14)$$

Para el obtener el agua evaporada de la madera:

$$Agua_{evaporada} = V_m \cdot \rho_m \cdot (H_i - H_f) \quad (2.15)$$

Donde:

$Agua_{saliente}$: peso de agua por peso de aire saturado que sale de la cámara de secado.

$Agua_{entrante}$: peso de agua por peso de aire que entra a la cámara de secado.

2.7. Secadores de leña

Hay muchas formas de secado de leña, de manera natural o artificial. Hay métodos de secado natural que consisten en disponer la madera en un espacio y distribución determinada para que la circulación del aire haga su trabajo en cuanto al secado, el cual tiene un tiempo promedio de secado de 5 meses para alcanzar humedades del 25% y dependiendo la madera puede alcanzar hasta 10 meses de secado. Para el secado artificial de la leña, se utilizan tecnologías como ventiladores de recirculación de aire o sopladores de fuerza motriz, que hacen circular aire seco por los espacios entre las pilas de leña, acelerando y uniformando el secado. Una de las últimas innovaciones en esta materia, es el desarrollo de proyectos de secado basados en el uso de energías renovables no convencionales, como energía solar o energía geotérmica, como se busca proponer en este trabajo de título.

La leña se cosecha usualmente a finales de cada invierno, ya que la madera contiene una menor proporción de agua debido a que la actividad fisiológica del árbol es baja. Lo que es ideal para aprovechar las temperaturas de la temporada de primavera y verano para implementar métodos de secado. Se enumeraran las diferentes formas de secado artificial que utilizan aire caliente, el cual se puede calentar con la energía de las fuentes termales de la zona [21].

- Secado forzado de aire caliente directo: consiste en encastillar la leña formando un castillo de un ancho no superior a los 2,50 [m], un alto de 2,50 [m]. Con un recorrido del aire de unos 2,0 [m]. El ventilador axial se acopla directamente a un motor eléctrico ya sea monofásico o trifásico. El conjunto se sustenta sobre una base metálica para darle la altura al ventilador de tal modo que se tenga la mejor uniformidad del aire en altura y ancho. Se coloca un calefactor alimentado con aire caliente o de agua caliente proveniente de un intercambiador de calor sencillo. Se puede observar la configuración del secador en la Figura 2.14.

El aire cruza directamente a lo largo el radiador y la carga una sola vez, lo que se traduce en un sistema de muy baja eficiencia térmica. A mayor velocidad del aire, menor es la eficiencia térmica. Aunque esta eficiencia no solo depende de la velocidad del aire, si no que también de la temperatura del aire ambiente, la humedad relativa, el diseño del radiador, entre otros.

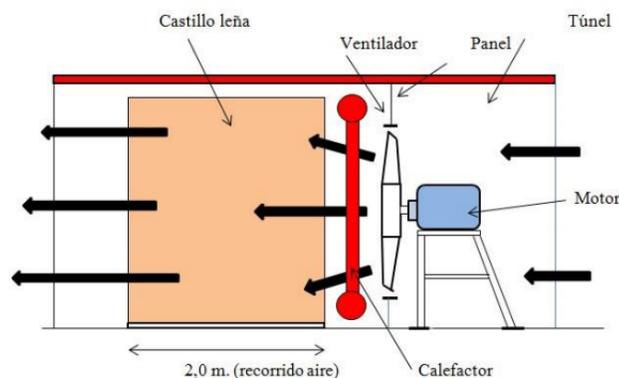


Figura 2.14: Vista en corte mostrando posición del ventilador respecto a castillo de leña. Las flechas indican dirección del aire.

- Secado forzado de aire caliente con retorno: el aire es movido por un ventilador centrífugo externo combinado con el intercambiador de calor y la cámara de secado. Los ventajas de este sistema, es que no se requiere la variable de humedad relativa a considerar en el proceso, ya que no importa la generación de defectos en la leña. Es posible secar con temperaturas bajo los 80°C. En la Figura 2.15 se presenta el esquema de funcionamiento y sus principales componentes de este tipo de secador.

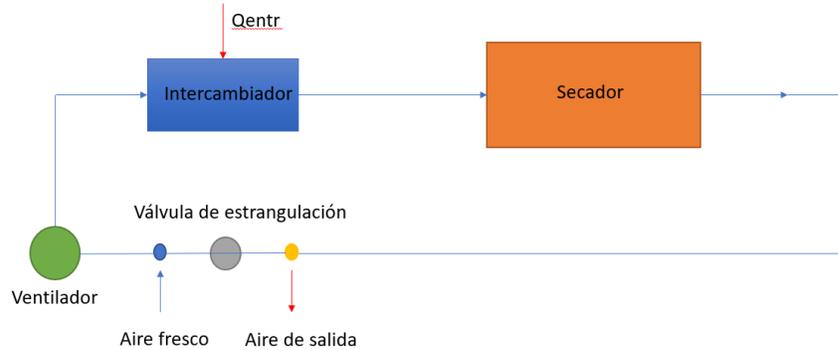


Figura 2.15: Esquema del principio de funcionamiento del secado mediante aire forzado caliente con retorno.

- Secado artificial convencional: esta modalidad es la más conocida en el área de secado de madera, en especial en el secado de madera aserrada. En esta modalidad se emplea un secador provisto de ventiladores axiales en su interior, ya sea en la zona superior o lateral cuyo aire es conducido a través de la leña. El aire pasa por unos tubos alimentados por agua caliente, vapor o aceite térmico para que transfiera el calor. En el diseño de este tipo de secado, se incorpora un sistema de humidificación ya sea de agua líquida o vapor para controlar la humedad relativa del ambiente. En la Figura 2.16 se observa un secador artificial convencional que se encuentra en Finlandia.



Figura 2.16: Dos capas de leña bajo madera aserrada en una cámara de secado artificial convencional de un aserradero en Finlandia [25].

2.8. Antecedentes termodinámicos

Se necesitan tener algunos conceptos claros antes de realizar los cálculos del secador, estos son los conceptos de humedad absoluta, relativa y específica, temperatura del bulbo húmedo y seco.

2.8.1. Humedad absoluta (Ha)

La humedad absoluta es la cantidad de vapor de agua que está contenido en un volumen determinado de aire, se expresa en $[\text{gr}/\text{m}^3]$. Cuanto mayor sea la temperatura del aire, más cantidad de vapor puede llegar a contener antes de llegar a la saturación.

2.8.2. Humedad específica

Es el peso de vapor de agua en gramos por kilogramo de aire seco. Esta se refiere a la humedad en peso, que se requiere para saturar un kilogramo de aire seco, a una temperatura de saturación (punto de rocío) determinada. El punto de rocío es cuando se comienza a condensar el aire, cuando una mezcla de aire-vapor se enfrían a una presión constante.

2.8.3. Humedad relativa (Hr)

Es la relación entre la cantidad de vapor contenida en el aire (humedad absoluta) y la cantidad máxima de vapor que el aire es capaz de contener a una temperatura determinada (humedad absoluta de saturación).

2.8.4. Temperatura del bulbo húmedo

La temperatura del bulbo húmedo se mide con un termómetro de mercurio envuelto en un paño de algodón empapado de agua, dando como resultado la temperatura húmeda del aire. Esta se utiliza en cartas de psicrométricas para calcular la humedad relativa, temperatura de rocío, humedad específica.

2.8.5. Temperatura del bulbo seco

Es la temperatura que se mide con un termómetro convencional, usualmente se denomina como la temperatura del aire.

2.8.6. Carta psicrométrica

La carta psicrométrica grafica diferentes propiedades del aire, como temperatura, volumen, humedad, presión. Estas cartas se utilizan para estudiar como varían las propiedades del aire al cambiar la humedad en este. En la Figura 2.17, se observa la carta psicrométrica del aire, el eje inferior es de temperatura de bulbo seco, el eje de las ordenadas es la humedad específica, el eje superior la humedad relativa, las diagonales azules la entalpía del aire y las diagonales celestes el volumen específico. Como se puede ver, teniendo dos propiedades del aire al entrar a la carta, este estará completamente caracterizado en todas sus propiedades.

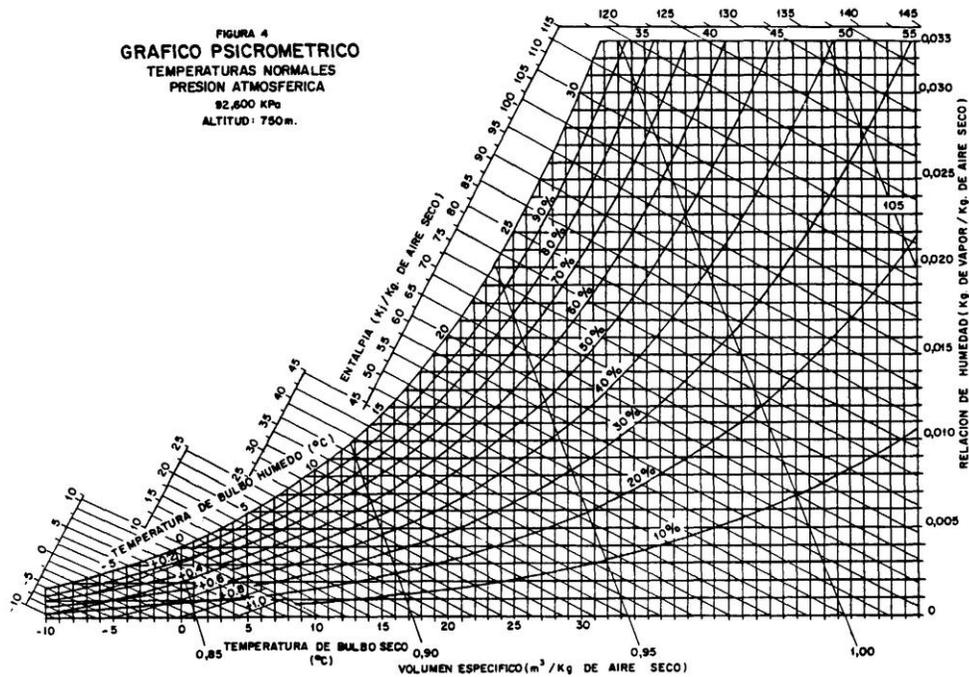


Figura 2.17: Carta psicrométrica.

Capítulo 3

Metodología

De acuerdo a lo expuesto en la sección de marco teórico, dentro de las especies más comercializadas de la zona se encuentran el roble, ulmo y eucalipto. Por lo que se secarán una especie nativa y una especie exótica, el roble y el eucalipto. Ya decidido el modelo de secador de leña a utilizar, un secado forzado de aire caliente con retorno, se realiza un cálculo a grandes rasgos, ya que es un trabajo donde muchas variables depende entre sí, de modo que se debe comenzar tomando una variable y luego ir iterando. Primero se estima el volumen de leña que se puede llegar a secar por la fuente termal. Luego, con estos cálculos, se puede llegar a un dimensionamiento real de los componentes del secador.

3.1. Caracterización de la fuente geotermal

El Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes facilita los datos de varias fuentes termales en la zona de Liquiñe, donde de un total de 13 fuentes termales, se toma la fuente termal con mayor temperatura para evaluar la factibilidad del secador. La fuente denominada Hipólito Muñoz es la que presenta la mayor temperatura, la cual tiene un flujo másico de 0,5 [kg/s] y una temperatura de 80°C, para calcular la potencia disponible de la fuente se utiliza la ecuación (3.1), con una temperatura de salida del agua a 30°C.

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = \dot{m}_{agua} C p_{agua} (T_{in_{agua}} - T_{out_{agua}}) \quad (3.1)$$

Donde:

\dot{m}_{agua} : Flujo másico de la fuente, 0,5 [kg/s].

$C p_{agua}$: Calor específico del agua, 4,18 [kJ/kg K].

$T_{in_{agua}}$: Temperatura de entrada del intercambiador, 80°C.

$T_{out_{agua}}$: Temperatura salida del intercambiador, 30°C.

Reemplazando los valores se obtiene:

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = 104,5 [kW] \quad (3.2)$$

La fuente termal entrega una potencia máxima de 104,5 [kW] que pueden ser utilizados para el secado de leña. El resumen de las características de la fuente termal se encuentran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características de la fuente termal principal de termas Hipólito Muñoz.

Variable	Valor
Temperatura	80°C
Flujo másico	0,5 [kg/seg]
Potencia disponible	104,5 [kW]

3.2. Dimensionamiento de equipos

En esta sección se dimensionan los principales componentes del secador de leña: intercambiadores de calor, ventilador y el tamaño de la cámara de secado.

3.2.1. Intercambiador de calor

De acuerdo a la literatura y a la industria, los tipos de intercambiadores que se utilizan en estos procesos, son de tubo con aletas, tipo radiador, con flujo cruzado. Primero se debe determinar la razón de la transferencia de calor real, con el método de efectividad-NTU. Se tiene que la razón máxima posible de transferencia es igual a la potencia disponible entregada por la fuente, es decir, $\dot{Q}_{m\acute{a}x}=104,05$ [kW]. Con la efectividad del intercambiador igual a $\epsilon=0,9$, la razón de transferencia de calor real es:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \epsilon \dot{Q}_{m\acute{a}x} \\ \dot{Q} &= 94,05 \text{ [kW]}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Obteniendo finalmente un $\dot{Q} = 94,05$ [kW] de potencia real que puede ser utilizada en el secador de leña.

El dimensionamiento del intercambiador consta en calcular el área de transferencia de calor necesaria. Como no se tienen las dimensiones del intercambiador, pero se tienen las temperaturas de trabajo, el calor a transferir y el coeficiente total de transferencia de calor se puede calcular el área de intercambio necesaria, como se observa en la ecuación 3.4.

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_{ml}\tag{3.4}$$

Se debe calcular el coeficiente global de transferencia U, el cálculo detallado se encuentra en la sección de Anexo A y tiene un valor $U = 122,33$ [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]. Finalmente se debe calcular ΔT_{ml} , que para el caso de los intercambiadores de flujo cruzado, poseen un factor de corrección que depende de la configuración geométrica y de las temperaturas de entrada y salida.

Quedando como:

$$\Delta T_{ml} = F \cdot \Delta T_{ml \text{ CF}} = F \cdot \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}\tag{3.5}$$

Donde:

$$\Delta T_1 = T_{in\text{agua}} - T_{out\text{aire}}$$

$$\Delta T_2 = T_{out\text{agua}} - T_{in\text{aire}}$$

$T_{in\text{aire}}$: Temperatura de entrada del aire, 15°C.

$T_{out_{aire}}$: Temperatura salida del aire a la cámara de secado, 60°C.

$T_{in_{agua}}$: Temperatura de entrada del intercambiador, 80°C.

$T_{out_{agua}}$: Temperatura salida del intercambiador, 30°C.

Por lo que la diferencia media logarítmica de temperatura es:

$$\Delta T_{mlCF} = \frac{20^{\circ}C - 15^{\circ}C}{\ln\left(\frac{20}{15}\right)} = 17,380^{\circ}C \quad (3.6)$$

Para calcular el factor de corrección se debe tener las relaciones P y R, definidas respectivamente:

$$P = \frac{T_{out_{agua}} - T_{in_{agua}}}{T_{in_{aire}} - T_{in_{agua}}} \quad (3.7)$$

$$R = \frac{T_{in_{aire}} - T_{out_{agua}}}{T_{out_{agua}} - T_{in_{agua}}} \quad (3.8)$$

Reemplazando respectivamente las temperaturas, el valor de las relaciones $P = 0,769$ y $R=0,9$, con estos valores, se va al diagrama del factor de corrección de la Figura 3.1, el cual se obtiene un valor de $F = 0,575$.

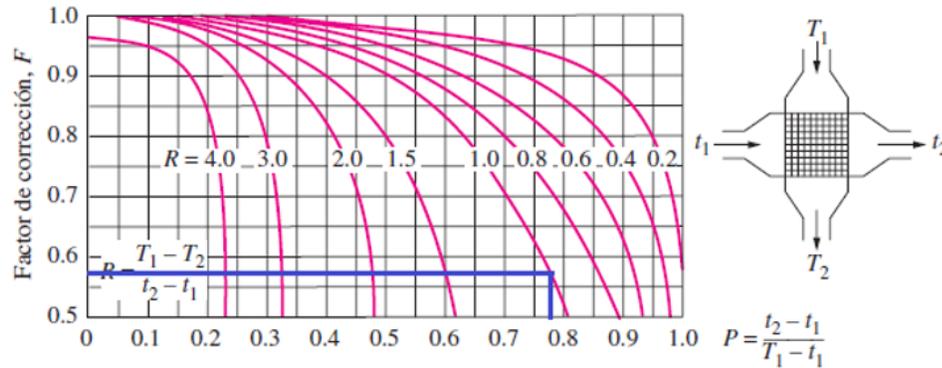


Figura 3.1: Diagrama de factor de corrección para flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado [22].

Al tener el factor de corrección y ΔT_{mlCF} , da como resultado $\Delta T_{ml} = 9,993^{\circ}C$. Finalmente se obtiene que el área de transferencia de calor necesaria es de $77 m^2$.

3.2.2. Ventilador

Se debe determinar el caudal que debe ser capaz de mover el ventilador. Para eso primero se calcula el flujo másico de aire que debe circular por el intercambiador de calor, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\dot{Q}}{C_{p_{aire}}(T_{out_{aire}} - T_{in_{aire}})} \quad (3.9)$$

En la ecuación se utiliza un $C_{p_{aire}} = 1,007$ [kJ/kgK], quedando un flujo másico de aire $\dot{m}_{aire} = 2,075$ [kg/s]. Y para determinar su caudal se divide por la densidad $\rho_{aire} = 1,127$ [kg/m³] y se obtiene:

$$Q_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire}} = \frac{2,075[\text{kg/s}]}{1,127[\text{kg/m}^3]} = 1,841[\text{m}^3/\text{s}] = 6.629,723[\text{m}^3/\text{hr}] \quad (3.10)$$

Finalmente $Q_{aire} = 1,841$ [m³/seg]. Una variable importante a considerar es la presión que debe ejercer el ventilador, esta debe ser igual a la pérdida de carga que genera el intercambiador, más la pérdida de carga de la cámara de secado. La pérdida de carga del intercambiador sera provista por el proveedor del intercambiador seleccionado y la pérdida de carga de la cámara de secado se calculara en la siguiente sección.

3.2.3. Cámara de secado

La cámara de secado se diseña para poder secar 26,4 [m³] estéreos de leña, con el fin de secar lo máximo posible con la potencia entregada y obtener la mayor cantidad de ingresos. Se estudia la configuración óptima y el como se distribuirá la leña dentro de la cámara. De acuerdo a la literatura y a otros proyectos de secado, la mejor forma de manipular la leña es en atriles o mallas, de dimensiones 1,1 x 1,1 x 1,1 [m³]. La capacidad de cada atril es aproximada de 1,1 - 1,3 [m³] estéreos de leña picada de 0,33 [m] de largo. En este formato la leña tiene un secado más acelerado comparado a leña de largo de 1 [m] y más uniforme, además de ser el formato final de consumo, por lo que es más fácil de dimensionar por el consumidor [16].

Ya establecido el ordenamiento y el formato de la leña, se calcula el área máxima que puede tener la cámara de secado, las velocidades del aire en este proceso varían de 1,5 - 5 [m/s], que depende de la temperatura ambiente de la zona y la potencia de la fuente [25]. Para este secado, la velocidad será de $v_{ingreso} = 2,5$ [m/s]. En la siguiente ecuación 3.11, se calcula la sección transversal máxima posible $A_{m\acute{a}x}$, con el dato del caudal de aire obtenido del ventilador en la sección anterior de $Q_{aire} = 1,841$ [m³/s]:

$$A_{m\acute{a}x} = \frac{Q_{aire}}{v_{ingreso}} = \frac{1,841[\text{m}^3/\text{s}]}{2,5[\text{m}/\text{s}]} = 0,830 [\text{m}^2] \quad (3.11)$$

Lo cual da una $A_{m\acute{a}x} = 0,830$ [m²]. Al tener este dato y las dimensiones de los atriles, se decide que dentro de la cámara de secado, los atriles se ubicaran de la forma 2 x 2, además serán ordenados con 2 columnas con 6 filas de atriles, como se observa en la siguiente Figura 3.2.

De acuerdo a esto, la cámara de secado tendrá un alto de 2,35 [m], lo cual da un margen de movimiento para operar con la traspaleta y la columna de atriles. Un ancho de 2,36 [m], con un margen de 8 cm por lado de cada atril y restando el área de los pasos de aire de los atriles de 0,108 [m²], quedan un área transversal de paso del aire de 0,814[m²], que es menor al $A_{m\acute{a}x}$. Un largo de 7,4 [m], considerando 0,3 [m] de margen al principio de la columna de atriles.

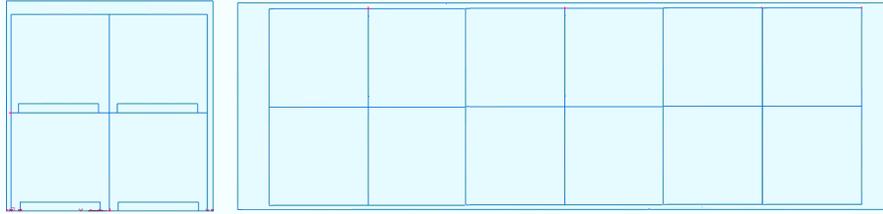


Figura 3.2: Plano de la cámara de secado y la distribución de atriles.

Como la cámara de secado tiene solo una dirección de paso del aire, la pérdida de carga generada es baja, de un valor de 84,109 [Pa], el cálculo de esta pérdida se encuentra en el Anexo B. En la Tabla 3.2 se resumen todas las características de la cámara de secado.

Tabla 3.2: Resumen del dimensionamiento y características de la cámara de secado.

Variable	Valor
Alto	2,35 [m]
Ancho	2,36 [m]
Largo	7,4 [m]
Volumen	41,04 [m ³]
Área superficial interna	80,8 [m ²]
Pérdida de carga	84,109 [Pa]

3.3. Estudio CFD dentro de la cámara de secado.

Dentro de la cámara de secado se realiza un estudio de mecánica de fluidos computacional (CFD) para estudiar el comportamiento de la temperatura, la velocidad del aire y como varía el comportamiento de la temperatura al variar la velocidad de entrada del aire.

Para este estudio se realiza un análisis de la cámara de secado original, es decir, estudiar como varía la temperatura y la velocidad del aire a través del tiempo dentro de la cámara. Luego se estudia el comportamiento de la temperatura al cambiar la velocidad de entrada del aire a la cámara, entre un rango de 1 a 2,5 [m/s].

El software utilizado es ANSYS®, en particular con su sistema de análisis “Fluid Flow (Fluent)”, en el cual se pueden realizar simulaciones de turbulencia, combustión, transferencia de calor, entre otros. Los pasos a seguir para el desarrollo del estudio CFD son los siguientes:

- Realizar modelo CAD de la cámara de secado. El cual se realiza en ANSYS®, con su extensión DesignModeler.
- Realizar el mallado de la estructura. El cual se debe ir evaluando en términos de calidad de resultados, el tiempo que se demoran en obtener los resultados de la simulación y recursos computacionales. Algunas propiedades asociadas a la calidad de un mallado son: la densidad y distribución de los nodos, relación de aspecto, esquinas, entre otros.
- Realizar un CFD a la cámara de secado para una velocidad del aire de entrada determinada, establecida en la Sección 3.2.2, de 2,5 [m/s], a distintos tiempos de secado. En el caso del roble se realizaran simulaciones para 1 - 5 - 50 - 101 horas de secado. Para el eucalipto se realizan simulaciones para 1 - 5 - 33 - 68 horas (los tiempos seleccionados son para final de la Fase I de calentamiento, mitad del secado y para el secado completo).
- Realizar un CFD a la cámara de secado para un tiempo determinado de 1 hora de secado, para luego ir variando la velocidad del aire de entrada entre 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].

Para cada madera son 7 simulaciones (4 simulaciones de temperatura y 3 simulaciones para diferentes velocidades), lo que da un total de 14 simulaciones. En la Tabla 3.3 se detallan los tiempos de simulaciones para los diferentes tiempos de secado, dando un total de 460,2 horas, que son 19 días.

Tabla 3.3: Tiempos de simulación.

Tiempo de secado [hr]	Tiempo de simulación [hr]
1	2,2
5	14
33	68
65	113
50	75
101	171
Total	460,2

Dentro de los resultados esperados de este estudio, es ver que a medida que la velocidad aumenta, la transferencia de calor aire-madera aumenta, lo que provoca secados de mejor calidad y más uniformes.

Capítulo 4

Resultados

De acuerdo a los resultados de cálculos iterativos, para estimar un volumen adecuado a secar con la potencia disponible, se decide secar 26,4 [m³] estéreos de roble, con densidad de 720 [kg/m³] [23] y 26,4 [m³] de eucalipto, con densidad de 480 [kg/m³] [24], en un tiempo de 4 días, para el roble y 2,5 días para el eucalipto. Los tiempos de secado mencionados están dentro de los estándares de secado para esas especies, según [20] el tiempo de secado de 40 % a 20 % de humedad del roble es de 3 días, mientras en el eucalipto, un tiempo secado para el mismo rango es de 2 días.

La leña tendrá un pre-secado al aire libre, para que entre al secador con un porcentaje de humedad alrededor del 50 %. Desde que la leña fue cortada, debe estar 2 meses en secado al aire libre para obtener este porcentaje de humedad. El ciclo de secado forzado con aire caliente comienza la tercera semana de octubre, hasta la segunda semana de abril, período donde las condiciones climáticas ya son adecuadas para realizar este proceso, considerando una temperatura promedio del aire ambiente de 15°C.

4.1. Selección de equipos

Luego de dimensionar los principales componentes del secador, se procede a buscar en el mercado los equipos que cumplan con los requisitos calculados en la sección anterior.

Se deben seleccionar el intercambiador de calor, el ventilador centrífugo y la bomba centrífuga, además de los materiales de construcción de la cámara de secado.

4.1.1. Intercambiador de calor

El primer equipo a seleccionar es el intercambiador de calor, como se mencionó en la Sección 3.2.2. Este proveerá la pérdida de carga del aire, a considerar en la presión que debe ejercer el ventilador centrífugo, y la del agua, que debe suplir la bomba centrífuga.

El intercambiador debe ser de flujo cruzado, con flujo no mezclado. En la industria de secado de madera o deshidratado de frutas se utilizan intercambiadores tipo radiador, con serpentines que son fabricados con tubos de acero inoxidable, cobre o acero carbono con aletas de aluminio. Los cuales pueden llegar a trabajar con temperatura entre los 150-180°C. Son equipos de gran durabilidad y confiabilidad en su operación.

De acuerdo a la Sección 3.2.1 el intercambiador de calor debe ser capaz de suministrar calor a una potencia de 94,05 [kW], con un área de intercambio térmico de 77 [m²]. Como se necesita una gran área de intercambio y en el mercado los intercambiadores de estos tamaños son de gran costo y difíciles de encontrar, se decide colocar intercambiadores de menor tamaño en paralelo, la cantidad que sea necesaria para cumplir con el área requerida.

La empresa nacional Termia será el proveedor del intercambiador, en la Tabla 4.1 se muestran las características de este.

Tabla 4.1: Características intercambiador de calor.

Variable	Valor
Caudal agua máx admisible	3 [m ³ /hr]
Potencia máx transferida	16,6 [kW]
Área máx de transderencia	13,5 [m ²]
Máx temperatura de trabajo	150 ° C
Pérdida de carga aire	70 [Pa]
Pérdida de carga agua	360 [kPa]
Efectividad	0,9
Dimensiones	2 x 1 x 1 [m ³]
Material tubos	cobre
Material aletas	alumnio
Marca	fabricado por Termia

Ahora, de acuerdo a las características del intercambiador, se debe calcular cuantos de estos serán necesarios para el sistema, en base a tres variables: área de intercambio de calor, caudal máximo admisible y tasa de transferencia de calor máxima.

El área necesaria de intercambio de calor es de 77 [m²] y el intercambiador tiene un área de intercambio de 13,5 [m²], por lo que se necesitan:

$$N_{intercambiadores} = \frac{A_{máx}}{A_{intercambiador}} = \frac{77[m^2]}{13,5[m^2]} = 5,7 \quad (4.1)$$

Lo que da como resultado un total de 6 intercambiadores para cubrir toda el área de intercambio necesaria. Ahora evaluando la variable de caudal máximo admisible, siendo el caudal de la fuente de 1,86 [m³/hr] y el caudal admisible del intercambiador es de 3 [m³/hr], solo se necesitara 1 intercambiador. Finalmente la última variable a evaluar es la tasa de transferencia de calor, para el intercambiador se tiene una tasa de 16, 87 [kW] y la potencia a suministrar es de 94,05 [kW], el número de intercambiadores que se necesita para este caso es:

$$N_{intercambiadores} = \frac{\dot{Q}_{máx}}{\dot{Q}_{intercambiador}} = \frac{94,05[kW]}{16,6[kW]} = 5,65 \quad (4.2)$$

En base a las 3 variables y para satisfacer todos los requerimientos del secador, se necesitan un total de 6 intercambiadores, los que se colocaran en paralelo. Estos intercambiadores, como se muestra en el esquema de la Figura 2.14, calientan el aire que ingresara a la cámara de secado.

4.1.2. Ventilador centrífugo

El ventilador centrífugo debe suministrar un caudal de 6.629,72 [m³/hr], la pérdida de carga que debe compensar el ventilador debe ser la suma de la pérdida de carga de la cámara de secado y del intercambiador de calor, la cual debe ser:

$$\begin{aligned} \Delta P_{total} &= \Delta P_{cámara\ de\ secado} + \Delta P_{intercambiador} \\ \Delta P_{total} &= 84,109[Pa] + 70[Pa] = 154,109[Pa] \\ \Delta P_{total} &= 154,109 [Pa] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Con esas dos variables determinadas, el ventilador centrífugo seleccionado es de la marca Sodeca, modelo CBXT-20/20-2 IE3, con las características de la Tabla 4.2. El proveedor del ventilador es Sodeca, ubicado en San Bernardo (Santa Bernardita 12.005).

Tabla 4.2: Características ventilador centrífugo.

Variable	Valor
Caudal máx.	11.500 [m ³ /hr]
Potencia	1,5 [kW]
Temperatura de trabajo	-20 +80 ° C
Presión máxima de trabajo	900 [Pa]
Material ventilador	chapa de acero galvanizado
Material turbina	álabes hacia adelante, en chapa de acero galvanizado
Marca	Sodeca

En la siguiente Figura 4.1 se muestra la curva característica del ventilador y su punto de operación.

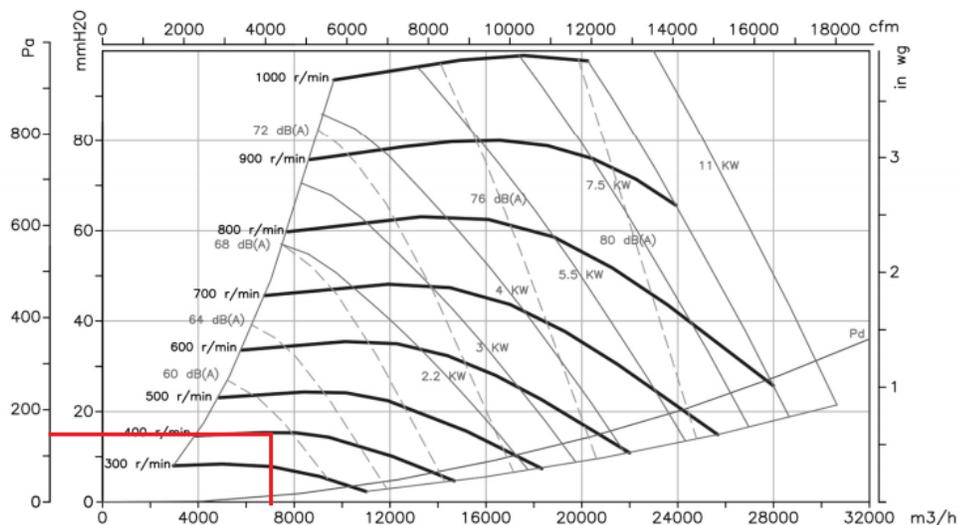


Figura 4.1: Curva característica del ventilador, con punto de operación en la cámara de secado.

4.1.3. Bomba centrífuga

La bomba centrífuga a utilizar debe tener la característica de trabajar con un flujo de agua a alta temperatura, por lo que no es posible utilizar cualquier bomba del mercado. Además, debe ser capaz de suministrar una pérdida de presión de 360 [kPa], cabe destacar que la pérdida de carga de los intercambiadores no es aditiva, ya que estos se encontraran en paralelo. También, debe suministrar un caudal de 0,5 [l/s], de acuerdo a esto, la potencia de la bomba debe ser la siguiente:

$$\begin{aligned} P_{bomba} &= \Delta P Q_{agua} \\ P_{bomba} &= 185[W] \end{aligned} \quad (4.4)$$

El proveedor de la bomba seleccionada es Koslan, una empresa chilena ubicada en Santiago (Lord Cochrane 1691) y las características de la bomba son las siguientes:

Tabla 4.3: Características bomba hidráulica.

Variable	Valor
Caudal máx	1 - 6 [m ³ /hr]
Potencia	1,1 [kW]
Temperatura de trabajo	-10 +100 ° C
Presión máxima de trabajo	600.000 [kPa]
Material cuerpo bomba	hierro fundido
Material tapa - rodetes - eje motor	acero inoxidable
Marca	2CP

4.1.4. Cámara de secado

Para la cámara de secado se deben seleccionar los materiales de construcción y dimensiones de estos para poder calcular el factor-U real para el modelo. La cámara debe tener la característica de una buena aislación térmica, ya que lo ideal es obtener las menores perdidas térmicas posibles. Para cumplir esto las paredes y cielo tendrán 3 capas, una plancha de acero estructural inoxidable, una capa de aislante de lana mineral y otra plancha de acero estructural inoxidable. El piso de la cámara será un radier de hormigón. Las características de los materiales son los de la Tabla 4.4, como el radier es parte de la construcción no se especifica el proveedor de este.

Tabla 4.4: Dimensiones materiales.

Variable	Acero estructural inoxidable	Lana mineral	Hormigón
k [W/mK]	16,3	0,037	1,63
Espesor [m]	0,002	0,1	0,2
Largo [m]	2	12,5	7,4
Ancho [m]	1	1,2	2,36
Área a cubrir [m ²]	63,336	63,336	17,46
Proveedor	Multiaceros	Ayrsa	

Como la lana mineral será usada en contacto con acero inoxidable los cuales son fabricados con una resina con bajo contenido de cloruros, inferior a 10 ppm cumpliendo con la Norma ASTM C 795 y que posee un factor R100 igual a 190. De acuerdo a las dimensiones de los materiales, se necesitan 48 planchas de acero estructural para forrar la cámara de secado considerando el interior y exterior. En el caso de la lana de vidrio que se vende en rollo, se necesitarían 5 rollos para cubrir toda el área de la cámara. La cámara tendrá una puerta a lo largo de esta para facilitar la carga y descarga, permitiendo que sea más rápida y exista un espacio adecuado para realiza el proceso. La puerta tendrá un sistema de aislación adecuado para evitar grandes pérdidas de calor. Se le colocan juntas de goma a ambos lados del marco de la puerta para garantizar el sellado total.

Una vez definida las dimensiones y los materiales de la cámara de secado, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor total o factor-U [22]. Este se calculará a través del concepto de resistencia térmica. La relación del factor-U con el concepto de resistencia térmica es la siguiente:

$$U = \frac{1}{R_{total}A} \quad (W/^{\circ}C) \quad (4.5)$$

Con el fin de determinar la razón de transferencia de calor, se calcula el R_{total} de las paredes de la cámara de secado. En la Figura 4.2 se observan las capas de las paredes, estas tres capas se traducen en tres resistencias. Agregando la convección interior, la convección natural y la radiación exterior, se tendrá un total de 5 resistencias a considerar.

$$\begin{aligned} R_{pared} &= R_{interior} + R_{pared} + R_{aislante} + R_{pared} + R_{combinado} \\ R_{piso} &= R_{piso} + R_{interior} \end{aligned} \quad (4.6)$$



Figura 4.2: Red de resistencias térmicas para las paredes de la cámara de secado.

Ahora, reemplazando con los valores de conducción, convección y radiación en una pared, para la ecuación 4.6.

$$\begin{aligned} R_{pared} &= \frac{1}{h_{interior}A} + \frac{e_{pared}}{k_{pared}A} + \frac{e_{aislante}}{k_{aislante}A} + \frac{e_{pared}}{k_{pared}A} + \frac{1}{h_{combinado}A} \\ R_{piso} &= \frac{e_{piso}}{k_{piso}A} + \frac{1}{h_{interior}A} \end{aligned} \quad (4.7)$$

El calculo de los coeficientes de transferencia convectivos interior y exterior se realiza en el Anexo C, dando $h_{interior} = 7,777$ [W/m²K] y $h_{exterior} = 5,87$ [W/m² K].

Con los datos de la Tabla 4.4, se reemplazan los datos en la ecuación 4.7, dando los siguientes valores de resistencia:

$$\begin{aligned}
 R_{pared} &= 104,37 [K/W] \\
 R_{piso} &= 2,252 [K/W] \\
 R_{total} &= 106,625 [K/W]
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Dando una resistencia térmica total de la cámara de secado de 106,625 [K/W], de igual manera se exponen los resultados del factor-U de la cámara de secado, para las paredes, piso y total en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 U_{pared} &= 0,326 [W/m^2K] \\
 U_{piso} &= 2,252 [W/m^2K] \\
 U_{total} &= 3,979 [W/m^2K]
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

En la sección 3.2.3 se establece que la leña dentro de la cámara de secado irá en atriles de 1 [m³], los cuales son fácil de transportar y manipular, se obtiene un secado más uniforme y menores tiempos de secado y además tiene una facilidad de comercializar el producto en este formato. Los atriles empleados son contruidos en acero y conformado por una estructura principal de perfil tipo L 1" x 1" x 4 mm de espesor para mayor durabilidad y una cubierta por cinco lados de malla metálica, dejándose la parte superior completamente abierta para facilidad de llenado, estos se pueden observar en la Figura 4.3. Para este proyecto se necesitan mínimo 48 atriles, de tal forma de tener 24 en el proceso de secado y otros 24 a la espera de ser secado y así obtener una continuidad en el proceso.



Figura 4.3: Ejemplo de atriles metálicos utilizados en España [25].

4.2. Energía consumida en el secado de leña.

Una vez ya caracterizada la fuente termal, dimensionados y seleccionados los equipos a utilizar se puede calcular y verificar que la fuente termal sea capaz de suministrar el calor necesario para secar el volumen de leña determinado. En esta sección se calculan los calores del capítulo Marco teórico Sección Energía consumida en el secador.

1. Fase de calentamiento inicial de la cámara de secado, Fase I.

- Cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del aire al interior de la cámara de secado hasta la temperatura de operación, Q_1 .
Con las propiedades del aire de entrada a 15 °C [22] y con el volumen del aire obtenido de la resta del volumen de la cámara con el volumen de madera a secar se obtiene:

$$Q_1 = 14,64 [m^3] \cdot 1,225 [kg/m^3] \cdot 1,007 [kJ/kgK] \cdot 45 [K] \quad (4.10)$$

$$Q_1 = 812,701 [kJ] \quad (4.11)$$

- Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de la estructura de la cámara de secado, hasta la temperatura de operación, Q_2 .
El calculo de la capacitancia de la cámara de secado se encuentra en el Anexo D, en el cual se considera las paredes, cielo y piso de la cámara de secado.

$$Q_2 = 2.802,1799 [kJ/K] \cdot 45 [K] \quad (4.12)$$

$$Q_2 = 126.098,096 [kJ] \quad (4.13)$$

- Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de la madera hasta la temperatura de operación, Q_3 .
La humedad inicial de la madera, como se mencionó en las secciones anteriores, es de 50%. Este calor dependerá de la especie a secar, ya que la densidad de la madera varía. Dado que se tienen las densidades respectivas de cada especie, se puede obtener el calor necesario.

Primero se calcula el calor específico del madera con la ecuación (2.7):

$$Cp_{mh} = 4,186 \cdot \frac{0,25 + 0,0006 \cdot T + H_i}{1 + H_i} \quad (4.14)$$

$$Cp_{mh} = 0,425 [kJ/kgC] \quad (4.15)$$

Luego reemplazando este calor en la ecuación 2.6 y de acuerdo a la densidad (roble=720 [kg/m³] y eucaliptos = 480 [kg/m³]) de cada especie se obtiene que Q_3 :

$$Q_{3,roble} = 0.5 \cdot 26,4 [m^3] \cdot 720 [kg/m^3] \cdot 0,425 [kJ/kgC] \cdot 45 [K] \quad (4.16)$$

$$Q_{3,roble} = 761.180,55 [kJ] \quad (4.17)$$

$$Q_{3,eu} = 0.5 \cdot 26,4 [m^3] \cdot 480 [kg/m^3] \cdot 0,425 [kJ/kgC] \cdot 45 [K] \quad (4.18)$$

$$Q_{3,eu} = 507.453,702 [kJ] \quad (4.19)$$

- Cantidad de calor necesaria para evaporar el agua de la madera Q_4 . De acuerdo a un documento INFOR (1994) de “Diseño y montaje de un secador de madera de bajo costo” de secado de diferentes especies se determina que la etapa de calentamiento varia entre 3 - 5 horas, considerando la potencia de la fuente se estableció un periodo de 5 horas para esta etapa. Para la etapa de secado, serán 4 días para el roble, lo que corresponde a 96 horas y en el caso del eucalipto, 2,56 días, lo que equivale a 63 horas.

$$Q_{4,roble} = \frac{5[hr] \cdot 26,4 [m^3] \cdot 720 [kg/m^3] \cdot (0.5 - 0.2)}{96[hr]} \cdot 2.355,67 [kJ/kg] \quad (4.20)$$

$$Q_{4,roble} = 699.636,88 [kJ] \quad (4.21)$$

$$Q_{4,eu} = \frac{5[hr] \cdot 26,4 [m^3] \cdot 480 [kg/m^3] \cdot (0.5 - 0.2)}{63[hr]} \cdot 2.355,67 [kJ/kg] \quad (4.22)$$

$$Q_{4,eu} = 710.742,24 [kJ] \quad (4.23)$$

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor a través de la estructura, Q_5 . De la sección 3.3.4 se obtiene el valor de la resistencia térmica de la cámara de secado, siendo $R = 106,62 [K/W]$.

$$Q_5 = \frac{45 [K]}{106,62 [K/W]} \cdot 18000 [s] \quad (4.24)$$

$$Q_5 = 7,596 [kJ] \quad (4.25)$$

2. Fase de operación de la cámara de secado, Fase II.

- Cantidad de calor necesaria para evaporar el agua de la madera Q'_4 . De acuerdo a “Dry kiln operator’s manual” para humedades igual o mayores al 20 %, no es necesario este calor extra, por lo que la ecuación (2.12) queda de la siguiente forma:

$$Q'_4 = V_m \cdot \rho_m \cdot (H_i - H_f) \cdot C.L.V \quad (4.26)$$

Luego reemplazando con los valores correspondientes:

$$Q'_{4,roble} = 26,4 [m^3] \cdot 720 [kg/m^3] \cdot (0.5 - 0.2) \cdot 2.355,679 [kJ/kg] \quad (4.27)$$

$$Q'_{4,roble} = 13.433.028,26[kJ] \quad (4.28)$$

$$Q'_{4,eu} = 26,4 [m^3] \cdot 480 [kg/m^3] \cdot (0.5 - 0.2) \cdot 2.355,679 [kJ/kg] \quad (4.29)$$

$$Q'_{4,eu} = 8.955.352,176[kJ] \quad (4.30)$$

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor a través de la estructura, Q'_5 .

Al igual que la fase anterior se necesita calcular el coeficiente de transferencia global de la cámara de secado, considerando paredes, cielo y piso. Comparado a la fase anterior este calor aumenta considerablemente por el tiempo de operación mayor.

$$Q'_{5,roble} = \frac{45 [K]}{106,62 [K/W]} \cdot 345.600 [s] \quad (4.31)$$

$$Q'_5 = 145,856 [kJ] \quad (4.32)$$

$$Q'_{5,eu} = \frac{45 [K]}{106,62 [K/W]} \cdot 226.800 [s] \quad (4.33)$$

$$Q'_5 = 98,75 [kJ] \quad (4.34)$$

- Cantidad de calor necesaria para suplir las pérdidas de calor por las renovaciones de aire, Q_6 .

Primero se debe calcular la cantidad de agua a evaporar para el roble y eucaliptos, que depende de la densidad de cada madera.

$$Agua_{evaporada,roble} = 26,4m^3 \cdot 720[kg/m^3] \cdot (0.5 - 0.2) \quad (4.35)$$

$$Agua_{evaporada,roble} = 5.702,4 [kg \text{ de agua}] \quad (4.36)$$

$$Agua_{evaporada,eu} = 26,4m^3 \cdot 480[kg/m^3] \cdot (0.5 - 0.2) \quad (4.37)$$

$$Agua_{evaporada,eu} = 3.802 [kg \text{ de agua}] \quad (4.38)$$

Luego se debe ir a las cartas psicrométricas de temperaturas normales y altas temperaturas para obtener los kg de vapor por kg de aire a la entrada y a la salida de la cámara de secado. Como se observa en la Figura 4.4, el aire de la entrada de la cámara entra a una temperatura de $15^\circ C$ y una humedad de 70% (temperatura y humedad promedio de la temporada de secado) con $0,008 [kg \text{ de vapor/kg de aire}]$, luego el aire se calienta hasta $70^\circ C$, este se satura con un $0,0255 [kg \text{ de vapor/kg de aire}]$ el cual debe ser expulsado.

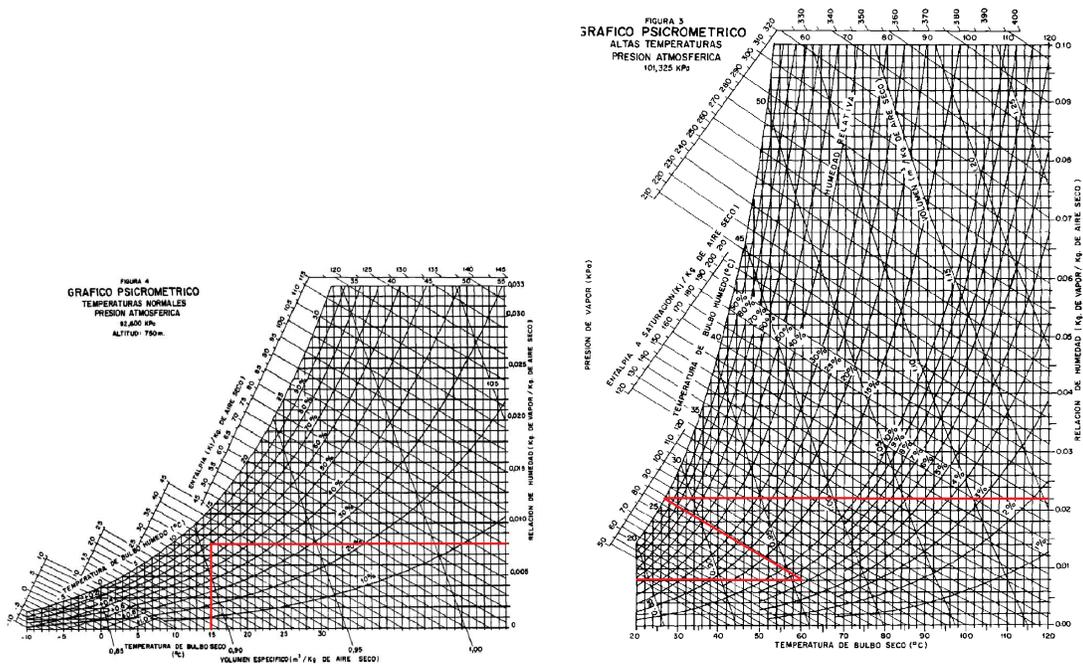


Figura 4.4: Evolución de los kilos de vapor por kilo de aire en la entrada y salida de la cámara de secado en la carta psicrométrica.

Reemplazado estos valores en la ecuación 2.14:

$$Q'_{6,roble} = \frac{5.184 [kgdeagua]}{(0,008 - 0,022)[kgdevapor/kgdeaire]} \cdot 1,007 [kJ/kg K] \cdot 45 K \quad (4.39)$$

$$Q'_{6,roble} = 14.765.957,5 [kJ] \quad (4.40)$$

$$Q'_{6,roble} = \frac{3.456 [kgdeagua]}{(0,008 - 0,022)[kgdevapor/kgdeaire]} \cdot 1,007 [kJ/kg K] \cdot 45 K \quad (4.41)$$

$$Q'_{6,eu} = 9.843.971,657 [kJ] \quad (4.42)$$

En la siguiente Tabla 4.5, se resumen los calores de cada etapa, cada fase de secado y la potencia total por fase de secado. En el cual se verifica que la fuente termal es capaz de secar el volumen de leña determinado, en los tiempos estimados para cada tipo de leña. Es importante notar que hay un delta de seguridad, de por lo menos 10 [kW], con lo cual se asegura, que si la fuente tiene caudales con menores temperaturas el secado siga siendo factible, además que el programa de secado se configura para obtener humedades del 20 % y no del 25 %, el cual es otro factor de seguridad para cumplir la norma chilena y tener obtener leña seca.

Tabla 4.5: Tabla resumen de los calores de la Fase I y II del secado de madera.

Fase I	Roble [MJ]	Eucaliptos [MJ]	Fase II	Roble [MJ]	Eucalipto [MJ]
Q_1	0,812	0,812	Q'_4	13.433,02	8.955,352
Q_2	126,098	126,098	Q'_5	0,145	0,095
Q_3	761,18	507,453	Q'_6	14.756,95	9.843,97
Q_4	839,564	710,742			
Q_5	0,00759	7,596			
Q_6	0	0			
Total	1.587,73	1.345	Total	28.199,13	18.799,423
Total	80 [kW]	74,7 [kW]	Total	81,6 [kW]	83 [kW]

En la Tabla 4.6 se resume el calor y la potencia total necesaria del proceso completo de secado y se compara con el calor y la potencia de la fuente termal para verificar nuevamente la factibilidad del secado, de acuerdo a la potencia de fuente termal.

Tabla 4.6: Tabla resumen del calor y potencia necesaria para el proceso de secado, comparado con la potencia y el calor entregado por la fuente termal de Hipólito Muñoz.

Variable	Roble	Eucalipto	Hipólito Muñoz
Calor total	29.789 [MJ]	20.144 [MJ]	34.196,58 [MJ_{roble}]- 23.023,44 [MJ_{eu}]
Potencia total	81,9 [kW]	82,3 [kW]	94,05 [kW]

4.3. Curva de secado obtenida

La curva de secado obtenida del proceso se puede observar en la Figura 4.5, de color azul la curva de secado del roble y en verde la del eucalipto. En el gráfico se puede apreciar que en el caso del eucalipto la pendiente es mayor, debido a menores tiempos de secado. La curva de secado se calcula como si la pérdida de humedad fuera lineal, al no conocer la evolución del peso de la madera a medida que pasa el tiempo.

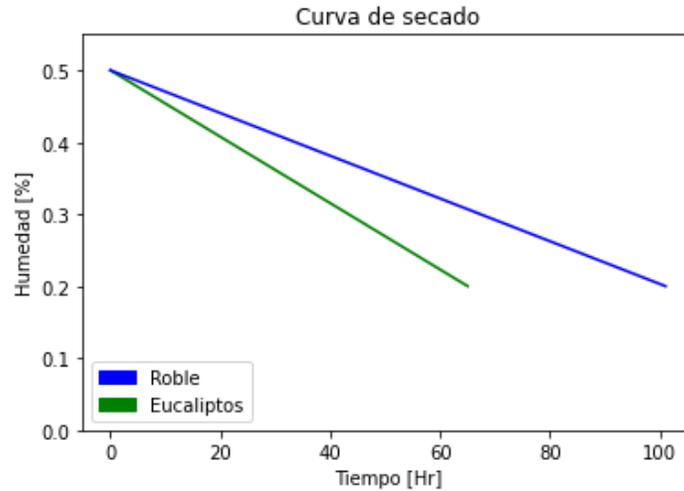


Figura 4.5: Curva de secado obtenida.

En la Tabla 4.7 se exponen los resultados más relevantes de las curvas de secado obtenida, se tiene una tasa de remoción para el roble de 0,00424 [kg agua/kg madera hr] y de 0,121 [kg agua/kg madera hr] para el eucalipto. Con velocidades de secado de 0,0156 [kg agua/seg] y 0,162 [kg agua/seg] para el roble y eucalipto respectivamente.

Tabla 4.7: Resultados de la curva de secado para el roble y eucaliptos.

Item	Roble	Eucalipto
Volumen inicial [m^3]	26,4	26,4
Densidad [kg/m^3]	720	480
Kilos de agua a evaporar	5.702	3.801
Humedad inicial [%]	50	50
Humedad final [%]	20	20
Peso inicial [kg]	19.008	12.672
Peso final [kg]	13.306	8.871
Volumen final [m^3]	18,48	18,48
Tiempo final [s]	363.600	244.800
Kilos de agua por kilo de masa	0,428	0,4286
Tasa remoción [kg agua/kg madera s]	$1,17 \times 10^{-6}$	$3,38 \times 10^{-5}$
Tasa remoción [kg agua/kg madera hr]	0,00424	0,121
Velocidad de secado [kg agua/ s]	0,0156	0,0162

4.4. Programa secado

Luego de realizar los cálculo de la energía requerida para el secado y comprobando que la fuente termal entrega el calor necesario para los tiempos de secado establecidos, se debe hacer el programa de secado. Como se menciona anteriormente la temporada de secado artificial de la leña comenzará la tercera semana de octubre hasta la segunda semana de abril, teniendo un total de 24 semanas para realizar el secado. Se programa el secado para una semana laboral de 5 días, con horario de trabajo de 8:30 a 18:00 horas.

El secador se deja preparado el día viernes de la segunda semana de octubre, con 24 atriles cargados de leña. Para así comenzar el secado el día lunes de la segunda semana de octubre a las 9:00. Para el secado de leña de roble se necesitan 101 horas de secado en total, considerando las 5 horas de calentamiento del secador y las 96 horas de secado. De acuerdo a esto en la Figura 4.6, se observa que se pueden realizar un total de 36 secados por temporada.

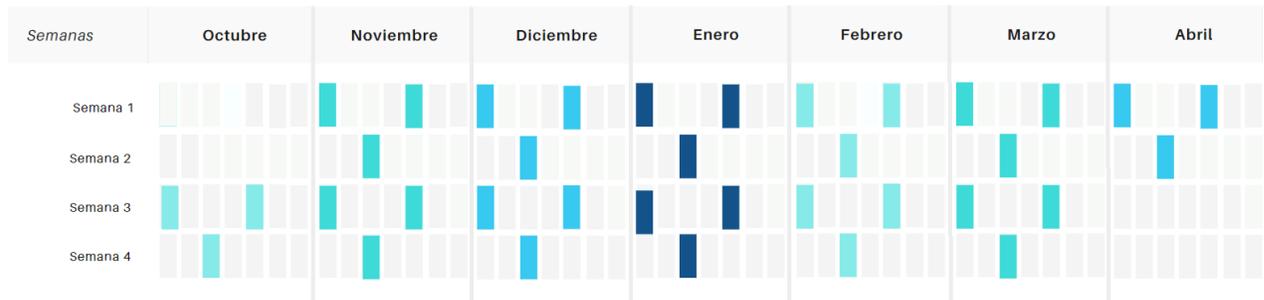


Figura 4.6: Programa de secado para el roble.

En el caso del eucalipto, el secado se realiza en 68 horas, 5 horas de calentamiento de la cámara y 63 horas de secado. En la Figura 4.7, se aprecia que se pueden realizar 2 secados cada semana de la temporada, realizándose un total de 48 secados.

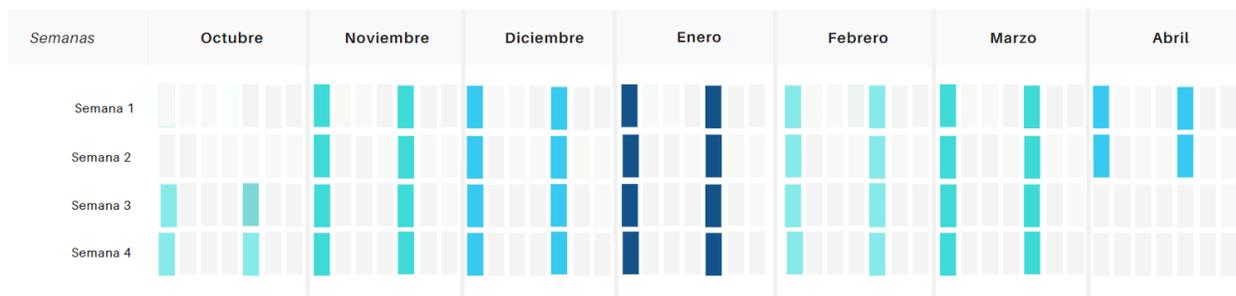


Figura 4.7: Programa de secado para el eucalipto.

Cabe destacar que cada secado termina en la madrugada, teniendo un tiempo razonable para que la temperatura de la cámara, de los atriles y de la madera baje para que pueda ser manipulados a la mañana siguiente. También en los tiempos de secado se considera un tiempo de carga y descarga de la cámara de secado.

4.5. Layout del secador

Al tener los equipos seleccionados, las dimensiones de la cámara de secado y comprobado que la fuente termal puede secar $26,4 [m^3]$, se realiza el layout del secador. En la Figura 4.8 se presenta el layout de la planta de secado, cómo van distribuidos los intercambiadores de calor, la bomba, el ventilador y la cámara de secado. Los intercambiadores se disponen en un hilera de 1 x 2 para minimizar el largo de sala de intercambiadores, esta sala es de $6,5 \times 5,4 \times 3 [m^3]$. La estructura completa tiene un largo de $16,1 [m]$ y un ancho de $5,4 [m]$.

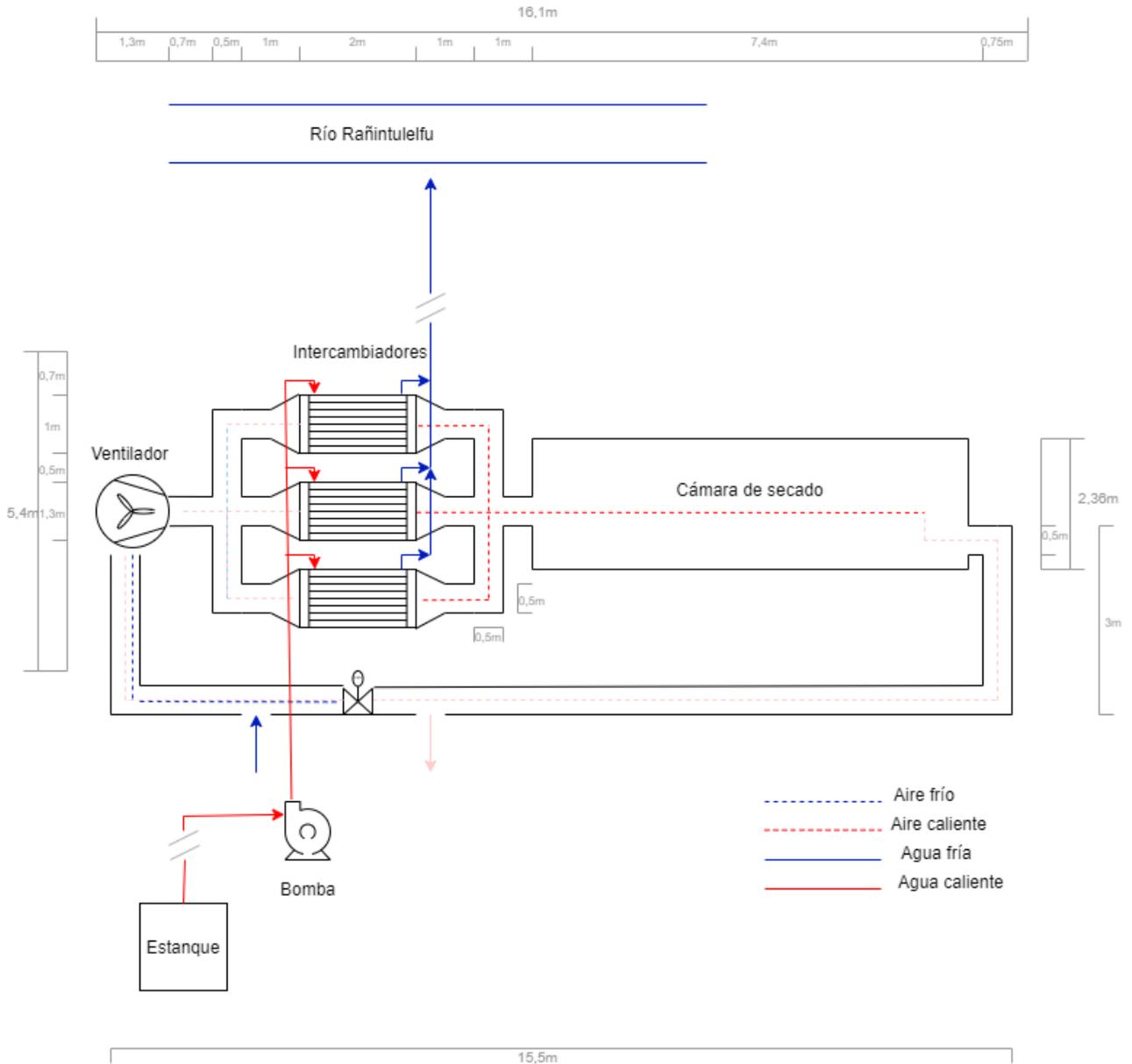


Figura 4.8: Layout de la planta de secado.

En el layout se observa el piping del sistema, las líneas punteadas son por donde circula el aire. Las azules aire frío que entra al sistema, las rojas aire caliente y las rosadas son el aire que sale de la cámara de secado a una temperatura media ($45 - 30 \text{ } ^\circ \text{C}$).

Las líneas continuas son el circuito de agua del sistema, las rojas representa el agua caliente que viene de un estanque que se llena con agua de la fuente termal. Las azules continuas son el agua que sale del sistema y vuelve al Río Rañintulelfu, cabe destacar que el agua vuelve totalmente limpia, sin intervenciones de químicos al caudal del río. En la Figura 4.9 se presenta como son las conexiones de los intercambiadores, como van los canales de aire, de dimensiones de 0,5x0,5[m] y las cañerías de agua de 2". Los intercambiadores se montan en una estructura de 0,25 [m] de alto.

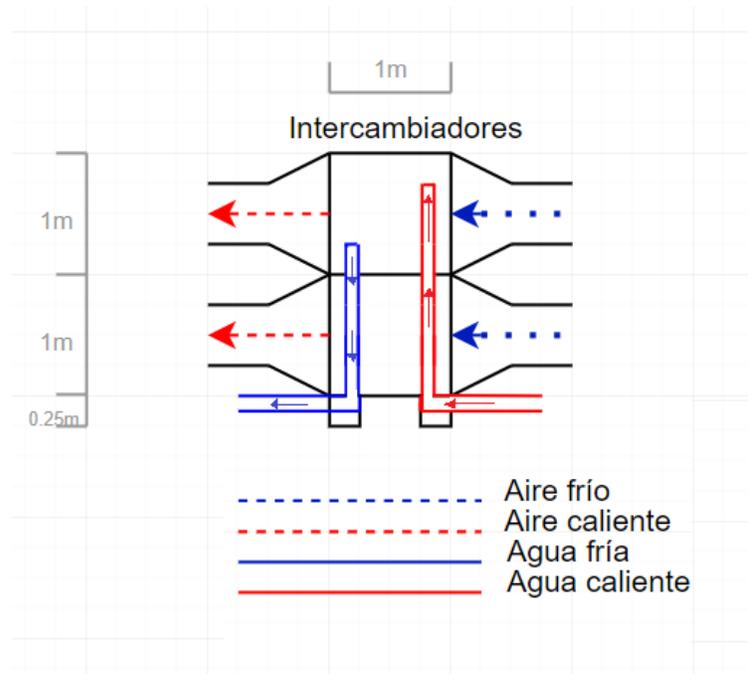


Figura 4.9: Vista de perfil de los intercambiadores de calor y sus conexiones.

4.6. Estudio CFD dentro de la cámara de secado

En esta sección se presentan los resultados de los estudios realizados para las distintas configuraciones de simulación de la cámara de secado.

4.6.1. Modelo CAD

De acuerdo a las dimensiones de la Sección 3.2.3, se construye el modelo CAD en Design-Modeler de ANSYS. En la Figura 4.10 se observa la cámara de secado, esta se modela como un paralelepípedo de $2,35 \times 2,36 \times 7,4$ [m³], el cuerpo verde de la figura representa la madera dentro de la cámara de secado. Por lo que el dominio del aire es el espacio entre el cuerpo de la madera y las paredes de la cámara de secado. El aire se inyecta por una ventana superior de $0,5 \times 0,5$ [m²] y se extrae por una ventana inferior con las mismas dimensiones, como se observa en la Figura 4.11.

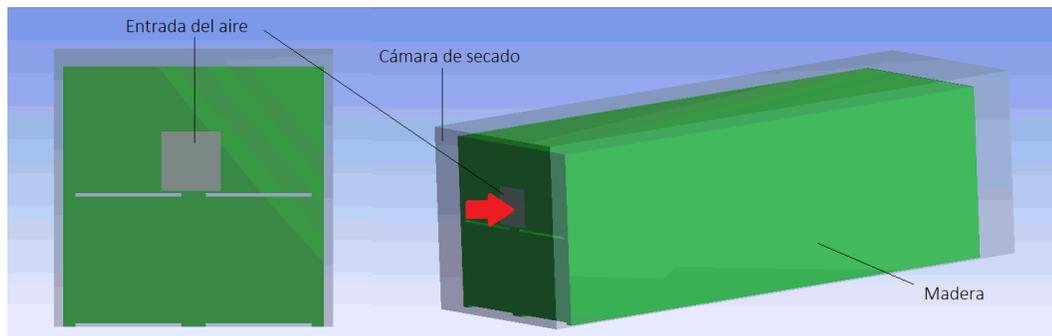


Figura 4.10: Modelo CAD de la cámara, en la izquierda se observa la vista isométrica del frente y en la derecha la vista isométrica posterior, en verde el cuerpo de la madera.

Las dimensiones del canal de entrada del aire, son iguales a los canales de aire del circuito de piping que se observa en el layout de la Figura 4.8. Y la posición del canal fue seleccionada a través de varios ensayos, para encontrar la mejor posición donde la transferencia de calor fuera mayor a un tiempo de secado determinado, esto fue a $0,7$ [m] abajo del techo y centrada. En el caso del canal de la salida del aire, la salida se coloca en el mismo eje, pero $0,3$ [m] despegada del suelo, ya que el aire frío baja al ser más denso.

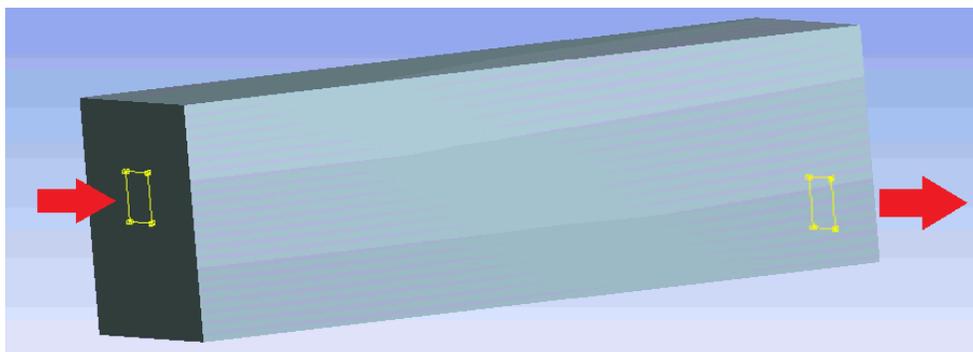


Figura 4.11: Modelo CAD de la cámara, se observa la entrada del aire por el extremo izquierdo y la salida del aire por el extremo derecho.

Luego la madera también se modela como un paralelepípedo, al cual se le hacen los canales de aire generado por la forma de los atriles. La dimensión de este paralelepípedo es de $2,2 \times 2,2 \times 6,6$ [m³], con canales de aire de $0,03 \times 0,9 \times 6,6$ [m³], esta estructura se observa en la Figura 4.12. En el programa se establece que son dos cuerpos, con relación de contacto entre ellos.

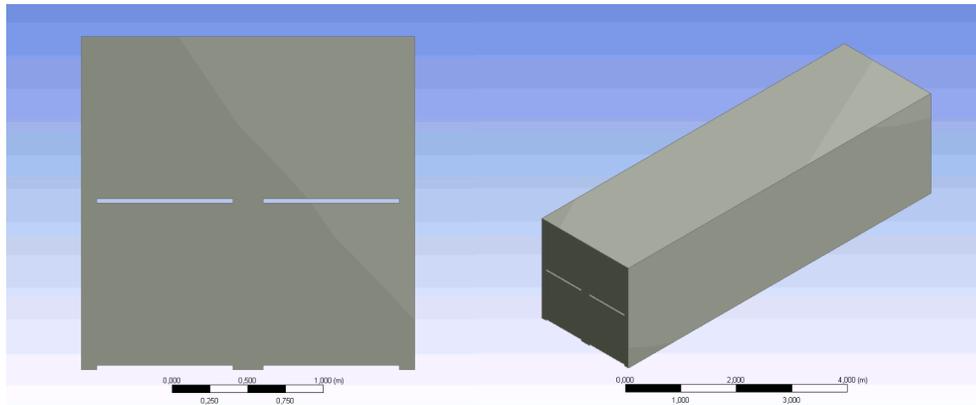


Figura 4.12: Modelo CAD de la madera, se observa el frente de la madera a la izquierda y a la derecha la vista isométrica.

4.6.2. Mallado

Luego de tener el modelo CAD realizado, el segundo paso es realizar el mallado correspondiente para la estructura, exportando el modelo a Meshing. De acuerdo a simulaciones de prueba de mallado se llega a las características de la Figura 4.13, con un ancho máximo de malla de 0,06 [m], con un número total de nodos de 627.797.

Model (B3) > Mesh	
Object Name	Mesh
State	Solved
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Growth Rate	Default (1,2)
Max Size	6,e-002 m
Capture Curvature	Yes
Curvature Min Size	1,5e-002 m
Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	8,1149 m
Average Surface Area	5,1265 m ²
Minimum Edge Length	3,e-002 m
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Smoothing	High
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
View Advanced Options	No
Assembly Meshing	
Method	CutCell
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
Intersection Feature Creation	Program Controlled
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Statistics	
Nodes	627797
Elements	502272

Figura 4.13: Características de mallado.

El espacio entre las paredes-madera es 0,08 [m] y cielo-madera es 0,15 [m], por lo que el ancho del mallado, no es el ideal para estas zona. Cabe destacar que estas zonas son de importancia en el modelo, ya que por estas circula el fluido y se quiere una buena aproximación del comportamiento térmico. A estas zonas se les realiza un refinamiento de mallado, utilizando la opción "face sizing". Las características de este mallado se resumen en la Figura 4.14, donde se observa que el ancho máximo de malla es de 0,03 [m].

Model (B3) > Mesh > Mesh Controls			
Object Name	Face Sizing	Face Sizing 2	Face Sizing 3
State	Fully Defined		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Face		
Definition			
Suppressed	No		
Type	Element Size		
Element Size	3,e-002 m		
Advanced			
Defeature Size	Default (5,e-004 m)		
Behavior	Soft		
Growth Rate	Default (1,2)		
Capture Curvature	No		
Capture Proximity	No		

Figura 4.14: Características del mallado refinado de las paredes y cielo.

En las siguientes Figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se muestra el mallado resultante.

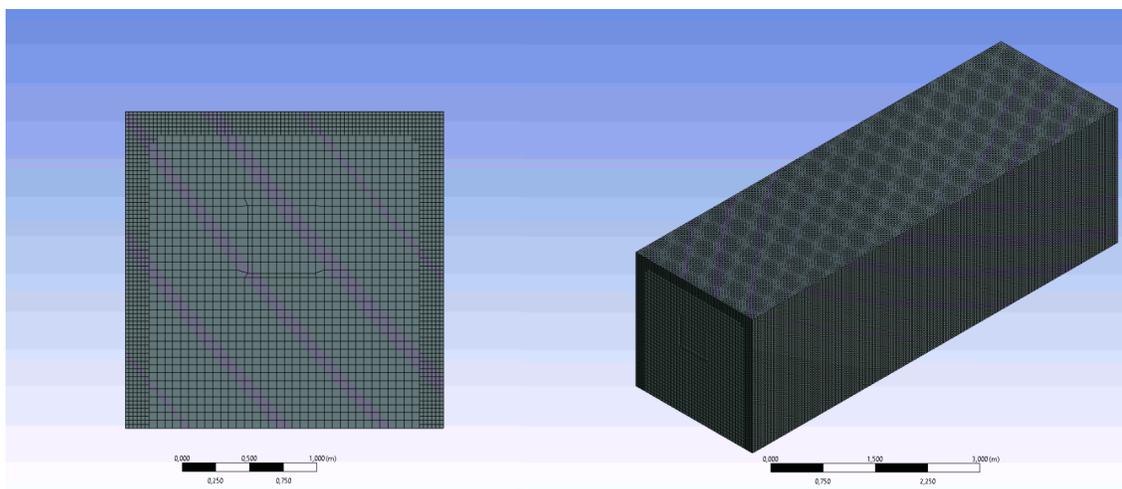


Figura 4.15: Mallado de la cámara de secado.

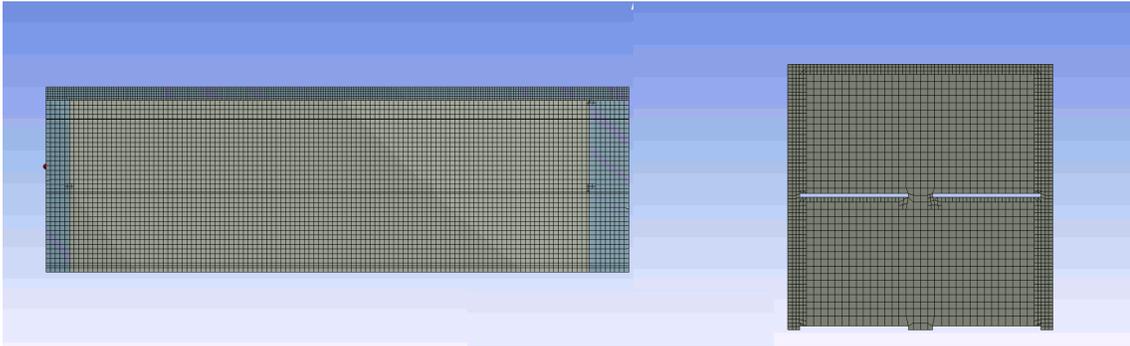


Figura 4.16: Mallado de la madera, a la izquierda un corte transversal del cuerpo y el frente del cuerpo con el mallado.

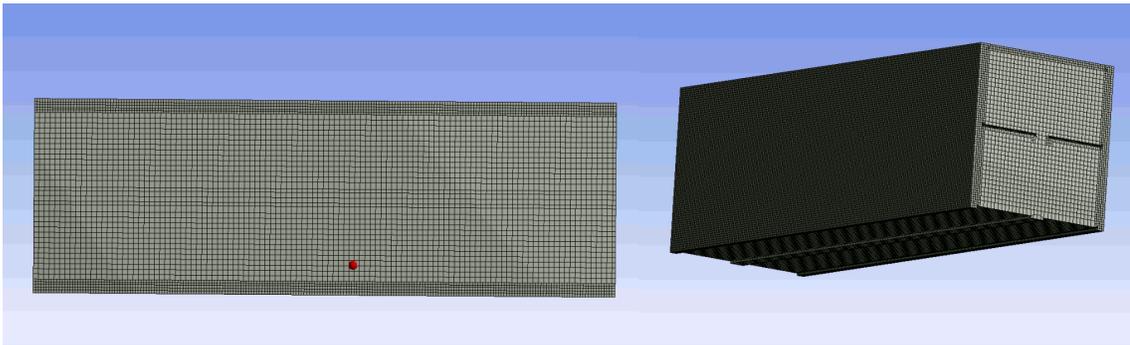


Figura 4.17: Detalle del mallado inferior de la madera.

4.6.3. Simulaciones

Se realizan las simulaciones, se comienza realizando el *setup* de las materiales de la cámara de secado, las características físicas de las maderas, definir el material y fluido de las celdas y finalmente las condiciones de borde.

El dominio del aire es el espacio entre la cámara y la madera, que corresponde a una masa de aire contenida dentro de la cámara de secado, que se encuentra quieta y a una temperatura ambiente homogénea de 15°C. Y el cuerpo de la madera esta a una temperatura homogénea ligeramente menor, 10°C.

Cuando comienza la simulación, el aire entra por la ventanilla superior a una temperatura de 60°C, que es la temperatura de secado y a una velocidad de 2,5 [m/s], que de acuerdo a la Sección 3.2.3 es la velocidad máxima para el caudal del aire y el área transversal de la cámara. Y con una turbulencia de 10 %, debido a cálculos en secciones anteriores se llega a que el caudal del aire entrante, es un flujo turbulento completamente desarrollado. En las paredes, techo y piso se impone un coeficiente de transferencia de calor de 7,777 [W/m² K], calculado en la Sección 4.1.4.

La volumen de aire se modela como un fluido con un modelo turbulento k-épsilon y con las propiedades termodinámicas del aire a 15°C, como densidad, calor específico, conductividad y viscosidad. En el caso del cuerpo de la madera, se determina que es un sólido y se ingresan las propiedades de densidad, calor específico y conductividad, para cada tipo de madera.

Para la solución del problema, en el caso de *Pressure-Velocity Coupling* se utiliza el método SIMPLEC, debido a que es un sistema transiente, turbulento y un pequeño paso del tiempo. Finalmente, se realiza una simulación en estado transiente, con un *Time Step Size* de 1 segundo, un *Time Step Size* del tiempo de secado que se quiere simular en segundos, por ejemplo 244.800 segundos en el caso de secado completo del eucalipto y 363.600 segundos para el roble. Los resultados de estas simulaciones se dividen en dos secciones: eucalipto y roble.

4.6.3.1. Eucalipto

Primero se estudia como evoluciona la temperatura dentro de la cámara de secado a través del tiempo. Luego la variación de la velocidad del aire de entrada a la cámara. En la Figura 4.18, se observa la temperatura de la cámara para los diferentes tiempos de secado. Al paso de las horas de secado, llega a un comportamiento uniforme. Con temperaturas al inicio de la cámara de 50°C y a la salida de la cámara de 36°C aproximadamente.

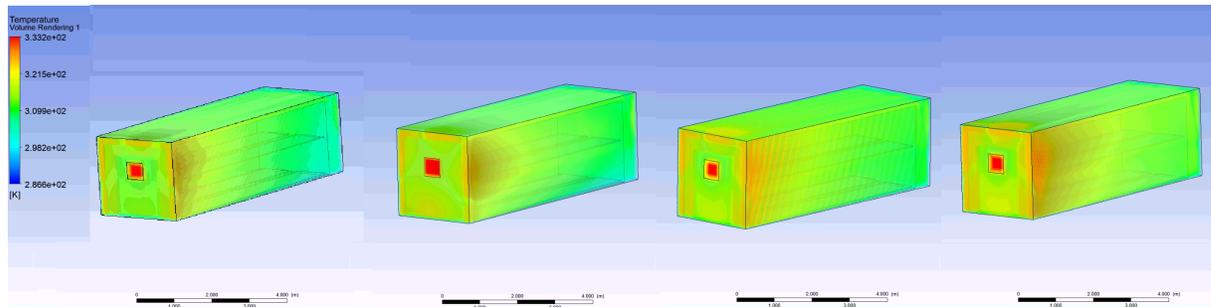


Figura 4.18: Temperatura dentro de la cámara de secado a 1 - 5 - 33 - 68 horas respectivamente.

En la Figura 4.19 se observa que la velocidad a medida que pasan las horas tiene un comportamiento continuo en general, al igual que la evolución de la temperatura de la cámara. Excepto en la cara del frente de la cámara, donde hay leve aumento en la velocidad del aire a medida que pasa el tiempo. Esto se debe a que en esta zona las componentes de la velocidad u y w aumentan al chocar con la madera.

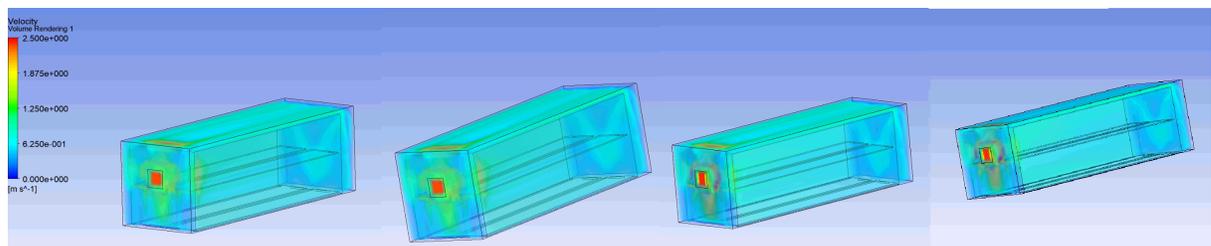


Figura 4.19: Comportamiento de la velocidad a 1 - 5 - 33 - 68 horas respectivamente.

En la Figura 4.20 se aprecia la evolución de la temperatura de la madera a medida que va aumentando el tiempo de secado en las distintas caras del cuerpo de la madera. Claramente se puede ver que la temperatura del cuerpo va aumentando, alcanzando temperaturas máximas de 58°C en algunas zonas. Y hay zonas con temperaturas alrededor de 27°C en el inferior del cuerpo de la madera, esto ocurre ya que en esta zona la circulación de aire caliente es menor. La evolución de temperatura en el cuerpo en el intervalo de secado de 33 a 68 horas es menor, comparado a 1 - 5 horas y 5 - 33 horas. De acuerdo a la curva de secado, corresponde al período de tiempo donde la velocidad de secado comienza a decaer, justificando tal comportamiento.

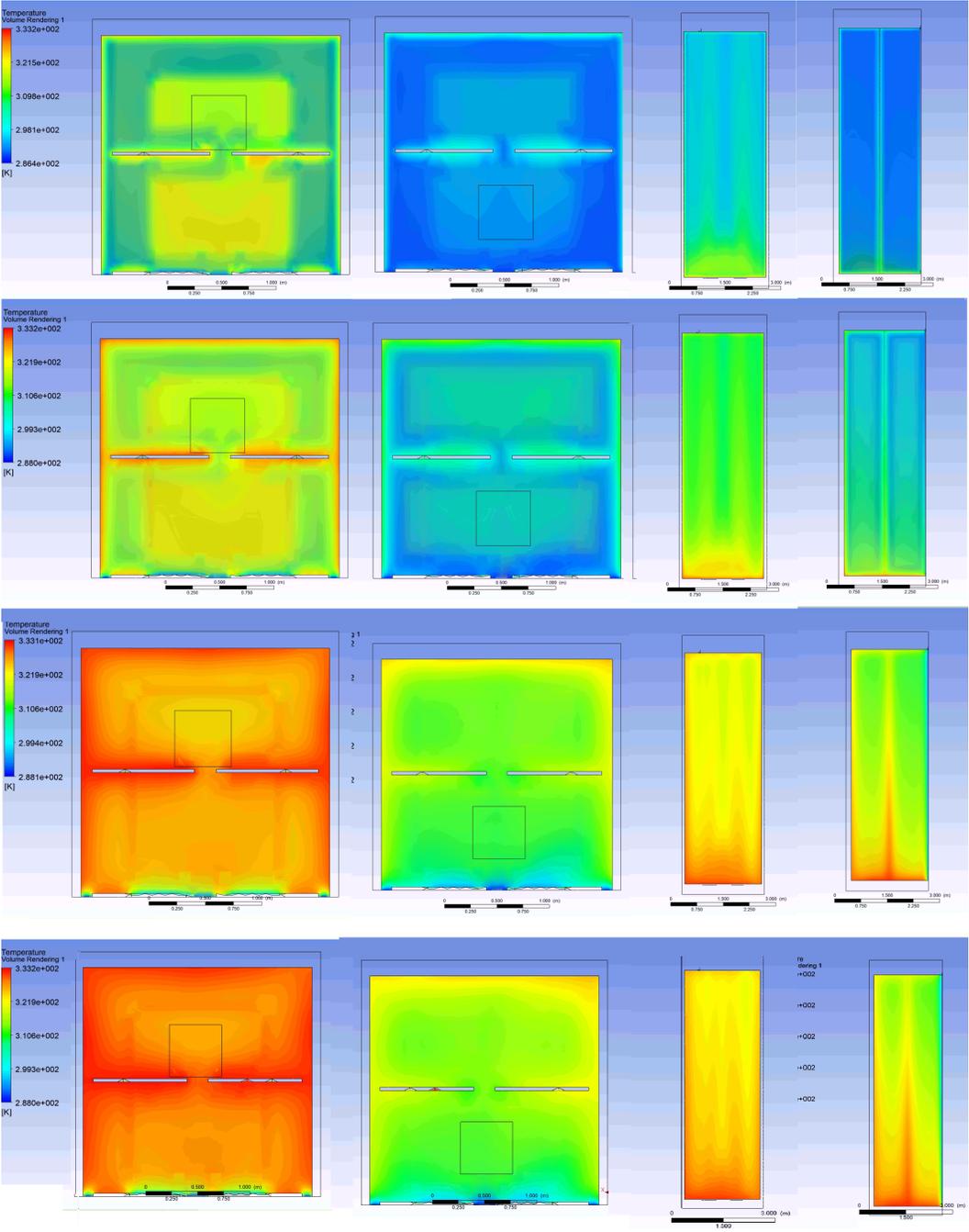


Figura 4.20: Evolución de la temperatura en la madera para 1 - 5 - 33 - 68 horas de secado respectivamente.

La Figura 4.21, muestra la temperatura de la cámara y la madera para las 68 horas de secado. En esta se confirma que el cuerpo de la leña alcanza casi por completo altas temperaturas, lo cual asegura la pérdida de humedad. En el plano vertical se observa los canales que se generan por los atriles, son fundamentales para alcanzar secado más homogéneos dentro del cuerpo.

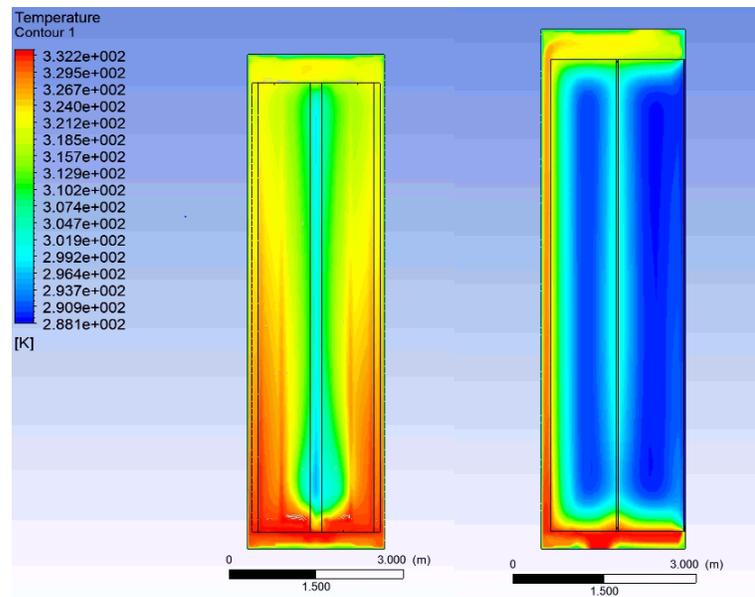


Figura 4.21: Temperatura al interior de la cámara para 68 horas de secado, en la izquierda el plano horizontal central de la cámara y la derecha un plano vertical central.

Luego se estudia como varía la temperatura al variar la velocidad del aire a la entrada de la cámara de secado. En la Figura 4.22 se presenta la variación de la velocidad dentro de la cámara de secado a distintas velocidades de entrada del aire, partiendo de 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s] y en la Figura 4.23 la misma variación pero en el plano central de la cámara de secado.

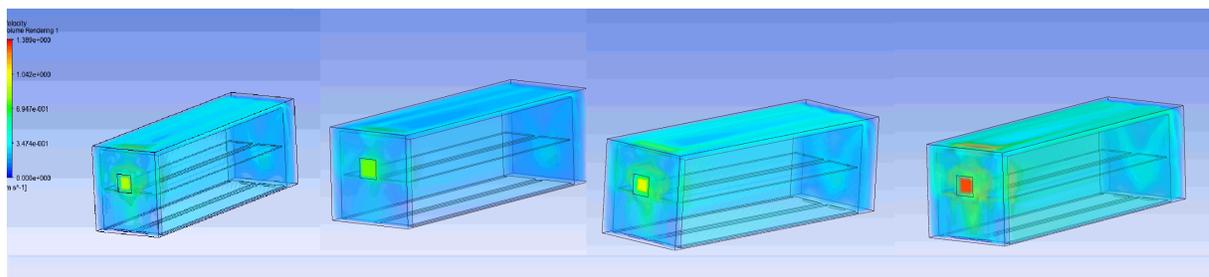


Figura 4.22: Evolución de la velocidad dentro de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].

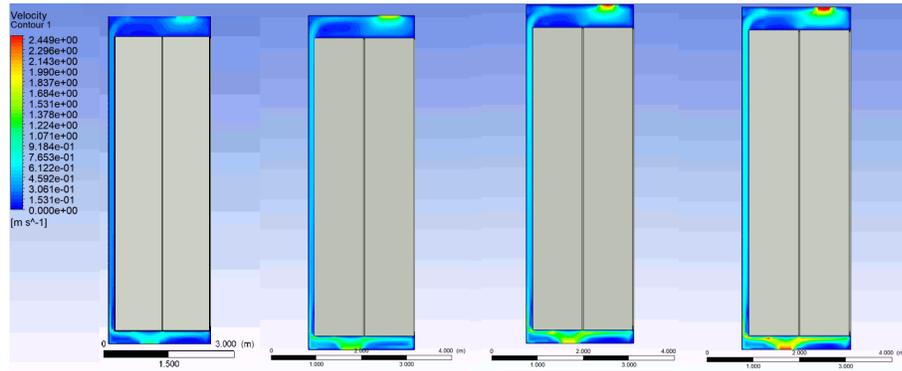


Figura 4.23: Evolución de la velocidad en el plano de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].

En la Figura 4.24 se puede observar como varía la temperatura de la cámara para las distintas velocidades, apreciando que para una velocidad menor se tiene una menor temperatura al final de la cámara, obteniendo una temperatura del aire de la cámara menos homogénea a un tiempo secado determinado.

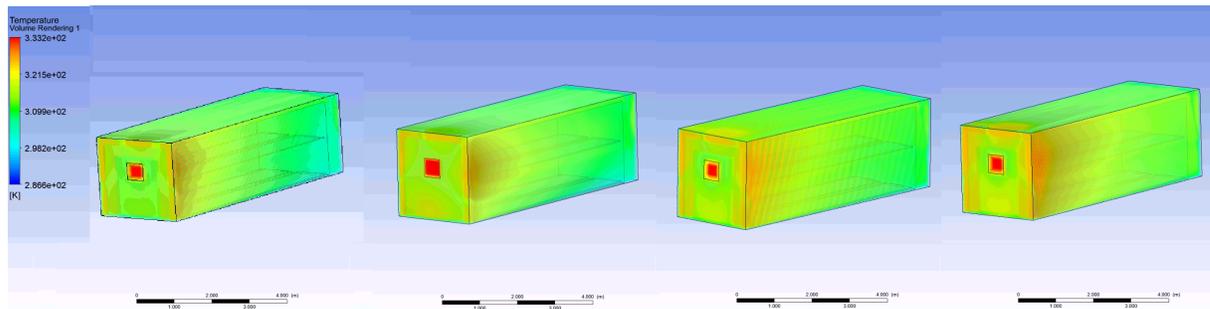


Figura 4.24: Evolución de la temperatura en la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].

Y en la Figura 4.25, se presenta el comportamiento de la temperatura de la madera para distintas velocidades de secado. A medida que aumenta la velocidad del aire, aumenta la transferencia de calor entre los cuerpos y así, finalmente, aumenta la temperatura en el cuerpo, obteniendo mejores secados.

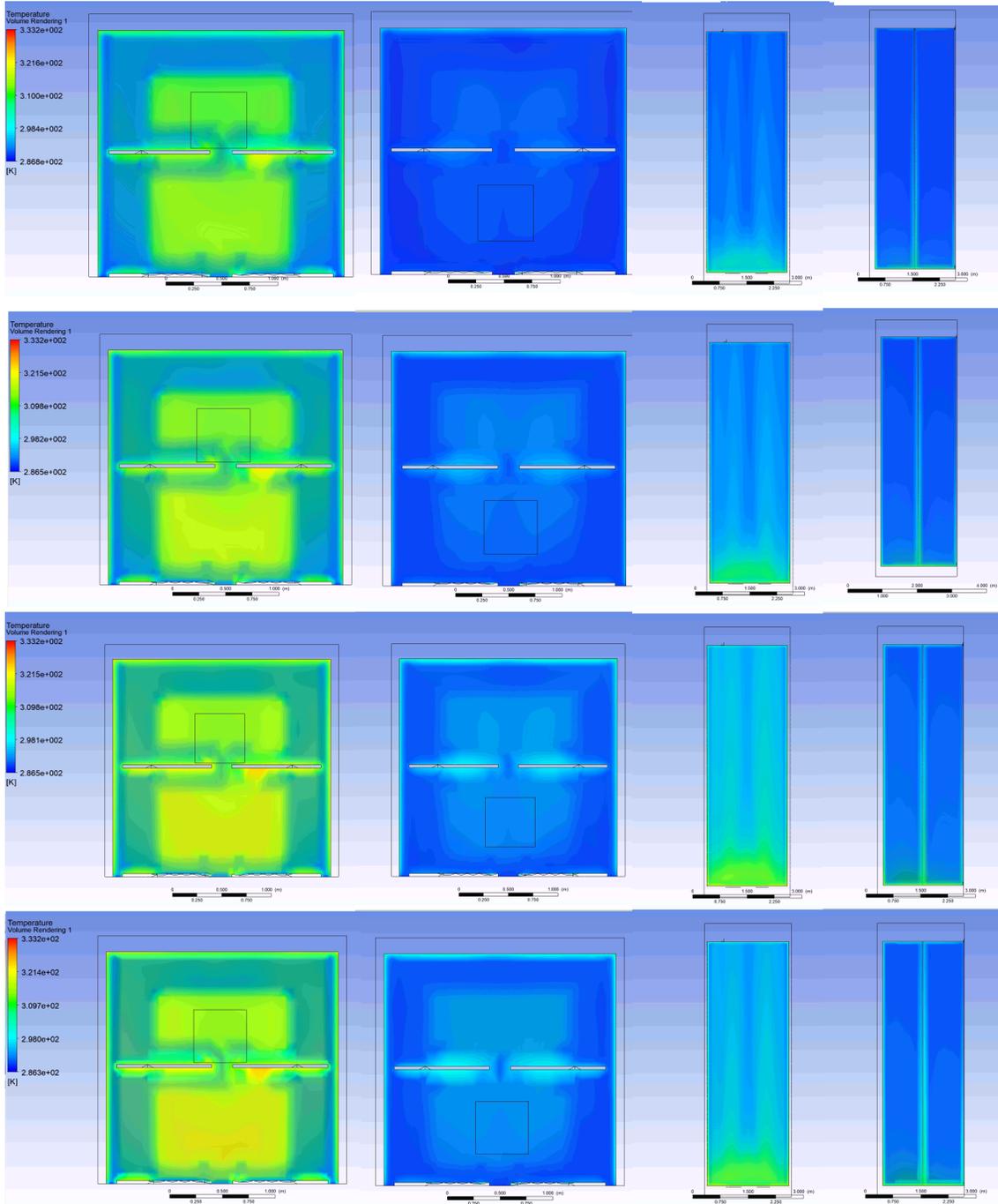


Figura 4.25: Evolución de la temperatura en los distintos planos de la madera, de arriba hacia abajo corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].

4.6.3.2. Roble

Al igual que en el eucalipto, primero se estudia como evoluciona la temperatura a través del tiempo. En la Figura 4.26, se observa la temperatura de la cámara para los diferentes tiempos de secado.

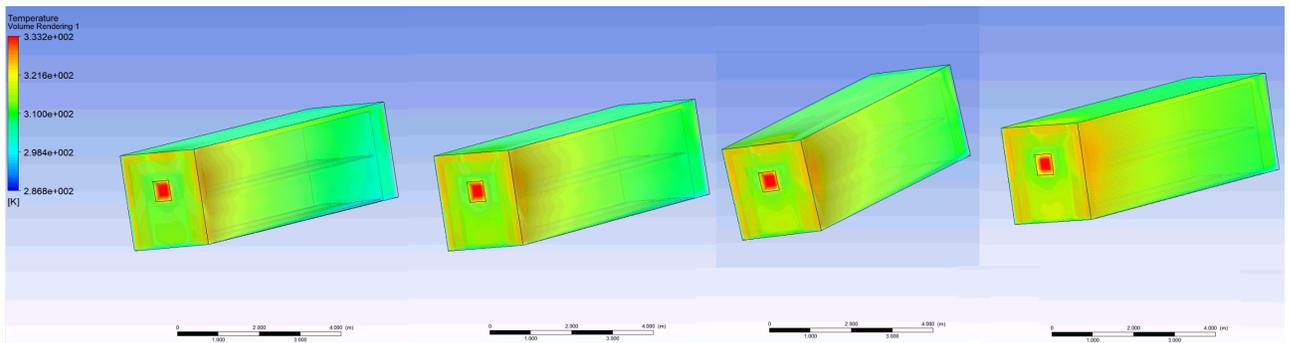


Figura 4.26: Temperatura dentro de la cámara de secado a 1 - 5 - 50 - 101 de secado horas respectivamente.

En la Figura 4.27, se muestra el comportamiento de la velocidad al paso de las horas de secado. Acá también se observa el aumento de velocidad en la cara frontal de la leña, este caso el aumento es más notorio que el caso del eucalipto.

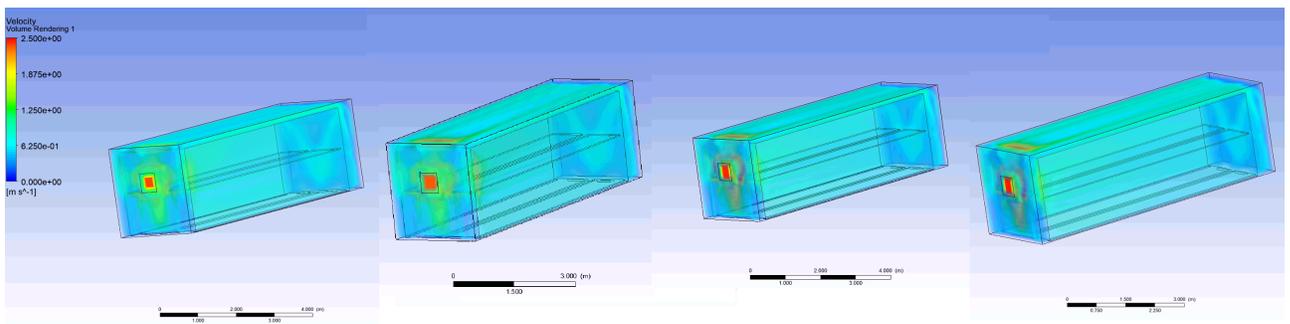


Figura 4.27: Comportamiento de la velocidad a 1 - 5 - 50 - 101 horas de secado respectivamente.

La Figura 4.28 es la evolución de la temperatura de la madera a medida que va aumentando el tiempo de secado, en las distintas caras del cuerpo. El cuerpo alcanza casi los 60°C en algunas zonas para un tiempo de 101 horas de secado. La evolución de temperatura en el cuerpo en el intervalo de secado de 50 a 101 horas es menor, al igual al caso del eucalipto, siendo la velocidad de secado en este intervalo de tiempo, decreciente.

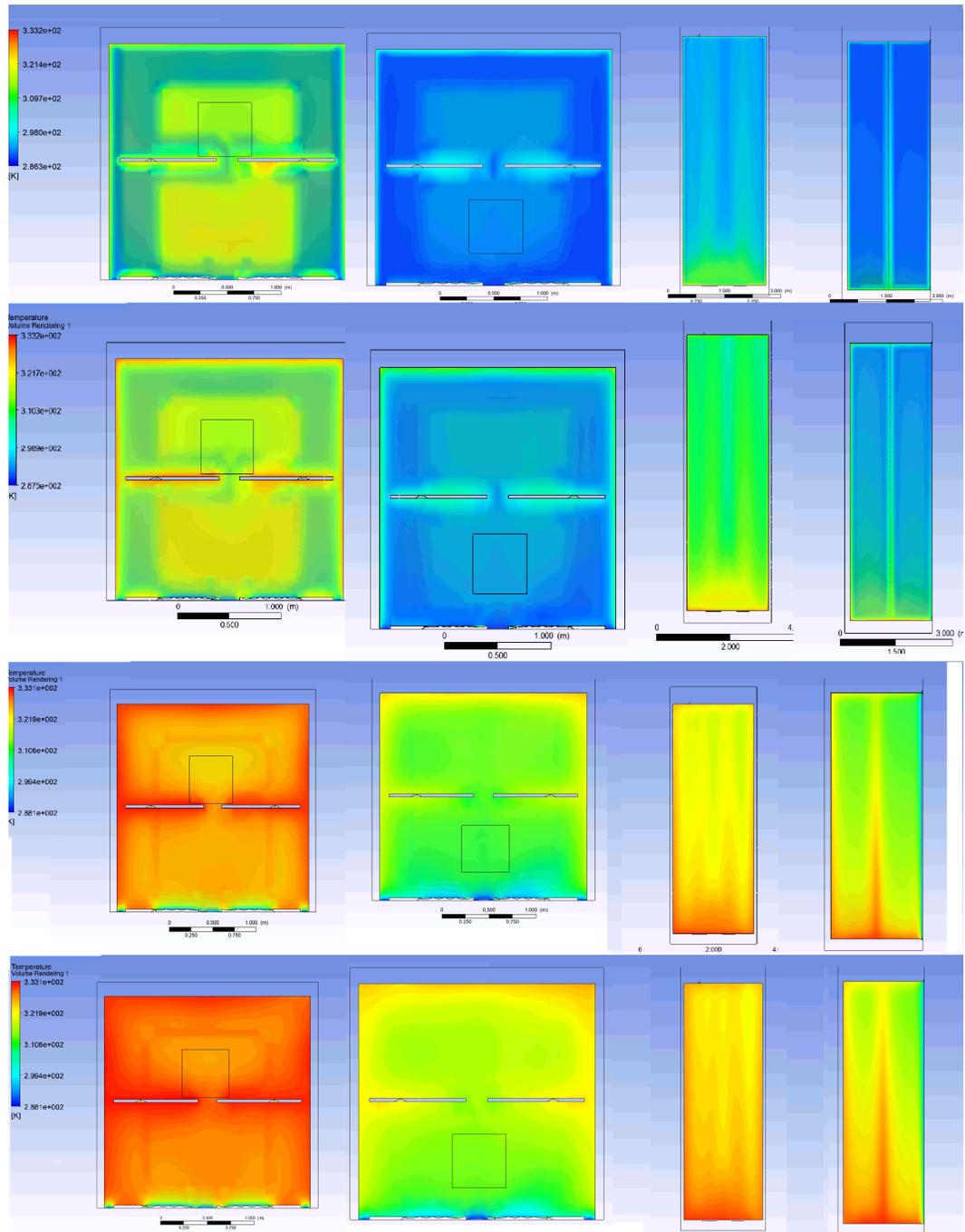


Figura 4.28: Evolución de la temperatura en la madera para 1 - 5 - 50 - 101 horas de secado respectivamente.

Para 101 horas de secado, el interior del cuerpo de la madera esta a altas temperaturas, exceptuando algunas partes del centro del cuerpo, esto se puede observar en la Figura 4.29. Nuevamente se asegura la pérdida de humedad deseada de la madera.

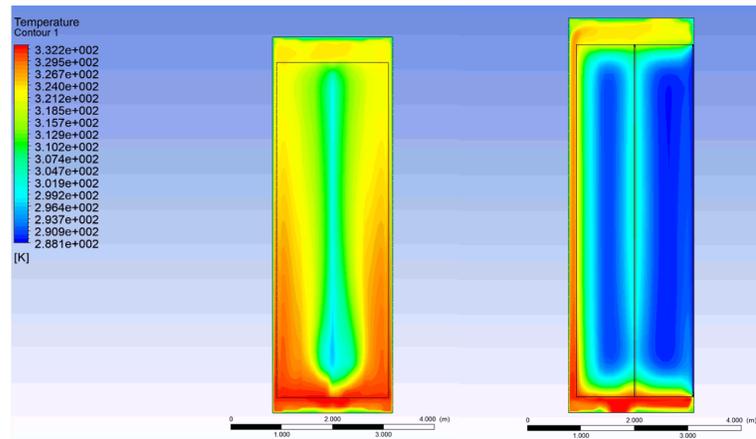


Figura 4.29: Temperatura al interior de la cámara para 101 horas de secado, en la izquierda el plano horizontal central de la cámara y la derecha un plano vertical central.

Ahora se estudia como varía la temperatura, al variar la velocidad del aire a la entrada de la cámara de secado. En la Figura 4.30 se observa la evolución de la velocidad dentro de la cámara de secado a distintas velocidad de entrada del aire y en la Figura 4.31 esta misma evolución pero en el plano central de la cámara de secado.

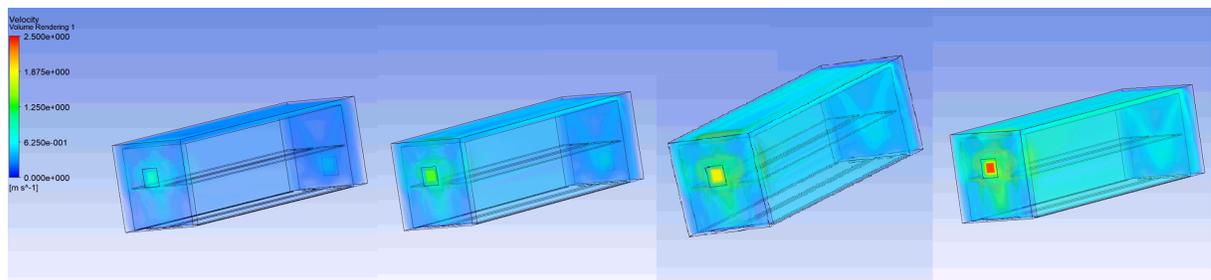


Figura 4.30: Evolución de la velocidad dentro de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].

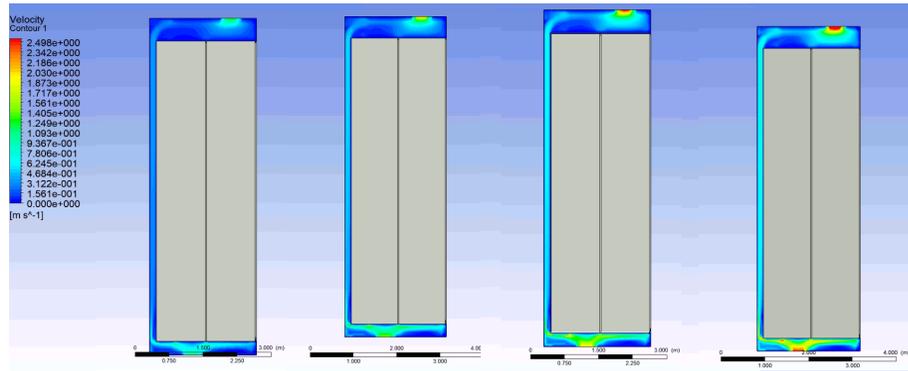


Figura 4.31: Evolución de la velocidad en el plano de la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0-1,5-2,0- 2,5 [m/s].

En la Figura 4.32 se puede observar como varía la temperatura de la cámara para las distintas velocidades, obteniendo una temperatura menor en la sección final de la cámara para velocidades menores.

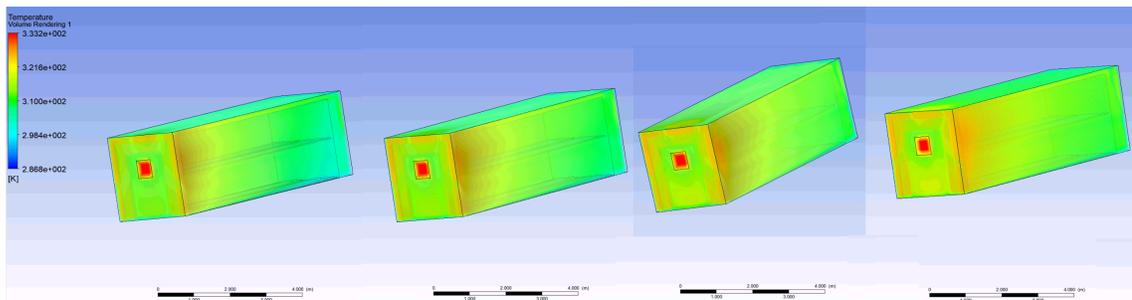


Figura 4.32: Evolución de la temperatura en la cámara de secado, de izquierda a derecha corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].

Como en el caso del eucaliptos, al variar la velocidad de entrada del aire, varía la transferencia de calor entre el fluido y el cuerpo, esta variación se puede observar en la Figura 4.33, en el cual se comprueba que para una menor velocidad de entrada del aire, más lenta es la transferencia de calor a la madera. También se puede apreciar que los canales de ventilación ayudan a tener un secado más homogéneo.

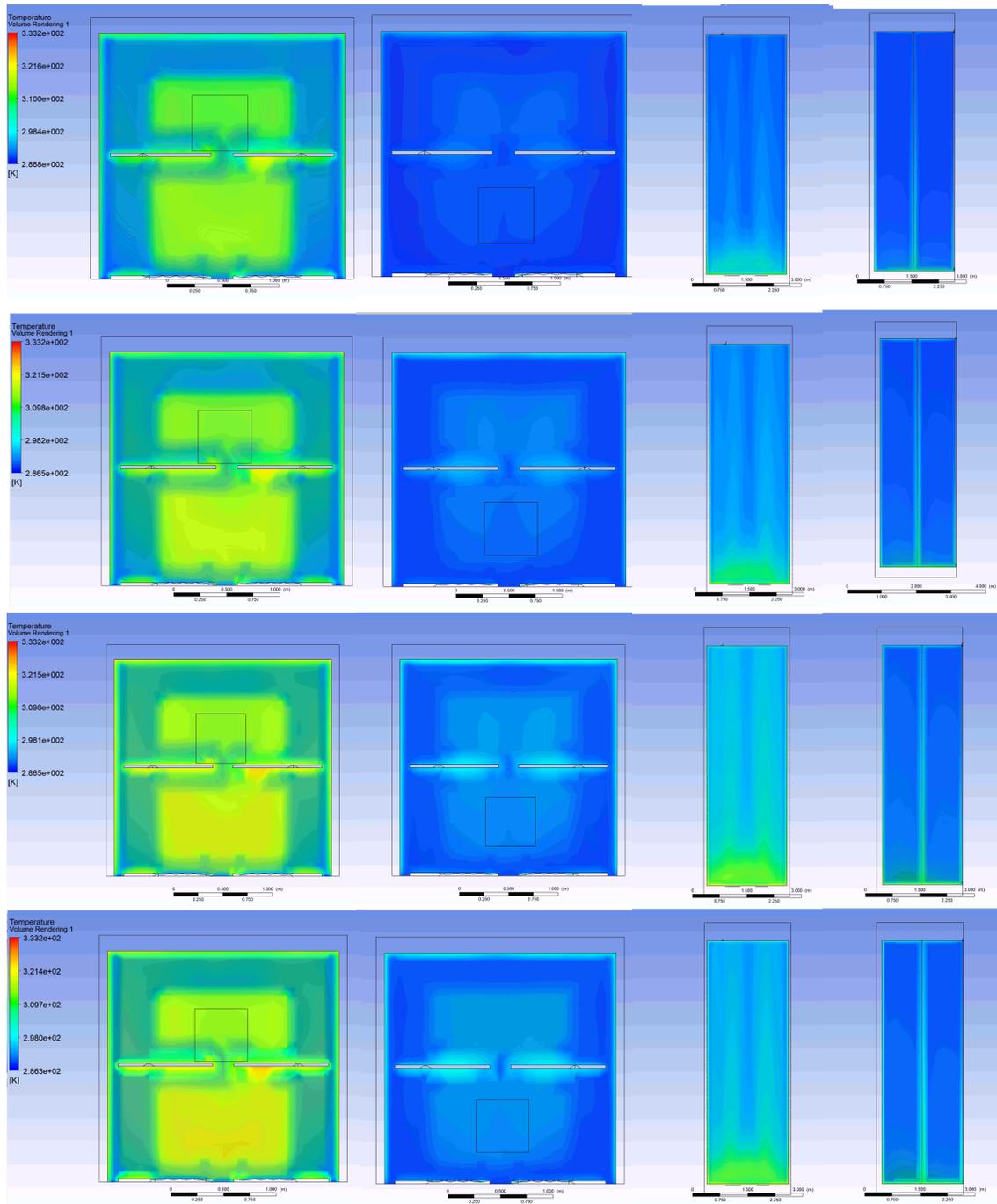


Figura 4.33: Evolución de la temperatura en los distintos planos de la madera, de arriba hacia abajo corresponde a 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 [m/s].

4.6.4. Comparación de temperaturas de las maderas

En la Figura 4.34, se muestran ambas maderas para 5 horas de secado, con un aire de entrada a 2,5 [m/s], siendo la figura de arriba madera de eucalipto y la de abajo roble. Se aprecia que el eucalipto está más caliente en sus paredes comparado el roble, esto es esperable ya que el roble, al ser más denso, se demora más en calentarse y por ende se demora más en secar.

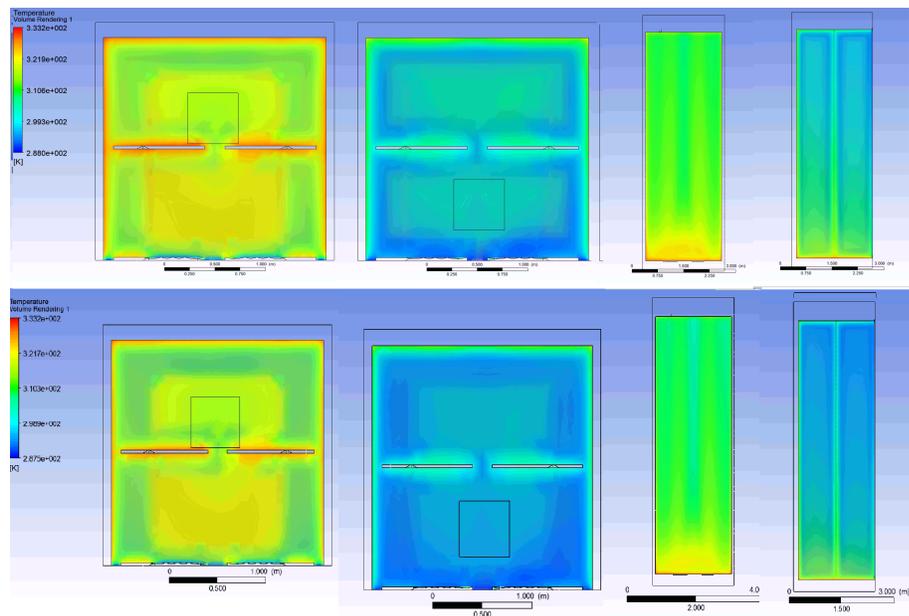


Figura 4.34: Comparación de las temperaturas del cuerpo de madera para un secado de 5 horas, con una velocidad del aire de entrada de 2,5 [m/s], arriba eucalipto y abajo roble.

Capítulo 5

Análisis económico

Una vez comprobada la factibilidad técnica del secador de leña, se debe comparar la rentabilidad económica. Este proyecto tiene la desventaja que la leña se vende a bajos precios, por lo que se suele buscar que los equipos y materiales estructurales tengan una buena relación precio-calidad.

Esta sección se divide en inversión del proyecto, que se incluyen los costos de los equipos, de la construcción de la cámara de secado y la sala de intercambiadores e instrumentación básica necesaria. Luego se calculan los costos operacionales del proyecto para poder obtener el flujo de caja del proyecto

5.1. Inversión

5.1.1. Equipos

En la Sección de 3.3 la selección de equipos se realiza en el mercado nacional, para incentivar la economía local, reducir costos por importaciones y reducir tiempos de entrega. En la compra de los equipos se considera una unidad más, en el caso de que alguna falle tener un repuesto y mantener continuidad en el proceso. Excepto en el caso de los intercambiadores que se compran 2 unidades más, por cualquier eventualidad.

En la Tabla 5.1, se tabulan los precios de los principales equipos del proyecto, con un total de inversión de 4.967.220 [CLP]. Siendo el equipo más caro del proyecto el ventilador centrífugo.

Tabla 5.1: Valores de los equipos principales del proyecto.

Equipos	Cantidad	Valor [CLP]	Total [CLP]
Intercambiador	8	220.000	1.760.000
Bomba	2	377.610	755.220
Ventilador	2	1.226.00	2.452.472
Total			4.967.220

5.1.2. Cámara de secado

En esta sección se considerara el precio de los materiales de construcción de la sección 3.3.4 y la mano de obra necesaria para su construcción. Los materiales son del mercado nacional y la mano de obra se cotizó con constructores de la zona de Valdivia. A ellos se les consulto cómo montar la estructura y los materiales necesarios para estos, que son barras de refuerzo para hormigón y para la estructura de la cámara de secado son necesario 48 barras. En la Tabla 5.2, se resumen la cantidad de material necesaria y los costos de estos, además del costo construcción, montaje y piping del proyecto, con un costo total de 8.584.000 [CLP].

Tabla 5.2: Costos de los materiales de construcción, mano de obra y montaje.

Item	Cantidad	Valor [CLP]	Total [CLP]
Planchas de acero estructural	76	28.000	2.128.000
Lana mineral	6	36.000	216.000
Barras de refuerzo	50	8.000	400.000
Atriles	48	80.000	3.840.000
Montaje de equipos, piping	2 operarios	500.000	1.000.000
Costo construcción	2 operarios	500.000	1.000.000
Total			8.584.000

5.1.3. Extras

En esta sección se consideran los costos asociados a piping e instrumentación del proyecto. En el piping se considera todas las líneas del circuito de agua y los ductos de aire. Los ductos de aire son de chapa de acero inoxidable y las líneas de piping son de polipropileno random (PPR), que posee una alta resistencia a altas temperaturas, su rango de temperaturas de trabajo va -5 a 90 ° C. Además, tiene la ventaja que no añade color ni sabor al agua y posee ausencia de corrosión e incrustaciones.

También, se consideran los costos de la instrumentación de la cámara del secado, considerando un anemómetro para medir la velocidad dentro de la cámara de secado, un controlador de temperatura y humedad relativa y el más importante de todos, un xilohigrómetro para medir la humedad de la madera a la entrada y salida del secador.

Tabla 5.3: Costos de piping e instrumentación.

Item	Cantidad	Valor [CLP]	Total[CLP]
Piping + Fiting	50 [m]	2.000/metro	100.000
Ductor aire	60 [m]	14.000/metro	840.000
Controlador de temperatura y humedad relativa	1	250.000	250.000
Anemómetro	1	150.000	150.000
Xilohigrómetro	2	200000	400000
Total			1.740.000

5.1.4. Resumen de inversión

En la Tabla 5.4 se calcula el costo total de la inversión del proyecto de secador de leña, con un total de 15.291.220 CLP.

Tabla 5.4: Resumen inversión del proyecto.

Item	Valor [CLP]
Equipos	4.967.220
Cámara de secado	8.584.000
Extras	1.740.000
Total	15.291.220

5.2. Costos operacionales

Los costos operacionales consideran los costos en estado transiente del proyecto, es decir, costos de energía, de producción de leña, operarios y mantención del secador.

El tiempo de producción de leña seca, es de 8 meses (2 meses de corte de leña previos a la temporada de secado), en el cual son 6 meses de operación del secado. Realizando 36 secados de roble y 48 secados de eucalipto. Siendo un productor de tamaño pequeño - medio con producción de 144 - 192 [m^3/mes] (la producción de un productor de leña varía entre 13 - 660 [m^3/mes] [25]) de leña húmeda, se consideran que trabajan 3 operarios de tiempo completo en la temporada de secado, con un sueldo de 510.000 [CLP]. Que de acuerdo a Tusalarario.org/Chile es el promedio de sueldo entre recolector de leña y técnico en tratamiento de maderas, con una experiencia de 5 años. Más un operador de grúa horquilla que trabaja 3 horas por cada secado realizado, con renta por secado de 20.000 [CLP]. Se considera el uso de dos sierras eléctricas para cortar madera durante la temporada con un uso de 5 horas diarias por dos operarios, este costo se considera en el costo de energía por temporada en las Tabla 5.5 y 5.6, siendo un total de 274.560[CLP].

En la Tabla 5.5 se muestra el consumo de energía de los equipos que se utilizan en un secado de leña de roble, siendo un total de 170,185 [kWh] y en la Tabla 5.6 el consumo de energía del eucalipto, con un total de 114,58 [kWh]. El costo de [kWh] para cliente libre BT4.3 de la distribuidora Saesa para la zona de Panguipulli es de 156 [CLP]/[kWh]. También en los costos de operación se considera un costo de mantención al inicio de cada temporada.

Tabla 5.5: Costos de energía para realizar un secado de roble.

Equipo	Potencia requerida [kW]	Horas funcionamiento	[kWh] utilizados
Ventilador	1,5	101	151,5
Bomba	0,185	101	18,685
Total			170,185

Tabla 5.6: Costos de energía para realizar un secado de eucalipto.

Equipo	Potencia requerida [kW]	Horas funcionamiento	[kWh] utilizados
Ventilador	1,5	68	102
Bomba	0,185	68	12,58
Total			114,58

Finalmente el último punto de la línea de producción es la venta de leña, los costos de venta consideran traslado de la leña a puntos de venta dentro de la Región de los Ríos y la operación de comercialización, de acuerdo a [28], es de 3.200 [CLP] por $[m^3]$ producido. En la Tabla 5.7 y 5.8 se muestra el resumen de los costos operacionales para un secado y la temporada completa.

Tabla 5.7: Costos de operacionales de un secado de roble y de la temporada.

Item	1 secado [CLP]	Temporada [CLP]
3 operarios	85.000/operario	122.400.000
1 operador grúa horquilla	20.000	720.000
Electricidad de los equipos	26.549	1.230.319
Costo por ventas de la leña	59.200	2.131.200
Mantenimiento		300.000
Total [CLP]	360.749	16.621.519

Tabla 5.8: Costos de operacionales de un secado de eucalipto y de la temporada.

Item	1 secado [CLP]	Temporada [CLP]
3 operarios	63.750/operario	122.400.000
1 operador grúa horquilla	20.000	720.000
Electricidad de los equipos	17.875	1.132.535
Costo por ventas de la leña	59.200	2.841.600
Mantenimiento		300.000
Total [CLP]	288.325	17.474.135

Los costos operacionales por temporada son de 16.621.519 [CLP] y 17.474.135 [CLP] para el roble y eucalipto respectivamente.

5.3. Flujo de caja

Determinados los costos de inversión y los operacionales, se puede realizar el flujo de caja correspondiente, para comprobar a través de varios indicadores de evaluación de proyectos si es factible económicamente el proyecto. El flujo de caja se realiza para un horizontes de evaluación de 10 años, considerando la vida útil de los equipos. Para llevar a cabo el proyecto, se considera que el capital de inversión existe, por lo cual no se pide un crédito. De acuerdo al SII, las utilidades de empresas privadas están sujetas a impuestos de primera categoría, el cual es de 27% y una tasa de descuentos de 12%.

La demanda de leña en Valdivia es de 518.680 [m^3 /año] [25], el cual solo 8% es suplida con leña certificada. Es un mercado grande y es un bien de primera necesidad en la zona, por lo que siempre existirá demanda. De acuerdo a esto, se considera que la producción se vende completa. El secado de roble produce por temporada 665 [m^3] de leña seca y el secado del eucalipto 887 [m^3] de leña seca. Cabe destacar que el secador en el mejor de los casos cubre el 0,17% de la demanda anual de leña.

Los precios de venta para leña trozada de acuerdo al último boletín N° 173 INFOR es de 35.000 [CLP/ m^3] para el roble y de 33.000 [CLP/ m^3] de eucalipto nitens. De acuerdo a estos datos, se desarrolla el flujo de caja para el roble en la Tabla 5.9 y en la Tabla 5.10 para el eucalipto.

Tabla 5.9: Flujo de caja para un secador de leña de roble, con un horizonte de 10 años.

	Temporada 0 [CLP]	Temporada 1-9 [CLP]	Temporada 10 [CLP]
+Ingresos por ventas	0	23.310.000	23.310.000
-Gastos operacionales	0	16.621.519	16.621.519
-Depreciación tributaria	0	556.722	556.722
-Intereses	0	0	0
-Pérdidas de ejercicios anteriores	0	0	0
+/-Ganancia/ perdida de capital	0	0	0
=Utilidad antes del impuesto	0	6.131759	6.131759
-Impuesto a la renta	0	1.655.575	1.655.575
=Utilidad después del impuesto	0	4.476.184	4.476.184
+Depreciación tributaria	0	556.722	556.722
+Pérdidas de ejercicios anteriores	0	0	0
+/-Ganancia/ perdida de capital	0	0	0
=Flujo de caja operacional	0	3.919.462	3.919.462
-Inversión fija	15.291.220	0	0
+Valor residual de los activos	0	0	9.724.000
-Capital de trabajo	6.688.481	0	0
+Recuperación del capital de trabajo	0	0	6.688.481
=Flujo de capitales	-21.979.701	0	16.412.481
=Flujo de caja Privado	-21.979.701	3.919.462	20.331.943

Tabla 5.10: Flujo de caja para un secador de leña de eucalipto, con un horizonte de 10 años.

	Temporada 0 [CLP]	Temporada 1-9 [CLP]	Temporada 10 [CLP]
+Ingresos por ventas	0	29.304.000	29.304.000
-Gastos operacionales	0	17.474.135	17.474.135
-Depreciación tributaria	0	556.722	556.722
-Intereses	0	0	0
-Pérdidas de ejercicios anteriores	0	0	0
+/-Ganancia/ pérdida de capital	0	0	0
=Utilidad antes del impuesto	0	11.273.143	11.273.143
-Impuesto a la renta	0	3.043.749	3.043.749
=Utilidad después del impuesto	0	8.229.394	8.229.394
+Depreciación tributaria	0	556.722	556.722
+Pérdidas de ejercicios anteriores	0	0	0
+/-Ganancia/ pérdida de capital	0	0	0
=Flujo de caja operacional	0	7.672.672	7.672.672
-Inversión fija	15.291.220	0	0
+Valor residual de los activos	0	0	9.724.000
-Capital de trabajo	11.829.865	0	0
+Recuperación del capital de trabajo	0	0	11.829.865
=Flujo de capitales	-27.121.085	0	21.553.865
=Flujo de caja Privado	-27.121.085	7.672.672	29.226.537

En la Tabla 5.11 se resumen los indicadores del proyecto más importantes, en el cual el VAN en ambos proyectos es positivo, siendo el del eucalipto más del cuádruple que del roble. En el caso de la TIR, esta debe ser mayor a la tasa de descuento, para que el proyecto sea aceptado, lo que se cumple en ambos casos. Además, se calcula que para el el secado del roble en un período de aproximadamente de 5,6 años se devuelve la inversión y en el caso del roble en un periodo aproximado de 3,6 años.

Tabla 5.11: Indicadores económicos de los proyectos.

Indicador	Roble	Eucalipto
VAN	4.305.961 [CLP]	19.226.223 [CLP]
TIR	16,4 %	27,6 %
PCR	5,6 [años]	3,6 [años]

5.4. Análisis de sensibilidad técnico y económico

En esta sección se estudiará, como afecta variar la carga de madera en la cámara de secado, con el costo que con lleva, las ventas y las ganancias del secado. Se realiza este estudio en el caso que en cierto escenario, no se llegue a la carga máxima se secado. Se evaluaran 4 escenarios, 100 %, 75 %, 50 % y 25 % de capacidad de la cámara de secado. Se mantienen las variables de secado, como la temperatura de secado, el caudal del aire, la velocidad del aire, pero la variable que se modifica al variar la carga es el tiempo de secado. Al tener menor volumen a secar, este se secará en menor tiempo. En la Tabla 5.12, se muestran los volúmenes a secar para el roble y el eucaliptos, con sus tiempos de secado y la potencia total asociada al secado.

Tabla 5.12: Análisis de sensibilidad técnico, para distintas capacidades de carga de la cámara de secado.

Capacidad	Volumen [m ³]	Roble		Eucalipto	
		Tiempo [hr]	Potencia [kW]	Tiempo [hr]	Potencia [kW]
100 %	26,4	101	82	68	82
75 %	19,8	72	87	49	81
50 %	13,2	49	85	36	81
25 %	6,6	26	82	17	85

Ahora evaluando los costos, ventas y ganancias por secado, de acuerdo al nuevo costo de energía utilizada y a las ventas asociadas al nuevo volumen final del secado. Con esos datos se realizan las Tablas 5.13 y 5.14. Cabe destacar que el análisis que se realiza es por un secado aislado, para evaluar si es que no se llega a la capacidad total del secado, hasta que capacidad es rentable realizarlo. Para el caso del roble, deja de ser rentable cuando el secado esta a un 25 % de su capacidad, donde no se alcanza a cubrir los gastos por secado, teniendo un déficit de 127.849 [CLP]. En cambio para el caso del eucalipto, ya al 50 % de capacidad del secador no es rentable realizar el secado, por un déficit casi despreciable de 4 [CLP].

Tabla 5.13: Análisis de sensibilidad económico por secado de roble, para distintas capacidades de carga de la cámara de secado.

Capacidad	Volumen [m ³]	Costo [CLP]	Ventas [CLP]	Ganancias [CLP]
100 %	18,4	335.149	647.500	312.350
75 %	13,86	320.089	485.000	165.010
50 %	9,24	305.137	323.400	18.262
25 %	4,64	290.250	162.400	-127.849

Tabla 5.14: Análisis de sensibilidad económico por secado de eucalipto, para distintas capacidades de carga de la cámara de secado.

Capacidad	Volumen [m ³]	Costo [CLP]	Ventas [CLP]	Ganancias [CLP]
100 %	18,4	334.411	607.200	272.788
75 %	13,86	319.779	457.380	137.600
50 %	9,24	304.924	304.920	-4
25 %	4,64	290.100	153.120	-136.979

5.5. Evaluación social del proyecto

El proyecto del secado de leña sigue la línea del Plan de Descontaminación Atmosférica de la comuna de Valdivia [29], implementado el año 2017 (D.S.N°25/2017 del Ministerio del Medio Ambiente). En el cual se presentan beneficios sociales valorizados asociados a impactos en la salud de la población, producto de la disminución de la concentración ambiental del material particulado MP2,5 asociado a la reducción de las emisiones por quema de leña húmeda. El uso de leña seca conlleva un ahorro de leña, debido a que esta tiene un mayor poder calorífico.

En la Figura 5.1, se observa que al paso de los años hay una leve disminución en las hospitalizaciones por causas respiratorias. En particular una disminución del 12,75% del promedio de hospitalizaciones de las semanas 27 - 28 y 29 del año 2018 al 2019. El cual se puede deber a las políticas públicas implementadas a la descontaminación ambiental.

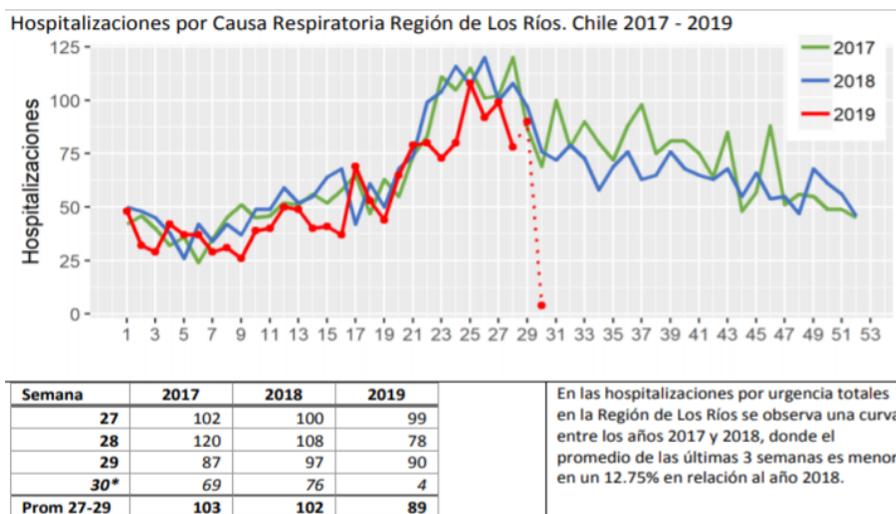


Figura 5.1: Hospitalizaciones por causas respiratoria Región de Los Ríos. Chile 2017 - 2019. Fuente: Campaña de Invierno 2019, Ministerio de Salud.

Un árbol de problemas busca identificar el problema, determinar efectos de este, e identificar las posibles causas que lo origina. Se realiza un árbol de la Figura 5.2, siendo el problema identificado, la alta tasa de enfermedades. Una alta tasa de enfermedades tiene varios efectos negativos en la sociedad, como se muestra en las flechas salientes del problema. Dentro de los cuales se destaca un alto gasto público en salud, disminución de disponibilidad de camas de urgencias, alta mortalidad e inasistencias laborales. Por lo que se busca disminuir la tasa de enfermedades atacando la causa del medio ambiente. Además, se puede ver que al disminuir este problema, tiene altos beneficios sociales involucrados.

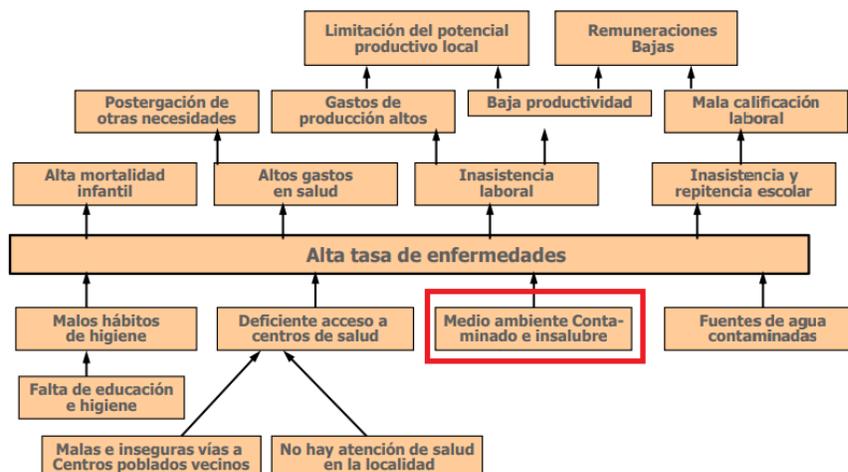


Figura 5.2: Árbol de problemas, de efectos y causas de una alta tasa de enfermedades, en rojo la causa a resolver.

El proyecto tiene un VAN positivo, pero este no es tan atractivo para que una empresa privada invierta, por lo que se busca optar por un subsidio en la inversión. Actualmente se encuentra el programa de “Leña más seca”, que tiene como objetivo aumentar la oferta de leña seca en varias regiones del sur de Chile, entre ellas la Región de los Ríos. Este programa realizó el 2014 el primer llamado para postulación de fondos.

El fondo es de máximo de 8.000.000 [CLP] por beneficiario, los cuales financian proyectos de inversión de los postulantes. El fondo va dirigido a productores y comerciantes de la leña, con o sin inicio de actividades en primera categoría ante en SII. Estos deben tener experiencia demostrable en el rubro de leña y deben querer aumentar su producción de leña seca o implementar procesos de secado [30]. En el caso de que se ganará el fondo concursable por el monto máximo, el proyecto tendría los indicadores económicos presentados en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15: Indicadores económicos de los proyectos.

Indicador	Roble	Eucaliptos
VAN	8.873.033 [CLP]	23.793.294 [CLP]
TIR	26,5 %	39,5 %
PCR	3,6 [años]	2,5 [años]

De acuerdo a estos indicadores, el proyecto lo hace mucho más atractivo al tener un subsidio a la inversión y las probabilidades que un privado quiera invertir en el secado de la leña aumentan.

Capítulo 6

Conclusiones y comentarios

En esta sección se presentan las conclusiones del trabajo de título, tanto técnicas como económicas. Y comentarios y recomendaciones de carácter personal respecto a la geotermia y el rol de Estado en el desarrollo de esta.

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo de título se estudió la realización de un secador de leña, alimentado con energía térmica de una fuente geotérmica, clasificada de baja entalpía. Para verificar la factibilidad técnica del proyecto se calcula la potencia entregada por la fuente termal, que es de un total de 104,5 [KW] que están disponibles para el secado de la leña. La planta de secado consta de un bomba centrífuga, que bombea el agua de la fuente termal Hipolito Muñoz. De un ventilador centrífugo que impulsa el aire del circuito, que será calentado por el agua. 6 intercambiadores de calor donde ocurre la transferencia térmica. Y la cámara de secado, donde entra el aire caliente, que sale del intercambiador, para secar la leña que se encuentra dentro de la cámara, con dimensiones de 2,35x2,36x7,4 [m³].

Este informe evalúa si es factible tanto como técnica y económicamente para los resultados obtenidos en el proyecto. Se comienza con el análisis técnico del secador, ya que si no es técnicamente viable, no se justifica la evaluación económica.

De acuerdo a los cálculos térmicos realizado se concluye que, la fuente geotermal de la localidad de Liquiñe, es capaz de secar 26,4 [m³] de leña húmeda, tanto de roble como eucalipto. Los tiempos de secado para ambas maderas, están dentro los tiempos de secado de la literatura, siendo de 4,2 días para el roble y 2,8 días para el eucalipto. Se verifica que una madera más densa, como lo es el roble, se demora más en secarse que una madera menos densa, como lo es el eucalipto. Se produce un total de 18,5 [m³] de leña seca, lo que se traduce a 13.306 kilos de leña de roble y 8.871 kg kilos de leña de eucalipto por temporada de secado, que va desde octubre a abril.

De las simulaciones de ANSYS, se comprueba que para una menor velocidad de entrada del aire, la transferencia de calor será más lenta y no tan efectiva comparado a mayores velocidades. También, de las simulaciones, se puede concluir que se cumple la curva de secado teórica, donde existe un punto del secado que la transferencia de calor entre fluido y cuerpo disminuye, llegando a cero.

Una vez verificado que es factible técnicamente, se realiza la evaluación económica respectiva. El proyecto de realizar un secador de leña de capacidad máxima de secado de 26,4 [m³] es de 15.822.442 [CLP]. El cual son 4.967.220 [CLP] costos asociados a la compra de los equipos del secador.

El costo operacional por secado del roble es de 360.749 [CLP], realizando 36 secados por temporada, lo que es equivalente a 16.621.519 [CLP]. Esto permite obtener un VAN = 4.305.961 [CLP], una TIR = 16,4% y la inversión se devuelve al paso de 5,6 años.

Al considerar la evaluación social del proyecto, estos valores son igual a VAN = 8.873.033 [CLP], TIR = 26,5% y la inversión se recupera en 3,6 años.

En el caso del eucaliptos, el costo operacional por secado es de 288.325 [CLP], al realizar 48 secados por temporada equivale a 17.474.135 [CLP]. De acuerdo a la inversión y a los costos operacionales, se obtiene un VAN = 19.226.223 [CLP], una TIR = 27,6% y la inversión se devuelve al paso de 3,6 años. Al realizar una evaluación social del proyecto, estos valores son igual a VAN = 23.793.294 [CLP], TIR = 39,5% y la inversión se recupera en 2,5 años.

En el caso de no llegar a la capacidad total de la cámara de secado, 26,4 [m³], en el caso del roble es rentable secar con una capacidad de hasta el 50%, con tiempo de secado de 49 horas. Y para el eucalipto es rentable hasta el 75% de la capacidad de secado, con tiempo de secado también de 49 horas.

De acuerdo a esto, el proyecto de secado de ambas maderas es factible, siendo el secado de eucalipto mucho más atractivo para la inversión privada, ya que trae más beneficio económico al corto y largo plazo. Además, de la publicidad de vender leña seca en el mercado, no generará pérdidas y la inversión se recuperará en el período determinado. El proyecto trae altos beneficios sociales a la población, ya que se puede llegar a disminuir la contaminación ambiental de la región. Lo que trae como consecuencia más importantes es la reducción de enfermedades respiratorias, que implica un menor colapso en centros de atención de salud (que se considera liberación de recursos). Que de acuerdo a contingencia nacional es algo que se necesita.

Finalmente se concluye que la construcción de un secador de leña, alimentado térmicamente por una fuente geotermal es factible. El cual tiene un alto impacto ambiental para el país y no menos importante, el ahorro que se produce al no invertir en el recurso para calentar el aire del secador de leña.

6.2. Comentarios

Dentro de las conclusiones generales de este trabajo de título, es que se necesitan más proyectos con energía geotérmica, renovable y limpia, para evidenciar al alto impacto y los beneficios que puede tener el uso de esta energía. Educar a la población de los potenciales usos de esta geotermia, sobretodo en las aplicaciones directas para fuentes térmicas de baja entalpía, que no son muy conocidas a nivel general de la población.

El Estado se debe alinear con distintos organismos (municipalidades, CORE, centros de investigación) para invertir en tecnologías aun emergentes como lo es la geotermia. El Estado debe seguir con su plan de descontaminación, ya que hay una leve mejoría en los números de casos de hospitalización de enfermedades respiratorias. También, educar a la población para que escoja siempre leña seca, aunque signifique a corto plazo un costo más alto. Pero a largo plazo es un beneficio en la salud, un mejor confort térmico y un ahorro en el consumo de leña.

Dentro de los desafíos para esta energía en general es buscar la forma de bajar los costos de instalación, para que se convierta en una energía más competitiva en el mercado. Tener un conocimiento detallado del recurso geológico del país y el potencial térmico de este, para facilitar la creación de proyectos.

Bibliografía

- [1] Consejo Geotérmico. (2018, septiembre). Geotermia como alternativa de reemplazo al carbón. https://energia.gob.cl/sites/default/files/20180925_presentacion_consejo_geotermico_-_sesion_5.pdf
- [2] Richter, A. (2020, 5 febrero). The Top 10 Geothermal Countries 2019 – based on installed generation capacity (MWe). Think GeoEnergy - Geothermal Energy News. <https://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-geothermal-countries-2019-based-on-installed-generation-capacity-mwe/>
- [3] Asociación de Generadoras de Chile. (2019, marzo). Boletín del mercado eléctrico sector generación. <http://generadoras.cl/media/page-files/817/Boletin%20Sector%20Generacion%20Marzo%202019.pdf>
- [4] Mary H. Dickson y Mario Fanelli, ¿Qué es la Energía Geotérmica?, Universidad de Santiago, Chile.
- [5] Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- [6] Termas Puyehue Wellness & Spa Resort apuesta por ERNC. (2010, 26 septiembre). CEGA. <http://www.cega-uchile.cl/noticias/termas-puyehue-wellness-spa-resort-apuesta-por-ernc/>
- [7] Luz Fariña. Departamento de Geofísica. (2019, 12 julio). Liceo de Coyhaique será calefaccionado con energía de la tierra. Universidad de Chile. <https://www.uchile.cl/noticias/155696/liceo-de-coyhaique-sera-calefaccionado-con-energia-de-la-tierra>
- [8] Baier, W. & Inmobiliaria Frankfurt S.P.A. (2019). Un sueño de innovación en valor. https://energia.gob.cl/sites/default/files/werner_baier-condominio_frankfurt.pdf
- [9] Hurtado Arroyo, N., & Valencia Musalem, A. (2017). Evaluación del uso de bombas de calor geotérmicas en invernaderos. Tesis (Ingeniero Civil Mecánico) – Universidad de Chile, 2017.
- [10] Comunicaciones Cega. (2017, 14 diciembre). CEGA lleva el primer invernadero geotérmico a la Patagonia - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile. CEGA. <http://ingenieria.uchile.cl/noticias/139912/cega-lleva-el-primer-invernadero-geotermico-a-la-patagonia>
- [11] Liquiñe. (s. f.). Sietelagos Panguipulli. Recuperado 16 de mayo de 2020, de <https://sietelagos.cl/liquine/>.

- [12] © Climate-Data.org / AM OP / OpenStreetMap contributors. (s. f.). Lliquiñe Clima (Chile). CLIMATE-DATA.ORG. Recuperado 10 de mayo de 2020, de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/chile/xiv-region-de-los-rios/liquine-148237/>
- [13] Pavez, Maximiliano, Díaz, Daniel, Held, Sebastián, Schill, Eva. Caracterización de la Zona de Falla Lliquiñe-Ofqui en el sector de Caburgua (Región de la Araucanía), mediante estudios magnetotélúricos. [artículos de congresos]. 2015. Publicado en: Congreso Geológico Chileno, 14, La Serena, Chile, 4 - 8 Octubre 2015, pp.57-60 (v.1)
- [14] Pérez-Flores, P., Cembrano, J., Sánchez-Alfaro, P., Veloso, E., Arancibia, G., & Roquer, T. (2016). Tectonics, magmatism and paleo-fluid distribution in a strike-slip setting: Insights from the northern termination of the Lliquiñe–Ofqui fault System, Chile. *Tectonophysics*, 680, 192-210. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.016>
- [15] Política de uso de leña y sus derivados para calefacción, Santiago de Chile, octubre 2016.
- [16] Sistema Nacional de Certificación de Leña. (2019, marzo). Manual de técnicas para el secado y monitoreo de leña. Región de Los Ríos, Chile. http://lena.cl/wp-content/uploads/2019/03/manual_lena_de_calidad.pdf
- [17] D.S. N° 20 12/2013 - Norma primaria material particulado respirable MP10, y D.S. N° 12/2011 - Norma primaria Material particulado fino MP2,5.
- [18] Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/XIV>.
- [19] Gobierno de Chile, Fondo de Investigación del Bosque Nativo, ANÁLISIS DE ENCADENAMIENTOS PRODUCTIVOS DE LEÑA Y MADERA NATIVA EN LAS REGIONES DE LOS RÍOS Y LOS LAGOS Y PROPUESTAS PARA SU DESARROLLO, Valdivia, Chile, enero 2017.
- [20] William T. Simpson. (1991). *Dry Kiln Operator’s Manual*. Madison, Wisconsin: United States Department of Agriculture.
- [21] River Consultores, Gobierno de Chile, ASESORÍA DE INGENIERÍA DE DETALLE DE UN CENTRO DE ACOPIO Y SECADO (CAS) DE LEÑA EN COYHAIQUE, enero 2016.
- [22] YUNUS A. ÇENGEL, AFSHIN J. GHAJAR. (Cuarta Edición). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. Mexico: Mc Graw Hill Educación.
- [23] INTI - CITEMA, Densidad de maderas (Kg/m³) ordenadas por nombre científico.
- [24] Corporación de Desarrollo Tecnológico, MEDICIÓN DEL CONSUMO NACIONAL DE LEÑA Y OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DERIVADOS DE LA MADERA, Santiago, Chile, diciembre 2015.
- [25] Misael Gutiérrez Ariel Villalón Rose Marie Garay Sergio Gutiérrez. (2009). Modelos de negocios para el acopio y secado de leña, Informe Final. Laboratorio de Bioenergía y Biocombustibles, Universidad de Chile, Chile.
- [26] AYRSA, Paneles de lana mineral [Archivo PDF].www.ayrsa.cl
- [27] ROOLFORD NEUMANN R., ALBERTO TAMM R Y MAURICIO BRAVO H.. (1995). PÉRDIDAS DE PRESIÓN DEL FLUJO DE AIRE POR PILAS DE MADERA. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Depto de Ingeniería Mecánica.

- [28] Gustavo Inostroza Paredes (2015) "Leñas Lahuén Costero", Parte 2 - Análisis organizativo - Financiero. (Tesis de magíster). Universidad de Chile, Santiago.
- [29] D.S. N° 25 06/2017 - ESTABLECE PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA COMUNA DE VALDIVIA.
- [30] Agencia de sostenibilidad energética (31 de mayo, 2019), Bases del proceso concursal, programa de leña más seca, Región de O'Higgins, Maule, Ñuble, BioBío, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén.

Anexo A

Coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador, se utilizan las temperaturas medias de ambos fluidos, en la Tabla A.1, se presentan las propiedades del agua y aire para estas temperaturas. El siguiente calculo esta ajustado al intercambiador seleccionado.

Tabla A.1: Propiedades fluidos.

Propiedad	Agua a 55°C	Aire a 38°C
Densidad, ρ [kg/m ³]	985,2	1,127
Conductividad térmica, k [W/mK]	0,649	0,02662
Número de Prandtl, Pr	3,25	0,7255
Viscosidad dinámica, μ [kg/m seg]	0,00504	0,00001918
Viscosidad cinemática, ν [m ² /seg]	5,11 x 10 ⁻⁶	1,02 x 10 ⁻⁵

El coeficiente de transferencia se calcula con la siguiente ecuación

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_{agua}} + \frac{1}{h_{aire}} \quad (A.1)$$

Primero se calcula h_{agua} , se necesita la velocidad del fluido dentro del tubo, para luego obtener el número de Reynolds, el cual se calcula como:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} \quad (A.2)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (A.3)$$

Donde:

\dot{m} : flujo másico.

D: diámetro del conducto, 0,008 [m].

ρ : densidad fluido.

ν : viscosidad del agua.

Obteniendo una velocidad media de 9,08 [m/seg] y un número de Reynolds de 14.210, por lo tanto es un flujo turbulento dentro del tubo. Asumiendo que es un flujo completamente desarrollado, el número de Nusselt se puede determinar con la siguiente relación:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (A.4)$$

Obteniendo un Nusselt de 77,36, que luego de reemplazar nuevamente se obtiene un $h_{agua} = 6.276,5 [W/m^2C]$. El intercambiador tiene un banco de tubos escalonados, donde $St = 25$ [mm], con este dato se puede calcular la velocidad máxima que alcanza el aire dentro del banco de tubos, como:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{St}{St - D}V \quad (A.5)$$

Ya que se cumple la relación $2Ad > At$. El resultado de $V_{m\acute{a}x} = 3,67$ [m/seg], con este valor se calcula el número de Reynolds del aire siendo:

$$Re_D = \frac{2V_{m\acute{a}x}H}{\nu} \quad (A.6)$$

Donde:

H: 0,004 [m].

El cual da 2.883,5. Se tiene que las relaciones $0,7 < Pr < 500$ y $0 < Re_D < 2 \times 10^6$ se cumplen, por lo que se puede usar las correlaciones para un flujo cruzado sobre un banco de tubos:

$$Nu_D = 0,35(St/Sl)^{0,2}Re_D^{0,6}Pr^{0,36}(Pr/Pr_s)^{0,25} \quad (A.7)$$

Donde:

Sl: 0,02165 [m].

El número de Nusselt obtenido es de 37,49, con el cual se calcula finalmente el $h_{aire} = 124,75 [W/m^2C]$. Ahora reemplazado h_{aire} y h_{agua} en la ecuación A.1, se obtiene un $U = 122,33 [W/m^2C]$.

Anexo B

Pérdida carga de cámara de secado

De acuerdo a [27], para flujos turbulentos en secciones transversales constantes, como se tienen en la cámara de secado, la pérdida de presión se puede calcular con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad (\text{B.1})$$

Donde:

f: factor de fricción.

L: largo del conducto.

D: diámetro del conducto.

ρ : densidad fluido.

v: velocidad del fluido.

El factor de fricción para flujos completamente desarrollados con superficies ásperas como es el caso de la madera de termina con la expresión de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{e/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (\text{B.2})$$

Donde:

Re: es el número de Reynolds, 975.738,4 de la ecuación D.4.

e: la rugosidad de la superficie, 0,015 [m] para leña.

Como el espacio que queda entre los atriles, atriles y paredes son rectangulares, se calcula el diámetro hidráulico para un ducto rectangular para estos espacios, en la Figura B.1 se observa la división de los ductos. Cada ducto tiene su diámetro hidráulico, que se calcula como:

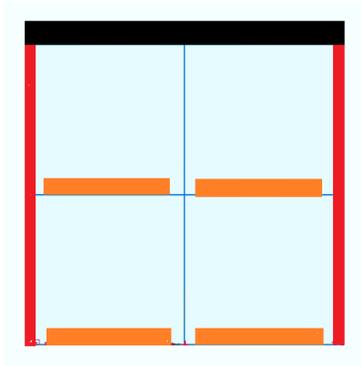


Figura B.1: División de ductos.

Cada ducto tiene su diámetro hidráulico, que se calcula como:

$$Dh = \frac{2ab}{a + b} \quad (B.3)$$

En la Tabla B.1 se observa el calculo de perdida de carga de cada ducto y el total de la cámara de secado siendo de 84,109 [Pa].

Tabla B.1: Resumen calculo de pérdida de carga ductos.

Ducto	Dh [m]	e/D	f	ΔP [Pa]
Rojo	0,298	0,0502	0,072	6,262
Negro	0,282	0,053	0,074	6,427
Naranja	0,058	0,258	0,187	65,155
Total				84,109

Anexo C

Capacitancia de la cámara de secado

La capacitancia de cámara de secado depende de los componentes de su estructura. Los cuales son: acero estructural, lana mineral y hormigón. Por lo que la capacitancia de la estructura es:

$$CAP = CAP_{acero} + CAP_{lanamineral} + CAP_{hormigon} \quad [kJ/K] \quad (C.1)$$

Siendo el calculo de cada CAP el siguiente:

$$\begin{aligned} CAP_{acero} &= Cp_{acero} \cdot \rho_{acero} \cdot e_{acero} \cdot area_{acero} \\ CAP_{lana\ mineral} &= Cp_{lana\ mineral} \cdot \rho_{lana\ mineral} \cdot e_{lana\ mineral} \cdot area_{lana\ mineral} \\ CAP_{hormigon} &= Cp_{hormigon} \cdot \rho_{hormigon} \cdot e_{hormigon} \cdot area_{hormigon} \end{aligned} \quad (C.2)$$

En la siguiente Tabla C.1, se resumen las propiedades de los materiales y los CAP's obtenidos para cada uno.

Tabla C.1: Resumen propiedades materiales [22] [26] y CAP's obtenidos.

Material	Cp_{acero} [J/kg K]	ρ_{acero} [kg/m ³]	e_{acero} [m]	$area_{acero}$ [m ²]	CAP [kJ/K]
Acero	0,46	7.850	0,004	63,336	914,825
Lana mineral	0,84	80	0,1	63,336	425,61
Hormigón	0,837	500	0,2	17,646	1.461,73

Siendo la capacitancia total de la estructura, $CAP = 2.802,179$ [kJ/K]. La madera también posee su capacitancia, siendo su calculo un poco más simple, el cual es el siguiente:

$$CAP_{madera} = masa_{madera} \cdot Cp_{madera} \quad (C.3)$$

Reemplazando los valores para ambas maderas y luego calculando la capacitancia total, ahora considerando la leña dentro de la cámara, se obtienen los siguientes valores resumidos en la Tabla C.2.

Tabla C.2: Resumen CAP's maderas y totales.

Madera	CAP_{madera} [J/kg K]	CAP_{total} [J/kg K]
Roble	30.775,35	33.577,53
Eucaliptos	20.516,9	23.319,08

Anexo D

Calculo de coeficientes convectivos.

Para poder obtener el coeficiente de transferencia de calor total o factor-U [22]. Se necesita tener los coeficientes convectivos interior y exterior. Primero se debe calcular $h_{interior}$ y $h_{combinado}$, se partirá calculando el $h_{interior}$. El cual se necesitan las propiedades del aire al interior de la cámara de secado, este se calculara cuando el aire de la cámara ya este a $60^{\circ}C$, las propiedades se resumen en la siguiente Tabla D.1.

Tabla D.1: Propiedades aire a $60^{\circ}C$

Variable	Valor
k	0,02808 [W/mK]
ρ	1,059 [kg/m ³]
ν	$1,896 \times 10^{-5}$ [m ² /seg]
μ	$2,008 \times 10^{-5}$ [kg/mseg]
Pr	0,7202
Cp	1,007 [J/kg K]

Se debe calcular el número de Reynolds al interior de la cámara de secado, con la siguiente ecuación:

$$Re_{interior} = \frac{\rho_{aire} v_{aire} L_{camara}}{\mu_{aire}} \quad (D.1)$$

Donde:

v_{aire} : velocidad del aire dentro de la cámara, 2,5 [m/seg].

L_{camara} : largo cámara de secado, 7,4 [m].

Dando como resultado un número de Reynolds, $Re_{interior} = 975.738,4$, que significa que el aire dentro de la cámara tiene un flujo turbulento. Para un flujo turbulento se tiene la siguiente correlación de para el número de Nusselt:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,037 Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad (D.2)$$
$$0,6 \leq Pr \leq 60$$
$$5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^6$$

Tanto el número de Prandtl y el número de Reynolds están dentro de los rangos, el Nusselt calculado es $Nu = 2.049,05$, dando un coeficiente de transferencia de calor por convección interior de $h_{interior} = 7,777 [W/m^2K]$. Ahora se necesita calcular el coeficiente de transferencia de calor combinado, que considera convección natural y radiación.

$$h_{combinado} = h_{rad} + h_{conv} \quad (D.3)$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se calcula como:

$$h_{rad} = \epsilon\theta(T_s^2 + T_{ambiente}^2)(T_s + T_{ambiente}) \quad (D.4)$$

Donde:

ϵ : emisividad acero inoxidable, 0,25.

θ : constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$.

T_s : temperatura pared. $T_{ambiente}$: temperatura ambiente, $15^\circ C$.

Con un trabajo iterativo se determina que la temperatura de la pared exterior de la cámara de secado es de $45^\circ C$, también notar que las temperaturas se deben trabajar en kelvin para calcular este valor. Por lo que se obtiene un $h_{rad} = 1,581 [W/m^2K]$. Para calcular el coeficiente convectivo se considera que hay convección natural en la pared exterior, por lo que se debe calcular el número de Grashof:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_{ambiente})L^3}{\nu^2} \quad (D.5)$$

Donde:

g : aceleración gravitacional, $[m/s^2]$.

β : coeficiente de expansión volumétrica, $1/K$.

L : longitud característica de la configuración geométrica, $[m]$.

En este caso la longitud característica de la geométrica, $L = A_{paredes}/P_{paredes} = 1,31 [m]$. Las correlaciones para el número de Nusselt para convección natural son de la forma:

$$Nu = \frac{hL}{k} = C(GrPr)^n = C Ra_L^n \quad (D.6)$$

Siendo Ra_L el número de Rayleigh que considera la razón de las fuerzas de flotabilidad y (los productos de) las difusividades térmica y de cantidad de movimiento. Reemplazando los datos en la ecuación D.5 y multiplicando por el número de Pr se obtiene un $Ra_L = 6,1432 \times 10^9$. Luego utilizando una la correlación empírica más exacta:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{(1/6)}}{(1 + (0,492/Pr)^{(9/16)})^{(8/27)}} \right\}^2 \quad (D.7)$$

Obteniéndose un número de Nusselt = 317,108 y finalmente calculando el $h_{exterior} = 4,289 [W/m^2K]$. Y dando como resultado un $h_{combinado} = 5,87 [W/m^2K]$.