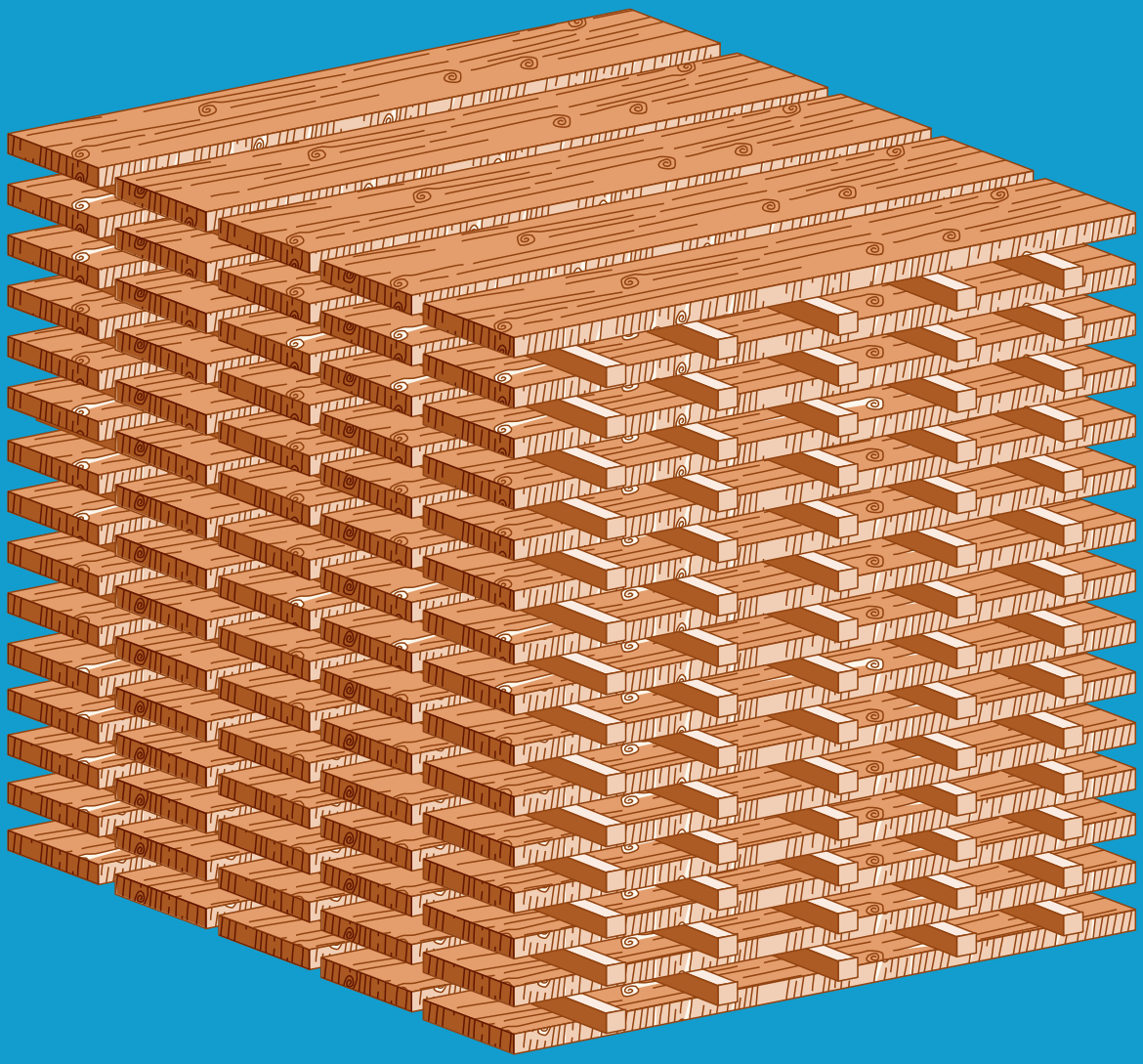
Secado convencional de *Eucalyptus grandis*

Manual de buenas prácticas



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

Centro Tecnológico Forestal Maderero

INSTITUCIONES PARTICIPANTES

Latitud - Fundación LATU

Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)

Universidad de la República

Facultad de Ingeniería,
Instituto de Ingeniería Química

Facultad de Agronomía, Departamento Forestal

Centro Universitario Regional Noreste,
sede Tacuarembó

Universidad Federal de Pelotas, Brasil

Centro de Ingeniería,
Laboratorio de Secado de Madera

TÉCNICOS PARTICIPANTES

LATITUD - Fundación LATU

Arq. Stephany Arrejuría

Ing. Quím. Silvia Böthig

Ing. Quím. Matías Cagno

Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)

Ing. Agr. Sebastián Quagliotti

**Universidad de la República,
Facultad de Ingeniería,
Instituto de Ingeniería Química**

Ing. Quím. MSc. Jorge Martínez

Ing. Quím. Dra. Berta Zecchi

**Universidad de la República,
Centro Universitario Regional Noreste,
Sede Tacuarembó**

Ing. Mec. Dra. Laidy Hernández Mena

Ing. Agr. PhD Alejandro Olivera

Ing. Ma. Dr. Diego Passarella

**Universidad de la República,
Facultad de Agronomía,
Departamento Forestal**

Ing. Ind. For. MSc. Julia Sáenz

Universidad Federal de Pelotas, Brasil

Ing. For. Dr. Leonardo Oliveira

Autores (por orden alfabético):
Stephany Arrejuría, Silvia Böthig, Matías Cagno, Laidy Hernández Mena, Jorge Martínez, Alejandro Olivera, Leonardo Oliveira, Diego Passarella, Sebastián Quagliotti, Julia Sáenz, Berta Zecchi

Edición: Silvia Böthig

Corrección de formato: Lorena Fiori

Diseño: manosanta desarrollo editorial

Latitud, 2025

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional

Stephany Arrejuría, Silvia Böthig, Matías Cagno, Laidy Hernández Mena, Jorge Martínez, Alejandro Olivera, Leonardo Oliveira Diego Passarella, Sebastián Quagliotti, Julia Sáenz, Berta Zecchi, 2025.
Secado convencional de *Eucalyptus grandis*: Manual de buenas prácticas. Montevideo: Latitud.

ISBN digital: 978-9915-9842-2-3

EUCALYPTUS / SECADO DE LA MADERA / TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

Dewey 674.3

Prefacio

En noviembre de 2017, la República Oriental del Uruguay y UPM Pulp Oy suscribieron un acuerdo de inversión (República Oriental del Uruguay y UPM, 2017) que estipuló la constitución de un Fondo de Innovación Sectorial (FIS) con el objetivo de incrementar las actividades de I+D+i en Uruguay, en particular las vinculadas a la cadena forestal-maderera. De esta forma se buscaba potenciar su competitividad, generar mayor valor, diversificar la matriz productiva y minimizar las condicionantes de exclusión de las micro y pequeñas empresas, para asegurar el máximo derrame de las oportunidades de generación de ingreso a la sociedad.

El presente manual se enmarca en las acciones del Centro Tecnológico Forestal Maderero (CTFM), creado y sostenido por el FIS para estos fines, buscando lograr sinergias, complementación y mayor eficiencia de los actores más relevantes en la cadena.

Agradecimientos

El equipo consultor agradece las colaboraciones recibidas que han permitido la ejecución de este documento:

- Forestal Caja Bancaria, empresa socia del proyecto que aportó su experiencia.
- INTA Concordia, y en particular Ciro Mastrandrea, quien gestionó las visitas y junto con Johanna Báez acompañó al equipo consultor en la provincia de Entre Ríos, Argentina.
- Ubajay, Hambis, Crafi, ACOM y Fracalossi, aserraderos de la provincia de Entre Ríos, que recibieron y colaboraron con el equipo de proyecto.
- Ludinel, Nalavip, Raíces, Agromaderas Cerro Largo e IMNSUR Ltda., aserraderos de Uruguay que respondieron consultas del proyecto.
- Empresas IBK e Digisystem de Brasil, que aportaron información de programas de secado.
- Empresas CIR, Mahild y Sertin, que brindaron información para el estudio económico.
- Latitud Fundación LATU, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Centro Universitario del Noreste de la Universidad de la República, Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Centro de Ingeniería de la Universidad Federal de Pelotas, instituciones representadas por equipo consultor, que apoyaron este trabajo.
- Lorena Fiori, del Centro de Información Técnica del LATU, por su revisión de formato y apoyo en proceso editorial.
- María José García y Juan Bruschi, de Comunicación Institucional del LATU, por sus aportes en la redacción del manual.
- CTFM, que financió y realizó seguimiento de este trabajo.
- Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), que gestionó la selección y financiación de la presente consultoría.

Tabla de contenido

Prefacio 3

Agradecimientos 5

Glosario de siglas y abreviaturas 9

Capítulo 1
Antecedentes e introducción

1.1. Antecedentes 13
1.2. Introducción 14

Capítulo 2
Fundamentos

2.1. Descripción general de la madera de *Eucalyptus grandis* ***19***
2.1.1. Descripción anatómica 20
2.1.2. Defectos de la madera 21
2.1.3. Propiedades físicas de la madera 23

2.2. Conceptos relevantes para el secado de la madera 26
2.2.1. Tipos de agua contenida en la madera 26
2.2.2. Humedad de equilibrio de la madera (CHE) 29
2.2.3. Gradiente de humedad de la madera (GH) 31
2.2.4. Gradiente de secado (GS) 32

2.3. Teoría del secado de la madera 32
2.3.1. Proceso de secado 32
2.3.2. Factores que afectan la velocidad de secado 35
2.3.3. Propiedades termodinámicas del aire húmedo 36
2.3.4. Defectos de secado y su control 37

Capítulo 3
El proceso de secado

3.1. Tecnologías de secado convencionales 45
3.2. Estrategia de secado 46
3.2.1. Producto 47
3.2.2. Mercado 48
3.2.3. Personal, equipamiento y otros 51
3.2.4. Criterios económicos 52

3.3. Consideraciones previas al secado 52
3.3.1. Cosecha 53
3.3.2. Transporte 53

3.3.3. Almacenamiento de trozas 54
3.3.4. Aserrado 55

3.4. Preparación de la madera para el secado 56
3.4.1. Clasificación de la madera 56
3.4.2. Encastillado de la madera a secar 57
3.4.3. Preparación de la carga para secar 61
3.4.4. Presecado 61

3.5. Secado en horno convencional 63
3.5.1. Descripción general 63
3.5.2. Equipamiento 64
3.5.3. Estrategia de secado en horno 68
3.5.4. Balance entre costos y calidad 78

3.6. Medición y control 84
3.6.1. Control del proceso 84
3.6.2. Calidad del secado 90

3.7. Procesos posteriores al secado 93
3.7.1. Remanufactura 93
3.7.2. Almacenamiento 93

Capítulo 4
Aspectos complementarios

4.1. Gestión de la información 95
4.1.1. Instructivos y protocolos 95
4.1.2. Registros 95
4.1.3. Trazabilidad y gestión del stock 96

4.2. Salud y seguridad ocupacional 97
4.3. Laboratorio de secado 99

Anexos.Estudios económicos

Anexo A. Energía para secar en horno convencional 101
Anexo B. Análisis general de costos e hipótesis de cálculo 105
Anexo C. Caso 1. Industria de escala pequeña 108
Anexo D. Caso 2. Industria de escala mediana 116
Anexo E. Comparativo económico entre pauta conservadora y pautas más enérgicas 124

Referencias

Glosario de siglas y abreviaturas

CH	Contenido de humedad de la madera
CHbs	Contenido de humedad de la madera expresado en base seca
CHi	Contenido de humedad inicial de la madera
CHf	Contenido de humedad final de la madera
CHE	Contenido de humedad de equilibrio (EMC por sus siglas en inglés)
GS	Gradiente de secado
GH	Gradiente de humedad de la madera
HR	Humedad relativa ambiente
PSF	Punto de saturación de la fibra
TBS	Temperatura bulbo seco
TBH	Temperatura bulbo húmedo

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN

Capítulo 1

Antecedentes e introducción

1.1. Antecedentes

El sector forestal uruguayo ha sido uno de los más dinámicos en la economía nacional en el presente siglo. Con posterioridad a la Ley Forestal n.º 15969, de 1987 (Uruguay, 1987), las plantaciones forestales se multiplicaron en el país y dieron base al desarrollo de industrias como los aserraderos y las plantas de celulosa.

La superficie de plantaciones forestales acumulada efectiva desde 1975 alcanzó al año 2021 las 1.108.371 hectáreas (Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal, 2022). Con un franco crecimiento actualmente, el sector representa alrededor del 3 % del PIB nacional (Uruguay XXI, 2021) desde hace años, y las exportaciones del complejo forestal (madera, celulosa y papel) representan cerca de una quinta parte del total de las exportaciones de bienes del país. El sector emplea directamente a cerca de 17.000 personas (Uruguay XXI, 2021).

Las exportaciones en 2022 de madera aserrada de eucalipto fueron de 100.849 toneladas con un total FOB de aproximadamente 81 millones de dólares (Laguna, 2023). Las exportaciones de madera para embalajes ascendieron a 2 millones de dólares, para obras y piezas de carpintería de madera para construcciones a 473.000 dólares, y en muebles de madera a 768.000 dólares. Por otra parte, en 2021, los precios promedio de madera aserrada de no coníferas fueron del orden de 550 USD/m^3; se registraron valores máximos del orden de los 1.500 USD/m^3 y mínimos del orden de 140 USD/m^3, dependiendo de la calidad de la madera aserrada, así como de los mercados destinatarios (Uruguay. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, 2023).

Por otra parte, la promoción de la construcción con madera nacional es una estrategia nacional orientada al aumento de la oferta de vivienda pública, liderada por el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial y expresada en la Hoja de Ruta de la construcción con madera (Uruguay. Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial y Banco Interamericano de Desarrollo, 2022).

En 2020 se creó la Comisión Honoraria de la Madera (CHM), entre cuyos fines está la promoción de la utilización de madera nacional en la construcción y de la producción de madera que cumplan con los estándares nacionales de calidad.

Para este objetivo se requiere de madera seca de calidad estructural, lo que implica el desarrollo de proveedores nacionales de este producto. El proyecto «Lineamientos de diseño estructural para viviendas de entramado ligero construidas con maderas de pino (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) y eucalipto (*Eucalyptus grandis*) de Uruguay», ejecutado por la CHM con el apoyo de FONPLATA e IICA, contribuyó a este objetivo a través de un primer relevamiento de potenciales proveedores. Este relevamiento encontró una producción anual de madera de *E. grandis* seca en horno (convencional) de 451.533 m^3 correspondientes en su mayor parte a madera de exportación (Franco, 2023) y sin participación de las pequeñas industrias.

Si bien es muy importante generar una oferta adecuada de madera para la construcción, el principal destino de la madera seca de *E. grandis* es la conocida como madera *de apariencia*, para uso en mobiliario y aberturas, con requisitos de humedad y de apariencia visual, tanto para el mercado local como para exportación.

Estos antecedentes muestran la necesidad de aumentar la capacidad de secado de madera de esta especie y de respaldar a las pymes para la creación de capacidades técnicas en esta temática. Un primer paso para alcanzar esta meta consiste en poner a disposición del sector información respecto al secado de la madera y, en particular, de *E. grandis*.

El objetivo general de este manual es divulgar buenas prácticas para el secado de *E. grandis* en horno convencional, desarrollar aspectos tecnológicos y técnicos para sortear los desafíos que presenta, y evaluar costos asociados al proceso.

1.2. Introducción

Durante la vida del árbol, la madera contiene grandes cantidades de agua, que es transportada hacia la copa junto con los minerales del suelo absorbidos por las raíces. Cuando la madera verde se seca, se elimina la mayor parte del agua y la humedad remanente tiende a llegar a un valor de equilibrio que depende de la humedad relativa y temperatura del aire en el entorno. Al perder el agua, las células reducen sus dimensiones, produciendo una contracción de las dimensiones de la madera.

El secado de la madera para su uso en carpintería de obra, muebles y otros productos es uno de los procesos fundamentales para garantizar la calidad del producto final.

Ventajas del secado

Un secado adecuado permite:

- estabilizar las dimensiones de la madera;
- aumentar su resistencia mecánica;
- disminuir el crecimiento de hongos y bacterias y el ataque de insectos, y en consecuencia mejorar la calidad y la durabilidad de la madera;
- mejorar sus propiedades como aislante térmico, acústico y eléctrico;
- reducir el peso para una mejor economía de su transporte;
- mejorar el comportamiento de la madera en procesos de industrialización como el cepillado, lijado, aplicación de colas y pinturas;
- impregnar la madera durante algunos procesos de preservación.

El proceso de secado constituye una de las fases más prolongadas y energéticamente demandantes en la transformación de la madera. La estructura anatómica de la madera impone restricciones a la rapidez con que el agua puede circular dentro de ella. Si no se realiza un secado adecuado, la madera puede presentar defectos de secado como colapso, rajaduras y alabeos, entre otros. El arte del secado de la madera consiste en mantener un adecuado equilibrio entre la velocidad de evaporación de la humedad en la superficie de la madera y el desplazamiento del agua desde su interior hacia la superficie.

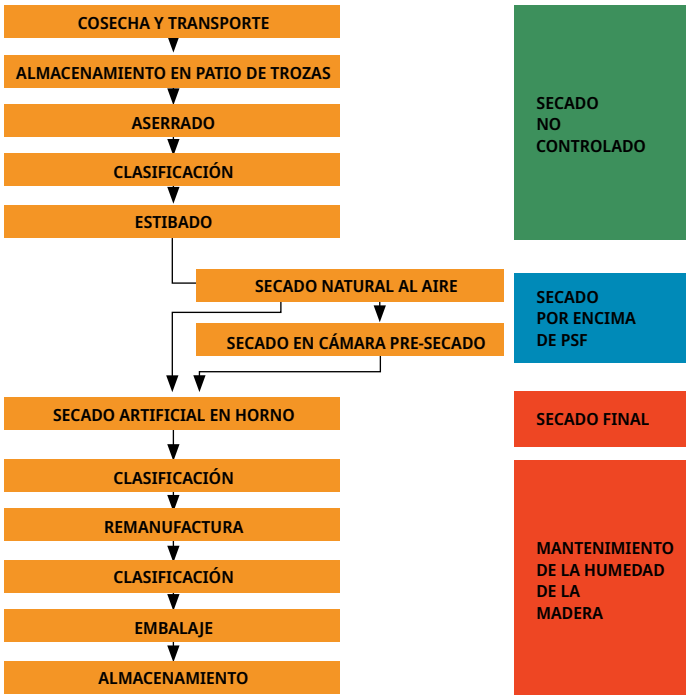
La presencia de humedad en la madera, su eliminación y la contracción resultante durante el secado es un tema científico y de ingeniería complejo. El tiempo de secado y la propensión a diversos defectos de secado aumentan a una tasa que excede proporcionalmente el espesor de la madera. La variabilidad en las propiedades de la madera dificulta aun más el proceso de secado. Cada especie presenta características distintas; e incluso dentro de una misma especie, la variación en la velocidad de secado y en la susceptibilidad a defectos de secado imponen restricciones en la formulación de procedimientos estándares de secado. Las complejas interacciones entre la madera, el agua, el calor y el estrés durante el secado añaden un nivel adicional de dificultad. Este manual incluye la descripción de las principales propiedades de la madera que son relevantes en el secado.

Aunque todavía es necesario profundizar la investigación en el secado de esta especie, los principios básicos son claros: el *E. grandis* debe secarse lentamente y con cuidado. Si la madera se somete a condiciones agresivas durante el proceso de secado, puede dañarse y perder valor. Con el recurso maderero disponible, el productor necesita obtener eficientemente el máximo volumen con el mejor valor de madera seca (Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 2003a). El esquema de la Figura 1 muestra las fases de secado de la madera desde la cosecha hasta los distintos procesos involucrados en la obtención de productos de madera seca.

Desde la cosecha comienza un proceso de secado no controlado, que se continúa durante el transporte y almacenamiento de las trozas (madera rolliza, producto de la cosecha forestal que es la materia prima de los procesos de aserrado, debobinado, producción de celulosa y biomasa, entre otros), el aserrado, la clasificación de las tablas y su estibado. Las prácticas implementadas en estas fases ya impactan en la calidad del producto final. El secado de las tablas puede realizarse en forma natural al aire, en una cámara de presecado, en un horno de secado o bien con una combinación de estas. El método de secado más recomendado para la obtención de madera de *E. grandis* de calidad es el secado artificial en horno convencional.

Luego del secado siguen etapas de clasificación, remanufactura, embalaje y almacenamiento, durante las cuales es importante mantener el contenido de humedad logrado con el secado.

FIGURA 1. Proceso de aserrado y fases del secado convencional de la madera



Para este trabajo se relevó la capacidad real de secado de *E. grandis* existente en Uruguay. Se pudo detectar que solo un aserradero seca actualmente madera de esta especie en forma sistemática, otro seca *E. grandis* en forma esporádica, otro está comenzando a secar esta especie y varios dejaron de hacerlo por problemas de competitividad. También se consultó sobre las tecnologías de secado que se aplican en la provincia de Entre Ríos (Argentina) y en el estado de Río Grande del Sur (Brasil).

Las empresas cuentan con cámaras de secado de diferentes marcas y procedencias, lo que redunda en diferencias en la tecnología de control del proceso. Los programas para el secado utilizan diversidad de variables para el control del proceso. Algunos secadores poseen un sistema de control sobre las variables de proceso (definidas más adelante) (TBH) y temperatura de bulbo seco (TBS); otros con temperatura y contenido de humedad de equilibrio (CHE); otros con temperatura y gradiente de secado (GS), cuyos registros pueden ser manuales o computarizados.

En general, la capacidad de secado de las cámaras empleadas también es variable; se encuentran hornos convencionales con capacidad de secado desde 10 m^3 hasta 140 m^3, de llenado frontal o tipo túnel.

El empresario industrial debe establecer una estrategia productiva y definir la mejor combinación de productos que se pueden extraer del recurso de madera rolliza disponible y los procesos de secado necesarios. Esto incluye evaluar las operaciones existentes y adaptar las estrategias a lo largo del tiempo. Un problema común en el sector es la falta de personal capacitado en la toma de decisiones y en el manejo del proceso de secado, en especial, de esta especie. Por ello, y considerando la importancia de contribuir a la formación del personal técnico responsable en la conducción del proceso de secado, se ha desarrollado la presente guía que busca mejorar las competencias técnicas y dar mayor valor agregado a la madera.

Capítulo 2

Fundamentos

2.1. Descripción general de la madera de *Eucalyptus grandis*

E. grandis es una especie latifoliada originaria de Australia, cultivada en Uruguay para producción de madera sólida y pulpa de celulosa. Es una especie de rápido crecimiento, por lo cual presenta tensiones de crecimiento. Esas tensiones constituyen un mecanismo del árbol para permanecer erecto y son liberadas al ser apeado y luego en el aserrado (Van Wyk, 1978, y Pádua et al., 2004, citados en Alves Ramos et al., 2011).

La madera es el tejido estructural subcortical formado en el tronco y ramas de las plantas leñosas. Es un material fibroso y poroso, de estructura compleja de carácter ortótropo, con zonas cristalinas ordenadas y zonas amorfas sin orden. Presenta alta higroscopicidad, que se manifiesta con importantes cambios en el contenido de humedad vinculados a las condiciones atmosféricas.

La madera está formada por polímeros estructurales de celulosa (40-50 %) que constituyen el material de sostén y le dan su resistencia y tenacidad; lignina (20-30 %) que es el material aglomerante; y hemicelulosas (20-25 %) (Coronel, 1994), que contribuyen a la cohesión de la estructura y a las propiedades elásticas de la madera.

Las maderas de coníferas y de latifoliadas tienen características bien diferentes que impactan en sus propiedades físicas y mecánicas. Sus propiedades dependen también de la especie, de la genética, del sitio de plantación y del manejo silvicultural que recibieron los árboles (podas y raleos).

La presencia de ciertas singularidades y defectos de la madera influye directamente en sus propiedades. Estas pueden estar asociadas a la formación del tejido y provocadas por causas climáticas o silviculturales, o pueden ser causadas por prácticas industriales durante los procesos de cosecha, transporte, aserrado, secado y almacenamiento.

2.1.1. Descripción anatómica

Anatómicamente, la madera está compuesta por diferentes tipos de células que conforman los tejidos dentro del árbol. En el caso de *E. grandis* existen células longitudinales (vasos leñosos o poros, fibras, parénquima axial) y transversales (radios leñosos) (Tomasello Filho, 1985).

La *corteza* es la zona externa del tronco. Se distingue entre corteza *externa*, formada por tejido muerto que tiene una función de protección, y corteza *interna*, formada por tejido vivo, que tiene la función de distribuir los productos elaborados por las hojas durante la fotosíntesis.

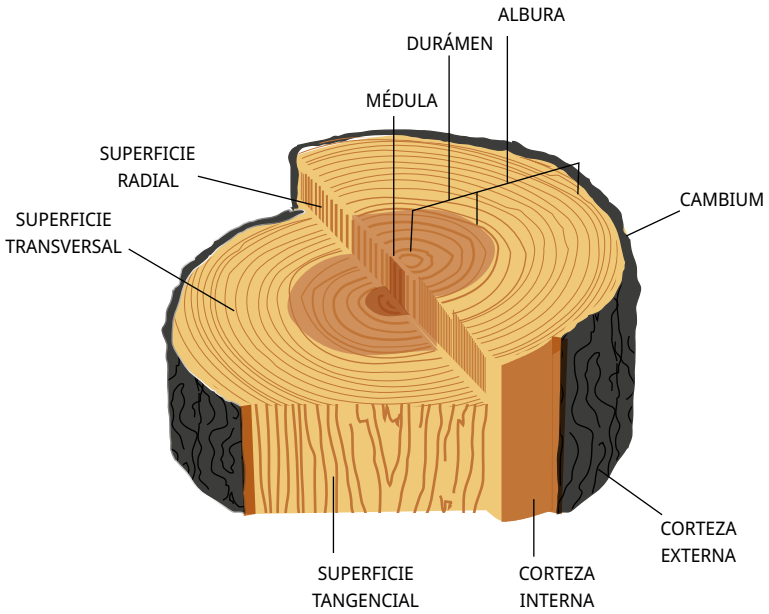
La albura de *E. grandis* es la madera de color más claro que ocupa los primeros dos a tres centímetros junto a la corteza. Transporta agua y minerales desde la raíz a las ramas y hojas. Está formada por tejido vivo y tejido muerto que sirve de sostén a la estructura del árbol y acumula sustancias de reserva, lo cual la hace menos resistente al biodeterioro. Es altamente permeable al agua. Con el correr de los años se produce una acumulación de extractivos en las células de la albura, disminuye la permeabilidad de la madera y se convierte en duramen. Este se ubica hacia el centro del árbol y se distingue por su coloración más oscura, de tintes rosados. La Figura 2 muestra estas características en un corte transversal.

La madera generada en los primeros años de vida del árbol es conocida como *madera juvenil* y abarca los primeros anillos desde la *médula* (esta corresponde a la parte central del árbol y es variable en su tamaño y color). A medida que el árbol madura, cambian las características del tejido, que tiende a una condición estable llamada *madera adulta*. De acuerdo con Tuset y Durán (2008), se acepta una transición entre los 10 y 20 años, aunque es conocido que esto depende de la especie y de las condiciones silviculturales.

La madera juvenil tiene un comportamiento mecánico y físico diferente al resto de la madera formada por el árbol. Es más ligera, de fibras más cortas, paredes celulares más delgadas, menor contenido de celulosa y mayor ángulo microfibrilar. Las piezas con presencia madera juvenil presentan menor resistencia y mayor porcentaje de curvatura en cantos y caras. El eucalipto es uno de los géneros de latifoliadas con marcada diferencia entre la madera juvenil y la madera adulta. *E. grandis* es una especie de rápido crecimiento; por ello es común la cosecha de árboles de edades menores a 20 años, constituidos en gran parte por madera juvenil.

En contraposición con la madera juvenil, la madera adulta presenta menor contracción longitudinal, mayor densidad, mejores propiedades mecánicas y es más estable. Consecuentemente, genera menos defectos durante el secado y sus productos finales son de mayor calidad.

FIGURA 2. Esquema de corte transversal de un árbol, con la corteza, la albura y el duramen



2.1.2. Defectos de la madera

Los defectos de la madera se definen como variaciones en la calidad de esta, causadas por una serie de factores que pueden afectar sus propiedades e implican una limitación parcial o total en el uso de las piezas de madera como materia prima. Estos defectos se pueden dividir en dos grandes categorías: aquellos que son parte de la estructura de la madera y existen previos al apeo del árbol, y los que son posteriores al apeo del árbol. Los defectos de la madera posteriores al apeo del árbol y asociados al secado se presentan en el punto 2.3.4 de este manual.

A continuación, se listan los defectos asociados al crecimiento que son *parte de la estructura de la madera*.

NUDO

Es el origen de una rama y se forma como una inclusión de la porción basal de esta dentro del tallo del árbol. La práctica silvicultural para minimizar su impacto es a través de la realización de podas. La presencia de nudos puede influir de maneras muy variables en el proceso provocando deformaciones y dificultades para la trabajabilidad. Los nudos se pueden clasificar en *nudos vivos* (permanecen en las piezas luego del procesado de la madera) y *nudos muertos* (se pueden desprender de la pieza luego del procesado). La presencia de nudos en tablas se puede cuantificar a partir de sus diámetros y su distribución.

MÉDULA
Es un elemento anatómico característico del árbol. Su constitución es totalmente diferente a la de la madera; es blanda, poco resistente y de diferente color. Se puede limitar su presencia con diferentes tipos de despiece en el proceso de aserrado.

MÉDULA EXCÉNTRICA
Se denomina de esta forma cuando la médula no está centrada en el tronco, debido a un crecimiento anual desigual dentro de un mismo anillo, repitiéndose esta circunstancia a lo largo de los años. Puede originarse cuando el árbol está sometido a un esfuerzo predominante en una cierta dirección, viento o pendiente del terreno muy acusada.

MADERA DE REACCIÓN
Se produce generalmente por el esfuerzo asimétrico u otros factores de estrés a los que está expuesto el fuste, que obligan al árbol a producir fibras diferentes de las normales para compensar dicha asimetría. En latifoliadas, la madera de reacción producida es denominada *madera de tensión*. Tiene mayor resistencia a la tracción y mayor tendencia a los alabeos.

ACEBOLLADURA
Se refiere a la separación del leño siguiendo la forma de los anillos de crecimiento, que se aprecia en el corte transversal de la troza. Este defecto puede ser causado por las tensiones de crecimiento, aunque también puede generarse por heladas o fuertes vientos. En algunos casos, no es visible hasta que la madera se ha secado.

BOLSA DE CORTEZA
Se origina cuando aparece una lesión superficial, haciendo que la corteza quede contenida dentro de la madera que sigue creciendo. Afecta la resistencia mecánica y apariencia de las piezas y puede inutilizarlas para algunas aplicaciones.

BOLSA DE KINO
Se trata de una acumulación de exudaciones en cavidades de diferentes tamaños. Este defecto afecta la apariencia de la pieza y reduce su resistencia mecánica, fundamentalmente al corte o cizallamiento en uniones con otras piezas de madera.

TENSIONES DE CRECIMIENTO
Son tensiones generadas como consecuencia de la maduración de los tejidos. Estas fuerzas pueden ser de magnitud significativa. Al ser liberadas, una vez apeado el árbol, se manifiestan en la separación de los elementos leñosos en forma de grietas o rajaduras en los extremos de los rollos y, más adelante, como alabeos durante el aserrado. Se trata de un defecto estructural muy importante, ya que puede afectar considerablemente el aprovechamiento de la madera. Este defecto se destaca en *E. grandis*.

CURVATURA DEL FUSTE

La falta de rectitud en el fuste del árbol puede estar asociada a causas genéticas o ambientales como la topografía, disponibilidad de luz, ocurrencia de vientos, ataque de plagas, entre otros factores. Normalmente, se asocia también a la presencia de madera de reacción. La curvatura del fuste puede comprometer el uso de los rollizos.

DEFECTOS DEL GRANO

El grano es la orientación de los elementos longitudinales de la madera con relación al eje longitudinal del tronco. El grano puede ser recto, inclinado, espiralado, entrecruzado, crespo o irregular. Esta característica pasa a ser considerada como un defecto cuando su magnitud es de tal importancia que afecta la resistencia de la pieza y su trabajabilidad, o provoca alabeo por las contracciones diferenciales durante el proceso de secado de la madera. De acuerdo con Doldán (2001), en muestras de *E. grandis* procedentes de distintas zonas de Uruguay se constató la existencia de grano inclinado, en el cual los elementos leñosos se disponen formando un determinado ángulo con el eje del árbol, y grano entrecruzado, que se produce cuando la inclinación se da de forma alternada y opuesta entre zonas adyacentes.

2.1.3. Propiedades físicas de la madera

La madera de diferentes especies se caracteriza por sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Estas tienen importancia tecnológica y económica, ya que determinan el comportamiento de la madera durante su procesamiento y en el uso final. Para el proceso de secado, las propiedades físicas adquieren mayor relevancia.

DENSIDAD

La densidad de la madera es la relación entre el peso y el volumen que ocupa, a un determinado contenido de humedad (CH) (Coronel, 1994), y se expresa en kg/m^3 o g/cm^3. Como la masa y el volumen de una madera varían según el contenido de humedad, es importante expresar la condición bajo la cual se obtiene la densidad.

La densidad aparente es el cociente entre el peso anhidro (seco) y el volumen determinado a diferentes contenidos de humedad. Así se pueden mencionar diferentes densidades aparentes como densidad aparente anhidra (volumen de la madera anhidra), densidad aparente básica (volumen de la madera verde por encima del punto de saturación de fibras) y densidad aparente corriente (volumen de la madera a 12 % de CHbs (contenido de humedad en base seca).

De esta propiedad dependen la mayoría de las características físicas y mecánicas de la madera, por lo cual es muy importante para los procesos de

transformación de la madera. En general, a mayor densidad la madera es más resistente y dura pero resulta más difícil de trabajar y secar y presenta mayor variación volumétrica y mayor tendencia a la aparición de defectos en el secado.

Los valores de densidad de esta especie varían considerablemente entre diferentes materiales genéticos, manejos silviculturales y sitios de plantación. Estudios realizados en Uruguay indican valores de densidad aparente básica en el rango de 400-450 kg/m^3, y para densidad aparente corriente, un rango de 460-500 kg/m^3. Las muestras corresponden a madera de plantaciones comerciales del norte y centro del Uruguay y las edades son 12 y 18 años para el norte y 26 años para el centro (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto [GT2], 2004, 2005, 2006).

CONTENIDO DE HUMEDAD (CH)

El CH es la cantidad de agua que contiene la madera que es posible extraer al sufrir un secado en horno a 103 ± 2 °C.

El CH se puede expresar en base seca o base húmeda:

- Contenido de humedad en base seca (CHbs)

$$CHbs\ (\%) = \frac{Peso\ del\ agua\ contenida\ en\ la\ madera}{Peso\ de\ la\ madera\ completamente\ seca} \times 100$$

- Contenido de humedad en base húmeda (CHbh)

$$CHbh\ (\%) = \frac{Peso\ del\ agua\ en\ la\ madera}{Peso\ de\ la\ madera\ húmeda} \times 100$$

- En este manual nos referiremos al CHbs, como es usual cuando se refiere a madera con destino a la transformación mecánica.
- Las propiedades físicas y mecánicas de la madera varían con el CH. A medida que disminuye el CH mejoran sus propiedades mecánicas y aumentan el poder calorífico y la resistencia al ataque de hongos. También mejora el desempeño de la madera en los procesos de segunda transformación (remanufactura) y acabado.

HIGROSCOPICIDAD

Es la capacidad que tienen los materiales de ceder o absorber humedad de la atmósfera que le rodea y de retenerla en forma de agua líquida o vapor de agua. La madera es un material altamente higroscópico y su CH varía con los cambios atmosféricos.

CONTRACCIÓN E HINCHAMIENTO

La contracción y el hinchamiento de la madera son los cambios producidos en las dimensiones de las piezas provocados por la variación de su CH debido a cambios en la humedad relativa del aire donde se encuentra. Ambos fenómenos son originados por la desorción o absorción de agua en las piezas de madera, registradas entre el estado anhidro (o seco) y el punto de saturación de las fibras (Suirezs y Berger, 2010; Martínez Rojas y Vignote Peña, 2005).

La variación volumétrica de la madera puede afectar la precisión en el dimensionamiento de los productos, y por ello limitar su uso en la industria. Por lo tanto, el control del contenido de humedad es un factor esencial para garantizar la calidad de los productos elaborados.

La madera es un material anisotrópico. Existen diferencias en el hinchamiento y la contracción según la orientación del grano. La contracción longitudinal es normalmente despreciable. Doldán y Böthig (2002) reportan valores de contracción total (desde la condición verde hasta el estado anhidro) para *E. grandis* provenientes de dos sitios de Uruguay (Tabla 1).

ANISOTROPÍA

La anisotropía o coeficiente anisotrópico es la relación que existe entre la contracción tangencial y la contracción radial para un determinado CH de una pieza. Este parámetro es importante para el secado de la madera. Se considera ideal un valor próximo a 1.

Se considera que una madera con una anisotropía mayor a 2 presentará problemas en el secado. Para madera de *E. grandis* plantado en Uruguay, se determinaron valores de anisotropía entre 1,80 y 2,04, para ejemplares provenientes del litoral y del norte del país, respectivamente (Doldán y Böthig, 2002).

TABLA 1. Contracción total para madera de *E. grandis* de Uruguay

Región de plantación	Edad en momento de corte	Contracción radial (%)	Contracción tangencial (%)	Contracción volumétrica (%)	Anisotropía	Valores reportados
Norte	16	4,5	8,8	13,5	2,04	Promedio
		1,2	1,8	2,1	0,55	Desviación estándar
Litoral norte	18	4,6	8,1	12,7	1,80	Promedio
		0,95	1,4	2,2	0,31	Desviación estándar

Fuente: (Doldán y Böthig, 2002).

PERMEABILIDAD
Refiere a la facilidad con la que los fluidos pueden pasar a través de la madera y está determinada por factores como la estructura celular y la presencia de extractivos. La permeabilidad es mayor en la dirección longitudinal que en las direcciones radial y tangencial, y también mayor en la albura que en el duramen, debido a que los vasos y punteaduras están menos obstruidos. La madera de *E. grandis* se caracteriza por una muy baja permeabilidad del duramen, lo que puede originar colapso durante el secado.

Las propiedades de la madera más relevantes para el secado son:

- contenido de humedad (CH)
- permeabilidad
- contracción e hinchamiento
- anisotropía

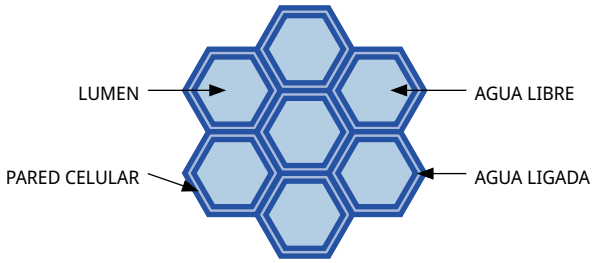
2.2. Conceptos relevantes para el secado de la madera

2.2.1. Tipos de agua contenida en la madera

La madera de los árboles en crecimiento contiene agua en forma de savia, que puede variar aproximadamente entre el 35 % y 150 % de su peso. Aunque la savia contiene algunos materiales disueltos, desde el punto de vista del secado, se puede considerar como simplemente agua. En la mayoría de los usos de la madera, para obtener un producto satisfactorio debe eliminarse la mayor parte de esta agua. Debido a su carácter higroscópico, la madera absorberá o cederá agua según las condiciones de humedad y temperatura del aire que la rodea. Por lo tanto, el conocimiento sobre el agua contenida en la madera, así como las relaciones de equilibrio entre la madera y la humedad del aire, es importante para una mejor gestión de los procesos de secado, almacenamiento, fabricación y uso de los productos de madera.

El agua se encuentra en la madera como agua libre, agua ligada o agua de constitución.

FIGURA 3. Esquema de la distribución del agua libre y el agua ligada a nivel celular



El agua libre se encuentra contenida en las cavidades celulares. Es la forma más lábil y es la primera en ser eliminada durante el secado. Si bien el agua libre afecta las propiedades de la madera, su variación no produce cambios significativos en sus propiedades físicas y mecánicas.

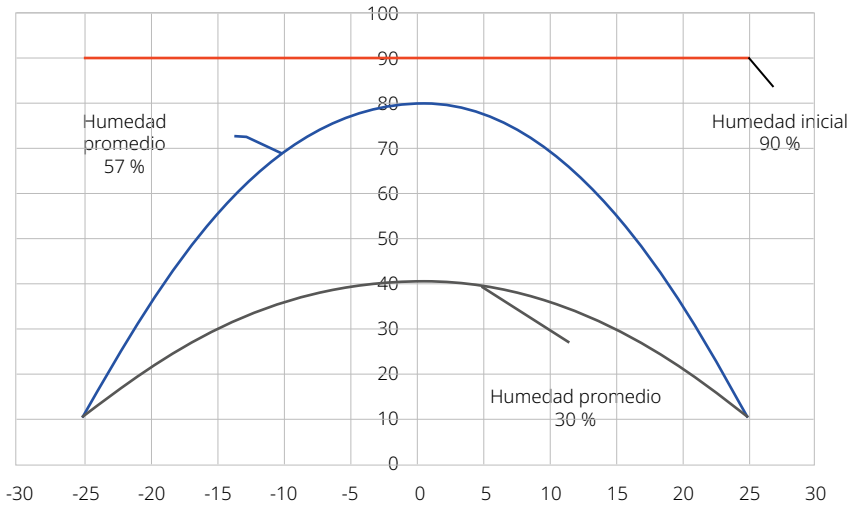
El agua ligada, también llamada higroscópica, está asociada a las paredes celulares y está en equilibrio dinámico con la atmósfera. Su variación tiene mayor impacto en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, y su eliminación provoca cambios, principalmente dimensionales, que afectan el uso de esta.

El agua de constitución forma parte de la estructura química de las paredes y se elimina solo por combustión de la madera.

El punto de saturación de la fibra (PSF) se define como el contenido de humedad en el cual las paredes celulares están saturadas de agua y sin presencia de agua libre en las cavidades celulares. El contenido de humedad de las paredes celulares en el punto de saturación de las fibras depende de la especie y oscila alrededor del 30 %. Para *E. grandis* provenientes del norte de Uruguay y con una edad de 16 años, se ha reportado un PSF promedio de 26,6 % con una desviación estándar de 2,5 %; mientras que para árboles de 18 años provenientes del litoral del país se reportó un valor promedio de 28,7 % con una desviación estándar de 3,3 % (LATU y JICA, 2002).

El concepto PSF refiere a células individuales y no a tablas o piezas de madera (USDA, 1991), dentro de las cuales el CH varía. Por lo tanto, se debe ser criterioso al evaluar si una pieza de madera está en el punto de saturación de las fibras. Básicamente, la madera se seca desde su superficie hacia su interior (los mecanismos de secado se discutirán más adelante). Por ello, durante el secado las partes exterior e interior de una tabla podrían tener contenidos de humedad sensiblemente diferentes. A modo de ejemplo, un perfil de humedad de una tabla que tiene 30 % de CH promedio como el de la Figura 4 (línea clara), presenta un CH de 10 % en la superficie, mientras que en el centro podría ser de 40 %. Aunque el PSF de esta especie fuera de 30 %, sería erróneo considerar que la tabla está en el PSF, ya que hay una variación continua o gradiente de contenido de humedad desde el exterior hasta el interior de la tabla, desde el 10 % hasta el 40 %, y solo algunas células estarán exactamente en PSF de 30 %.

FIGURA 4. Ejemplo de perfiles de humedad dentro de una tabla de 50 mm de espesor y CHi = 90 %, a distintos tiempos de secado



El PSF es crucial en el proceso de secado de la madera, por las siguientes razones:

1. Se requiere más energía para evaporar agua de una pared celular (por debajo del PSF) que de una cavidad celular (por encima del PSF); aproximadamente un 5 % más a un CH del 15 % y un 15 % más a un CH del 6 % (USDA, 1991).
2. La velocidad de secado durante la remoción del agua libre será mayor que durante la remoción del agua ligada.
3. Una célula de madera no se contraerá hasta que alcance el PSF.
4. Cambios significativos en muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera comienzan a ocurrir por debajo del PSF.

2.2.2. Humedad de equilibrio de la madera (CHE)

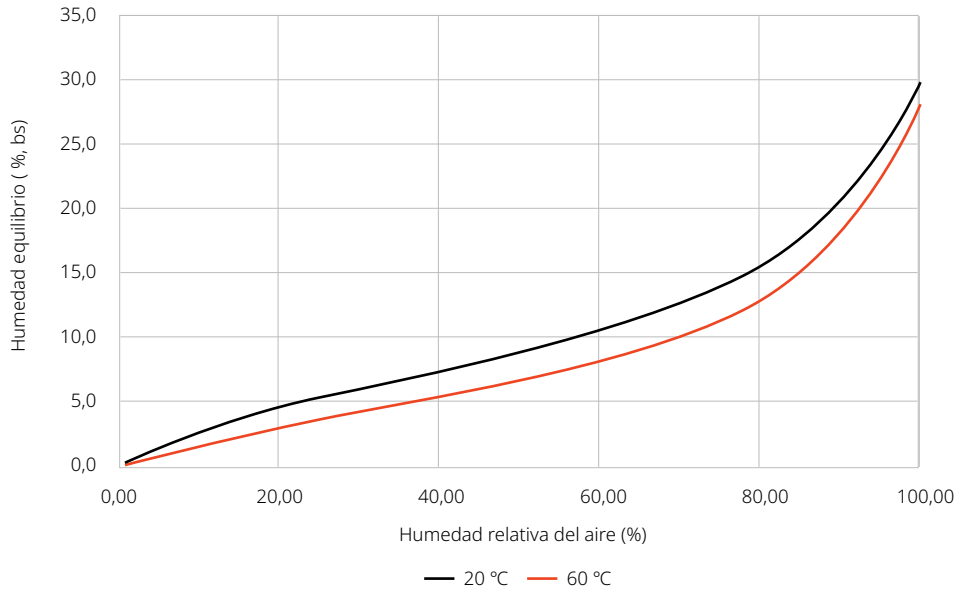
Si la madera permanece suficiente tiempo en un lugar determinado (esto puede ser algunos meses), llega un momento en que se *estabiliza* o *alcanza un equilibrio con el medio* y, por consiguiente, el CH de la madera puede considerarse constante. El CH que adquiere la madera cuando alcanza este equilibrio se conoce como contenido de humedad de equilibrio (CHE), que no variará a menos que cambien las condiciones de humedad y temperatura en el aire que la rodea.

Conociendo la temperatura del aire y la humedad relativa ambiente es posible predecir el CHE a través de la ecuación de Simpson (Simpson, 1971, citado en Simpson, 1998). Dicha ecuación ha sido introducida en calculadoras digitales disponibles en forma gratuita en la web como, por ejemplo, la calculadora de Computer Support Group (CSG) y CSGNetwork.Com (2024) que, a partir del valor de temperatura en grados Farenheit y la humedad relativa ambiente en porcentaje, proporciona un valor del CHE en porcentaje. El valor de la temperatura en grados Celsius (Sistema Métrico Internacional) puede convertirse a grados Farenheit (Sistema Imperial) con la siguiente fórmula: $1\,°F = 9/5\,°C + 32$.

La relación entre la humedad relativa ambiente con el CHE de la madera a una temperatura determinada describe la curva de equilibrio característica a esa temperatura.

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de curva de equilibrio a dos temperaturas diferentes. Puede verse que cuando la temperatura del aire es de 20 °C y la humedad relativa es 60 %, la humedad de equilibrio de la madera es de 10,7 % (base seca).

FIGURA 5. Curva típica de humedad de equilibrio de la madera a dos temperaturas



Fuente: (United States Department of Agriculture [USDA], 2010).

La variación del CHE de la madera es más significativa con la variación de la humedad relativa del aire que con la temperatura del aire (Figura 5).

Por lo general, la madera proveniente de distintas especies presenta pequeñas variaciones en la curva de equilibrio. A continuación (Tabla 2) se presentan datos recogidos en un estudio realizado desde agosto de 2000 hasta febrero de 2002 por el LATU con el apoyo de JICA, sobre la velocidad de secado y el CHE de madera aserrada y rolliza de varias especies nacionales, incluyendo *E. grandis* en diferentes regiones del país.

TABLA 2. Valores de CHE y rango de variación determinados para tablas de *E. grandis* de corte tangencial de 38 x 150 x 600 mm (con los extremos sellados), en diferentes departamentos de Uruguay durante cinco estaciones climáticas en un período de 15 meses

Período	Departamento	Rivera	Paysandú	Tacuarembó	Soriano
	Localidad	Rivera	Paysandú	Paso de los Toros	Mercedes
Verano 2001	Promedio	14,5	15,4	14,6	14,4
	Rango	13,9-14,8	15,1-16,0	13,6-15,8	14,0-14,9
Otoño 2001	Promedio	17,1	17,7	16,5	17
	Rango	15,7-18,9	16,7-18,4	14,3-17,6	16,4-17,9
Invierno 2001	Promedio	18,4	19,2	19,3	18,7
	Rango	16,2-19,7	17,6-20,8	18,6-20,3	17,8-19,4
Primavera 2001	Promedio	16,5	17,4	17,6	16,2
	Rango	15,5-18,0	16,6-18,0	17,1-18,2	15,6-16,8
Verano 2002	Promedio	13,4	14,1	13,9	13,9
	Rango	12,7-14,0	14,0-14,3	13,2-14,9	13,4-14,4
Promedio anual	Promedio	16,5	17,3	16,9	16,5
	Rango	12,7-19,7	14,0-20,8	13,2-20,3	13,4-19,4

Fuente: Laboratorio Tecnológico del Uruguay (datos no publicados).

En este proyecto se determinó el tiempo requerido para el secado natural de tablas de *E. grandis* de 38 mm de espesor, partiendo de la condición verde hasta alcanzar 20 % de CH de la madera en todos los lugares del estudio. Los tiempos variaron de 8 a 14 semanas, dependiendo del lugar y del CH de partida (Tabla 3).

TABLA 3. Tiempo de secado de tablas de *E. grandis* de corte tangencial de 38 x 150 x 600 mm (con los extremos sellados), desde condición verde a 20 % en diferentes departamentos de Uruguay iniciando entre agosto y setiembre

Departamento	Localidad	CH inicial (%)		Tiempo (d)
		x	s	
Rivera	Rivera	126,1	24,3	64
Paysandú	Paysandú	82,2	6,8	98
Tacuarembó	Paso de los Toros	137,0	21,8	81
Soriano	Mercedes	131,3	10,0	89

x=promedio; s=desviación estándar
Fuente: Laboratorio Tecnológico del Uruguay (datos no publicados).

2.2.3. Gradiente de humedad de la madera (GH)

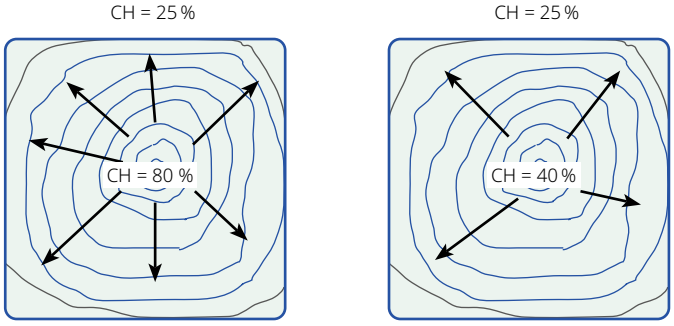
Cuando la madera recién cosechada es aserrada presenta un CH prácticamente uniforme a través de la sección transversal, es decir, posee una humedad homogénea tanto en su superficie como en su interior.

Luego empieza a secarse, de manera natural o artificial. El agua de la superficie se evapora inicialmente, mientras que el interior permanece húmedo.

La diferencia del contenido de humedad entre dos puntos de la madera se denomina gradiente de humedad (GH) (Moscoso, Pérez y Ugarte, 2013).

Este GH origina la circulación interna del agua entre los dos puntos considerados. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se observa mayor GH entre el centro y la superficie de la pieza en una etapa más temprana del secado, cuando el CH promedio es de 57 %, que en una etapa más avanzada con un CH promedio de 30 %. Esto implicará una mayor velocidad de secado al comienzo (Figura 6).

FIGURA 6. Movimiento del agua desde el interior hacia la superficie ocasionado por el gradiente de humedad correspondiente a los perfiles de humedad de la Figura 4



> Altos gradientes de humedad durante el secado pueden generar importantes defectos en la madera.

2.2.4. Gradiente de secado (GS)

Durante el secado en horno convencional existe una variable que es muy importante para conducir un programa de secado.

El gradiente de secado (GS) se define como la relación entre el CH de la madera y el CHE de la cámara en un momento determinado.

Puede ser calculado en diferentes momentos del proceso con la ecuación 1:

ECUACIÓN 1. GRADIENTE DE SECADO

$$GS = \frac{CH}{CHE}$$

Mientras mayor sea la diferencia entre el CH de la madera y el CHE, mayor será el GS y la madera se secará más rápido porque perderá agua con mayor facilidad, pero se corre el riesgo de que puedan ocurrir defectos en la madera por un secado demasiado severo.

El GS es una medida del potencial de secado de la madera. Es muy importante determinar el GS adecuado para secar la madera en el menor tiempo posible, con la menor aparición de defectos. Este valor dependerá principalmente de la especie, espesor de la madera, valor de CHi y condiciones del aire en la cámara.

Estudios para madera de *E. grandis* indican el empleo de programas de secado suave, con GS en el entorno de 3,0 (Jankowsky, Vasconcelos do Santos y Ariel, 2003).

2.3. Teoría del secado de la madera

2.3.1. Proceso de secado

El proceso de secado consiste en eliminar el agua libre y parte del agua ligada hasta llegar a la humedad final, que debe coincidir con las especificaciones del cliente, del uso y destino final de la madera.

El agua en la madera normalmente se desplaza de zonas de mayor a menor contenido de humedad. Este hecho respalda la afirmación común de que *la madera se seca de afuera hacia adentro*, lo que significa que la superficie de la madera debe estar más seca que el interior para que la humedad sea eliminada.

El agua se mueve a través de la madera como líquido o vapor a través de varios tipos de pasajes. Estos incluyen las cavidades de las fibras y vasos, células de

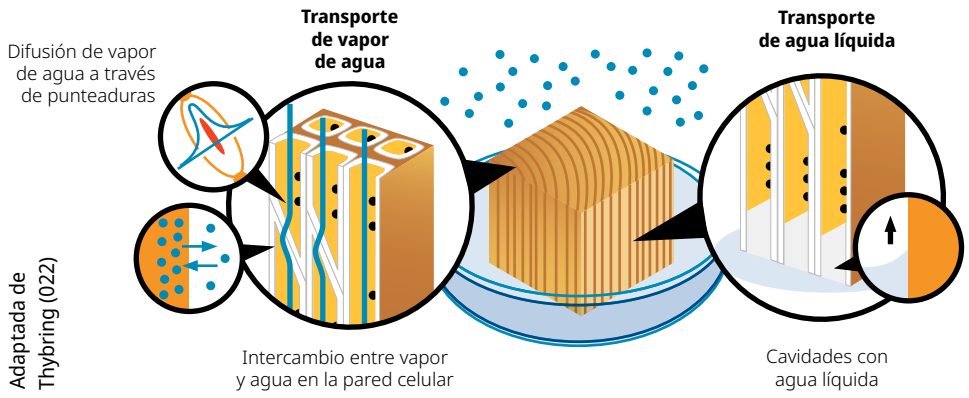
radios, cámaras de punteaduras y sus aberturas de membrana, otros espacios intercelulares y pasajes transitorios en las paredes celulares. La mayor parte del agua perdida por la madera durante el secado se desplaza a través de las cavidades celulares y las punteaduras. Se desplaza en estas vías en todas direcciones, tanto a lo largo de la tabla como en el espesor de esta. En general, las especies menos densas se secan más rápido que las especies más densas porque su estructura contiene más cavidades por unidad de volumen.

MECANISMOS DE MOVIMIENTO DEL AGUA EN LA MADERA

> Durante el secado, el agua se mueve dentro de la madera por diferentes mecanismos que se pueden presentar simultáneamente: capilaridad, difusión y diferencias de humedad relativa.

- *Capilaridad:* el agua líquida libre se transporta a través de las cavidades y fosas celulares (Figura 7).
- *Difusión:* el agua líquida ligada se transporta por diferencias de humedad, desde los puntos más húmedos a los más secos. En términos generales, cualquier molécula de agua que se desplace a través de la madera por difusión lo hace a través de las paredes celulares y de las cavidades celulares (Figura 7). Puede ocurrir que el agua se evapore desde una pared celular hacia una cavidad celular, se desplace a través de la cavidad celular, sea reabsorbida en la pared celular opuesta, atraviese la pared celular por difusión, y así sucesivamente, hasta llegar a la superficie de la tabla.
- *Diferencias de humedad relativa:* esto promueve que el vapor de agua se desplace a través de las cavidades celulares por difusión, lo cual traslada el agua desde áreas de alta humedad relativa a áreas de baja humedad relativa. Las paredes celulares son la fuente de vapor de agua; es decir, el agua se evapora desde las paredes celulares hacia las cavidades celulares (Figura 7).

FIGURA 7. Mecanismos para el movimiento del agua en la madera durante el secado



Cuando la madera verde comienza a secarse, la evaporación del agua desde las células superficiales establece fuerzas capilares que ejercen una tracción sobre el agua libre en las zonas de madera debajo de la superficie y generan un flujo. Esto es similar al movimiento del agua en una mecha. Gran parte del agua libre en la albura se desplaza de esta manera. En comparación con la difusión, el movimiento capilar es rápido.

La difusión longitudinal es aproximadamente de 10 a 15 veces más rápida que la difusión lateral (radial o tangencial). No obstante, solo es de importancia práctica en piezas cortas. Comercialmente, la mayor parte del agua es eliminada por difusión lateral, pues se secan escuadrías/tablas/piezas de largos 30 a 100 veces mayores al espesor.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA

Los métodos más comúnmente utilizados hasta el momento para el secado de madera aserrada se basan en impulsar una corriente de aire caliente sobre la superficie de la madera, lo que caracteriza un proceso de secado por convección. La energía (calor sensible) de la corriente de aire se transfiere a la superficie de la madera, promoviendo la vaporización del agua, la cual se transfiere a la corriente de aire en estado de vapor. Simultáneamente, parte de la energía recibida por la superficie provocará el aumento de la temperatura en esa región y dará inicio al transporte de calor desde la superficie hacia el centro de la pieza. La vaporización del agua presente en la superficie generará un gradiente de humedad, principalmente en la dirección del espesor, generando el movimiento del agua desde el interior hacia la superficie de la pieza.

La humedad se desplaza hacia la superficie más lentamente en el duramen que en la albura debido a las características anatómicas. Los fenómenos de tilosis y la obstrucción de las punteaduras que conectan las células impiden el flujo de fluidos y tornan la madera impermeable.

En el secado, las fibras superficiales de la madera de la mayoría de las especies alcanzan el equilibrio de humedad con el aire circundante poco después de que comienza el secado. Este es el comienzo del desarrollo de un típico gradiente de humedad que inicia el movimiento del agua (Figuras 4 y 6). Si la circulación del aire es lo suficientemente rápida para evaporar el agua de la superficie tan rápido como llega a la superficie, las fibras superficiales de la madera tienden a alcanzar nuevamente el equilibrio de humedad con el aire circundante. Si la circulación del aire es demasiado lenta, se requiere más tiempo para que la superficie de la madera alcance otra vez el equilibrio de humedad. Esta es una de las razones por las que la circulación del aire es tan importante en el secado en horno. Cuando es demasiado lenta, el secado también es más lento de lo necesario y puede llegar a desarrollarse moho en la superficie de la madera. Si es demasiado rápida, se desperdicia energía eléctrica en el funcionamiento de los ventiladores, y puede desarrollarse agrietamiento en la superficie.

2.3.2. Factores que afectan la velocidad de secado

La humedad relativa, la temperatura y la velocidad del aire son los factores del ambiente que se pueden regular para controlar el proceso de secado.

VARIABLES DEL PROCESO

- ***Humedad relativa (HR).*** La velocidad a la que la humedad se desplaza en la madera depende de la humedad relativa del aire circundante. A menor humedad relativa del aire, mayor es el flujo capilar de la humedad en la madera. La baja humedad relativa también estimula la difusión al reducir el contenido de humedad en la superficie, lo que agudiza el gradiente de humedad y aumenta la velocidad de difusión. Si la humedad relativa del ambiente es demasiado baja en las etapas iniciales del secado, en la tabla podrían desarrollarse defectos de secado.
- ***Temperatura del aire.*** A mayor temperatura, la humedad se desplaza más rápidamente desde el interior más húmedo hacia la superficie más seca de la tabla. Si la temperatura es demasiado alta, podrían ocurrir defectos en las piezas.
- ***Velocidad del aire.*** A mayor velocidad del aire en contacto con las caras de las tablas que se están secando, mayor será la velocidad de secado. Velocidades altas disminuyen el tiempo de secado, pero también generan más defectos.

CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

- ***Permeabilidad.*** Afecta el transporte de agua a nivel celular y, en consecuencia, la velocidad de secado. Una baja permeabilidad puede causar colapso durante el secado de esta especie.
- ***Densidad.*** La densidad específica es una propiedad física de la madera que sirve como guía para predecir facilidad de secado. En términos generales, cuanto más densa es la madera, más lenta es la velocidad de secado y mayor la probabilidad de desarrollar defectos durante el proceso.
- ***Espesor.*** El tiempo de secado aumenta con el espesor y a una tasa que es mayor a la directamente proporcional al espesor. Por ejemplo, si el espesor se duplica, el tiempo de secado es más que el doble. Teóricamente, si el secado estuviera controlado completamente por la difusión, el tiempo de secado aumentaría en un factor de cuatro si el espesor se duplicara. Sin embargo, debido a otros mecanismos involucrados en el secado, el tiempo de secado aumenta entre tres y cuatro veces. La variación de espesor en la madera causada por un aserrado deficiente puede llevar a una variación excesiva en el contenido de humedad después del secado o a un tiempo excesivo en la cámara para igualar la variación.
- ***Contenido de humedad.*** El contenido de humedad de la madera también influye en la velocidad del proceso de secado. Cuando el contenido de humedad inicial es elevado, es necesario remover más agua de la madera y consecuentemente el tiempo de secado será mayor. Así mismo, el contenido

de humedad final, o sea la humedad final deseada de la madera, también afecta al tiempo de secado. En general, cuanto mayor es la diferencia entre CHi y CHf mayor será el tiempo de secado.

2.3.3. Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Las propiedades termodinámicas de mezclas de gas con vapor son estudiadas por la psicrometría. La mayoría de las aplicaciones se refieren al aire húmedo, considerado como la mezcla de aire seco y vapor de agua. Las propiedades del aire como temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de bulbo húmedo (TBH), humedad relativa (HR), humedad absoluta, volumen húmedo, etc., son variables interrelacionadas. Conocidas o fijadas dos de ellas, el resto de estas quedan determinadas. Por ejemplo, si se conocen la TBS y la TBH, quedan fijas y conocidas las restantes propiedades anteriormente mencionadas.

TEMPERATURA DE BULBO SECO (TBS)

Es la temperatura del aire medida con un termómetro normal, en forma independiente de la humedad (Pezo, 2007).

Se puede medir con RTD (*resistence temperature detector*) o termocuplas PT100 (Pezo, 2007).

En maderas difíciles de secar como el *E. grandis*, la TBS se restringe a un rango de 35 a 75 °C (Pezo, 2007).

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO (TBH)

Corresponde a la temperatura del aire que mide un termómetro con bulbo húmedo (algodón, tela mojada), cuando pasa por él una corriente de aire a una velocidad mínima 2 m/s. Al evaporarse el agua, absorbe calor y desciende la temperatura del aire. **La TBH siempre es menor que la TBS.**

La TBH es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la tasa de transferencia de calor por convección y conducción desde el bulbo húmedo se iguala a la tasa a la cual la superficie húmeda pierde calor en forma de calor latente de vaporización. Dicho de otra forma, es la temperatura a la que el agua es evaporada a una determinada temperatura de bulbo seco y humedad relativa mientras la presión se mantiene constante (Pezo, 2007).

En maderas difíciles de secar como el *E. grandis*, se utiliza la TBH en un rango de 30 °C a 50 °C (Pezo, 2007).

HUMEDAD RELATIVA (HR)

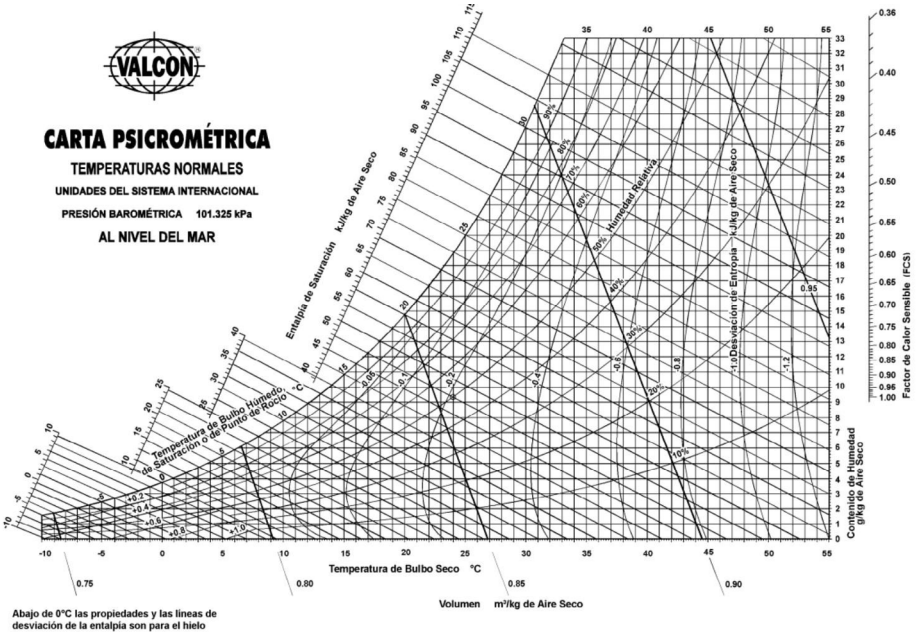
Es la humedad del aire expresada como relación entre la cantidad de vapor de agua que se encuentra contenida en 1 m^3 de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que pueda encontrarse en el aire a una temperatura determinada.

DIFERENCIA PSICROMÉTRICA

Es la resta entre la TBS y la TBH, que explica el potencial de secado. Una mayor diferencia psicrométrica implica un mayor potencial de secado. El objetivo es lograr la mínima diferencia psicrométrica, idealmente menos de 2 °C (Pezo, 2005).

Para conocer estas propiedades se pueden utilizar diagramas psicrométricos como el de la Figura 8 o recurrir a aplicaciones en línea, como el «Diagrama y calculadora de parámetros psicrométricos online» (Herramientas de Ingeniería, s. d.)

FIGURA 8. Diagrama psicrométrico de la mezcla aire vapor de agua a presión atmosférica



Fuente: (Ingeniería Química Reviews, 2020).

2.3.4. Defectos de secado y su control

Los defectos, en términos aplicados a la madera, se refieren a cualquier anormalidad o irregularidad que disminuya su valor comercial. Estos pueden afectar la resistencia de la madera, su trabajabilidad, sus cualidades de acabado o su apariencia. Al someter la madera a un proceso de secado, se generan tensiones internas, a nivel estructural, que se pueden manifestar en la troza, la madera aserrada, los productos terminados y los productos en uso.

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

La contracción natural de la madera no se desarrolla uniformemente en toda la pieza. El endurecimiento superficial ocurre cuando el GH de la madera es muy elevado y se forma una capa muy seca en las caras exteriores de las piezas

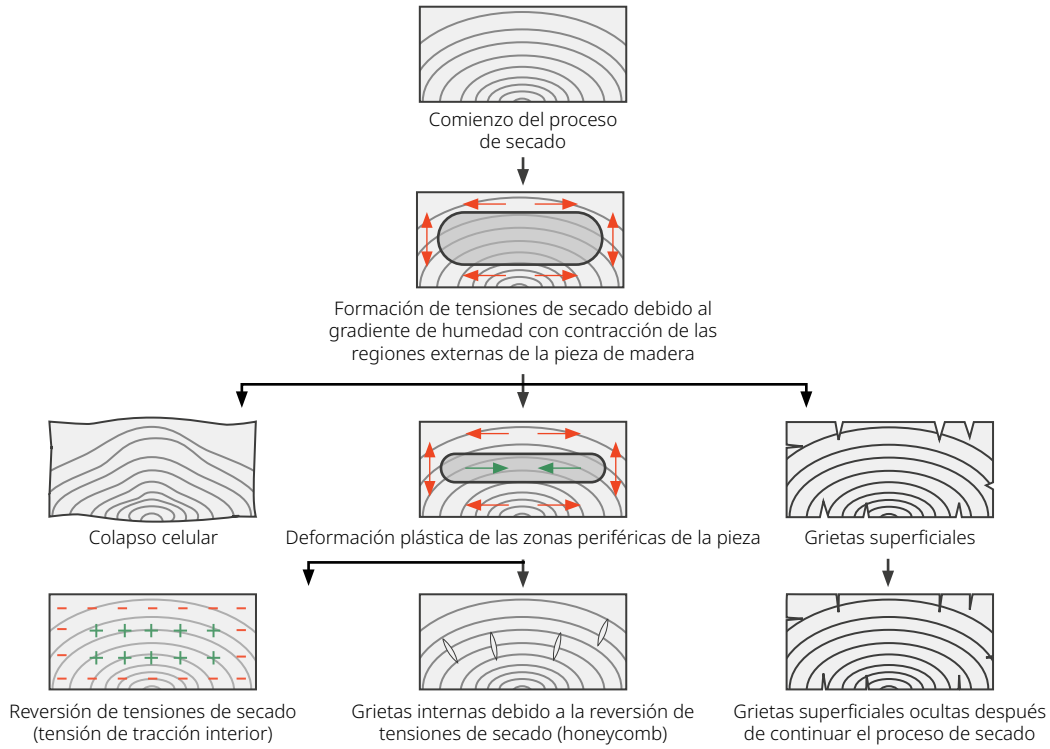
que hacen de barrera para el avance del agua hacia el exterior, impidiendo la disminución del CH de la madera durante un proceso de secado. Esta capa no puede contraer, ya que el centro de la tabla aún verde no permite su movimiento. Cuando finalmente comienza a disminuir el CH en el centro, la periferia endurecida no permite que se contraiga, mientras es sometida a esfuerzos de compresión y las células internas sufren esfuerzos de tensión. Esto puede desembocar en grietas superficiales en la primera fase o internas en la segunda fase y puede conservarse en tensión hasta el final del secado.

Este defecto se detecta cuando al reaserrar longitudinalmente una tabla las piezas resultantes se curvan hacia adentro. Esto puede ocurrir cuando se secan maderas muy húmedas y poco permeables, y puede estar acompañado por agrietamiento superficial, torceduras y encorvaduras. Este defecto puede evitarse aplicando vaporizado fuerte a la madera cuando empieza a bajar del PSF y una segunda vez antes de alcanzar el CHf. En maderas presecadas al aire, se recomienda iniciar el secado con una primera etapa de vaporizado para minimizar la ocurrencia de este defecto.

EFECTOS DE LAS TENSIONES DE SECADO

Las tensiones que se producen en una pieza de madera durante el secado son de naturaleza diferente, según si su CH se encuentra por encima o por debajo del PSF (Figura 9).

FIGURA 9. Tensiones de secado y posibles consecuencias

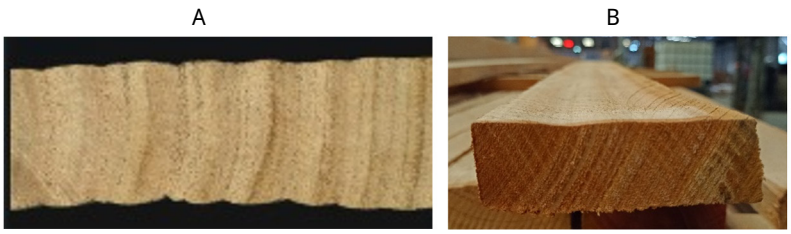


COLAPSO

Por encima de PSF, en condiciones extremas la tensión capilar puede producir colapso o aplastamiento celular. Este defecto es el resultado del secado rápido de la madera desde un CHi muy alto. Cuando el colapso es externo se presenta como corrugaciones o fuertes aplastamientos en la superficie de la pieza. Cuando el colapso es interno, va acompañado de grietas internas que se presentan en la sección transversal de la pieza como cavidades de forma irregular. El eucalipto es muy sensible al colapso.

Este defecto puede evitarse sometiendo la madera verde a un secado lento a temperaturas que no superen los 40-44 °C y manteniendo la HR cercana a la saturación atmosférica durante las primeras fases del proceso. El reacondicionamiento de madera colapsada es posible cuando aún no se han desarrollado roturas en la pieza. Esto se realiza sometiendo la madera a un fuerte vaporizado, es decir, temperaturas altas en atmósfera saturada de vapor. La duración del tratamiento depende del espesor de la madera, el grado de ondulación que presenten las piezas y la especie (generalmente se estima entre 4 y 8 horas). Después de este reacondicionamiento debe practicarse un cuidadoso programa de secado con condiciones más suaves que el programa de secado inicial. En el ítem «Programas de secado», dentro del punto 3.5.3. «Estrategia de secado en horno», se pueden ver ejemplos de aplicación de estos conceptos.

FIGURA 10. Manifestación del colapso, visible en la cabeza de las piezas de madera



A: Tomado de (Pedras Saavedra y Touzas Vázquez, 2005). B: Colapso en tablas de 1" de *E. grandis.* Foto de los autores durante visita a aserraderos, 2024.

Por debajo del PSF, las tensiones que se desarrollan en las paredes celulares son responsables de la contracción normal de la madera debido al GH, es decir, la diferencia del CH de las capas superficiales y el centro de la pieza de madera. En condiciones extremas, estas tensiones pueden producir endurecimiento, grietas superficiales e internas y diferentes tipos de deformaciones en los cantos y caras de las piezas de madera.

Las causas de estos defectos están relacionadas, por un lado, con errores en el proceso de apilado y estiba, como separadores mal espaciados o de espesor inadecuado, espesores de las piezas de madera variables o piezas que sobresalen de las pilas de madera. Por otro lado, se relacionan con fallas en el funcionamiento del secadero, donde la ventilación es insuficiente, la circulación del aire es escasa o

irregular, y por la falta de estanqueidad de la cámara u horno de secado. Finalmente, la distribución irregular de la humedad dentro de cada pieza y las particularidades anatómicas de la especie también influyen en el porcentaje de defectos generados durante un proceso de secado.

AGRIETAMIENTO (GRIETAS Y RAJADURAS)

Las grietas de la madera se forman cuando las tensiones generadas durante el secado son mayores a la resistencia de la madera a la tracción. Estas tensiones pueden ser causadas por diferencias de contracción entre capas contiguas o por aplastamiento celular durante el transporte capilar del agua. Pueden presentarse los siguientes tipos de agrietamientos:

Grietas internas. Son separaciones de la fibra que devienen en cavidades internas, que generalmente se forman en el sentido de los radios leñosos, como consecuencia de un estado severo de colapso o de endurecimiento superficial (Figura 10). Se pueden producir:

- por colapso severo al comienzo del secado (apanalado);
- cuando el CH del centro de la pieza cae por debajo del PSF en una pieza con altas tensiones;
- durante un enfriamiento rápido luego del secado o cuando se realiza el reaserrado de las piezas de madera seca con altas tensiones residuales.

Es un defecto grave que inhabilita la madera para casi cualquier elaboración posterior. Es importante la detección del colapso o el endurecimiento lo antes posible, para evitar la formación de este defecto.

FIGURA 11. Grietas internas por secado severo en tablas de 1" de *E. grandis*



Fuente: Foto de los autores durante visita a aserraderos, 2024.

Grietas superficiales y en los extremos. Son la consecuencia de tensiones superficiales en la dirección perpendicular al grano y se manifiestan en la superficie y en los extremos de las tablas (Figura 11). Este defecto se presenta con mayor frecuencia en las primeras etapas del secado, como consecuencia de gradientes de secado muy altos, es decir, secado muy rápido. La formación de grietas puede considerarse un defecto leve, siempre y cuando estas no sean muy pronunciadas, aunque son siempre síntomas de condiciones severas del proceso que conviene atenuar.

Aunque las grietas superficiales pueden cerrarse durante el período de acondicionamiento, el tejido está separado, y más adelante, con sucesivos cambios de humedad de la madera, estas grietas pueden volver a abrirse.

Para evitar la formación de grietas en los extremos de las tablas, debe evitarse la circulación de aire en dirección longitudinal de las piezas. Se debe disponer la pila de madera perpendicular al sentido del aire dominante, proteger los extremos de las piezas con un producto impermeable que evite la rápida evaporación de la humedad en sentido longitudinal, y colocar separadores en los extremos de las pilas o castillos. Para el caso de las grietas superficiales, se debe evitar la radiación directa del sol sobre la madera verde o recién cortada y controlar el GS en todo el proceso en hornos, especialmente al comienzo.

Rajaduras. Se considera rajadura cuando la rotura de la madera afecta dos superficies opuestas o adyacentes de una tabla (Figuras 12 y 13).

FIGURA 12. Grietas y rajaduras en los extremos de tablas de *E. grandis*



Fuente: Foto de los autores durante visita a aserraderos, 2024.

FIGURA 13. Rajado de la tabla durante el aserrado desde la cabeza



Fuente: (Buchner, Cabrera e Ipinza, 2014).

ALABEOS O DEFORMACIONES

Este tipo de defecto se produce por una distribución irregular de la humedad dentro de cada pieza o un apilamiento incorrecto, sumado a las características inherentes a la madera, como tensiones de crecimiento, contracción tangencial y radial muy elevadas y la presencia de madera juvenil o madera de reacción en las piezas. Pueden manifestarse en superficies opuestas (cara, canto o en la cabeza), a lo largo o dentro de la sección de la pieza (Board of the Cartagena Agreement, 1989).

Abarquillado. Este se produce cuando las aristas o bordes longitudinales no se encuentran al mismo nivel que la zona central. Se reconoce cuando al colocar la pieza de madera sobre una superficie plana, apoyará la parte central de la cara quedando levantados los bordes, presentando un aspecto cóncavo o de barquillo.

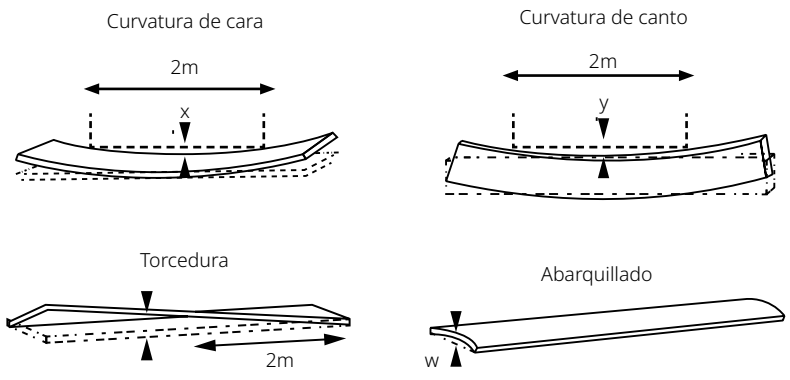
Curvatura de cara. También llamada *combado* o *arqueadura*, es la curvatura a lo largo de la cara de la pieza. Se reconoce cuando al colocar la pieza sobre una superficie plana, se observa una luz o separación entre la cara de la pieza de madera y la superficie de apoyo.

Curvatura de canto. También conocido como *encorvadura*, es la curvatura a lo largo del canto de la pieza. Se reconoce cuando al colocar la pieza de canto sobre una superficie plana se observa una luz o separación entre el canto de la pieza de madera y la superficie de apoyo.

Torcedura. Este defecto se presenta cuando las esquinas de una pieza de madera no se encuentran en el mismo plano. Se reconoce cuando al colocar la pieza sobre una superficie plana, se observa levantamiento de una o más aristas en diferentes direcciones.

En la Figura 14 se muestran los alabeos más comunes descritos anteriormente.

FIGURA 14. Medición de las deformaciones



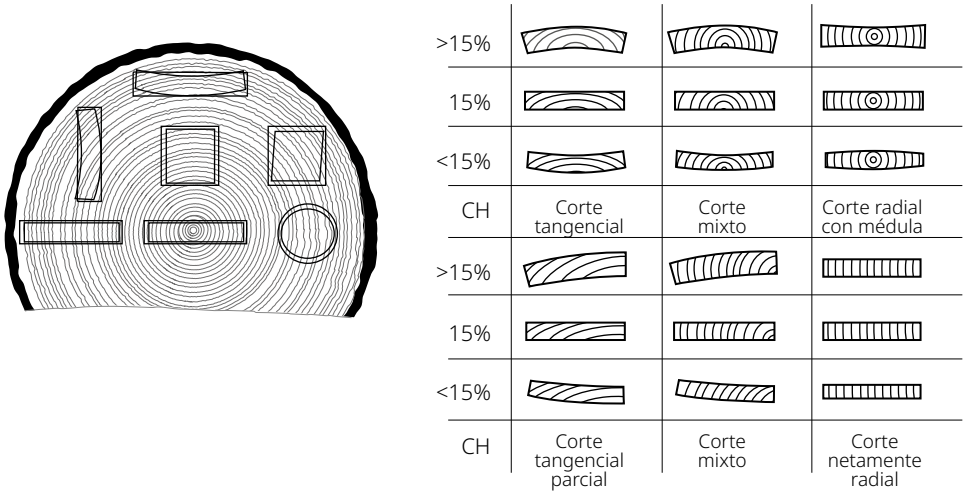
Fuente: (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018).

Cuando los alabeos o deformaciones se producen por diferencias en el CH de las distintas partes de las piezas, se pueden prevenir siguiendo recomendaciones sencillas:

- colocar separadores uniformes en las pilas, de acuerdo con los espesores de las piezas;
- unificar espesores y longitudes de piezas en el apilado;
- utilizar cargas durante el proceso de secado;
- aprovechar la máxima capacidad del secadero;
- revisión periódica de los sistemas de ventilación y cerramiento del secadero;
- uniformizar la carga de pilas en el secadero y respetar los espacios de circulación de aire dentro del secadero.

En caso de que las deformaciones se produzcan por las características de la madera, poco se puede hacer durante el proceso de secado además de las recomendaciones anteriores. Sin embargo, es posible prever los efectos de las tensiones en función del tipo de corte de las piezas, radial o tangencial, y también en función de la ubicación de las piezas dentro de las distintas zonas de la sección transversal del tronco (Figura 15).

FIGURA 15. Deformación normal esperada según el tipo de corte y efectos del cambio de contenido de humedad en diferentes tipos de cortes



EXUDACIONES, COLORACIONES Y DECOLORACIONES

Las exudaciones, resinosas, aceitosas o gomosas, son inherentes a la naturaleza de la madera. Se producen siempre por el afloramiento al exterior de las sustancias extractivas de la madera durante la pérdida de humedad. El único remedio en estos casos es la moderación de la marcha del secado.

En cuanto a las coloraciones y decoloraciones, casi siempre están relacionadas con altas temperaturas o humedades en las primeras fases del secado, por la proximidad o contacto directo de la fuente de vapor con las pilas de madera y con el uso de separadores húmedos o de especies no aptas para este fin.

Capítulo 3

El proceso de secado

3.1. Tecnologías de secado convencionales

El proceso de secado de la madera se puede realizar de diferentes formas y su elección depende de varios factores como volumen de madera a secar, especie de madera, escuadría a secar, entre otros, buscando minimizar los costos del proceso y lograr una buena calidad del producto obtenido.

Existen diferentes métodos de secado: al aire, al aire acelerado, solar, en horno convencional, entre otros, y combinaciones de estos.

El *secado de la madera al aire* consiste en exponerla al ambiente de forma de disminuir su contenido de humedad. Dicho valor de humedad tendrá como límite la humedad de equilibrio en la zona donde se encuentre la madera y dependerá de las condiciones climáticas, TBS, HR, vientos y radiación solar. Para el secado al aire existen diferentes opciones de encastillado como encastillado horizontal, vertical, en tijera y triangular. Presenta como mayor ventaja el bajo costo y como principales limitaciones el escaso control de las variables del proceso de secado, el largo tiempo para terminar el proceso debido a una baja tasa de secado y la imposibilidad de definir un CH de la madera por debajo del CHE para las condiciones climáticas locales y temporales.

El *secado al aire acelerado* consiste en ubicar la madera en cobertizos, galpones o bajo techo, donde se pueden cubrir o no los costados. Dentro de la estructura, el movimiento del aire es forzado y se realiza a través de ventiladores. Se puede o no regular la temperatura, utilizando medios artificiales o naturales. Este método se considera un tipo de presecado. La ventaja principal frente al secado al aire radica en el menor tiempo de secado necesario para alcanzar el CHf de la madera. Al tener un mayor control de las variables frente al secado al aire se disminuye la probabilidad de aparición de defectos. Como desventaja, es un método más costoso que secar la madera al aire libre ya que hay que invertir en cobertizo y ventiladores, pero a largo plazo estos costos disminuyen porque tener madera detenida demasiado tiempo significa un costo adicional.

El *secado solar* tiene como objetivo aprovechar la energía del sol, utilizando cámaras de bajo costo de construcción, y lograr secados de madera en menores tiempos y con un menor CHf en comparación con el secado al aire.

El *secado en horno convencional* consiste en exponer a la madera a condiciones de temperatura y humedad relativa que pueden ser controladas. Se realiza en cámaras o compartimentos cerrados herméticamente. Presentan un sistema de calefacción que permite elevar la temperatura del horno y dispositivos para variar la humedad relativa. El aire es forzado por medio de ventiladores. Las condiciones de secado en cada etapa están previamente definidas en un programa que depende del tipo de madera, espesor, calidad de secado deseada, entre otros factores.

La mayor ventaja frente a otros métodos es tener todas las variables de secado bajo control, para obtener una disminución en la aparición de defectos y en el tiempo de secado, así como homogeneidad y un valor de CHf que puede ser seleccionado en función del destino final de la madera.

Entre las limitaciones se pueden mencionar los mayores costos de inversión, el requerimiento de mano de obra calificada y la necesidad de energía térmica, un recurso que puede generar dependencia externa a las empresas que no producen su propia biomasa.

TABLA 4. Ventajas y desventajas de los distintos tipos de secado

Secado	Ventajas	Desventajas
Al aire	Bajo costo	Escaso control de variables de proceso Baja tasa de secado CHf nunca superior a CHE Muy largo tiempo de secado
Aire acelerado	Bajo costo	Control sobre pocas variables de proceso CHf nunca superior a CHE Largo tiempo de secado
Solar	Baja inversión en cámaras Control sobre algunas variables de proceso	Tiempo de secado moderado
Horno convencional	Control sobre todas las variables del proceso CHf homogéneo Corto tiempo de secado	Alto costo de inversión en cámaras Mano de obra calificada Necesidad de energía térmica y biomasa

3.2. Estrategia de secado

La premisa fundamental del negocio de producción de madera seca es, como la de cualquier otro, obtener rentabilidad. Esto requiere que el industrial desarrolle una estrategia que reconozca cinco factores principales.

Estrategia del negocio de producción de madera seca

1. Atender los requerimientos de sus clientes a través de alcanzar la calidad requerida para los productos.
2. El recurso disponible. Adecuar a la madera rolliza disponible y sus características naturales (ver 3.2.2).
3. Recursos técnicos, de infraestructura y capital disponibles. Esto incluye la habilidad del personal y la capacidad del equipo.
4. El retorno económico. El equilibrio entre el precio y los costos de producción.
5. Un balance entre los costos de producción y la calidad del producto obtenida.

3.2.1. Producto

La madera de *E. grandis* se caracteriza por su potencial de uso para numerosos fines. Sus aplicaciones varían desde fuente de energía procedente de leña o carbón a la producción de celulosa y papel; o bien como rollizo para usos estructurales, como madera aserrada o como materia prima para la producción de tableros o paneles. Estos destinos implican requisitos muy diversos en relación con su materia prima.

En este manual se consideran los usos de la madera aserrada, entre los que destacan su aplicación para funciones estructurales y la *madera de apariencia*, que presenta gran valor económico, particularmente en la elaboración de muebles, marcos, molduras y otros productos de mayor valor agregado. Este segmento de usos más nobles de la madera de eucalipto requiere mayor calidad del producto final, así como materiales libres de defectos y con bajo CH.

Si bien en la Tabla 5 se presentan valores frecuentes de CH de la madera para algunos usos finales, las especificaciones para cada producto se deben establecer para cada caso en acuerdo con el cliente según las condiciones específicas.

TABLA 5. Valores de CH de la madera recomendados para diferentes aplicaciones

Aplicaciones de la madera según su contenido de humedad	CH (%)
Muebles y parqué en países fríos con calefacción alta	8-10
Muebles en ambientes con calefacción central normal	10-12
Muebles en ambientes calefaccionados eventualmente	13-14
Puertas y ventanas al exterior	14-15
Equipos agrícolas, tonelerías, embalajes, cajas	16-17
Maderas en las que se quiere evitar la pudrición	18-20
Construcción en corrientes de aire fresco y húmedo	21-24

Fuente: (Suirezs y Berger, 2010).

3.2.2. Mercado

Los clientes pueden requerir una amplia gama de productos de madera seca para fines estructurales o de apariencia, u otros de menor calidad. La especificación del producto está determinada por el mercado de destino y el cliente en particular. Existen estándares internacionales, regionales o nacionales y otros documentos técnicos propios de un sector del mercado que establecen los requisitos técnicos para un producto. También puede acordarse una determinada especificación entre las partes.

Dependiendo del uso final de la madera, y del mercado de destino, existen diferentes tipos de estándares aplicables a la madera de *E. grandis*.

MADERA DE APARIENCIA

La Asociación Nacional de Maderas de Latifoliadas (NHLA) de Estados Unidos generó unas reglas para la medición e inspección de madera de latifoliadas y ciprés (National Hardwool Lumber Association [NHLA], 2023), que son ampliamente adoptadas para la clasificación y comercialización de madera de apariencia de latifoliadas. Esta norma provee una clasificación especial para algunas especies y productos y una genérica que se aplica a la madera *E. grandis*.

La clasificación de una tabla según esta norma se determina por la proporción que puede ser cortada en un número y tamaño específicos de piezas más pequeñas (United States Department of Agriculture, 2010), libres de defectos en al menos un lado. La clasificación se basa en la cantidad de cortes utilizables en la tabla. De esta forma, un fabricante de sillas puede utilizar una tabla que contenga piezas (recortes) libres de defectos más cortas y estrechas, mientras que un fabricante de muebles o mesas puede requerir cortes más largos o anchos, o ambos. Las piezas de latifoliadas suelen fabricarse en tamaños estándar. Las longitudes estándar tienen incrementos de un pie, desde 4 hasta 16 pies. La madera dura se fabrica generalmente en anchos aleatorios, pero existen anchos mínimos para cada clasificación.

Las reglas de clasificación se describen en manuales de la NHLA que ilustran los criterios determinantes de la clasificación como la longitud y el ancho de la tabla, la medida de superficie de los cortes limpios (*clear*), el porcentaje de la tabla que produce cortes limpios, así como el número máximo y tamaño de los cortes permitidos (National Hardwool Lumber Association [NHLA], 2023). Los defectos admitidos varían también entre las clases. La categoría de más alta calidad se denomina FAS (primera y segunda), seguida de FAS una cara (F1F), seguidas de Selects, N.º1 Common, N.º2 Common, Sound Wormy, N.º3A Common y N.º3B Common.

La madera de apariencia se exporta también según requisitos especiales de los compradores.

MADERA DE USO ESTRUCTURAL

Las normas NHLA proveen también una metodología para la clasificación de madera estructural de latifoliadas. Si bien esta clasificación puede aplicarse por mutuo acuerdo entre comprador y vendedor, no provee garantías de resistencia de la madera clasificada.

A nivel nacional, para la clasificación de la madera de *E. grandis* para uso estructural se dispone de la norma UNIT 1262 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018). Dicha norma es aplicable a madera aserrada seca de sección rectangular. La clasificación de la madera para uso estructural se basa en la evaluación de ciertas características y singularidades que presentan las piezas de madera: las dimensiones, el peso y el contenido de humedad en base seca. Las singularidades que se determinan están ligadas a la anatomía (por ejemplo, el diámetro mayor del nudo en cara y canto) o al proceso de aserrado (por ejemplo, arista faltante). También se evalúan las alteraciones de tipo biológico que puede presentar la madera, como el ataque de hongos e insectos xilófagos.

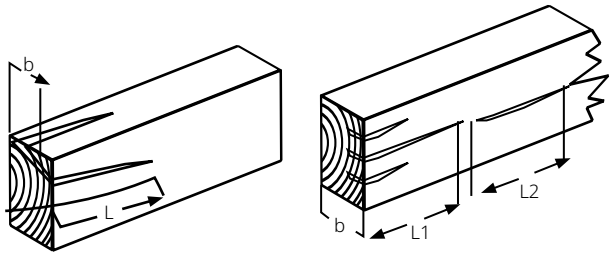
Las deformaciones de las piezas producidas durante el secado que se determinan son la curvatura de cara, la curvatura de canto, el abarquillado y torcedura. Otros parámetros que se determinan en las piezas a clasificar son la presencia de rajaduras o grietas. La madera para clasificarse como estructural bajo la norma UNIT 1262 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018) debe haber pasado por un proceso de secado y con un contenido de humedad promedio inferior al 20 %bs y ninguna pieza podrá exceder el 24 %bs. Para la determinación de la humedad del lote de madera se efectúan medidas en al menos un 10 % de las piezas (elegidas aleatoriamente), sin que el número total de medidas descienda de 15. La determinación del CH se puede realizar con métodos eléctricos, según lo descrito en la norma UNIT 223-2 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2007).

La curvatura de cara (combado o arqueadura) se evalúa como la deformación en máxima (en mm) en la cara de la pieza en un tramo de 2 m de longitud. La curvatura de canto (encorvado o encorvadura) se evalúa como la deformación en máxima (en mm) en el canto de la pieza en un tramo de 2 m de longitud. La torcedura o alabeo se evalúa como la deformación máxima de la superficie sobre una longitud de 2 m desde el extremo de la pieza. El abarquillado o acanaladura se evalúa como

la deformación máxima sobre el ancho de la sección. Estas deformaciones se representan en la Figura 14.

Con relación a las rajaduras, se mide su longitud total en las dos caras o cantos adyacentes. Las grietas se miden utilizando una galga de 0,2 mm de espesor y se mide la longitud de aquellas que presentan profundidades mayores a 1 cm, como se muestra en la Figura 16. En caso de haber más de una, se computa la suma de todas las grietas.

FIGURA 16. Criterio de medición de grietas y rajaduras. Norma UNIT 1262



Leyenda

Izquierda: Fisura pasante o rajadura
Derecha: Fisura pasante o grieta

Fuente: (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018).

Las especificaciones de la norma UNIT 1262 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018) para la clasificación visual de piezas de sección rectangular de *E. grandis* con relación a estas deformaciones se muestran en la Tabla 6.

TABLA 6. Criterios de clasificación visual de *E. grandis* según la norma UNIT 1262

Criterios de calidad	Calidad visual EF1
Diámetro de los nudos (d) sobre la cara (h)	d ≤ 2/3 h
Diámetro de los nudos (d) sobre la cara (b)	d ≤ 2/3 b
Presencia de médula	No permitida
Dirección de las fibras	Desviación ≤ 1:9 (11 %)
Fisuras de secado pasantes / Rajaduras	Solo se permiten en los extremos y su longitud no debe ser mayor que el espesor (b) de la tabla.
Fisuras de secado no pasantes / Grietas	≤ 1 m o ≤ ¼ La
Fisuras / Fendas de rayo, heladura o abatimiento	No permitidas
Madera de reacción: tensión (mm/mm)	Sin limitación

Alteraciones biológicas:	
◗ Azulado	Permitido
◗ Hongos de pudrición	No permitidos
◗ Galerías de insectos	Diámetro de los orificios ≤2mm
Deformaciones:	
◗ Curvatura de cara, combado o arqueadura	≤ 8mm
◗ Curvatura de canto o encorvadura	≤ 8mm
◗ Torcedura o alabeo	≤ 1mm por cada 25 mm de h
◗ Abarquillado o acanaladura	Sin limitación
Arista faltante (mm/mm)	Transversalmente ≤ ¼ h o ¼ b donde aparece. Sin limitación en el largo.
Otros	Daños mecánicos, bolsa de resina, corteza incluida y otras singularidades se limitan por analogía con alguna característica similar.

Fuente: (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018).

Es importante recordar que los clientes particulares pueden tener sus propios requisitos para el producto final considerado.

MADERA PARA *PALLETS*

Las características establecidas en los diferentes estándares utilizados para la madera destinada a la fabricación de *pallets* dependen estrechamente del tipo de producto que se vaya a transportar en el *pallet*. Estos estándares normalmente son definidos por los propios compradores de un determinado producto, que establecen en qué condiciones y en qué forma se debe embalar para que les llegue de sus proveedores. En este caso, el proveedor del producto traslada estas condiciones a quien le vende los *pallets*.

Entre estas definiciones se encuentran las siguientes características:

- Dimensiones y formato del *pallet*.
- Requisitos para la madera (contenido de humedad máximo admitido, presencia y tamaño de nudos máximo admitido, agujeros de insecto generalmente no permitidos).
- Tratamientos requeridos. Fundamentalmente para los *pallets* utilizados para el transporte de alimentos se requiere tratamiento térmico.
- Controles de calidad que el proveedor realizará al recibir los *pallets*.

3.2.3. Personal, equipamiento y otros

Los recursos técnicos disponibles van a determinar el proceso que puede realizarse y el grado de complejidad de proceso que puede enfrentarse.

El secado de *E. grandis* requiere:

- equipamiento capaz de regular las condiciones buscadas;
- equipamiento auxiliar;
- instrumentos de medición;
- capacidad de gestión del stock de materia prima y producto;
- capacidad de procesamiento del volumen deseado;
- personal operativo para mover la madera, entrenado para clasificar y encastillar;
- personal entrenado para medir los parámetros de control del proceso en forma adecuada;
- personal que pueda vincular el resultado final de los procesos con la materia prima y los resultados del monitoreo del proceso, tomar decisiones en consecuencia y actuar sobre los programas de secado.

3.2.4. Criterios económicos

El objetivo fundamental del negocio de producción de madera seca es obtener mayor rentabilidad produciendo lo que el cliente requiere, buscando el retorno económico y cuidando el equilibrio entre el precio y los costos de producción. En los anexos de este documento se presentan estudios económicos de dos ejemplos de secado de madera de *E. grandis*.

En resumen, el desafío del secado de esta especie consiste en generar una estrategia adaptable a la materia prima y el producto deseado, para lograr el cumplimiento de las especificaciones con los recursos disponibles, en el menor tiempo y con el menor costo posibles. Esta estrategia deberá considerar posibles combinaciones de presecado y secado, manejando en forma cuidadosa el stock de madera verde para evitar daños por secado *descontrolado* y regulando las variables de proceso según las condiciones particulares.

3.3. Consideraciones previas al secado

Luego de secada la madera, a lo largo del procesamiento de *E. grandis* una serie de factores influyen en la obtención de un producto de calidad adecuada. El buen resultado del proceso de secado depende de todas las operaciones involucradas, desde el abastecimiento hasta el almacenamiento y despacho del producto. Es crucial recordar que, si bien el programa de secado es un paso muy importante en el proceso, si no se procede en forma competente en todas sus etapas, ni el mejor programa por sí solo puede asegurar la calidad del producto final.

Este proceso empieza en el suministro de madera. El objetivo del suministro debe ser entregar trozas de *E. grandis* de procedencia conocida, clasificadas, minimizando los daños físicos y bióticos. Daños a las trozas en las operaciones de cosecha y transporte reducen el aprovechamiento final de la madera.

Las etapas del proceso previas al secado que pueden afectar la calidad final de la madera son: cosecha, transporte (incluyendo carga y descarga), almacenamiento de trozas, aserrado y preparación para el secado.

3.3.1. Cosecha

Adecuadas prácticas en operaciones de cosecha y transporte pueden evitar la posterior aparición de daños mecánicos como grietas y rajaduras en la madera seca.

APEO

El apeo de los árboles debe ser hecho con maquinaria específica, dimensionada y operada correctamente, controlando la caída de los árboles en superficie plana y minimizando el impacto de la caída.

DESRAME, DESCORTEZADO Y TROZADO

El procesamiento (desrame y descortezado) y trozado deben hacerse con maquinaria específica, dimensionada y operada correctamente, minimizando golpes y evitando el trozado con la troza/fuste totalmente suspendido. En el trozado mecanizado deben clasificarse trozas según dimensiones (largo y diámetro) y calidad (forma, poda). Si el trozado es manual, la clasificación se hace en la extracción.

El largo de troza debe ser sobredimensionado para el despunte de extremos rajados o agrietados en la industria.

ALMACENAMIENTO

Las trozas expuestas a condiciones atmosféricas (altas temperaturas, radiación directa, baja humedad relativa y viento) comienzan a secarse sin control y ocasionan la aparición de defectos como grietas y rajaduras en extremos y exterior de las trozas sin corteza.

Para evitar los defectos causados por el secado sin control, se debe minimizar el tiempo entre apeo y aserrado, principalmente en verano. Si esto no es posible, se pueden tomar algunas de las siguientes medidas de protección para controlar el secado:

- Apilar trozas en pilas cerradas, a la sombra, y cubrirlas con ramas, corteza, aserrín.
- Sellar extremos de las trozas lo antes posible luego del trozado, con parafina u otro material sellante.
- Colocar placas metálicas en los extremos para contener el rajado, lo antes posible luego del trozado.

3.3.2. Transporte

La extracción, carga y descarga de las trozas debe hacerse con maquinaria específica, dimensionada y operada correctamente, evitando golpes (por ejemplo, caída de trozas), daños físicos y minimizando la cantidad de movimientos.

Se debe minimizar el tiempo entre cosecha y transporte de trozas a la industria; es deseable que se haga dentro de las 48 horas luego del apeo.

El transporte debe ser hecho en camiones adecuados para el transporte forestal y operados correctamente. Las trozas deben cargarse clasificadas e identificadas según origen (geográfico e identidad genética) e historia de manejo, trozas podadas y no podadas. La clasificación por clase diamétrica es recomendable en casos donde los aserraderos no tengan sistema automático de clasificación (por ejemplo, un scanner).

Es recomendable que existan procedimientos específicos para operaciones de cosecha y transporte de *E. grandis* (o al menos eucaliptos) para aserrado. Dichos procedimientos deben incluir los cuidados respecto al secado de la madera previo a su aserrado.

Los criterios de clasificación dimensional y de calidad deben ser establecidos entre industria y proveedor, pues en Uruguay no se dispone de norma nacional de clasificación de trozas para industria. La información de origen e historia de manejo (calidad) debe acompañar a la carga de trozas hasta su destino.

3.3.3. Almacenamiento de trozas

El objetivo en el patio de trozas es recibir, evaluar, almacenar y preparar trozas para su aserrado, de modo que se minimice el daño a las trozas y al entorno circundante. Debe estar ubicado lo más próximo posible a la alimentación del aserradero, para minimizar traslados y optimizar el uso del tiempo.

Las trozas son la materia prima para aserrar y luego secar; cualquier daño a las trozas y cualquier falla en su preparación reducen la cantidad de madera aserrada utilizable.

Las trozas deben llegar según especificaciones de calidad y dimensiones, lo cual debe chequearse al ingreso. Los desvíos, incumplimientos o defectos deben ser registrados y comunicados al proveedor.

La información de origen, calidad y dimensiones de las trozas debe ser recibida, corroborada e ingresada al registro de la empresa, para su uso posterior en el proceso y para mantener la trazabilidad de la madera.

Las trozas deben ser apiladas en clases homogéneas según: procedencia, dimensiones (largo y clase diamétrica), calidad (podada y no podada) y fecha de cosecha.

La manipulación de trozas (carga, descarga, clasificación, alimentación del aserradero) debe hacerse con maquinaria específica, dimensionada y operada correctamente, evitando golpes, daños físicos y minimizando la cantidad de movimientos.

En el patio, las trozas deben ser mantenidas en condiciones controladas para su secado. Se sugiere adoptar las siguientes medidas:

- pilas cerradas, paralelas y próximas entre sí para proteger del sol y limitar la circulación de aire (Figura 17);
- almacenar en ambiente húmedo, con riego.

Para un apilado eficiente se deben disponer contenciones/topes hechas preferentemente con madera, para evitar que las trozas rueden hacia atrás de las pilas y así favorecer el cerrado y altura conveniente del apilado.

FIGURA 17. Apilado de trozas en pilas cerradas y próximas entre sí, sobre patio



Foto: Alejandro Olivera, junio de 2024.

El tiempo de permanencia de las trozas en el patio debe ser lo más corto posible. No debe superar los 5 días en verano y 8 días en invierno.

El diseño y manejo del patio de trozas debe favorecer el drenaje, evitando afectar negativamente el ambiente y permitiendo el tránsito de maquinaria todo el año y en condiciones atmosféricas diversas.

3.3.4. Aserrado

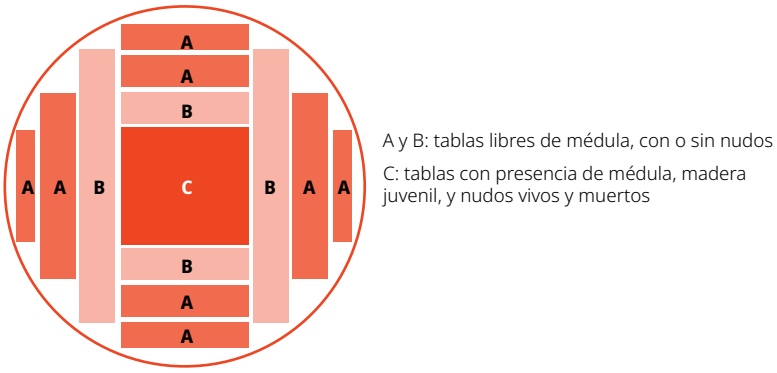
El objetivo del aserradero es transformar las trozas en tablas, empleando un patrón de aserrado determinado y dimensiones específicas. Luego se clasifican y entregan para su empaque o para ser encastilladas y continuar al secado con un daño mínimo.

Para facilitar la clasificación de la madera a secar, el aserrado debe alimentarse con trozas de clases homogéneas según: procedencia, dimensiones (largo y clase diamétrica), calidad (podada y no podada) y fecha de cosecha. No toda la madera aserrada se seca; una parte se comercializa, empaca y despacha verde.

En el aserrado de *E. grandis* es recomendable emplear diagramas de cortes simultáneos (múltiples) para favorecer la liberación controlada de tensiones. Las características (y calidad) de las tablas obtenidas del aserrado de una troza son

variadas. Las piezas de mayor valor son aquellas libres de médula y con poca presencia o libres de nudos (*clear*). Este tipo de piezas se obtienen de cortes próximos a la corteza, con mayor frecuencia cortes tangenciales; mientras que las piezas obtenidas de la parte central de la troza son de menor valor y más propensas a deformarse, agrietarse y rajarse debido a la presencia de nudos, madera juvenil y médula (Figura 18).

FIGURA 18. Ejemplo de diagrama de corte para aserrada de rollizos de *E. grandis*



Nota: Se indican partes de la troza con mayor y menor incidencia de nudos y médula.
Fuente: Elaboracion propia.

3.4. Preparación de la madera para el secado

La preparación de la madera o encastillado suele hacerse a la salida de la línea de aserrado. El secado es un proceso costoso, por lo que se debe secar la madera de mayor valor: se debe clasificar y encastillar la madera aserrada que cumpla con los criterios de calidad objetivo.

3.4.1. Clasificación de la madera

El objetivo de la clasificación es categorizar cada tabla según su calidad, de manera que cumpla con los requisitos de uso previstos o con los estándares de alguna normativa. La clasificación de una tabla se basa generalmente en el número, carácter y ubicación de las características que pueden disminuir su resistencia, utilidad, apariencia o durabilidad. Algunas características visibles comunes que afectan la clasificación son nudos, fisuras, bolsas de quino, grietas, rajaduras, canto muerto, deformaciones y manchas. Si bien algunas características son naturales del árbol, otras pueden ser evitadas con buenas prácticas durante el proceso desde la cosecha hasta el secado y almacenamiento.

Algunos criterios a tener en cuenta:

- La madera que no cumple con los requisitos del producto final no debe ingresarse al horno de secado.
- Nunca mezclar la madera de ***E. grandis*** con madera de pino para el secado.
- Clasificar espesores: espesores diferentes deben distribuirse en diferentes cargas de cámara.
- Clasificar por contenido de humedad: no mezclar madera verde y seca al aire en una misma carga.

En caso de no poder evitar mezclas, las cargas mixtas deben manejarse como la más difícil y en las condiciones que generen el menor estrés.

Este tipo de operaciones pueden bajar el rendimiento anual del secadero a la mitad (Catterick, 1998).

3.4.2. Encastillado de la madera a secar

Encastillado. Se denomina así al apilado de la madera en camadas cerradas (en lo posible), separadas por escuadrías de madera llamadas separadores (Figura 19).

Castillos. Son las unidades de manipuleo de la madera a secar; también se denominan paquetes, estibas o fardos de madera.

Separadores. Son los elementos colocados horizontalmente entre las tablas para separarlas y permitir que el aire circule entre las piezas durante el proceso de secado.

Los separadores deben tener las siguientes características:

- serán preparados con madera seca, de espesor homogéneo, forma recta, colocados en forma perpendicular al largo de las tablas y equidistantes (Tabla 7);

- Estarán alineados verticalmente para prevenir alabeos al mantener las tablas apretadas y descargar la presión sobre la columna de separadores (Figuras 19, 20 y 21).
- El primer y el último separador de cada camada deben ubicarse sobre los extremos para evitar alabeos, grietas y rajaduras en las puntas de las tablas (Figura 19).
- La sección (ancho y espesor) de los separadores depende del espesor de madera a secar; varía de 15 a 50 mm para espesores de madera de 25 a 50 mm (Tabla 7). La suma del espesor de los separadores debe ubicarse en un rango de ±10 % del pleno. (*Pleno o plenum*: espacio libre lateral entre la pared o puerta de la cámara de secado y los castillos de madera).
- El largo de los separadores debe ser igual al ancho máximo de los castillos.
- Es recomendable flejar los castillos para mantener la forma y la correcta disposición de los separadores durante el movimiento (Figura 19A).

FIGURA 19. Madera de *E. grandis* en etapas previas al secado en cámara



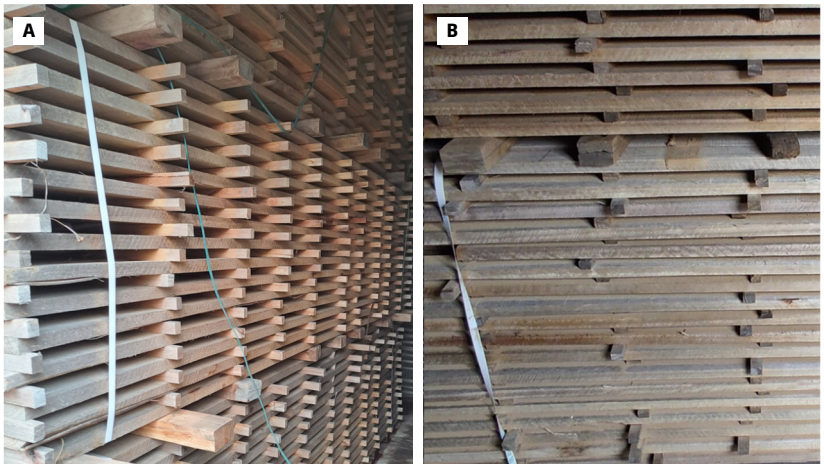
A. Castillos en patio de secado, con flejes plásticos para conservar estructura.
B. Detalle de extremo de castillo siendo armado; separadores en los extremos, huecos debido a la presencia de tablas más cortas al largo total del castillo.
Fotos de los autores durante visita a aserraderos, 2024.

TABLA 7. Dimensiones y espaciamiento de separadores y recomendado para secado de *E. grandis*

Espesor de piezas a secar (mm)	Espesor de separadores (mm)	Ancho de separadores (mm)	Distancia entre separadores (cm)
<30	15-20	30-40	40-50
30-50	20-30	30-40	60-70
>50	30-50	50	100

Fuente: Adaptado de (Tuset y Durán, 2008).

FIGURA 20. Alineamiento vertical de separadores



A. Correcto, verticalmente alineado, sobre apoyos intermedios y sobre el extremo del castillo.
B. Incorrecto, desalineado.
Fotos de los autores durante visita a aserraderos, 2024.

Al armar los castillos se debe procurar que la madera sea lo más homogénea posible:

- Las tablas deben ser del mismo espesor.
- Los contenidos de humedad deben ser similares.
- Se recomienda el mismo tipo de corte, tangencial o radial, si el volumen de madera a secar lo permite.
- Se pueden mezclar tablas de ancho diferente en cada camada, sin que esto influya en el secado.

Al encastillar tablas de diferentes largos, el largo del castillo es definido por las piezas más largas o por un largo mayor en función del mejor aprovechamiento de la cámara de secado. Tablas más cortas que el largo del castillo se colocan

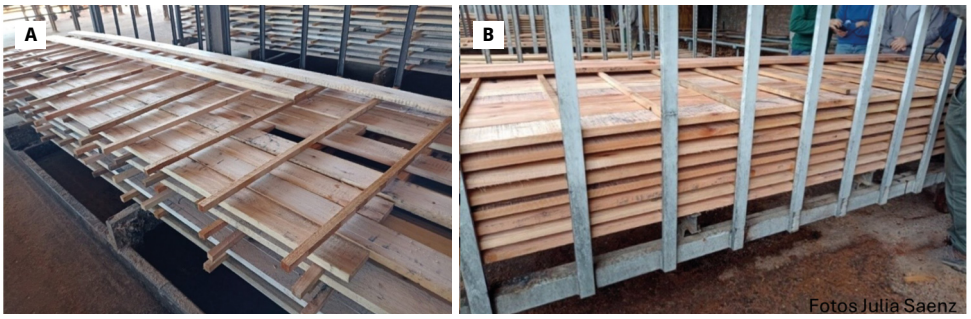
haciendo coincidir un extremo de la tabla con el extremo del castillo; el otro extremo de la tabla quedará dentro del castillo.

Para prevenir defectos (alabeos, grietas y rajaduras) en los extremos de las tablas, es recomendable colocar separadores adicionales para que los extremos queden apoyados.

En todas las camadas debe haber tablas en los extremos del castillo para mantener su estructura. En el medio quedarán espacios sin cubrir (chimeneas) (Figuras 19 y 20).

Es recomendable contar con estructuras o guías para el correcto armado de los castillos, cuidando la distancia entre separadores y su alineación vertical (Figura 21).

FIGURA 21. Castillos en preparación al final del aserrado



A. Colocación de separadores. El largo de los separadores indica el ancho del castillo. Presencia de chimeneas debido a tablas más cortas que el largo del castillo.
B. Estructura para armado de castillos con guía para colocación de separadores.
Fotos de los autores durante visita a aserraderos, 2024.

Las dimensiones de los castillos deben definirse en función del largo de las tablas de mayor largo, de la maquinaria empleada para su movimiento dentro del local y del largo del horno, buscando aprovechar al máximo el espacio de la cámara. A modo orientativo, para movimientos con montacargas, las dimensiones de los castillos pueden ser de 1,0 a 1,2 m de ancho y de altura, y el largo de las tablas de mayor longitud (2 a 5 m).

Para evitar la formación de grietas superficiales y rajaduras en los extremos de las tablas se debe:

- evitar la radiación directa del sol sobre la madera recién aserrada y la acción de corrientes secas y fuertes sobre la madera húmeda;

- proteger los extremos de las piezas con un producto que evite la rápida evaporación de la humedad en sentido longitudinal.

3.4.3. Preparación de la carga para secar

Cada carga se compone de un conjunto de castillos hasta completar la capacidad del horno.

Se debe procurar que la carga del horno sea lo más homogénea posible:

- castillos con madera del mismo espesor ;
- humedad inicial similar ;
- misma humedad objetivo en el secado ;
- mismo tipo de corte (tangencial o radial), si el volumen de madera a secar lo hace viable ;
- lotes de similar calidad y uso final.

Si la carga no ingresa a la cámara de secado el mismo día de aserrada, es recomendable mantenerla en condiciones protegidas o controladas (bajo techo, con riego, cubierta, a la sombra) hasta su ingreso a cámara de secado. Este período previo puede ser un presecado planificado en el proceso de producción.

3.4.4. Presecado

Se denomina presecado de la madera a la etapa del secado donde se pierde el agua libre presente en la madera. En *E. grandis*, hasta un CH de 30 % aproximadamente. Este proceso puede conducirse o realizarse por diferentes caminos:

AL AIRE LIBRE

Se realiza en patio de secado donde hay un control limitado sobre el efecto de las variables atmosféricas en el secado (radiación, temperatura, viento y humedad relativa).

El secado al aire se puede combinar con el método de secado artificial en horno convencional, realizando un presecado (eliminando el agua libre) y reduciendo la permanencia de la madera en el horno de secado. Los procedimientos técnicos

recomendados para realizar un presecado al aire de calidad son la estructuración del patio de secado y de la pila de madera (Figura 22).

El éxito del secado al aire libre comienza con la adecuada estructuración del patio de secado. La ubicación debe contemplar las siguientes características:

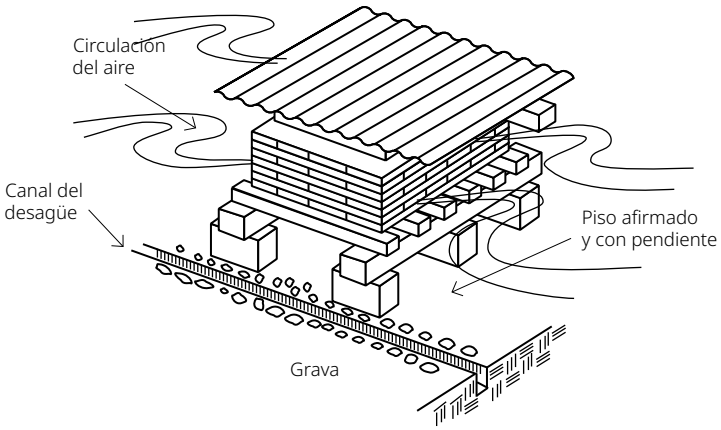
- Espacio amplio y bien drenado (evitar la acumulación de humedad).
- Ubicación cercana al aserradero y al horno de secado, lo que permite un fácil movimiento de la madera, tanto para la llegada de madera *verde* (con alto contenido de humedad) como para la salida de la leña al horno de secado.
- De ser posible, el patio debe tener o algún revestimiento.
- Los castillos del suelo deben elevarse del suelo, evitando el contacto directo entre la madera, así como el suelo y las salpicaduras.
- El lugar debe estar libre de vegetación.
- Espacio ventilado. Los alrededores del patio no deben tener árboles, construcciones u otros obstáculos que impidan el paso del viento.
- Para una mayor calidad de secado se recomienda la protección de las pilas de la lluvia y el sol.
- Uno de los procedimientos técnicos importantes que se deben considerar al estructurar pilas de madera durante el secado al aire libre es el posicionamiento. Las pilas de madera deben colocarse perpendicularmente a la dirección de los vientos predominantes en la región. Esto permite un mayor flujo de aire entre los tableros apilados, lo que ayuda a acelerar el proceso de secado.

Otros procedimientos relacionados con el apilamiento se trataron en los puntos 3.4.2 «Encastillado de la madera para secar» y 3.4.3 «Preparación de la carga para secar».

BAJO TECHO (O TINGLADO)

Si se dispone de la infraestructura y la superficie suficiente, secar bajo cubierta es conveniente para controlar el efecto de la radiación sobre la madera y dar protección ante las lluvias.

FIGURA 22. Esquema de una estiba en un patio de secado



Fuente: (CITEmadera, 2009).

EN PRESECADEROS
Son estructuras de bajo costo (o de menor costo que las cámaras de secado convencional) para controlar velocidad del aire, temperatura y humedad relativa. Normalmente operan en un rango de 30 a 35 °C.

El uso de presecaderos para el secado controlado es una opción a considerar, para aplicarla previo al secado convencional. Una de sus ventajas es que aumenta la productividad de los hornos, ya que parte del proceso se hace fuera de estos.

Dependiendo de la estación del año, la ubicación del horno y la construcción, las necesidades energéticas se reducen en comparación con el secado de madera verde en horno convencional.

La aislación de paredes, la hermeticidad de la estructura del edificio y la ventilación controlada son factores importantes en el diseño. El mayor desafío de diseño, aparte de la integridad estructural de la cámara, es la distribución del aire en estructuras climatizadas que contienen grandes cantidades de madera.

La gran desventaja que se presenta para el caso del *E. grandis* es la calidad de la madera presecada. Esta es fuertemente dependiente de la capacidad de controlar la temperatura y la humedad relativa del aire dentro de la cámara de presecado.

DENTRO DE LA CÁMARA DE SECADO CONVENCIONAL
En este caso, el presecado es una etapa dentro del proceso total de secado.

3.5. Secado en horno convencional

3.5.1. Descripción general
El nivel de degradación de la madera en algunos patios de secado al aire es elevado, y esto puede evitarse al secar en condiciones controladas.

El secado en horno convencional es un proceso de secado de madera controlado, efectuado mediante el calentamiento del aire, humedad controlada y ventilación forzada, con la finalidad de reducir el tiempo de secado de la madera hasta las humedades requeridas, por debajo de CHE del ambiente exterior.

Se realiza en cámaras u hornos cerrados, dentro de los que se generan climas artificiales controlados, evacuando el aire caliente saturado o casi saturado de la cámara y reemplazándolo por aire menos húmedo a temperatura ambiente. Posibilita el control de las variables del proceso: temperatura, humedad y velocidad del aire, operando a temperaturas de entre 40 y 100 °C.

El proceso de secado incluye calentamiento, presecado, secado, igualado y acondicionamiento. También puede ser combinado con etapas previas de secado natural, al aire, o en presecaderos.

3.5.2. Equipamiento

Un horno de secado de madera consiste en una cámara diseñada para proporcionar y controlar las condiciones ambientales de temperatura, humedad y circulación de aire necesarias para el secado adecuado de la madera.

El diseño de un horno tiene influencia en su operación y la eficiencia de secado. En un horno bien diseñado y operado en forma adecuada podría alcanzarse un CH de hasta 3 %.

Las condiciones ambientales son ajustadas a lo largo de un proceso de secado de acuerdo con el CH de la madera. Dichos cambios en las condiciones pueden realizarse en forma manual, automática (programada) o mediante una combinación de ambas.

Existen dos tipos de hornos convencionales de secado de madera: de *operación discontinua* (no estacionario) y de *operación continua* (estacionario). Para el secado de *Eucalyptus sp.* se suelen utilizar hornos que operan en discontinuo.

La mayoría de los hornos de secado son compartimentos aislados térmicamente, diseñados para un proceso discontinuo en que el horno está completamente cargado con madera en una sola operación y la madera permanece estacionaria durante todo el ciclo de secado. La geometría de la cámara, la distribución de los dispositivos para la regulación de las condiciones atmosférica, así como la disposición los elementos de control se configuran de forma de mantener la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire lo más uniforme posible en todo momento.

Comúnmente, se pueden encontrar dos tipos de carga de hornos convencionales para el secado de madera. En el *de carga frontal*, la carga entra y sale en vagonetas o carros sobre rieles. Las tablas se cargan fuera del horno en carros, que luego se introducen frontalmente (Figura 23).

FIGURA 23. Horno de secado de vagonetas

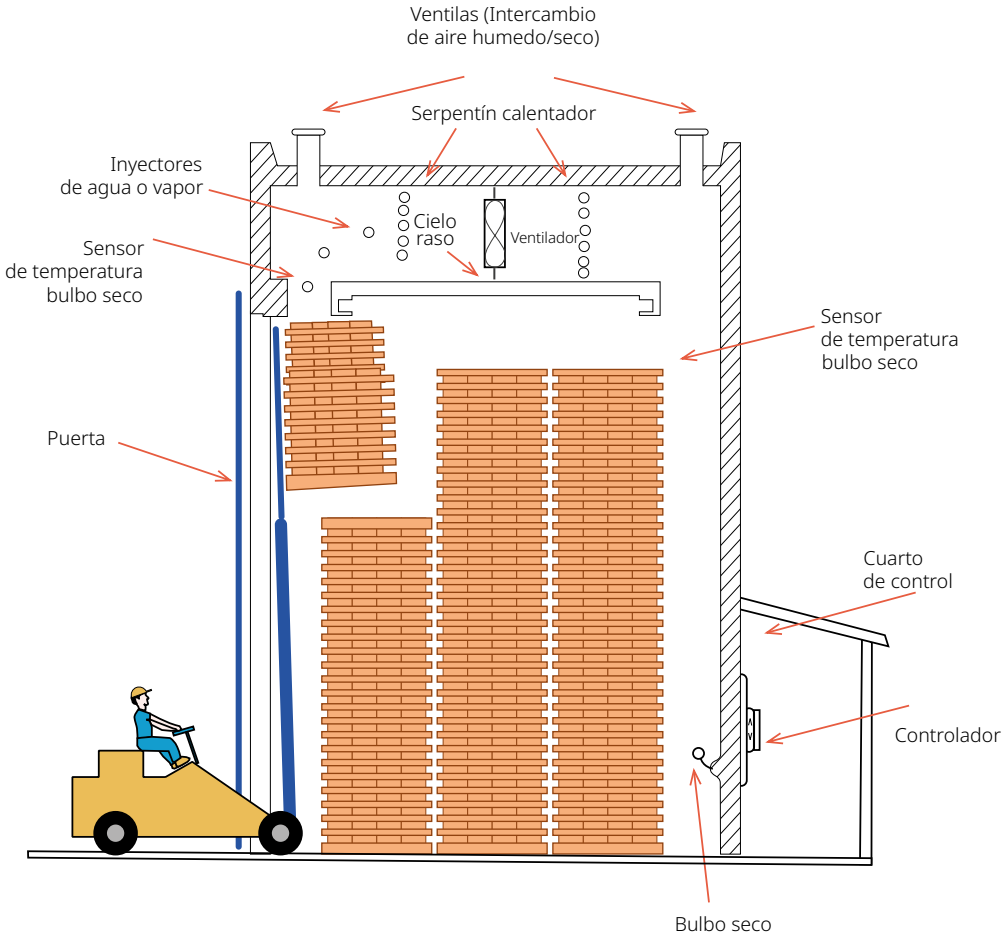


Fuente: (Mahild Drying Technologies, 2022).

Otro tipo es el horno *de carga lateral*, cargado con paquetes mediante montacargas o autoelevadores según el largo de pila (Figura 24). Estos hornos son los más comúnmente utilizados para secar madera de latifoliadas (Denig, Wengert y Simpson, 2000).

El calor del proceso es comúnmente aportado por vapor indirecto, aunque también por agua caliente. La humedad se retira evacuando el aire húmedo por las ventilas del secador.

FIGURA 24. Esquema de horno de secado con carga lateral



Fuente: (CITEmadera, 2020).

Existe otro tipo de horno menos frecuente, el deshumidificador. En estos secadores, a diferencia de los anteriores, el agua se retira del secador por condensación de la corriente húmeda de aire en serpentines refrigerados.

COMPONENTES DE UN HORNO CONVENCIONAL

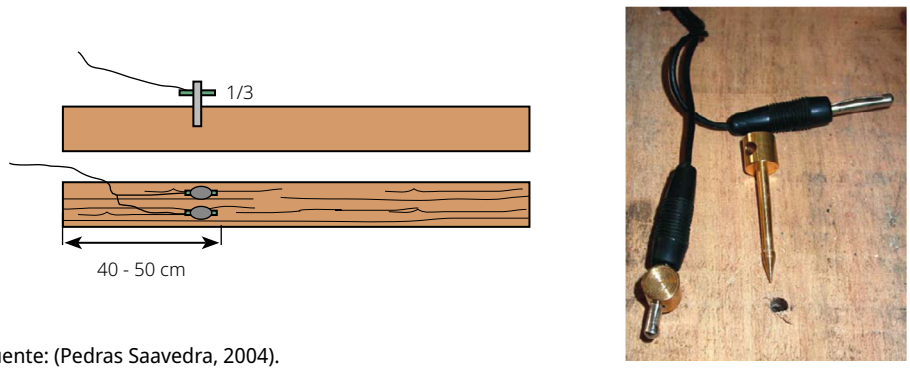
- *Cámara.* Generalmente está hecha de mampostería o de aluminio con un aislante térmico, formando a modo de habitación las paredes y techo de la cámara (Figura 24). Cuenta con una puerta de carga, generalmente del mismo ancho de la cámara y con una altura del mismo nivel del cielo raso, debiendo ser hermética para evitar fugas de calor. El sistema de apertura de esta puerta puede ser batiente o corrediza. Las cámaras modernas tienen sistemas hidráulicos de fácil apertura por un solo operador. Adicionalmente, las cámaras poseen una puerta pequeña, llamada *puerta de inspección*, necesaria para realizar el control del secado en su interior. La cámara de secado debe ser construida sobre una losa armada de hormigón, con una ligera pendiente y una canaleta para la evacuación de agua.
- *Sistema de calentamiento.* Es el que proporciona la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de secado. Los secadores de *E. grandis* operan normalmente en un rango de temperaturas de 40 a 90 °C. El sistema de calefacción comienza en la fuente de calor, que puede ser una caldera con un quemador (a *fuel oil*, leña, residuos del aserradero o gas). El vapor generado en la caldera es generalmente conducido a radiadores tipo serpentín, ubicados en la parte superior de la cámara, frente a los ventiladores, a fin de provocar el movimiento del aire caliente en su interior.
- *Sistema de ventilación.* Se compone de ventiladores que dan velocidad al aire en la cámara, permitiendo su circulación entre las tablas y homogenizando el calor dentro. El número de ventiladores dependerá del ancho de la cámara. En algunos hornos, los ventiladores tienen la posibilidad de regular la velocidad y el cambio del sentido de giro. Esta regulación es muy importante para el secado de *E. grandis*.
- *Sistema de humidificación.* Este sistema permite ajustar la humedad del aire de la cámara, aumentándola o disminuyéndola cuando sea conveniente. Está compuesto por:
  a. *dispositivos de inyección de agua o vapor*, que permiten aumentar la humedad; estos pueden ser inyectores de agua tipo aspersores *spray*, ubicados generalmente en uno de los lados de la cámara; es muy importante su mantenimiento para evitar obstrucciones. Otro dispositivo para aumentar la humedad en la cámara de secado son las piletas internas de agua calefaccionadas con vapor.
  b. *ventilas o dampers* que disminuyen la humedad de la cámara al permitir que salga aire húmedo e ingrese aire más seco del exterior. Están generalmente en el techo de la cámara, en número par. Su función es generar el intercambio de aire entre la cámara y el exterior.

- *Sistema de control y registro.* Es el sistema o mecanismo que controla y registra las variables que determinan las condiciones ambientales establecidas por el programa de secado para la madera. Está compuesto por:
  a. *Sensores de temperatura de la cámara*. Normalmente se utilizan detectores de temperatura por resistencia (RTD) o también termocuplas con vaina de acero inoxidable.

b. *Sensores de humedad de la cámara*. Se utilizan distintos tipos de sensores para realizar estas medidas.
Una opción es instalar dos termómetros, el de bulbo seco y el de bulbo húmedo, para obtener la temperatura y la humedad relativa. El termómetro de bulbo seco mide la temperatura de la manera habitual, denominada TBS. El sensor del termómetro de bulbo húmedo se mantiene húmedo con una cubierta de mecha, de la cual el agua se evapora a una velocidad determinada por la HR y la temperatura del aire. Esa evaporación enfría el sensor que registra así la TBH, temperatura de bulbo húmedo. Normalmente, en una cámara se instalan dos RTD, una de ellas cubierta por un paño húmedo. Este paño debe mantenerse limpio o cambiarse periódicamente.
Otros métodos involucran una placa de celulosa sujetada entre dos electrodos. El CH de la celulosa estará directamente relacionado con la HR y la TBS. Variaciones en el CH de la celulosa van a generar cambios en su conductividad eléctrica que permiten su medición.
Las placas de celulosa deben cambiarse periódicamente según las instrucciones de proveedor del equipamiento.
Los sensores de temperatura y humedad de la cámara están ubicados en la parte central de uno de los lados de la cámara.

c. *Sensores de humedad de la madera.* Son clavos especiales (electrodos) que se insertan en las maderas durante el armado de la pila (Figura 25) y se conectan con el panel de control por cables de registro.
Criterios a seguir para la instalación de estos sensores:
   - La cantidad de clavos se calcula en función del tamaño de la cámara; pueden variar de 6 a 12.
   - En general, se recomienda clavar los electrodos hasta 1/3 del espesor de la madera y a más de 40 cm del extremo de la tabla (Pedras Saavedra, 2004).
   - Los sensores deben ubicarse estratégicamente, buscando registrar las diferentes condiciones de la cámara.
   - Una limitación de estos sensores es el límite superior del CH que pueden medir, ya que por encima del PSF va a existir conductividad por el agua libre celular y se generará un error importante en las determinaciones.

FIGURA 25. Medidores de humedad y esquema mostrando colocación



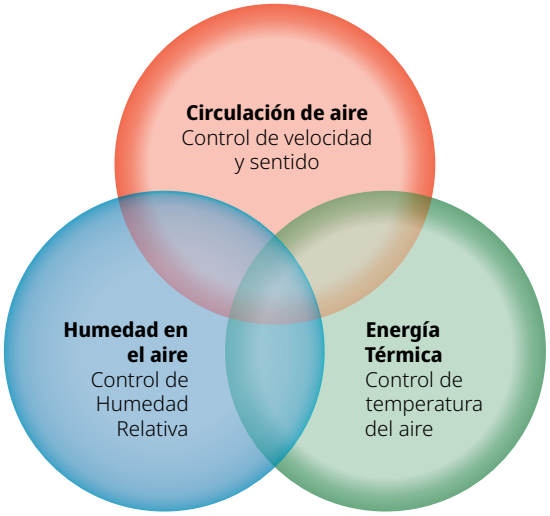
Fuente: (Pedras Saavedra, 2004).

- *Panel o PLC de control.* El panel de control generalmente se encuentra fuera de la cámara, pudiendo estar contiguo o distante de esta, para llevar un registro manual o computarizado de las variables de proceso, además de registrar las incidencias que se pudiesen presentar.

3.5.3. Estrategia de secado en horno

El avance del secado está determinado por la energía térmica aportada, así como por la circulación y contenido de humedad del aire (Figura 26).

FIGURA 26. Las tres variables principales del secado



Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de un horno de secado depende en gran medida de las condiciones de operación. A pesar de los avances en la tecnología de control que brindan al operador más información de la que era posible en el pasado, todavía es en gran medida el juicio del operador lo que determina si un lote de madera pasará por el horno en el tiempo mínimo, saldrá uniformemente secado al contenido de humedad deseado y estará libre de defectos y tensiones no deseadas.

El encargado decide qué programa de secado usar y si debe ser un programa de tiempo o de contenido de humedad; si se van a utilizar muestras del horno, ya sea pesadas o monitoreadas manual o automáticamente con sondas. El operador sigue siendo responsable de seleccionar muestras representativas del horno. Debe supervisar el progreso del secado, ya sea manualmente o con la ayuda de lecturas de computadora, y aplicar su juicio para decidir si son necesarios ajustes durante el secado. Además, el operador debe tomar decisiones para determinar cuándo la madera ha alcanzado el contenido de humedad final con un mínimo de variación en el contenido de humedad y aplicar cualquier tratamiento de igualación o acondicionamiento que estime necesario.

ETAPAS DEL PROCESO

La madera de *Eucalyptus* solo puede resistir condiciones moderadas sin degradarse, hasta que la parte central de todas las tablas esté por debajo del PSF. Una vez que se ha alcanzado este punto, las secciones centrales comienzan a encogerse. Esto disminuye el nivel de tensión en la superficie y la posibilidad de iniciar o aumentar el agrietamiento superficial. A partir de este momento, el secado puede avanzar más rápidamente bajo condiciones más extremas.

La madera no se seca a una velocidad lineal con el tiempo. A medida que el CH cae y se acerca al CH objetivo, se necesita más energía para eliminar cada unidad adicional de agua.

Asumiendo que se parte de tablas con mucha humedad (madera verde), a modo de resumen operativo pueden distinguirse ocho etapas durante el secado:

- ***Calentamiento.*** Al inicio del secado, tanto la madera como la estructura del secador se encuentran a temperatura ambiente. En esta etapa se eleva la temperatura en condiciones de alta humedad. El objetivo es calentar la madera impidiendo totalmente el secado.
  La diferencia de temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo debe ser mínima, entre 0 y 2 °C.
  Controlar el CHE entre 16 y 19 % (CITEmadera, 2017).
- ***Acondicionamiento inicial.*** Si la madera ha estado expuesta a un secado natural u oreo, es probable que su superficie esté más seca que su interior. El acondicionamiento inicial consiste en saturar de humedad la cámara para homogeneizar la humedad de la madera y eliminar así las tensiones de secado generadas antes de entrar a cámara y favorecer la llegada de calor al centro de las piezas.
  Con respecto a los controladores, es importante que estos dispongan de un bloqueo del aumento de la temperatura mientras no se alcanza el CHE en el interior de la cámara.
- ***Presecado.*** Durante esta etapa se reduce la humedad desde verde hasta humedades de aproximadamente 25-30 % (PSF). Las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire son relativamente moderadas.
- ***Reacondicionamiento***. Implica calentar con vapor directo la madera colapsada o propensa a colapsar, durante el tiempo suficiente para que las paredes celulares se ablanden con el calor y la humedad. Las células colapsadas luego recuperan gran parte de su forma original y el tablero se expande. Generalmente se lleva a cabo cuando todas las partes de la madera están por debajo del PSF, normalmente con un CH promedio de alrededor de 18-20 %. Es importante medirlo antes. El reacondicionamiento generalmente agrega 1-2 % al CH de la pieza (Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 2003b). La duración de esta etapa puede ser de entre 4 y 6 horas para tablas de 25 mm y de entre 6 y 8 horas para tablas de 50 mm.
  En la Tabla 8 se sugieren tiempos de reacondicionamiento para diferentes espesores de la madera.

- ***Secado final.*** Durante esta etapa se alcanza la humedad objetivo. Esto se consigue elevando la temperatura y disminuyendo la humedad del aire.
- ***Igualado.*** Se busca uniformizar el CH en la carga manteniendo la temperatura de la fase anterior. Se inicia cuando la muestra más seca alcanza 2 % por debajo del CH objetivo. Se mantiene la HR correspondiente al CHE objetivo, hasta que la muestra de mayor CH alcance el objetivo (Pezo, 2007).
  Para tablas de 25 milímetros de espesor, esta etapa puede llegar a demorar entre 2 y 3 días para lograr estibas homogéneas (Pérez del Castillo y Ono, 2003).
- ***Acondicionamiento.*** En esta etapa se busca reducir o eliminar tensiones en las piezas de madera. Se mantiene la temperatura del igualado y se eleva el CHE en 4 % en relación con el CH deseado. Puede durar entre 4 y 48 horas, dependiendo de las características de la madera y la calidad requerida.
  Pérez del Castillo y Ono (2003) observaron que para tablas de *E. grandis* de 25 mm, un día bajo estas condiciones puede ser suficiente para reducir las tensiones y homogeneizar el contenido de humedad dentro de las tablas.
- ***Enfriamiento:*** es la etapa final, en la que se interrumpe la calefacción del secador y se ingresa aire ambiente en forma controlada hasta que la madera alcance una temperatura próxima a la del ambiente.

TABLA 8. Tiempos recomendados para reacondicionamiento

Espesor (mm)	Tiempo de tratamiento (h)
16-19	4
25	5-6
38	6-7
50	7-8

Fuente: (Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 2003b).

FACTORES CLAVES PARA LOGRAR UNA OPERACIÓN DE SECADO CORRECTA

- **Correcta ubicación de las pilas en el secador:**
  - Deben estar ordenadas según procedimientos estándar. Los paquetes deben estar sujetos de manera adecuada.
  - Las pilas ensambladas (castillos) deben ser estables y lo suficientemente uniformes como para no experimentar ni causar carga desigual en tablas.
  - Los castillos deben disponerse formando camadas continuas que permitan la circulación de aire sin obstáculos.
  - Deben estar orientados en forma perpendicular al flujo de aire (Figura 26).

- **Colocación de pesos sobre los castillos:**
  - Para prevenir alabeos, mantener estabilidad de la carga dentro del horno y disminuir la incidencia de rajaduras durante el secado, es fundamental la

colocación de pesos sobre los castillos (Figura 23). Nótese que el flejado de la pila no cumple esa función.
- Una vez cargadas las pilas se deberán colocar las pesas sobre estas, distribuyendo el peso en forma uniforme, tratando de ubicarlas sobre los extremos del castillo.

- **Proteger las pilas de daños físicos y de defectos de secado:**
  - El espaciado y soporte de las pilas y los bafles del horno deben permitir que el flujo de aire a través de cada camada de la pila sea lo más uniforme posible y que el equipamiento del horno siga correctamente las pautas (programas) de secado establecidos.
  - Al transportar los paquetes, tanto en la carga como descarga del horno para su almacenamiento, se debe minimizar el daño físico que provoque la pérdida de integridad del paquete.

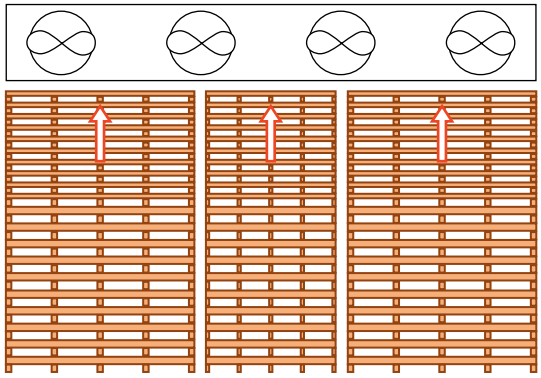
- **Medición del CH:**
  - Es fundamental el monitoreo de la humedad de la madera.
  - Al finalizar el secado, se debe verificar que la humedad cumpla con normativa establecida o con las especificaciones del cliente.

- **Sistema de trazabilidad:**
  - La información de cada paquete debe registrarse y archivarse, de forma que sea accesible para su uso posterior.

- **Identificación de problemas:**
  - Para desarrollar un proceso de mejora continua es necesario identificar y registrar los problemas encontrados para abordar su solución en forma sistemática.

- **Gestión de personal y equipos:**
  - Los recursos humanos y los equipos deben estar disponibles para realizar la actividad de manera segura y eficiente.

FIGURA 26. Esquema de carga de pilas orientadas perpendicularmente a la dirección del aire



Fuente: (Pedras Saavedra, 2004).

PROGRAMAS DE SECADO

Una de las primeras decisiones del operador es seleccionar un programa de secado en el horno y determinar si utilizará un programa basado en el CH o en el tiempo. Esta suele ser una decisión rutinaria para el secado de maderas coníferas, ya que para estas la tecnología de secado ha desarrollado programas de tiempo. Sin embargo, para el caso de *E. grandis*, debido a las particularidades del secado de esta especie, se recomiendan programas basados en el CH.

Un programa de secado en horno es un compromiso cuidadosamente elaborado entre la necesidad de secar la madera lo más rápido posible y evitar condiciones severas que provoquen defectos en la madera (Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 2003b). Se establecen una serie de temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo que fijan la temperatura y la humedad relativa del horno en diversas etapas del proceso de secado. Las temperaturas se eligen para lograr este compromiso entre una velocidad de secado satisfactoria y evitar defectos de secado. Las tensiones que se desarrollan durante el secado constituyen el factor limitante que determina el programa de secado en el horno. Los programas deben desarrollarse de manera que las tensiones de secado no superen la resistencia de la madera a una temperatura y CH dados. De lo contrario, la madera se agrietará en la superficie o internamente, o será aplastada por fuerzas que colapsan las células.

El *E. grandis* es especialmente propenso a sufrir daños durante el proceso de presecado y secado, como colapso, contracción, grietas, rajaduras, abarquillado y tensiones de secado pronunciadas, todo en detrimento de la calidad de la madera seca producida, reduciendo el rendimiento para su uso como madera sólida en distintas aplicaciones. La madera adulta y la juvenil presentan a su vez diferencias en el comportamiento durante el secado. Según Dias Soares (2016), la madera adulta requiere condiciones de secado más suaves, y admite menores temperaturas iniciales y menor potencial de secado que la madera joven.

El presecado es la etapa más crítica dentro del proceso de producción de tablas secas, desde el punto de vista de la calidad de la madera seca. Una reducción del tiempo del presecado aumenta la capacidad de producción y reduce el costo del proceso. Sin embargo, dado que una aceleración del proceso de presecado se logra imponiendo condiciones de temperatura y humedad más exigentes para el producto, la reducción del tiempo de presecado modifica y en general reduce la calidad y rendimiento de la madera seca. Procesos de acondicionamiento como la vaporización pueden mejorar la calidad del producto frente a condiciones de presecado más exigentes.

En consecuencia, definir las condiciones más adecuadas de procesamiento para el presecado de la madera de eucalipto o, dicho de otra forma, definir la tecnología de presecado más adecuada, implica determinar las condiciones para llevar a cabo el proceso en el menor tiempo posible compatible con la producción de madera de calidad adecuada, situación en la cual se obtiene una productividad máxima.

PROGRAMAS DE SECADO DE *E. GRANDIS*

Como se mencionó en el punto anterior, un programa de secado en horno busca secar la madera lo más rápido que permita obtener un producto final de calidad. Tanto en la literatura como en la práctica industrial, se aplican distintos programas de secado, los que se perfeccionan a medida que se acumula experiencia en la operación del secador.

- Generalmente, los programas de secado de esta especie comienzan con una etapa de calentamiento hasta TBS de 30 a 35 °C, en condiciones de alta humedad relativa en el aire.
- Luego la TBS se eleva en varias etapas, hasta alcanzar TBS finales de 55-60 °C.
- Una recomendación consensuada es la de mantener la TBS por debajo de 45 °C y la HR por encima de 75 % hasta el PSF (Jankowsky y Vasconcelos dos Santos, 2005).
- En la definición del programa se debe tener presente la recomendación anterior de mantener un GS en torno a 3,0 o menor (Jankowsky, Vasconcelos dos Santos y Andrade, 2003).
- También es frecuente realizar etapas de vaporización, que contribuyen a disminuir y corregir defectos que puede experimentar la madera durante el secado. En algunos programas se realiza un vaporizado en la última etapa, mientras que en otros casos se realiza un vaporizado intermedio, al alcanzar la humedad del PSF y otro al finalizar el secado.
- En los casos en que se haya realizado un presecado al aire, se recomienda incorporar una vaporización al inicio del secado en cámara.

En la Tabla 9 se suministra un ejemplo de programa de secado que puede utilizarse como punto de partida al comienzo de la operación de un secador, para tablas de 25 mm de espesor partiendo de madera recién aserrada (95 a 120 % de humedad) hasta obtener una humedad final de 12 %.

TABLA 9. Ejemplo de programa de secado para tablas de *E. grandis*, 25 mm desde condición verde (recién aserrada) hasta CHf=12 %

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	Vel. aire (m/s)	GS
Calentamiento		3°C/h		31,0	100	1,5	-
Inicial	65	31	29,5	20,0	90	1,5	3,2
65	55	34	32,5	20,0	90	1,5	3,0
55	45	37	35,2	19,0	89	1,5	2,6
45	40	42	37,8	17,5	87	1,5	2,4
40	35	45	42,1	15,5	84	1,5	2,4
35	30	48	44,6	14,5	82	1,5	2,2
Vaporizado (10 h)		50	50,0		100	1,5	

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	Vel. aire (m/s)	GS
30	24	50	45,8	13,5	79	2,0	2,0
24	20	50	44,0	11,0	71	2,0	2,0
20	18	52	44,2	9,5	64	2,0	2,0
18	16	56	45,4	7,5	55	2,0	2,3
16	12	60	46,0	6,0	46	2,0	2,3
12	10	60	39,3	4,0	29	2,0	2,7
Igualado*		60	52,0	10,0	66	2,0	2,0
Acondicionamiento**		60	56,0	14,0	82	2,0	-
Enfriamiento (4 h)		-		-	-	-	-

CHi = contenido de humedad inicial de la madera; CHf = contenido de humedad final de la madera; TBS= temperatura de bulbo seco.
* Hasta que la sonda con humedad máxima alcance la humedad objetivo.
** CHE = 4 % encima de CH objetivo. Esta etapa puede durar de 4 a 48 horas, dependiendo de las características de la madera y de la calidad requerida.

En todos los casos, el avance del programa de secado debe estar condicionado estrictamente por las mediciones del CH dentro de la cámara.

En la Tabla 10 se presenta una pauta de secado que impone condiciones más enérgicas (Batista, Klitzke y Pereira da Rocha, 2015), para tablas de 30 mm de espesor. Se partió de un CHi de 77,4 % (CV=25,6 %) obteniendo una CHf de 10,0 % (CV=10,8 %) en 19 ± 1 d. Este programa dio por resultado un 35,8 % de tablas con colapso, un 18,5 % de tablas sin tensiones de secado y ninguna tabla con fuertes tensiones. Según los autores, este programa debe ser modificado, aumentando los tiempos de uniformización y acondicionamiento.

TABLA 10. Ejemplo de programa de secado para tablas de *E. grandis*, 30 mm desde condición verde (77 %) hasta CHf=10 %, con una velocidad del aire de 2,0 m/s constante

CH (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	HR (%)	CHE (%)	Tiempo (h)	GS
Calentamiento	40	39	94	-	3	-
45	40	38	88	18	-	2,5
35	44	41	84	16	-	2,2
31	46	42	78	14	-	2,2
28	50	45	77	14	-	2
25	54	48	71	12	-	2,1

CH (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	HR (%)	CHE (%)	Tiempo (h)	GS
20	58	49	64	10	-	2
17	60	49	55	8	-	2,1
15	62	49	48	7	-	2,1
12	66	51	46	6	-	2
10	66	47	35	5	-	2
Igualado	64	56	66	10	8	-
Acondicionamiento	62	56	73	12	8	-
Enfriamiento	44	35	55	9	4	-

TBS = temperatura de bulbo seco; TBH = temperatura de bulbo húmedo; CHE = contenido de humedad.
Fuente: (Batista, Klitzke y Pereira da Rocha, 2015).

También se encuentran programas básicos sugeridos por fabricantes de hornos, con pautas más enérgicas (Pezo, 2024). En la Tabla 11 se presenta una pauta para *E. grandis* de hasta 30 mm de espesor.

Estas pautas siguen las recomendaciones generales de Drying Hardwood Lumber-USDA (USDA, 1991), donde se opera el secador con una misma temperatura de bulbo seco hasta alcanzar la humedad del punto de saturación de la fibra, para luego cambiar a otra temperatura mayor que también se mantiene fija hasta alcanzar la humedad final deseada. En ambos tramos, se varía la TBH o la HR.

TABLA 11. Ejemplo de programa de secado para tablas de *E. grandis*, de 30 mm desde condición verde (recién aserrada) hasta CHf=8 % con velocidad del aire de 2 a 2,5 m/s

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	GS
Calentamiento		3 °C/h		31,0	100	-
Inicial	60	45	42,3	16,5	85	2,4
60	50	45	41,8	15,5	82	2,4
50	40	45	41,3	14,8	80	2,4
40	35	45	40,8	14,0	77	2,4
35	30	45	40,5	13,3	76	2,4
30	25	45	39,8	12,3	72	2,4
Calentamiento		3 °C/h		31,0	100	-
25	20	70	62,0	10,5	69	2,8
20	17	70	58,0	9,0	56	2,8

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	GS
17	14	70	55,0	7,0	48	2,8
14	12	70	50,0	6,0	35	2,8
12	10	70	47,0	5,0	29	2,8
10	8	70	43,0	4,5	22	2,8
8	6	70	37,0	3,5	13	2,8
Enfriamiento (6 h)				-	-	-

CHi = contenido de humedad inicial de la madera; CHf = contenido de humedad final de la madera; TBS = temperatura de bulbo seco; TBH = temperatura de bulbo húmedo; CHE = contenido de humedad de equilibrio; HR = humedad relativa; GS = gradiente de secado.
Fuente: (Pezo, 2024).

En la Tabla 12 se suministra un ejemplo de programa de secado para tablas de 50 mm de espesor, que puede utilizarse como punto de partida al comienzo de la operación de un secador, partiendo de madera recién aserrada hasta obtener una humedad final de 12 %.

TABLA 12. Ejemplo de programa de secado para tablas de *E. grandis*, 50 mm desde condición verde (recién aserrada) hasta CHf = 12 %

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	Vel. aire (m/s)	GS
Calentamiento		3°C/h		31,0	100	1,5	-
Inicial	65	31	29,5	20,0	90	1,5	3,2
65	55	34	32,5	20,0	90	1,5	3,0
55	45	36	34,0	19,0	88	1,5	2,6
45	40	38	36,0	18,0	87	1,5	2,4
40	35	40	37,5	17,0	85	1,5	2,2
35	30	40	37,0	16,0	83	1,5	2,0
Vaporizado (14 h)		40	40,0	-	100	1,5	-
30	24	44	40,0	14,0	78	2,0	1,9
24	20	48	42,5	12,0	73	2,0	1,8
20	18	52	44,0	10,0	63	2,0	1,9
18	16	56	46,5	9,0	59,5	2,0	1,9
16	12	58	45,0	7,0	47	2,0	2,0
12	10	60	42,0	5,0	33	2,0	2,2
Igualado*		60	52,0	10,0	66	2,0	-

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	Vel. aire (m/s)	GS
Acondicionamiento**		60	56,0	14,0	82	2,0	-
Enfriamiento (4 h)		-		-	-	-	-

CHi = contenido de humedad inicial de la madera; CHf = contenido de humedad final de la madera; TBS = temperatura de bulbo seco; TBH = temperatura de bulbo húmedo; CHE = contenido de humedad de equilibrio; HR = humedad relativa; Vel. aire = velocidad del aire; GS = gradiente de secado.
Fuente: (Pezo, 2024).

Pezo (2024) recomienda también pautas más enérgicas para *E. grandis* para espesores entre 30 y 60 mm que se esquematizan en la Tabla 13.

TABLA 13. Ejemplo de programa de secado para tablas de *E. grandis*, de 30 a 60 mm, desde condición verde (recién aserrada) hasta CHf = 8 % con velocidad del aire entre 2 y 2,5 m/s

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	GS
Calentamiento		3 °C/h		31,0	100	-
Inicial	60	42	39,6	17,3	86	2,2
60	50	42	39,1	16,3	84	2,2
50	40	42	38,6	15,6	81	2,2
40	35	42	38,1	14,8	78	2,2
35	30	42	38,0	14,1	78	2,2
30	25	42	37,4	13,1	75	2,2
Calentamiento		3 °C/h		31,0	100	-
25	20	65	57,0	10,5	67	2,6
20	17	65	53,0	9,0	54	2,6
17	14	65	50,0	7,0	45	2,6
14	12	65	45,0	6,0	33	2,6
12	10	65	42,0	5,0	27	2,6
10	8	65	38,0	4,5	20	2,6
8	6	65	32,0	3,5	11	2,6
Enfriamiento (6 h)				-	-	-

CHi = contenido de humedad inicial de la madera; CHf = contenido de humedad final de la madera; TBS = temperatura de bulbo seco; TBH = temperatura de bulbo húmedo; CHE = contenido de humedad de equilibrio; HR = humedad relativa; Vel. aire = velocidad del aire; GS = gradiente de secado.
Fuente: (Pezo, 2024).

La Tabla 14 provee pautas para *E. grandis* para espesores mayores a 60 mm.

TABLA 14. Ejemplo de programa de secado para tablas de *E. grandis*, de más de 60 mm desde condición verde (recién aserrada) hasta CHf=8 %

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	GS
Calentamiento		3 °C/h		31,0	100	-
Inicial	60	40	38,0	18,0	88	2,0
60	50	40	37,5	17,0	85	2,0
50	40	40	37,0	16,5	83	2,0
40	35	40	36,5	15,5	80	2,0
35	30	40	36,5	15,0	80	2,0
30	25	40	36,0	14,0	77	2,0
Calentamiento		3 °C/h		31,0	100	-
25	20	60	52,0	12,3	66	2,4
20	17	60	48,0	9,0	52	2,4
17	14	60	45,0	7,0	43	2,4
14	12	60	40,0	6,0	31	2,4
12	10	60	37,0	5,0	24	2,4
10	8	60	33,0	4,5	17	2,4
8	6	60	27,0	3,5	7	2,4
Enfriamiento (6 h)				-	-	-

CHi = contenido de humedad inicial de la madera; CHf = contenido de humedad final de la madera; TBS = temperatura de bulbo seco; TBH = temperatura de bulbo húmedo; CHE = contenido de humedad de equilibrio; HR = humedad relativa; GS = gradiente de secado.
Fuente: (Pezo, 2024).

3.5.4. Balance entre costos y calidad

Los aspectos económicos del secado de la madera implican un compromiso entre el aumento de los ingresos por una mejor calidad del producto seco (Perré, 2007) y el aumento del costo en el proceso de secado para lograr esta mejora en el secado.

El costo del secado puede dividirse en dos partes:

1. el costo de operación y de amortización de la planta de secado;
2. el costo relacionado con el aumento de los defectos que se producen (colapso, rajaduras, alabeos, grietas).

La frecuencia e intensidad de algunos defectos aumentan al secar la madera hasta un contenido de humedad más bajo y también por las condiciones de secado impuestas por la pauta de secado más enérgica. Por lo tanto, la madera puede ser menos adecuada para algunos destinos (madera para apariencia, madera para uso estructural, madera para *pallets*). El rendimiento volumétrico se verá reducido al reaserrar o cepillar las tablas secas. Según Gjerdrum (2000), el *costo por pérdida de dimensión y calidad* puede ser de una magnitud de dos a tres veces el costo de operar el proceso de secado.

Batista, Klitzke y Pereira da Rocha (2015) reportaron evaluaciones de calidad de secado de tablas tangenciales de tres *especies* de *Eucalyptus*. En la Tabla 15 se reportan los defectos encontrados al finalizar el secado realizado siguiendo la pauta presentada en la Tabla 16. Los resultados son expresados como porcentaje de tablas que presentan el defecto.

TABLA 15. Defectos presentes en las tablas secas luego del secado descrito en la Tabla 16, expresados como el promedio del porcentaje de tablas que presentaban ese defecto para tres réplicas del estudio

Especie	Rajaduras de cabeza (%)	Grietas superficiales (%)	Abarquillado (%)	Colapso (%)
E. saligna	4,94	3,70	67,90	28,40
E. grandis	7,15	0	60,49	35,80
E. dunnii	9,88	4,94	74,07	55,56

Fuente: (Batista, Klitzke y Pereira da Rocha, 2015).

TABLA 16. Ejemplo de programa de secado para tablas tangenciales de *E. grandis*, *E. saligna* y *E dunnii* de 30 mm de espesor, desde condición verde (recién aserrada) hasta CHf = 12 %

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	GS
Calentamiento		40	39	-	94	--
Inicial	45	40	38	18	88	2,5
45	35	44	41	16	84	2,2
35	31	46	42	14	78	2,2
31	28	50	45	14	77	2,0
28	25	54	48	12	71	2,1
25	20	58	49	10	64	2,0
20	17	60	49	8	55	2,1

CHi (%)	CHf (%)	TBS (°C)	TBH (°C)	CHE (%)	HR (%)	GS
15	15	62	49	7	48	2,1
15	12	66	51	6	46	2,0
12	10	66	47	5	35	2,0
Uniformización (8 h)		64	56	10	66	-
Acondicionamiento (8 h)		62	56	12	73	-
Enfriamiento (4 h)		44	35	9	55	-

CHi = contenido de humedad inicial de la madera; CHf = contenido de humedad final de la madera; TBS = temperatura de bulbo seco; TBH = temperatura de bulbo húmedo; CHE = contenido de humedad de equilibrio; HR = humedad relativa; GS = gradiente de secado.
Fuente: (Batista, Klitzke y Pereira da Rocha, 2015).

Al utilizar pautas más exigentes se espera reducir el tiempo de secado con una consiguiente disminución de costos. En el Anexo E de este manual se presenta un análisis económico de estos costos.

Por otra parte, también aumentan los defectos y consecuentemente disminuye el volumen útil de producto.

En la Tabla 17 se reportan resultados de pérdida de volumen útil por la presencia de defectos y por contracción, basados en resultado de ensayos de secado a escala laboratorio, de tablas de 1" de *E. grandis*, desde un CHi de 118 % hasta CHf de 10 %. En estas pruebas realizadas sobre una misma madera se ensayaron tres pautas con diferentes niveles de severidad; en las pautas más severas se obtuvo una mayor pérdida de volumen aprovechable, entre un rango de 5 a 20 % del volumen inicial de la tabla (datos del LATU inéditos).

TABLA 17. Pérdidas de volumen útil por contracción y por defectos en pruebas de secado en laboratorio de *E. grandis* en LATU

	1	2	3
Tiempo de secado (días)	29	11	11
Pérdida de volumen por contracción (%)	4,7	5,5	4,9
Pérdida de volumen por defectos (%)	12,4	31,3	17,0
Pérdida de volumen total (%)	17,1	36,8	21,9
Diferencia en la pérdida de volumen con respecto al programa más largo (%)		19,7	4,8

Fuente: Laboratorio Tecnológico del Uruguay (datos no publicados).

Al evaluar los costos por pérdida de calidad, deben también tenerse en cuenta los costos asociados a la remanufactura de las tablas con defectos, necesaria para obtener un producto comercializable.

MODIFICACIONES DE UNA PAUTA

Tomando un programa como punto de partida y con el debido cuidado previo en la preparación de la madera (encastillado, clasificación), el operador del secador deberá introducirle modificaciones en función del modelo de secador de que disponga, así como de las características de la madera: edad de la plantación, manejo forestal, diámetro de las trozas aserradas, dimensiones, etc.

Cada secador tiene características propias y consecuentemente establece las posibilidades de fijar y controlar las condiciones en el secador. Como se ha mencionado, las pautas de secado son un compromiso entre la necesidad de secar la madera lo más rápido posible y la necesidad de evitar condiciones de secado severas que causen defectos. Al momento de modificar la pauta de secado es conveniente tener en cuenta que a lo largo del secado podemos distinguir tres etapas (Denig, Wengert y Simpson, 2000), en función del CH de la madera a secar:

- Etapa 1: se seca desde la humedad inicial (verde) hasta perder un tercio de la humedad inicial.
- Etapa 2: continúa el secado hasta alcanzar un CH de aproximadamente 25 %.
- Etapa 3: se seca desde 25 % hasta la humedad final.

Al inicio del secado (etapa 1), se requieren temperaturas relativamente bajas para mantener la máxima resistencia en las fibras cercanas a la superficie y ayudar a prevenir grietas superficiales. La HR debe mantenerse alta al comienzo del secado para minimizar la formación de grietas superficiales causadas por tensiones que se desarrollan en la capa externa de la madera y también para disminuir la ocurrencia de colapso causada por la baja permeabilidad de esta especie. Incluso bajo estas condiciones iniciales de secado suaves, la madera pierde humedad rápidamente. Se monitorea la velocidad de secado para asegurar que no ocurra demasiado rápido.

Después de la pérdida del primer tercio del CH de la madera (basado en el CHi), la velocidad de secado comienza a disminuir (etapa 2). Ya no son necesarias condiciones tan suaves de secado, porque las fibras superficiales tienen poco o ningún riesgo de agrietarse en este punto. Es decir, las fibras de la madera se vuelven más fuertes a medida que disminuye el contenido de humedad (MC) y pueden soportar de manera segura mayores tensiones de secado. Por lo tanto, para mantener una velocidad de secado aceptable, la HR se reduce gradualmente, comenzando desde el punto de pérdida del primer tercio.

En la etapa 3 (la última), cuando la madera alcanza un contenido de humedad promedio de 30 %, en general, la temperatura puede aumentarse gradualmente de manera segura y la humedad puede disminuirse continuamente. Estos cambios iniciales de temperatura deben ser graduales, debido al peligro de grietas internas.

Regla general

Como regla general, cuando la humedad en el centro de la madera está por debajo del PSF (lo que significa que el CH promedio de la madera de 25 mm es de aproximadamente 20 %), generalmente es seguro hacer aumentos grandes (≤6 °C) en la temperatura de bulbo seco para mantener una rápida velocidad de secado. Para madera más gruesa, puede ser necesario reducir el CH promedio al 15 % para asegurarse de que en el centro de la tabla el CH esté en el entorno de 25 a 30 %.

El procedimiento operativo recomendado es usar el CH promedio de la mitad más húmeda de las muestras del horno como el factor que determina cuándo cambiar las condiciones de secado. Para la estimación de estos niveles críticos de CH se debe usar un número suficiente de muestras control del horno.

TABLA 18. Ajustes en el programa de secado y adaptación de procedimientos recomendados ante ocurrencia de defectos de secado

Defecto de secado	Ajuste en programa de secado o adaptación de procedimientos
Grietas	◗ Se recomienda reducir la TBS y aumentar la humedad de equilibrio en la fase inicial de secado (presecado).
Grietas y rajado en extremos	◗ Una forma de controlar este tipo de defecto es pintar los extremos con productos impermeabilizantes (resinas, tintas o parafinas apropiadas).
Grietas superficiales	◗ Surgen cuando el proceso es acelerado al inicio del secado (por encima de CH de 60 %), por el uso de humedades relativas bajas (inferiores a 50 %), las cuales causan diferencias marcadas entre el CH de la superficie y el centro de la pieza. Se recomienda usar altas humedades relativas al principio del secado.
	◗ Otras causas pueden ser el excesivo tiempo de espera antes de entrar al horno, el uso de separadores muy anchos, velocidad de aire muy alta, condiciones irregulares en la cámara.
Colapso	◗ Se recomienda la reducción de la TBS, en la primera y segunda fase del proceso de secado.
	◗ HR altas, por encima del PSF.
	◗ Niveles moderados de colapso pueden ser eliminados en la etapa de acondicionamiento; si el colapso persiste, esta etapa deberá ser extendida.

Defecto de secado	Ajuste en programa de secado o adaptación de procedimientos
Abarquillado	◗ Ajustar el programa para que sea menos exigente, con reducción de la TBS y aumento de la CHE.
	◗ Colocar peso sobre la pila de madera y asegurar el correcto apilado.
Curvatura de cara	◗ Se recomienda la reducción entre la distancia de los separadores y aplicación de carga homogénea sobre la pila de madera.
Endurecimiento	◗ Se recomienda velocidad lenta de secado al comienzo del proceso, dada por velocidad baja del aire y bajas temperaturas.
	◗ Para eliminar estas tensiones se debe prolongar el periodo de acondicionamiento.

PREDICCIÓN DEL TIEMPO DE SECADO

Cuando se adapta una pauta de secado a diferente espesor de la misma especie, puede aplicarse una simple regla desarrollada por N.C. Higgins, de la Michigan State University, basándose en extensa experiencia en secado de diferentes espesores (Higgins, s.d., citado en Denig, Wengert y Simpson, 2000).

El tiempo correspondiente al nuevo espesor se estima con base en la ecuación 2, aplicando los factores presentados en la Tabla 19.

ECUACIÓN 2. ESTIMACIÓN SIMPLE DE TIEMPO DE SECADO

$$\textit{Nuevo tiempo de secado} = \textit{Tiempo conocido de secado} \times \frac{\textit{Factor nuevo espesor}}{\textit{Factor espesor con tiempo conocido)}}$$

TABLA 19. Factores para la estimación de los tiempos de secado

Espesor (pulgadas)	Espesor (mm)	Factor
0,75	19,05	0,24
1	25,40	0,4
1,25	31,75	0,55
1,5	38,10	0,7
2	50,80	1
2,5	63,50	1,35
3	76,20	1,75
3,5	88,90	2,25
4	101,60	2,85

De acuerdo con lo observado en algunas plantas industriales visitadas por los autores, los tiempos así obtenidos son una buena estimación como punto de partida que deberá ajustarse con la propia experiencia.

3.6. Medición y control

3.6.1. Control del proceso

CONTROLES RECOMENDADOS ANTES DE COMENZAR A SECAR

Para asegurar el proceso de secado es recomendable realizar controles previos a cada operación, tanto en las instalaciones manejadas manualmente como en las instalaciones automatizadas. El riesgo de defectos en el secado y un tiempo excesivo de secado se puede reducir si se realizan verificaciones previas al inicio. Estas verificaciones y procedimientos varían según el tipo de horno, pero todos tienen como objetivo asegurar que el equipo se opere adecuadamente.

Se sugiere preparar una lista de control de todos los aspectos a verificar.

Algunos de los controles recomendados antes de comenzar a secar son:

- Controlar y revisar de la cámara de secado y sus accesorios, boquillas de aspersión, que deben estar limpias antes de iniciar el ciclo de secado, así como los cables de sensores e instrumentos.
- Verificar el correcto funcionamiento de los sensores de humedad de la madera.
- Revisar en los medidores de temperatura la exactitud y la concordancia entre todos los que se encuentren instalados.
- Verificar en los psicrómetros que exista correcto flujo de agua y que estén limpios.
- Controlar el funcionamiento correcto de todas las válvulas que alimentan los radiadores y vaporizadores.

- Una vez que hay vapor en la instalación, operar las trampas de vapor para eliminar el agua acumulada en operaciones anteriores.
- Controlar el correcto estado y funcionamiento de los motores, ventiladores y deflectores.
- Revisar el correcto funcionamiento de las ventilas y de los cables que las manejan.
- Verificar el cierre hermético de las puertas.
- Revisar el funcionamiento de la caldera y la disponibilidad de combustible.

CONTROL DEL PROCESO DE SECADO

La TBS y la HR del horno son parámetros fundamentales, ya que determinan el CHE y a su vez generan condiciones que pueden ser críticas para el desarrollo de defectos. Por consiguiente, tanto la TBS como la HR deben medirse.

CONTROL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Es necesario hacer un monitoreo del CH de la madera y de las características del aire en la cámara de secado (temperatura, humedad y velocidad) durante todo el proceso.

Estos valores deben supervisarse y controlarse, de forma de mantenerlos dentro de los límites requeridos por el programa seleccionado. Esto es primordial para evitar apartamientos de las condiciones que pueden redundar en un secado muy rápido que resulta en pérdidas de calidad de la madera, o un secado muy lento que lleva a mayor gasto energético y menor eficiencia de proceso.

Para medir las condiciones del aire se utilizan termómetros de bulbo húmedo y seco o sensores electrónicos que se leen en medidores externos o se registran en gráficos o computadores de control.

El secado convencional es conducido a través de un controlador que puede ser operado de forma manual, semiautomática o automática.

La información colectada por los sensores es la que determina el cambio de etapa o el fin del proceso cuando la carga ha alcanzado la humedad deseada.

Para las operaciones manuales o semiautomáticas se utilizan testigos para controlar la humedad de la madera por métodos gravimétricos y se comprueban

diariamente. Este método es poco práctico a nivel operativo y suele ser usado como método de verificación o en las primeras corridas de secado de las cámaras. Alternativamente, se posicionan medidores de humedad por resistencia y se conectan a un punto común de control y registro. El contenido de humedad de cada posición se lee con un medidor digital.

Las ventilas, las válvulas de aerosol y las fuentes de calor se controlan manualmente o mediante relés desde un puesto de control para alcanzar las condiciones deseadas de la cámara. Por lo general, el caudal de aire no se mide, salvo en las pruebas de puesta en servicio o calibración. Los controladores pueden tener la posibilidad de cambiar de modo manual a semiautomático y así cambiar las condiciones en la cámara si se detecta un comportamiento no deseado.

Para las operaciones automatizadas se utilizan sensores de temperatura y humedad para medir las condiciones del aire, y sondas de medición de humedad por resistencia en la madera para controlar su CH. Estos sensores y sondas están conectados a sistemas de control automatizados, a menudo compuestos por un controlador lógico programable (PLC) y un computador. Estos sistemas realizan una serie de tareas, entre estas: leer y registrar los datos de los sensores y sondas; mostrar la información actual en una interfaz de usuario; comparar las lecturas con límites previamente definidos; y accionar equipos y actuadores para controlar las condiciones del horno. Todo ello puede realizarse de forma automática o mediante la intervención de un operario. Las capacidades de estos sistemas informatizados varían considerablemente en función de la capacidad y versatilidad del controlador lógico programable (PLC) y la sofisticación del software empleado. Algunos controlan las funciones separadas como sistemas individuales con poca o ninguna optimización del proceso. Otros controlan el horno y el comportamiento de secado de la madera de forma integrada. Pueden comparar las opciones disponibles y modificar varios aspectos del funcionamiento del horno para mejorar las condiciones del proceso.

El número necesario de sensores y sondas y la calidad de los sistemas de control variarán en función del tamaño de la carga, el tamaño y la fiabilidad del horno y el mercado previsto para la madera que se está secando. Mientras más sensores para la medición de la humedad tenga la cámara, se obtendrá mayor y mejor información sobre el comportamiento de la humedad dentro de esta. Normalmente, el proveedor del horno recomienda el número mínimo de sensores.

Cualquier secadero debe disponer de instrumentos y controles suficientes para: determinar con seguridad la temperatura y la humedad en cualquier momento; modificar estas condiciones de acuerdo con el programa requerido; indicar si los ventiladores están funcionando e invirtiéndose; y proporcionar una indicación razonable del contenido de humedad de la madera. Para las instalaciones nuevas, los requisitos mínimos de control son un PLC y un computador de control y registro.

Como parte del monitoreo, durante la fase de secado se puede ingresar a la cámara para hacer una inspección visual de la madera, identificar defectos y controlar que la

aspersión de agua sea la adecuada, así como realizar una inspección del paso del aire entre las pilas. El monitoreo durante el proceso de secado permite definir acciones correctivas para el logro de los resultados propuestos.

El secado final no debe concluir hasta que el monitoreo indique que el CH de la carga está dentro de las tolerancias requeridas.

CONTROL DE VELOCIDAD DEL AIRE

La velocidad del aire dentro de la cámara es también crítica. Normalmente, las cámaras no cuentan con sensores de este tipo, sino que se debe medir en forma manual con un anemómetro. Las mediciones se deben realizar con la cámara cargada antes y durante el secado en diferentes lugares, a lo largo, ancho y alto de esta en la entrada del aire a la estiba (Pedras Saavedra, 2004). Luego de invertir la dirección del viento, se deben repetir las mediciones en el otro lado. De esta forma, se verifica que no haya lugares *muertos* o con velocidades que excedan las especificaciones. Con base en estas medidas, se puede corregir la ubicación de los bafles o la regulación de los ventiladores (a través de los variadores de la frecuencia de giro) que normalmente se ajustan a un porcentaje de la velocidad máxima.

Los tipos de anemómetro que se utilizan con mayor frecuencia son los de turbina, de eje horizontal y de hilo caliente (Pezo, 2007).

Los anemómetros de eje horizontal están compuestos por una hélice que se acciona con el pasaje de flujo de aire, y suelen trabajar en rangos de velocidad de entre 0,2 y 20 m/s (Pezo, 2007).

Los anemómetros de hilo caliente consisten en un elemento conductor hecho de un metal inerte soldado a dos electrodos. Cuando el conductor se pone en contacto con la corriente de aire, se calienta mediante una resistencia eléctrica, lo que permite medir la velocidad del fluido. Son instrumentos muy precisos que permiten medir velocidades muy localizadas y que varían rápidamente.

CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Para determinar el contenido de humedad de la madera, durante el secado y en el procesamiento se utilizan:

Medidores de humedad (xilohigrómetros)

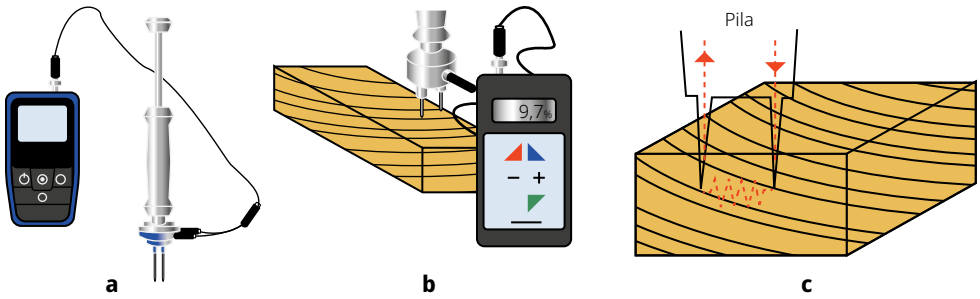
Son instrumentos portátiles que permiten medir el contenido de humedad *in situ* o almacenar la información. Proveen una medida instantánea del CH en forma indirecta, sin necesidad de destruir la pieza. Existen dos tipos de xilohigrómetros, los que miden por resistividad y los de capacitancia.

Los xilohigrómetros eléctricos miden la resistencia eléctrica de la madera, a través de la cual estiman el valor de CH (James, 1988). Utilizan electrodos con forma de pins o pinchos que penetran en la madera. Tienen diferentes longitudes que se seleccionan según el espesor de la madera (Figura 27).

Existen pinchos con o sin aislación. Los pinchos aislados son preferibles, ya que la medición que indica el equipo corresponde al CH del área adyacente a la punta del pincho. Se puede considerar que cuando la madera ha sido secada por debajo del PSF, las fibras que se encuentran a 1/5 de profundidad respecto a la superficie de la tabla tienen el mismo CH promedio que la sección.

Cuando se realiza la medición es importante que los pinchos se claven en la madera en dirección perpendicular al sentido del grano.

FIGURA 27. Xilohigrómetro eléctrico: a) Xilohigrómetro de pinchos. b) Ejemplo de medición. c) Esquema que muestra el principio de medida

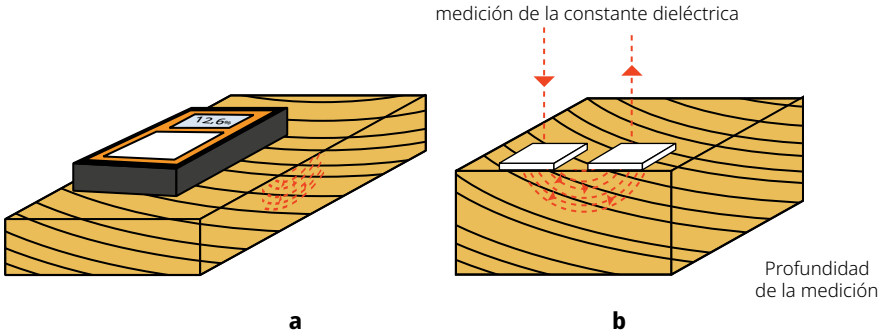


Fuente: Elaboración propia.

Según William (1970), los xilohigrómetros son efectivos en el rango entre 7 y 30 % aproximadamente, y las mediciones más precisas se encuentran en los valores menores de este rango. Por encima del PSF las mediciones deben ser consideradas relativas.

Los xilohigrómetros de contacto realizan también una medida indirecta, pero a través de la medida de la capacitancia dieléctrica de la madera (Figura 28). Si bien estos equipos solo pueden utilizarse sobre superficies lisas que garanticen un perfecto contacto con la madera, tienen como ventaja que no producen ningún daño en la pieza.

FIGURA 28. Xilohigrómetro de capacitancia. a) Ejemplo de medición de equipo sobre una tabla. b) Esquema que muestra el principio de medida



Fuente: Elaboración propia.

El tipo de xilohigrómetro que se utilice dependerá de la superficie y espesor de la pieza que se quiera medir.

Estas mediciones, al igual que las propiedades eléctricas y dieléctricas de la madera, están afectadas por la temperatura, la especie, la densidad de la madera, ya que las diferentes especies de madera contienen diferentes propiedades eléctricas. Se recomiendan, por lo tanto, equipos que permitan corregir las mediciones por estas variables.

Existen diversos factores que pueden afectar la precisión del equipo: la distribución de humedad dentro de la pieza, la superficie de contacto, tratamientos químicos u otros tratamientos superficiales que pueda tener la madera, condiciones del ambiente, entre otras.

Se debe tener en cuenta que, si se realizan mediciones sobre una madera con algún tipo de tratamiento, los *preservantes orgánicos* pueden tener un efecto despreciable sobre la medición, pero esta se puede ver significativamente afectada por los *preservantes inorgánicos*.

El número de mediciones a realizar depende del uso final de las piezas; es recomendable medir entre 5 y 10 % del lote. Es importante que la muestra sea representativa de distintas posiciones en el lote.

Los xilohigrómetros deben ser verificados contra el método de referencia de secado en estufa.

Testigos con CH conocido

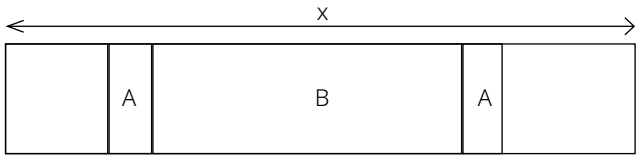
Este método permite seguir el proceso de secado mediante el registro del peso de muestras de control (testigos) colocadas en los castillos.

- Inicialmente se extrae una sección central de una tabla, que será el testigo. Se determina su contenido de humedad (Figura 29), como el promedio del CH determinado por secado en estufa de dos probetas (B) tomadas de su sección transversal en los extremos. El valor así determinado constituye el CHi del testigo.
- Se toma el peso de C y se calcula el peso anhidro a través del CH determinado.
- Se pintan las cabezas del testigo para impedir el secado en sentido longitudinal.
- Se vuelve a colocar el testigo en la pila de donde provenía (Figura 30).
- Luego se realiza el pesaje periódico del testigo y se determina la humedad.
- Esta pérdida deberá ser comparada con la tasa segura de secado para la especie que se está secando, y ajustar el proceso de acuerdo con los requerimientos.
- Se recomienda ubicar por lo menos una muestra en cada frente del castillo, a nivel que no coincida con las camadas inferiores (las más húmedas) ni superiores (las más secas).

Las determinaciones del CH por estufa se utilizan también para verificar los sensores de humedad de la cámara y los xilohigrómetros.

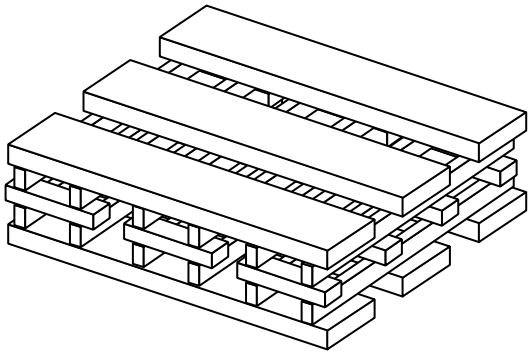
- Las muestras deben ser representativas en cuanto a cantidad de nudos y proporción de albura y duramen.
- El largo de las muestras puede ser de 50 a 70 cm, según la distancia entre separadores.
- Antes de colocar la muestra se deben cubrir los extremos con pintura epoxi.

FIGURA 29. Preparación de testigos de CH para seguimiento del secado



X: Longitud variable
A: Muestras para determinar CHi
B: Muestras testigo

FIGURA 30. Testigo de CH ubicado en el castillo para el seguimiento del proceso



3.6.2. Calidad del secado

La calidad del secado se evalúa esencialmente a través de la medición de CH resultante, la presencia de tensiones residuales de secado y otros defectos de secado con relación a las especificaciones del cliente.

En ausencia de documentos específicos acordados con el cliente que definan un método de estimación de la calidad del secado, se puede adoptar la norma española:

- UNE-EN 14298 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018)

Se aplica a lotes de madera aserrada seca (cepillada o sin cepillar), tanto a madera de coníferas como de frondosas de grosor menor o igual a 100 mm. Según esta norma, la calidad del secado se expresa mediante el contenido de humedad medio del lote y la variación entre las piezas del lote, en relación con el contenido

de humedad objetivo. Incluye la opción de expresar el grado de cementado de la madera (endurecimiento superficial).

En los documentos de clasificación visual de la madera aserrada o en las normas de producto, se especifican otras características de calidad del secado (grietas de secado, rajaduras, deformaciones y coloraciones anormales, entre otros) que no están incluidas en dicha norma.

Especificaciones

- Los requisitos para cada lote deben estar disponibles y comprendidos.
- Las tolerancias medidas del contenido de humedad y las lecturas medidas del material deben discutirse periódicamente de acuerdo con los estándares de calidad requeridos.

En el capítulo 4, ítem 3 se lista el equipamiento necesario para un laboratorio de control de calidad de secado.

CONTROL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL

Debe verificarse que el CH de la madera cumple con las normas pertinentes o la especificación del cliente.

En caso de no estar pactado un método de medida pueden aplicarse las siguientes normas:

- UNE-EN 13183-1 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2002)
- UNE-EN 13183-2 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2002)
- UNE-EN 13183-2 Err (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2003)
- UNE-EN 13183-2/AC:2004 Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica

TENSIONES RESIDUALES

Durante el secado, la madera puede verse afectada por tensiones residuales, que no siempre logran determinarse a simple vista, ya que se manifiestan en su interior. Es recomendable aplicar la prueba del tenedor para evaluar las condiciones del esfuerzo residual generado durante el secado.

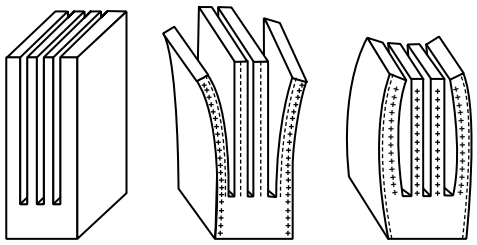
La prueba puede realizarse en cualquier momento del secado y luego de este, y el operador puede variar el programa de secado y comprobar la efectividad de los procesos de acondicionamiento mediante esta prueba.

Las muestras para la prueba del tenedor:

- deben tomarse en varios sectores de la pila de madera;
- deben ser cortadas a unos 60 cm del extremo de la tabla y tener por lo menos 2,5 cm de ancho;
- la sección cortada debe ser ranurada con dos o cuatro dientes según el espesor de la pieza, como se muestra en la Figura 31.

Dependiendo el tipo de tensión que presente, los dientes de la probeta se curvarán hacia afuera, hacia adentro o no se curvarán. Si las capas exteriores están más secas que las capas interiores, se curvarán hacia afuera; si las capas interiores están más secas que las capas exteriores, se curvarán hacia adentro (Figura 31). Ello sucede porque existe compresión en las capas exteriores y tensión en las interiores (caso típico de endurecimiento). Si el secado es correcto, sin tensiones, los dientes no se curvarán. La intensidad de la tensión se asocia a la magnitud de la deformación.

FIGURA 31. Muestras de prueba de tenedor
a) Secado correcto sin tensiones; b) Tracción exterior; c) Compresión exterior.



Fuente: Elaboración propia.

Un método estandarizado para la evaluación de estas tensiones se describe en la norma española experimental:

- UNE-CEN/TS 14464 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2010).

ACCIONES CORRECTIVAS

Luego de evaluada la calidad de producto se deben realizar las siguientes acciones:

- Cualquier material fuera de las tolerancias requeridas debe separarse para futuros reprocesamientos.

- La causa de que un material no alcance las tolerancias requeridas debe ser rastreada
- Analizar si es necesario definir acciones correctivas en el programa de secado.
- La causa de que un material no alcance las tolerancias requeridas debe ser rastreada.

3.7. Procesos posteriores al secado

3.7.1. Remanufactura

Luego del proceso de secado, la madera debe enfriarse dentro del secadero. Una vez transcurridos de tres a cinco días de finalizado el proceso de secado, puede ser utilizada en procesos de transformación secundaria según el diseño del producto final (Atencia, 2023).

Durante el procesamiento deben cuidarse las condiciones atmosféricas, de forma de no volver a humedecer la madera.

Un cepillado de las tablas puede eliminar defectos superficiales de poca entidad.

3.7.2. Almacenamiento

Según las condiciones de almacenamiento, la madera luego del secado es susceptible de ceder o de absorber humedad. En este contexto, la madera seca puede humidificarse debido a:

- exposición directa a la intemperie durante el almacenamiento o transporte;
- contacto directo con fuente de agua: lluvia, agua estancada, filtraciones de techos o canaletas;
- la humedad del ambiente, cuando el CHE es superior al CH de la madera; de igual forma, el CH de la madera podría bajar cuando el CHE sea inferior al CH de la madera y la madera esté expuesta un tiempo suficiente.

Para conservar la madera seca en buenas condiciones se sugiere:

- almacenar la madera dentro de locales con suelo seco e impermeable a la lluvia;

- de ser posible, almacenar paquetes de alto valor en ambientes con atmósfera controlada donde el CHE coincida con el CH de la madera seca;
- embalar los paquetes cuidadosamente;
- evitar embalar los paquetes de madera con láminas impermeables (plástico, etc.) cuando el CH sea superior a 14 % y existan grandes amplitudes de variación climática;
- evitar el almacenamiento cercano a puntos generadores de calor y humedad;
- evitar almacenar en zonas de alto riesgo de condensación;
- no disponer el material en zonas de riesgo de deterioro;
- secar la madera por debajo de la humedad deseada, previendo una subida de humedad por efecto de almacenamiento prolongado.

Capítulo 4

Aspectos complementarios

4.1. Gestión de la información

El propósito de la gestión de la información es sistematizar la recopilación, procesamiento, conservación y visualización de los datos de proceso, para su aplicación en el monitoreo, gestión y mejora del secado.

4.1.1. Instructivos y protocolos

Todos los procedimientos deberán estar protocolizados en documentos simples, de fácil lectura y comprensión; deberán ser claros y no dejar dudas de las acciones a tomar. Se sugiere el empleo de esquemas y figuras.

Los procedimientos deberán ser leídos y comprendidos por el personal y estar accesibles en todo momento.

Deberán ser actualizados de acuerdo con las modificaciones del proceso.

4.1.2. Registros

REGISTROS OPERATIVOS, LISTAS DE CONTROL

Los datos recabados durante el control de la materia prima del proceso y del producto deberán registrarse para ser evaluados en conjunto con los resultados del secado.

Los datos registrados del proceso, de la materia prima y del control de calidad deberán ser almacenados durante un tiempo prudencial, de forma de poder cotejar los resultados obtenidos en diferentes momentos y así evaluar el efecto de algunas variables como, por ejemplo, un cambio de materia prima.

Una buena práctica sugerida es la generación de listas de control para las operaciones y verificaciones a realizar en las diferentes etapas del proceso. Estas listas aseguran el cumplimiento de todos los puntos y facilitan el entrenamiento y la supervisión. A su vez, permiten acotar el análisis de causas cuando surgen problemas. A medida que los procesos se sistematizan, será posible reducir el número de estos registros y dejar operativos los que cubren los aspectos críticos del proceso.

MARCAS Y ETIQUETAS

Se recomienda identificar los paquetes de madera seca a través de un sello o etiqueta que identifique el producto y el proceso de secado realizado.

En caso de reclamos se dispondrá de todo el historial del proceso para ese lote, de forma de poder analizar las causas de los problemas.

Las etiquetas deben ser de un material e impresión o escritura resistente a la intemperie y estar firmemente fijadas al paquete.

En el caso de las marcas con pintura sobre la madera, también debe utilizarse una tinta resistente.

4.1.3. Trazabilidad y gestión del stock

Todos los registros y marcas permiten tener trazabilidad del proceso. Es posible, además, implementar un sistema de trazabilidad que permita manejar el stock de madera y su condición de humedad y clasificación, para lograr el uso óptimo de los recursos y capacidades del almacén. Se trata de la identificación de los productos para seguimiento e indagación en cada una de las etapas de la cadena de suministro.

La trazabilidad implica un conjunto de procesos que permiten conocer con precisión aspectos como la situación actual de la mercadería, el historial de su ubicación, su trayectoria, los tiempos de estancia en cada parte de la cadena y las demoras entre sitios.

La trazabilidad en la gestión de almacenes permite automatizar la entrada de datos de la mercadería en el sistema informático de la empresa, optimizar la preparación de pedidos, controlar con mayor precisión las expediciones, realizar un examen rápido del stock y tener una mayor flexibilidad en el servicio.

Esto permitiría, por ejemplo, una selección más eficiente de la madera a secar de acuerdo con el tiempo de presecado, mantener asociadas a cada paquete las condiciones de secado y el contenido de humedad obtenido, favoreciendo la mejora continua del proceso. En caso de reclamo de un cliente es posible verificar si el problema se condice con algún evento durante el secado. La trazabilidad permite estudiar las posibles causas de los problemas y adaptar los programas de secado a las materias primas.

Los sistemas de trazabilidad pueden ser tan sencillos como planillas y etiquetas o pueden involucrar tecnologías para el registro, acopio, lectura y análisis de los datos. Las identificaciones incluyen elementos tanto para los productos individuales como para los embalajes y bultos o *pallets*; todos ellos se ingresan e imprimen con software mayormente desarrollados a medida. Generalmente se utilizan identificaciones de tipo código de barras, código QR o RFID (*Radio Frequency Identification*)

La información puede enviarse a un software específico o bien puede ser incorporada, mediante el desarrollo de una aplicación, al software de gestión de la empresa. Así, se

pueden mantener alineados el control administrativo y el control operativo de los activos, además de tener un control de los procesos y movimientos de dichos activos. Esto permite disponer en una única base de datos que contiene toda la información de cada lote o pieza dentro de la red física, capturando información en tiempo real.

Esta herramienta faculta la optimización e incluso automatización de los procesos de identificación, brinda fiabilidad, eficiencia y rapidez, y evita posibles errores humanos que acabarían incrementando costos.

4.2. Salud y seguridad ocupacional

En todo proceso productivo se debe promocionar y mantener la salud y la seguridad en el trabajo mediante la prevención, procurando el más alto grado de bienestar físico y social de trabajadores.

El primer paso en la seguridad industrial es la identificación y evaluación de riesgos en el proceso. Ello debe ser conducido localmente con el apoyo de un profesional en salud y seguridad ocupacional e involucrar a los responsables y al personal con experiencia en las tareas.

Deben elaborarse procedimientos de trabajo seguro, identificando los riesgos y las correspondientes medidas de control.

Las medidas de control son acciones que deben tomar las personas sobre el ambiente donde se desarrolla la actividad. En el nivel de las personas, se consideran la capacitación, la conducta de trabajo seguro y el uso de *equipos de protección personal* (EPP). Deben identificarse los EPP que se requieren para cada tarea y protocolizar su utilización (Figura 32). En el nivel del ambiente, se considera la adecuación de este para controlar los riesgos.

Si bien la identificación y evaluación de riesgos y la determinación de medidas de prevención deben ser hechas localmente, existen medidas generales que deben ser adoptadas (Tabla 20).

FIGURA 32.
Equipo de protección personal



Fuente: Imagen generada por Grok, AI de xAI, noviembre de 2025

TABLA 20. Medidas generales de seguridad aplicables a una planta de secado convencional de madera de *E. grandis*

Medida de seguridad	Descripción
Formación y capacitación a todo el personal	Todo el personal debe estar capacitado para el cumplimiento de las funciones específicas y para el cuidado de su salud y del entorno. Se deberán registrar las instancias de capacitación inicial y de mantenimiento de la capacitación.
Habilitación reglamentaria para funciones específicas	Ej.: carné de foguista emitido por la Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua (URSEA) para operar calderas de vapor.
Uso de EPP adecuado a la terea	Se debe proveer y exigir el uso de EPP general y específico. General: Casco, calzado antideslizante y con puntera metálica, ropa que no se enganche en maquinaria, antiparras. Específica: Faja para levantar pesos, guantes para manipular la madera, guantes para manipular objetos calientes, máscaras para polvo.
Operación de maquinaria con idoneidad	Emplear maquinaria adecuada dimensionada y operada correctamente. Operadores con habilitación reglamentaria.
Señalización de áreas, riesgos	Plano del área, cartelería de seguridad según reglamentación, delimitación de fajas de tránsito peatonal.
No ingresar al horno funcionando con alta temperatura.	Nunca entrar cuando TBH supere 49 °C (a menos que se cuente con equipo protector que cubra cuerpo y cabeza entera) y si se sufre del corazón o vías respiratorias, el límite superior sería 44 °C (AITIM, 1968).
Maquinaria en buenas condiciones con sistemas de seguridad y protección operativos	Mantenimiento de máquinas y herramientas con atención a sistemas de seguridad en condiciones, protecciones, señalización de riesgo.
Orden y limpieza de áreas de trabajo	Definición y señalización de locales adecuados para materiales, residuos, productos químicos. Rutinas de limpieza diaria para remover obstáculos a la circulación (trozos de madera, flejes, tacos de apoyo, separadores rotos).
Rutinas de chequeo/ evaluaciones de riesgo	Establecer procedimiento (frecuencia y responsables) para chequeo de estructuras, áreas de trabajo, zonas de tránsito (peatonal o con maquinaria) y evaluaciones de riesgo ante cambios. Listas de chequeo específicas. Por ejemplo: caldera de vapor, cámara de secado, maquinaria autopropulsada.
Adecuación del área de trabajo a la intemperie	Drenaje de áreas de procesamiento y acopio de madera: piso compacto, pendiente para eliminar exceso de agua, protecciones para trabajo expuesto al sol o lluvia.
Diseño de áreas de acopio	Zonas de acopio con salida por al menos dos lugares.
Plan de protección contra incendios	Definir con técnico especialista.
Primeros auxilios	Definir con técnico especialista.

Es necesario el mantenimiento de planes de salud y seguridad ocupacional. Se requieren las siguientes acciones:

- Registros e investigación de incidentes, accidentes y enfermedades profesionales.
- Acondicionamiento periódico de ambientes y prácticas de trabajo.
- Formación y capacitación de personal a todo nivel.

4.3. Laboratorio de secado

Se recomienda contar con un mínimo laboratorio para análisis de muestras, evaluación de programas y calidad de secado, dotado con el siguiente equipamiento:

- balanza digital para pesar hasta 10 kg con precisión al gramo;
- horno eléctrico para el secado de la madera a 103 °C con circulación de aire forzada con ventilas para eliminar la humedad y control de temperatura con la precisión indicada por el método de medida.

Las especificaciones del equipamiento deberán cumplir con los requisitos de los estándares de calidad aplicados.

Para la ejecución de los controles de laboratorio se requiere equipamiento auxiliar de carpintería para la preparación de muestras:

- sierra de cinta (o caladora) para procesamiento de muestras y evaluación de tensiones de secado;
- sierra circular ingletadora o manual.

Anexos.
Estudios económicos

En estos anexos se presenta una metodología para realizar una evaluación preliminar del costo de secado, así como algunos ejemplos. Para dichos cálculos se realizaron suposiciones que deben ser consideradas para la interpretación de estos resultados. Las evaluaciones de factibilidad deberían involucrar datos que se ajusten al caso particular de análisis.

Anexo A. Energía para secar en horno convencional

El secado artificial de la madera tiene requisitos de energía térmica y eléctrica que se detallan.

Energía térmica

El secado de materiales en general, y en particular de la madera, es intensivo en energía, principalmente porque se necesita una gran cantidad de energía para evaporar el agua (de líquido a gas).

La energía térmica se emplea para:

- calentar la madera y el propio equipo de secado;
- para evaporar el agua líquida presente en la madera;
- y para compensar las pérdidas al ambiente, tanto por las paredes del equipo como por la emisión de aire húmedo y caliente a la atmósfera a través de las ventilas.

Dependiendo del tipo de equipo utilizado para secar la madera, el nivel de eficiencia térmica de la operación puede requerir de una vez y media a cuatro veces la energía realmente necesaria para evaporar el agua. Los distintos modelos

de secadores tienen diferentes niveles de eficiencia dependiendo de su diseño físico y los materiales de construcción, incluso cuando se operan de manera óptima. La eficiencia puede a su vez verse afectada por factores ambientales.

La energía para evaporar aumenta cuando se requiere retirar agua por debajo del punto de saturación de la fibra, con aumentos del 5 % al 15 % según la humedad final deseada. La energía asociada con la eliminación de esta agua durante el proceso de secado es ahora mayor que el calor latente de vaporización. Para niveles de humedad inferiores al 20 %, el calor de adsorción aumenta de manera exponencial a medida que el contenido de humedad disminuye del 20 % al 0 % (USDA, 1991).

Para obtener un metro cúbico de madera con una humedad del 10 % partiendo de tablas verdes, se requiere aproximadamente una tonelada y media de vapor de caldera, considerando una eficiencia del secador del 50 %. Esta estimación es fuertemente dependiente del diseño del secador industrial y de los programas de secado que se utilicen.

Para cubrir la demanda de energía térmica de los hornos de secado, la mayoría de las industrias tienen calderas donde se quema una mezcla de subproductos del proceso de aserrado (chips, aserrín, costaneros). La eficiencia de estos equipos generadores de energía difiere de acuerdo con la calidad de los subproductos. La composición de la mezcla de subproductos depende del rendimiento de la producción, del mercado local de los productos secundarios y del tipo de caldera.

Energía eléctrica

Para lograr un secado efectivo de la madera es necesario contar con el movimiento de aire suficiente a través de un paquete de madera con separadores. El flujo de aire (o velocidad) necesario dependerá de la velocidad de secado (ya sea a alta o baja temperatura), el ancho del paquete, el espesor de los separadores y si se seca madera de coníferas o latifoliadas. Especialmente en el secado de *E. grandis*, a medida que aumenta el espesor NO son necesarias/convenientes altas velocidades de aire como se esperaría para una transferencia efectiva de calor y eliminación del agua evaporada.

Para la circulación de aire, en la mayoría de los tipos de secadores se requiere energía eléctrica. Para un horno dado, **la demanda real de energía para circular el aire aumentará con la velocidad del aire, el ancho del paquete, la rugosidad de las tablas y al disminuir el espesor de los separadores.** Para un espesor de separador y ancho de paquete dados, existe una velocidad máxima alcanzable que corresponde a la carga máxima de energía.

La energía eléctrica se convierte en energía térmica dentro del secador, de dos maneras. Si los motores están fuera del secador, solo el trabajo realizado en el movimiento del aire se convierte en calor debido a la fricción (del aire y de los cojinetes), menos el trabajo de mover el aire. El calor generado dentro del motor

se pierde en el entorno externo (aproximadamente el 10 % de la entrada de energía). Si los motores están dentro del compartimento del secador, entonces todo el consumo eléctrico que disipa el motor se transforma en calor.

El consumo de energía eléctrica, y consecuentemente su costo, puede reducirse si se puede controlar la velocidad del aire. Tres leyes de los ventiladores nos permiten entender mejor este fenómeno:

> - El flujo de aire total (volumen por unidad de tiempo) es directamente proporcional a la velocidad del ventilador en revoluciones por minuto (rpm).
> - La presión de descarga es proporcional al cuadrado de la velocidad.
> - La potencia consumida es proporcional a la velocidad elevada al cubo.

Por lo tanto, si la velocidad del ventilador se reduce en un 50 %, la velocidad del aire se reducirá en un 50 %; la carga de presión disminuirá en un 75 % y la potencia del eje en un 87,5 %. En pruebas de rendimiento real bajo condiciones controladas de ventiladores axiales y centrífugos de muchos diseños se ha demostrado que estas tres leyes de los ventiladores son correctas. Resulta clara la importancia de contar con control de velocidad de giro de los ventiladores.

La energía necesaria para el proceso de secado de madera en hornos convencionales puede ser distribuida en **cinco áreas principales**:

1. ***Calentamiento de la madera y del agua en la madera.*** Calentamiento inicial cuando se pone en marcha el secador y calentamiento durante el proceso cuando cambia la temperatura.
2. ***Evaporación del agua.*** La mitad de la energía utilizada para secar la madera se utiliza para evaporar el agua. Esta energía incluye tanto el calor necesario para evaporar el agua como el necesario para romper los enlaces higroscópicos entre el agua y las moléculas de la madera. Esta energía depende del CH inicial y final y la densidad de la madera.
   Una vez que el agua se ha evaporado, el vapor transporta la energía de evaporación. En un horno convencional, esta energía se pierde por los respiraderos. Sin embargo, si este vapor se puede condensar a un líquido, es posible recuperar la energía de la evaporación (deshumidificador).
3. ***Calentamiento del aire de ventilación entrante.*** En el horno o presecador convencional calentado por vapor, la humedad de la madera se elimina a través de respiraderos y aire fresco que ingresa al secador. Se requiere calor

para llevar este aire hasta la temperatura de funcionamiento del horno. La cantidad de energía necesaria para la ventilación depende de la diferencia de temperatura y humedad absoluta entre el interior y el exterior del horno. Las pérdidas por ventilación también se pueden minimizar manteniendo el secador libre de fugas. En un horno de vapor, los respiraderos y el rociador no deben operar juntos. Es decir, durante cualquier hora determinada, el horno debe ventilar o inyectar vapor rociado, no ambos. Si oscila entre ventilación y el rociado sobre una hora, será necesario corregir los problemas del equipo para conservar energía. Es común que secadores convencionales en la industria maderera utilicen calentadores auxiliares eléctricos para proporcionar aire caliente y seco.

4. ***Pérdida de calor (conducción) a través de paredes, puertas, suelo y techo.*** El calor fluye de las zonas cálidas a las frías. La cantidad de calor depende de las propiedades aislantes del material y de la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior. Para reducir pérdidas por conducción, el aislamiento en las paredes debe mantenerse lo más seco posible.
5. ***Entrada de energía eléctrica a ventiladores de circulación de aire y otros elementos del horno.*** El nivel de demanda energética de los hornos de secado depende de la técnica de secado, de los productos de madera y de la producción. El consumo energético en este tipo de horno es relativamente elevado, por lo que la energía para calefacción casi siempre se utiliza desde la caldera.

Anexo B. Análisis general de costos e hipótesis de cálculo

El costo de un secado queda determinado por la selección y adquisición del equipamiento a utilizar y el compromiso entre el tiempo de secado a utilizar y la calidad final del producto.

Costos operativos

En términos generales, los costos operativos a considerar en un proceso de secado de madera serían los siguientes:

- **Costos asociados a la mano de obra:** salarios, aportes patronales, leyes sociales, alimentación, ropa, elementos de seguridad.
- **Costos asociados a la energía térmica:** para el funcionamiento de un horno convencional de secado se requiere un generador de vapor. Lo más habitual en un aserradero es instalar un generador de vapor alimentado por biomasa, la propia biomasa generada en el proceso de aserrado (costaneros, recortes, corteza, viruta, aserrín).
- **Costo de energía eléctrica:** el principal consumo de esta energía se centra en los ventiladores del horno. También se utiliza energía eléctrica para todos los instrumentos de operación y automatismo.
- **Empalillado o encastillado:** este proceso requiere de horas de operación. En caso de que el aserradero cuente con algún sistema de calificación visual, se realiza a medida que se va armando el fardo. Los separadores y tacos se van deformando al sufrir sucesivos procesos de secado, por lo que deben ser sustituidos periódicamente, o luego de determinada cantidad de horas en horno. Este recambio de separadores insume un costo, ya que para fabricarlos es aconsejable utilizar madera seca y cepillada en las cuatro caras. Lo mismo sucede con los tacos.
- **Costos de mantenimiento**.
- **Servicios tercerizados:** transporte, asesoramiento externo, servicios de calibración.

Costos de inversión

- Obra civil.
- Equipamiento: horno de secado, generador de vapor, planta de tratamiento de agua.
- Montacargas.
- Inversión inicial de separadores.

Escala

Para el estudio económico financiero se analizó el caso de una empresa proveedora de servicios de secado, tomando en cuenta dos escalas. Para el criterio de las escalas se utilizó la clasificación de los aserraderos según el informe de Böthig et al. (2021), que agrupa los aserraderos en tres clases, según el consumo volumétrico anual de madera rolliza verde:

- Clase 1: mayor a 50.000 m^3
- Clase 2: 4.001 a 50.000 m^3
- Clase 3: 1.000 a 4.000 m^3

La mayor escala seleccionada para este estudio correspondió a un aserradero con capacidad para procesar un volumen según el máximo del rango correspondiente a la clase 2 (consumo 48.000 m^3) mientras que la menor escala correspondió al máximo de la clase 3, con un consumo de 4.000 m^3. No se consideró el caso de los aserraderos de clase 1, asumiendo que ya secan su madera artificialmente.

A los efectos de estimar la demanda del servicio de secado por los aserraderos del ejemplo, se supuso un rendimiento de aserrado del 50 % y un proceso de clasificación de la madera aserrada con un rendimiento del 60 % en tablas destinadas a secar artificialmente.

Para la empresa de mayor escala se propuso una disposición de 6 hornos de 200 m^3, mientras que para la menor escala una disposición de 2 hornos de 50 m^3. Estas capacidades de secado fueron definidas suponiendo 12 ciclos de secado al año partiendo de madera verde. La disposición de hornos se planteó con base en la versatilidad que le puede generar a un aserradero tener más de un horno de secado y según las dimensiones ofrecidas por los fabricantes.

Consideraciones

Se consideraron costos operativos (de energía eléctrica, mano de obra, etc.) y costos de inversión. No fueron considerados los costos de transporte de materia prima y se abarcaron solo los costos a puerta de la planta. El negocio planteado se enfocó en la venta de servicio de secado sin tomar en cuenta la ubicación.

Para ambos casos, se consideró la compra de equipamiento nuevo con un período de amortización de 20 años, con inversión de fondos propios, por lo que no se tuvieron en cuenta costos por intereses.

El tipo de cambio utilizado para el análisis fue de $39,07 por dólar, correspondiente a la cotización oficial del BCU del 5 de junio de 2024.

Características del proceso de secado considerado para los cálculos

Para estimar el costo del proceso de secado se tomó en cuenta la pauta de secado sugerida para madera de 28 mm de espesor con un contenido de humedad

promedio de inicio de 107 % y una duración de 28 días (Tabla 21). El contenido de humedad final se consideró entre 11 y 12 %.

La estimación fue realizada para las dos dimensiones de horno planteadas: 50 m^3 y 200 m^3. Se consideraron fardos de 1,2 m de ancho por 1,2 m de altura, con un largo de tablas de 4 m.

TABLA 21. Pauta de secado sugerida

Etapa	Rango de humedad (%)		TBS (°C)	TBH (°C)	DS	CHE (%)	RPM	V (m/s)
1	107	65	31	29,5	1,5	18,4	68	1,496
2	65	56	34	32,5	1,5	18,7	68	1,496
3	56	50	37	35,2	1,8	18,8	68	1,496
4	50	40	42	37,8	4,2	13,6	68	1,496
5	40	35	45	42,1	2,9	17,0	68	1,496
6	35	31	48	44,6	3,4	15,6	68	1,496
Vaporizado (10 h)			50	50	0	26,5	68	1,496
7	31	24	50	45,8	4,2	8,5	91	2,002
8	24	20	50	44,0	6,0	7,9	91	2,002
9	20	18	52	44,2	7,8	7,3	91	2,002
10	18	16	56	45,4	10,6	6,3	91	2,002
11	16	12	60	46,0	14,0	6,3	91	2,002
12	12	11	60	39,3	20,7	6,3	91	2,002

DS = TS - TBH.

En la Tabla 22 se muestra un resumen de los tiempos de secado.

TABLA 22. Tiempos de secado estimados a modo de ejemplo para la pauta propuesta

Calentamiento	10 h
Secado	648 h
Acondicionado	10 h
Enfriado	4 h
Total	672 h

Anexo C. Caso 1. Industria de escala pequeña

En la Tabla 23 se muestra un detalle de los costos de producción, desglosados en costos directos e indirectos, calculados para una industria de pequeña escala de las características definidas en el Anexo B.

FIGURA 33. Estructura de costos directos e indirectos para una industria de pequeña escala, según características definidas en Anexo B

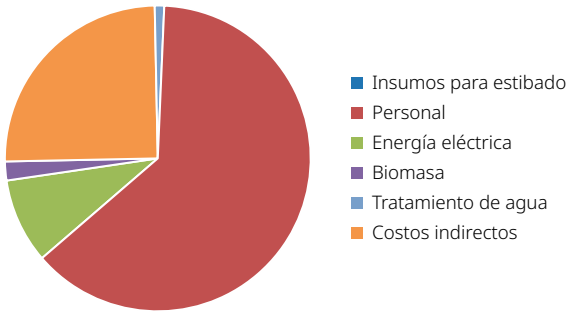


TABLA 23. Costos mensuales de producción para un secadero con capacidad de 100 m^3

Ventas netas totales	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Servicio de secado	100	m^3	135	13.510
Costos directos de producción				
Fleje	307,2	m	0,035	11
Separadores	0,055	m^3	770	43
Personal de planta (grupo 6.2)				
Peón práctico (1)	168,00	horas	4,60	774
Maquinista II / Foguista I (3)	672,00	horas	5,81	3.902
10 horas de supervisión semanales	42	horas/mes	11	467
Energía eléctrica, consumo de potencia activa	6535	kWh	0,12	752
Consumo de biomasa	13,9	t	12,00	167
Tratamiento de agua (consumo de sal para regeneración de resina)	20	kg	1,50	30
Costos indirectos de producción				
Cargas sociales del personal				803

Ventas netas totales	Cantidad	Unidad	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Energía eléctrica, potencia contratada	30	kW	115,11	115
Mantenimiento		meses		821
Comunicaciones	1	contrato	51	51
Seguros		contrato	205	205
Costos totales (USD)				8.140
Superávit (USD)				5.370

Costos directos de producción

Para el flejado de las estibas se consideró el uso de 19,2 m por estiba, utilizando como precio de referencia de fleje de 11 mm de espesor en rollo de 2000 m, USD 73. Para hornos de 50 m^3 se consideró un total de ocho fardos.

Para el consumo de separadores, se tomó en cuenta el valor reportado por Pezo (2007) de una reposición de 20,4 % luego de 15 ciclos de secado para el caso de separadores de *Eucalyptus globulus*. Se consideró una reposición del 20 % cada 12 ciclos de secado (reposición anual) con separadores de *Eucalyptus grandis*. El volumen de separadores para completar un horno de 50 m^3 se calculó en 1,66 m^3. Para el costeo de los separadores se consideró únicamente el valor de la madera ($ 78/m), no su manufactura.

Para el valor por hora de la mano de obra se tomó en cuenta el laudo vigente al 18 de enero de 2024 del grupo 6 «Industria de la madera, celulosa y papel», subgrupo 2 «Aserraderos con o sin remanufactura, plantas de tableros y/o paneles, plantas chipeadoras y plantas impregnadoras».

Para un aserradero con dos hornos de 50 m^3 se consideró la contratación de un peón práctico y tres foguistas I para cubrir los tres turnos mientras el generador de vapor esté en funcionamiento. En este caso, se consideró al peón práctico para los trabajos de preparación de estibas, estibado, flejado, desarmado de estibas y carga de biomasa en el generador de vapor. En el caso del foguista I, al ser un operador polivalente, se lo consideró apto para realizar tanto tareas de supervisión de los procesos de secado como de uso de montacargas para el movimiento de las estibas. Dadas las dimensiones del generador de vapor, el reglamento vigente de URSEA al respecto, permite que la persona que está a cargo de ese generador pueda atender otras tareas, siempre y cuando tenga a la vista y a su percepción los elementos de control del equipo. Los generadores de vapor pequeños (P) son aquellos con presión máxima de trabajo admisible (PMTA) igual o menor a 6,0 kgf/cm^2 (5,9 bar), no incluidos en la categoría E1.

Además, se sumó al equipo un supervisor con una dedicación horaria de 10 horas semanales. Si bien esta estructura de personal es una propuesta, puede variar en un amplio rango según los criterios utilizados por la empresa al momento de realizar la inversión.

Las definiciones de estos cargos según el grupo 6.2 son las siguientes:

- Peón práctico: trabajador que desempeña tareas como mover productos y materiales, descortezar, apilar y desapilar, clasificar primariamente maderas (por medidas, rajaduras, nudos y defectos notorios y cantos muertos), marcar, etiquetar y embolsar fardos, limpieza, tareas de apoyo en general en cualquier área o taller, serenos, porteros, etc. (valor nominal hora: $ 179,90).
- Maquinista 1/Operador 2 de generación de energía: operador polivalente cuya función es desempeñarse en forma efectiva y habitual en cualquiera de las máquinas del establecimiento (valor nominal hora: $ 226,84)
- Supervisor (valor mensual: $ 73.011).

Para el proceso de secado se planteó un banco de cinco ventiladores de 3 kW manteniendo una relación de 0,3 kW/m^3 de madera sólida.

En este caso, se consideró la tarifa general hora-estacional con un máximo de potencia contratada de 40 kW según el pliego tarifario de UTE vigente al 1 de mayo de 2024. Dado que el funcionamiento de los ventiladores es continuo, se tomó el valor ponderado según días de la semana y horarios (valle, llano y punta), obteniendo un valor de $ 3,98 por kWh, equivalente a 0,1026 USD/kWh.

También se sugirió un factor de carga y temperatura para los ventiladores de 0,85.

Para el proceso de secado se estimó el consumo de vapor a una temperatura de 150 °C correspondiente a una presión de vapor de 3,75 bar.

Se definió la capacidad del generador de vapor según la demanda de vapor de los hornos con una eficiencia del generador de un 80 %.

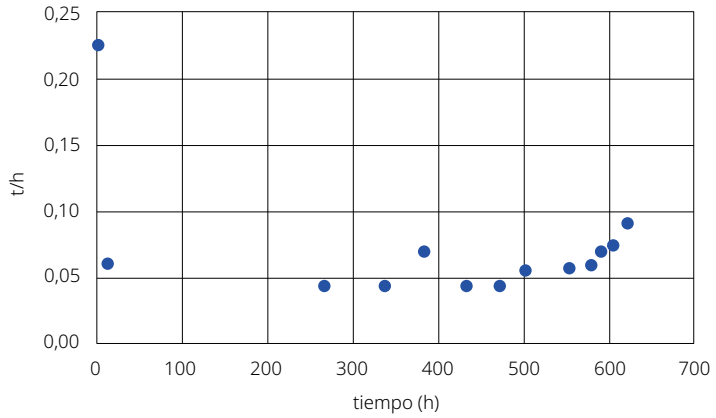
Para la etapa de calentamiento se tomó en cuenta la carga de madera y el agua que contiene, los separadores, tacos, contrapeso y una pérdida en pisos y paredes del 12 %. Para la etapa de secado se consideraron las condiciones del aire exterior a una TBS de 15 °C y TBH de 12 °C (HR: 70,3 %) para estimar las pérdidas de energía por renovación de aire. Además, se consideraron pérdidas de energía del 3 %.

La etapa de mayor consumo se presenta en el calentamiento, según la Figura 34, por lo que se utilizó como referencia para el dimensionamiento del generador de vapor.

En el caso de la escala más pequeña, con dos hornos de 50 m^3, se consideró que los procesos de secado se coordinan para que las etapas de calentamiento no coincidan. En este caso, el consumo máximo fue de 0,23 t/h de vapor y la suma de los consumos de un horno en etapa de calentamiento y un horno en etapa

de secado definió una capacidad mínima del generador de 0,32 t/h. Para cubrir pérdidas y otros eventuales consumos en planta se planteó una capacidad del generador de 0,35 t/h. Para este caso se consideró un generador humotubular vertical alimentado manualmente a rolos sin grilla dado su pequeño tamaño.

FIGURA 34. Consumo de vapor estimado para un horno de 50 m^3



Fuente: Elaboración propia.

Se consideró un 80 % de eficiencia del generador de vapor y se calculó, luego del cálculo de consumo de vapor total por proceso de secado, el consumo de biomasa para dicha generación. Se aplicó un valor de biomasa de USD 12/t (Böthig et al., 2021) y un poder calorífico inferior de 14 kJ/g.

Se asumió un abastecimiento con agua de pozo, por lo que para su tratamiento se consideró únicamente el costo de sal para la regeneración de la resina según el consumo sugerido por la empresa especialista en tratamiento de agua para generadores de vapor. Se tomó el precio de la bolsa de 20 kg de sal industrial a USD 15, datos consultados en plaza en 2024.

Costos indirectos de producción

Para los aportes patronales se tomó un 15,625 % del valor nominal total de la remuneración de los funcionarios. El porcentaje señalado surge de la suma de:

1. Aporte patronal jubilatorio del 7,5 %;
2. Aporte patronal al Fondo Nacional de Salud (FONASA) del 5 % (se asume que no se requiere pago de complemento de cuota mutual, es decir, los aportes básicos al FONASA cubren el monto de una cuota mutual);
3. Aporte patronal al Fondo de Reconversión Laboral (FRL) del 0,10 %;
4. Aporte al Fondo de Garantía de Créditos Laborales del 0,025 %; y,
5. Póliza de seguro de accidentes laborales del Banco de Seguros del Estado (BSE) se supone del 3 % (aunque esta alícuota depende del riesgo al que están expuestos los trabajadores al desarrollar sus actividades en la empresa, lo

que está condicionado por el tipo de herramientas o equipamiento utilizado, la peligrosidad de los materiales empleados en el proceso productivo y otros factores específicos de la actividad de cada empresa).

Los costos por potencia contratada se tomaron del pliego tarifario de UTE vigente a mayo del 2024. Para este caso, correspondió la tarifa general hora estacional con un cargo por potencia contratada de $ 140,1/kW y un cargo fijo mensual de $ 325,8. Dado que el proceso de secado es continuo, se consideró la misma potencia utilizada para los tres horarios.

Para el caso de mantenimiento general del equipamiento, se tomó como valor un 2 % de la inversión inicial.

Se consideró un contrato de $ 2.000 mensuales para el rubro de comunicaciones, ya que el sistema de automatismo permite un seguimiento de los procesos de forma remota.

Los gastos de seguro para toda la vida útil del proyecto (20 años) se consideraron en un 0,5 % anual del valor de la inversión en equipamiento.

Análisis de inversión

Para este modelo se tomó una tasa de descuento (Tabla 24) calculada a partir de la tasa libre de riesgo y el premio por riesgo del mercado en Uruguay y el factor beta sin apalancamiento (coeficiente de volatilidad) de compañías comparables. Para el caso de la tasa libre de riesgo se tomó en cuenta el rendimiento de los bonos del Tesoro de Estados Unidos a 20 años (United States. Department of the Treasury, s. d.). El premio por riesgo para el mercado de Uruguay y el factor beta de compañías comparables se tomaron de la base de datos de Aswath Damodaran, economista de la Universidad de Nueva York (Damodaran, 2024). Se tomó en cuenta el rubro de papel y productos forestales como valor comparable.

Debe notarse que, para el equipamiento seleccionado para este ejemplo, el 81 % de la inversión inicial corresponde a la cámara y el generador de vapor (Figura 35).

TABLA 24. Tasa de descuento para 100 m^3 de capacidad de secado

Tasa libre de riesgo (*Risk Free Rate*)	4,63 %
Premio por riesgo del mercado (*Market Risk Premium Uruguay*)	2,78 %
Beta de compañías comparables	1,51 %
Ke	8,8 %

Ke = tasa de descuento.

En la Tabla 25 se describe la inversión en equipamiento para esta escala y en la Tabla 26 se describe el flujo de fondos del proyecto de acuerdo con los gastos e ingresos considerados.

TABLA 25. Inversión en equipamiento para 100 m³ de capacidad de secado

Concepto	Inversión
2 hornos de secado de 50 m³	250.722
Costos de montaje, instalación eléctrica, mano de obra, comisionado (22 % del costo del equipamiento, valor sugerido por fabricante del horno)	55.159
Generador de vapor y montaje	150.000
Separadores y tacos	2.772
Planta de tratamiento de agua	2.200
Pozo 50 m	6.500
Montacargas	25.000
Total	492.353

FIGURA 35. Magnitud relativa de los costos de inversión para ejemplo de pequeña escala (100 m³)

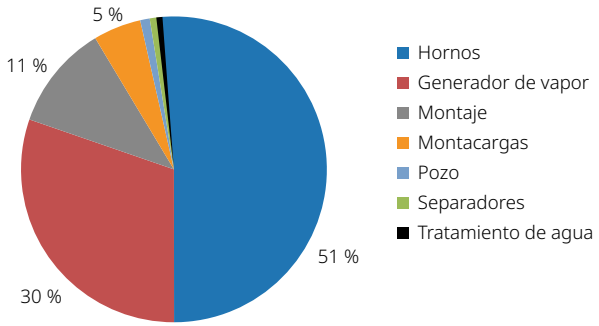


TABLA 26. Flujo de fondos para 100 m³ de capacidad de secado

Flujo de fondos del proyecto	Base (USD)	Montos anuales, años 1-20 (USD)
Ventas netas totales		162.120
Servicio de secado		162.120
Costos directos de producción		73.736
Fleje		129
Separadores		511

Flujo de fondos del proyecto	Base (USD)	Montos anuales, años 1-20 (USD)
Personal de planta (grupo 6.2)		
Peón práctico		9.283
Maquinista II / Foguista I		46.819
10 horas de supervisión semanales		5.606
Energía eléctrica, consumo de potencia activa		9.026
Consumo de biomasa		2.002
Tratamiento agua (consumo de sal para regeneración de resina)		360
Resultado bruto		88.384
Costos indirectos		23.946
Cargas sociales del personal		9.642
Energía eléctrica, potencia contratada		1.381
Mantenimiento		9.847
Comunicaciones		614
Seguros		2.462
Resultado operativo		64.437
Amortizaciones		24.618
Intereses		0
Resultado antes de impuestos		39.820
Impuesto a la renta*		9.955
Resultado neto		29.865
Amortizaciones		24.618
Inversión activo fijo	492.353	
Capital de trabajo**	10.740	
Flujo de fondos	-503.092	54.482

*Impuesto a la renta de 25 %.
**Para el capital de trabajo se consideraron dos meses.

Para un análisis financiero se planteó como condición que la tasa interna de retorno (TIR) fuera mayor o igual a la tasa de descuento. De esa forma, se logró proponer un precio mínimo de venta por el servicio de secado por metro cúbico de madera.

Para que el negocio del ejemplo sea rentable, se encontró un precio mínimo de venta de servicio de 135,1 USD/m3 (Tabla 27). El tiempo de repago simple de la inversión es de 9,2 años con un valor actual neto (VAN) próximo a cero por la condición mínima planteada.

TABLA 27. Análisis financiero para 100 m^3 de capacidad de secado

TIR (%)	8,8
VAN (USD)	548
Tasa de descuento (%)	8,8
Repago simple (años)	9,2
Precio mínimo sugerido (USD/m^3)	135,1

Es importante resaltar que la inversión inicial estimada fue para equipamiento nuevo con un tiempo de amortización propuesto de 20 años. Estos valores de inversión pueden cambiar significativamente según la decisión del inversionista de incorporar equipamiento usado.

Este análisis se realizó desde la perspectiva de una empresa que ofrece servicios de secado y no dispone de su propio suministro de biomasa.

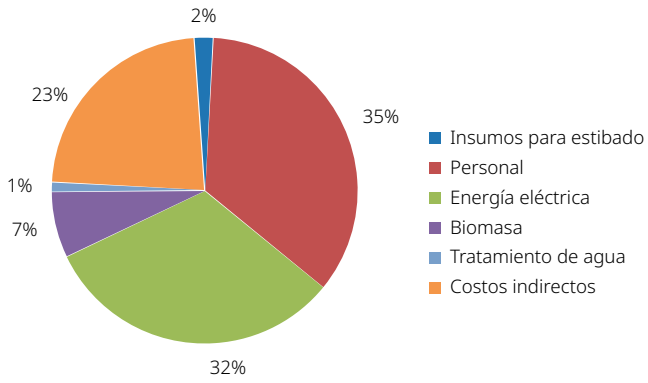
Anexo D. Caso 2. Industria de escala mediana

En la Tabla 28 se muestra un detalle de los costos de producción, desglosados en costos directos e indirectos, calculados para una industria de escala de las características definidas en el Anexo B.

TABLA 28. Costos mensuales de producción para un secadero con capacidad de 1.200 m^3

Ventas netas totales	**Cantidad**	**Unidad**	**Valor unitario (USD)**	**Total (USD)**
Servicio secado	1.200	m^3	43	52.008
Costos directos de producción				
Fleje	3.686,40	m	0,035	129
Separadores	0,664	m^3	770	511
Personal de planta (grupo 6.2)				
Peón práctico (2)	336	horas	4,60	1.547
Maquinista II / Foguista I (4)	1.120	horas	5,81	6.503
Supervisor (1)	168	tiempo/mes	11	1.869
Energía eléctrica, consumo potencia activa	78.421,2	kWh	0,12	9.026
Consumo de biomasa	164,76	t	12,00	1.977
Tratamiento de agua (consumo de sal para regeneración de resina)	250	kg	1,50	375
Costos indirectos de producción				
Cargas sociales del personal				1.550
Energía eléctrica, potencia contratada	30	kW	338,34	338
Mantenimiento				3.608
Comunicaciones	1	contrato	51	51
Seguros		contrato	902	902
Costos totales (USD)				28.387
Superávit (USD)				23.621

FIGURA 36. Estructura de costos directos e indirectos para ejemplo de escala mediana, capacidad de 1.200 m³



Costos directos de producción

Para el flejado de las estibas se consideró el uso de 19,2 m por estiba, utilizando como precio de referencia fleje de 11 mm de espesor en rollo de 2.000 m, USD 72,94. Para hornos de 200 m³ se consideró un total de 32 fardos. Para el consumo de separadores, se tomó en cuenta el valor reportado por Pezo (2007) de una reposición de 20,4 % luego de 15 ciclos de secado para el caso de separadores de *Eucalyptus globulus*. Se consideró una reposición del 20 % cada 12 ciclos de secado (reposición anual) con separadores de *Eucalyptus grandis*. El volumen de separadores para completar un horno de 200 m³ se calculó en 6,64 m³. Para el costeo de los separadores se consideró únicamente el valor de la madera, aproximadamente $ 78/m, no su manufactura.

Para el aserradero con seis hornos de 200 m³ se consideró la contratación de dos peones prácticos, cuatro maquinistas 1/operadores 2 de generación de energía y un supervisor a tiempo completo. Las tareas de los dos peones prácticos incluyeron el armado de estibas, empalillado, flejado y desarmado de estibas. Se consideró un maquinista para el uso de montacargas para transporte de cargas pesadas y tres foguistas para cubrir los tres turnos de producción. El supervisor se consideró para el seguimiento de los procesos de secado y supervisión del personal. Si bien esta estructura de personal es una propuesta, puede variar en un amplio rango según los criterios utilizados por la empresa al momento de realizar la inversión.

Para el valor por hora de la mano de obra se tomó en cuenta el laudo vigente al 18 de enero de 2024 del grupo 6 «Industria de la madera, celulosa y papel», subgrupo 2 «Aserraderos con o sin remanufactura, plantas de tableros y/o paneles, plantas chipeadoras y plantas impregnadoras».

Para el aserradero con seis hornos de 200 m³ se consideró la contratación de dos peones prácticos, cuatro maquinistas 1/operadores 2 de generación de energía y un supervisor a tiempo completo. Las tareas de los dos peones prácticos

incluyeron el armado de estibas, empalillado, flejado y desarmado de estibas. Se consideró un maquinista para el uso de montacargas para transporte de cargas pesadas y tres foguistas para cubrir los tres turnos de producción. El supervisor se consideró para el seguimiento de los procesos de secado y supervisión del personal. Si bien esta estructura de personal es una propuesta, puede variar en un amplio rango según los criterios utilizados por la empresa al momento de realizar la inversión.

Las definiciones de estos cargos según el grupo 6.2 son las siguientes:

- Peón práctico: trabajador que desempeña tareas tales como mover productos y materiales, descortezar, apilar y desapilar, clasificar primariamente maderas (por medidas, rajaduras, nudos y defectos notorios, y cantos muertos), marcar, etiquetar y embolsar fardos, limpieza, tareas de apoyo en general en cualquier área o taller, serenos, porteros, etc. (valor nominal hora: $ 179,90).
- Maquinista 1/operador 2 de generación de energía: operador polivalente cuya función es desempeñarse en forma efectiva y habitual en cualquiera de las máquinas del establecimiento (valor nominal hora: $ 226,84).
- Supervisor (valor mensual: $ 73.011).

Para el proceso de secado se planteó un banco de 20 ventiladores de 3 kW manteniendo una relación de 0,3 kW/m^3 de madera sólida.

Para este caso, se consideró la tarifa de gran consumidor 1, correspondiente a un consumo mayor o igual a 200 kW y una tensión entre 230 y 400 V. De la misma manera que en el caso anterior, se tomó el valor ponderado según los horarios, de $ 4,37 por kWh, equivalente a USD 0,1126 por kWh.

También se sugirió un factor de carga y temperatura para los ventiladores de 0,85. Para el proceso de secado se estimó el consumo de vapor a una temperatura de 150ºC correspondiente a una presión de vapor de 3,75 bar.

Se definió la capacidad del generador de vapor según la demanda de vapor de los hornos con una eficiencia del generador de un 80 %.

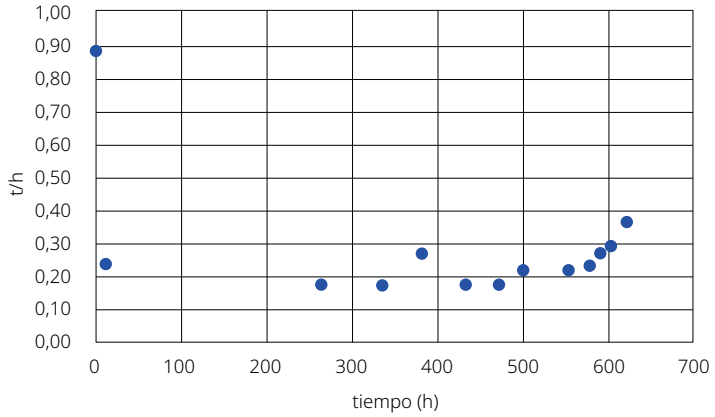
Para la etapa de calentamiento se tomó en cuenta la carga de madera y el agua que contiene, los separadores, tacos, contrapeso y una pérdida en pisos y paredes del 12 %. Para la etapa de secado se consideraron las condiciones del aire exterior a una TBS de 15ºC y TBH de 12ºC (HR: 70,3 %) para estimar las pérdidas de energía por renovación de aire. Además, se consideraron pérdidas de energía del 3 %.

La etapa de mayor consumo se presenta en el calentamiento según la Figura 37, por lo que se utilizó como referencia para el dimensionamiento del generador de vapor.

En el caso de la escala más grande, con 6 hornos de 200 m^3, se consideró que los procesos de secado se coordinan para que no coincidan etapas de calentamiento

en los hornos. En este caso el consumo máximo por horno en la etapa de calentamiento fue de 0,9 t/h de vapor y la suma de los 5 hornos restantes en las etapas de secado con un valor ponderado promedio de 0,22 t/h definieron una capacidad mínima del generador de 2 t/h. Para cubrir pérdidas y otros eventuales consumos en planta se planteó una capacidad del generador de 2,2 t/h. Para este caso se tomó en cuenta un generador de vapor con grilla reciprocante alimentado a biomasa granular (mezcla de chips, costaneros, aserrín).

FIGURA 37. Consumo de vapor estimado para un horno de 200 m^3



Para el cálculo del consumo de biomasa se consideró un 80% de eficiencia del generador de vapor. Se aplicó un valor de biomasa de USD 12 por tonelada (Böthig et al., 2021) y un poder calorífico inferior de 14 kJ/g.

Costos indirectos de producción

Para los aportes patronales se tomó un 15,625 % del valor nominal total de la remuneración de los funcionarios El porcentaje señalado surge de la suma de:

1. Aporte patronal jubilatorio del 7,5 %;
2. Aporte patronal al Fondo Nacional de Salud (FONASA) del 5 % (se asume que no se requiere pago de complemento de cuota mutual, es decir, los aportes básicos al FONASA cubren el monto de una cuota mutual);
3. Aporte patronal al Fondo de Reconversión Laboral (FRL) del 0,10 %;
4. Aporte al Fondo de Garantía de Créditos Laborales del 0,025 %;
5. Póliza de seguro de accidentes laborales del Banco de Seguros del Estado (BSE) se supone del 3 % (aunque esta alícuota depende del riesgo al que están expuestos los trabajadores al desarrollar sus actividades en la empresa, lo que está condicionado por el tipo de herramientas o equipamiento utilizado, la peligrosidad de los materiales empleados en el proceso productivo y otros factores específicos a la actividad de cada empresa).

Los costos por potencia contratada se tomaron según el pliego tarifario vigente a mayo del 2024. Para este caso correspondió la tarifa de gran consumidor 1 con

$ 43, $ 262 y $ 614 por horario de valle, llano y punta respectivamente por kW de potencia máxima medida y un cargo fijo mensual de $ 5.515. Dado que el proceso de secado es continuo se consideró la misma potencia utilizada para los tres horarios.

Para el caso de mantenimiento general del equipamiento, se tomó como valor un 2 % de la inversión inicial.

Se consideró un contrato de $ 2.000 mensuales para el rubro de comunicaciones, ya que el sistema de automatismo permite un seguimiento de los procesos de forma remota.

Los gastos de seguro para toda la vida útil del proyecto (20 años) se consideraron en un 0,5 % anual del valor de la inversión en equipamiento.

Análisis de inversión

Para este modelo se tomó una tasa de descuento (Tabla 29) calculada a partir de la tasa libre de riesgo y el premio por riesgo del mercado en Uruguay y el factor beta sin apalancamiento (coeficiente de volatilidad) de compañías comparables. Para el caso de la tasa libre de riesgo se tomó en cuenta el rendimiento de los bonos del Tesoro de Estados Unidos a 20 años (United States. Department of the Treasury, s. d.). El premio por riesgo para el mercado de Uruguay y el factor beta de compañías comparables se tomó de la base de datos de Aswath Damodaran, economista de la Universidad de Nueva York (Damodaran, 2024). Se tomó en cuenta el rubro de papel y productos forestales como valor comparable.

TABLA 29. Tasa de descuento para 1200 m^3 de capacidad de secado

Tasa Libre de Riesgo (Risk Free Rate)	4,63 %
Premio por Riesgo del Mercado (Market Risk Premium Uruguay)	2,78 %
Beta de Compañías Comparables	1,51 %
Ke	8,8 %

Ke = costo del capital.

En la Tabla 30 la inversión en equipamiento para esta escala, y en la Tabla 31, el flujo de fondos del proyecto.

TABLA 30. Inversión en equipamiento para 1.200 m^3 de capacidad de secado

Concepto	Inversión (USD)
6 hornos de secado de 200 m^3	1.289.000

Costos de montaje, instalación eléctrica, mano de obra, comisionado (22 % del costo del equipamiento, valor sugerido por fabricante del horno)	283.580
Generador de vapor y montaje	500.000
Separadores y tacos	33.310
Planta de tratamiento de agua	27.500
Pozo 50 m	6.500
Montacargas	25.000
Total	2.164.890

Al aumentar la escala aumenta la inversión, pero los costos más relevantes siguen siendo la compra de los hornos y del generador de vapor (Figura 38).

FIGURA 38. Importancia relativa de los componentes de la inversión inicial para el ejemplo de mediana escala, 1.200 m³ de capacidad de secado

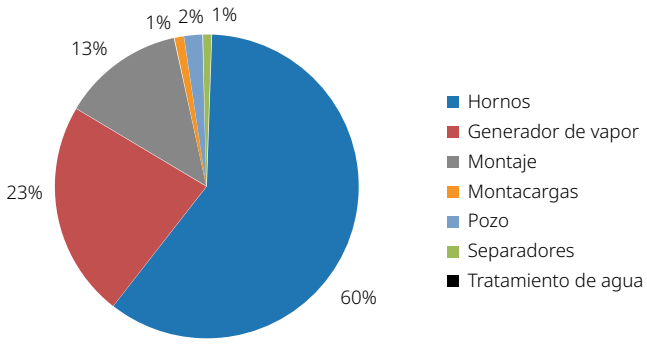


TABLA 31. Flujo de fondos para 1.200 m³ de capacidad de secado

Flujo de fondos del proyecto	Base (USD)	Montos anuales, años 1-20 (USD)
Ventas netas totales		624.096
Servicio de secado		624.096
Costos directos de producción		263.247
Fleje		1.548
Separadores		6.135
Personal de planta (grupo 6.2)		
Peón práctico (2)		18.566
Maquinista II / Foguista I (5)		78.032

Flujo de fondos del proyecto	Base (USD)	Montos anuales, años 1-20 (USD)
Supervisor		22.425
Energía eléctrica, consumo de potencia activa		108.315
Consumo de biomasa		23.725
Tratamiento de agua (consumo de sal para regeneración de resina)		4.500
Resultado bruto		360.849
Costos indirectos de producción		77.394
Cargas sociales personal		18.597
Energía eléctrica - potencia contratada		4.060
Mantenimiento		43.298
Comunicaciones		614
Seguros		10.824
Resultado operativo		283.455
Amortizaciones		108.245
Intereses		0
Resultado antes de impuestos		175.210
Impuesto a renta*		43.803
Resultado neto		131.407
Amortizaciones		108.245
Inversión activo fijo	2.164.890	
Capital de trabajo**	47.242	
Flujo de fondos	-2.212.133	239.652

*Impuesto a la renta de 25 %.
**Para el capital de trabajo se consideraron dos meses.

Para el análisis financiero se planteó como condición que la tasa interna de retorno (TIR) fuera mayor o igual a la tasa de descuento. De esa forma, se logró proponer un precio mínimo de venta por el servicio de secado por metro cúbico de madera.

TABLA 31. Análisis financiero para 1.200 m^3 de capacidad de secado

TIR (%)	8,8
VAN (USD)	2.440
Tasa de descuento (%)	8,8
Repago simple (años)	9,2
Precio mínimo sugerido (USD/m^3)	43,3

En este caso se plantea un precio mínimo de venta de servicio de USD 43,3 por m^3 (Tabla 31) para que el negocio sea rentable. El tiempo de repago simple de la inversión es de 9,2 años con un valor actual neto (VAN) próximo a cero por la condición mínima planteada.

Es importante resaltar que la inversión inicial estimada fue para equipamiento nuevo con un tiempo de amortización propuesto de 20 años. Estos valores de inversión pueden cambiar significativamente según la decisión del inversionista en incorporar equipamiento usado.

Debe resaltarse que este análisis fue hecho desde el punto de vista de una empresa que vende el servicio de secado y no tiene suministro propio de biomasa.

Anexo E. Comparativo económico entre pauta conservadora y pautas más enérgicas

Tomando como referencia los análisis económicos según los Anexos C y D, se compararon los costos operativos y de amortización entre pautas más enérgicas y la pauta de secado más lenta.

Caso 1. Industria de escala pequeña

En la Tabla 32 se muestran tres escenarios distintos, tomando como el caso más conservador aquella pauta con 30 días de duración para secar tablas de *E. grandis* de 28 mm de espesor. Según se desprendió del estudio realizado en el Anexo C, el precio mínimo de venta de servicio de secado por m^3 para que la tasa interna de retorno y la tasa de descuento se igualen es de USD 135. Repitiendo el cálculo para el mismo espesor con un tiempo de secado de 22 días, el precio mínimo de venta fue de USD 100, mientras que para el caso de secado de tablas de 50 mm de espesor con 42 días de secado fue de USD 189.

TABLA 32. Escenarios considerados para la comparación para 100 m^3 de capacidad de secado y el precio mínimo que viabiliza la inversión

Espesor (mm)	28	28	50
Tiempo de secado (días)	30	22	42
Precio mínimo de venta (USD/m^3)	135	100	189

Para una capacidad de secado de 100 m^3, se mantuvo el mismo nivel de inversión en los tres casos analizados (Tabla 25). La inversión en el generador de vapor y su instalación podría variar ligeramente, ya que la potencia requerida durante el proceso de secado puede fluctuar según los tiempos. Sin embargo, para simplificar el estudio, se asumió que este valor no cambiaba.

En la Tabla 33 se muestran los flujos de fondo para los tres escenarios, tomando como precio de venta de referencia el valor mínimo para el secado de tablas de 28 mm en 30 días. Los costos directos de producción varían levemente. En el caso del uso de flejes y separadores, los valores varían por contar con más o menos ciclos de secado según el caso. Lo mismo sucede con el consumo de biomasa y la energía eléctrica. De todas formas, en el valor global de costos directos, el impacto es menor al 2 %.

Los costos indirectos se mantienen incambiados.

Las amortizaciones varían en relación con el flujo de fondos según el caso. Para el caso base de 28 mm de espesor y 30 días de secado, la amortización representa

un 45 % del flujo de fondos. Para el mismo espesor, pero con un secado de 22 días, la amortización pasa a representar un 25 % del flujo de fondos, siendo un escenario mucho más favorable para el inversionista. En cuanto al secado de tablas de 50 mm de espesor en 42 días, el escenario pasa a ser totalmente contrario, ya que la amortización pasa a representar un 136 % del flujo de fondos.

TABLA 33. Flujo de fondos para 100 m^3 de capacidad de secado según pauta de secado. Precio de venta USD 135/m^3

Flujo de fondos del proyecto	**Año 1-20 (USD)**		
	Espesor 28 mm Secado 30 días	**Espesor 28 mm Secado 22 días**	**Espesor 50 mm Secado 42 días**
Ventas netas totales	162.120	220.909	115.714
Servicio secado	162.120	220.909	115.714
Costos directos de producción	73.736	74.788	73.779
Fleje	129	176	92
Separadores	511	697	244
Personal de planta (Grupo 6.2)			
Peón práctico	9.283	9.283	9.283
Maquinista II / Foguista I	46.819	46.819	46.819
10 horas de supervisión semanales	5.606	5.606	5.606
Energía eléctrica, consumo de potencia activa	9.026	9.270	9.963
Consumo de biomasa	2.002	2.576	1.411
Tratamiento de agua (consumo de sal para regeneración de resina)	360	360	360
Resultado bruto	88.384	146.121	41.935
Costos indirectos	23.946	23.946	23.946
Cargas sociales del personal	9.642	9.642	9.642
Energía eléctrica, potencia contratada	1.381	1.381	1.381
Mantenimiento	9.847	9.847	9.847
Comunicaciones	614	614	614
Seguros	2.462	2.462	2.462
Resultado operativo	64.437	122.175	17.989
Amortizaciones	24.618	24.618	24.618

Flujo de fondos del proyecto	Año 1-20 (USD)		
	Espesor 28 mm Secado 30 días	Espesor 28 mm Secado 22 días	Espesor 50 mm Secado 42 días
Intereses	0	0	0
Resultado antes de impuestos	39.820	97.557	-6.629
Impuesto a renta	9.955	24.389	-
Resultado neto	29.865	73.168	-6.629
Amortizaciones	24.618	24.618	24.618
Flujo de fondos	54.482	97.786	17.989

Para el caso del secado en 30 días para un espesor de 28 mm se planteó que la tasa interna de retorno iguale a la tasa de descuento. En ese caso, según fue planteado en el Anexo C, el período de repago fue de 9,2 años. Para el caso de realizar **un secado de las mismas tablas en 22 días a un mismo precio de venta, el escenario sería ampliamente favorable con una TIR de 18,4 %** y un período de repago de 5,2 años (Tabla 34).

En el caso de mantener el mismo precio para secado de tablas de 50 mm de espesor, el proyecto no sería rentable. El precio de venta final por m^3 de la tabla debería ser mayor al aumentar el espesor, vinculado a un precio mayor por el servicio de secado, según fue planteado en la Tabla 32.

En este análisis económico no se consideró una disminución en el rendimiento de la madera seca por aumento de defectos con relación al caso de un secado más lento (30 días).

TABLA 34. Tasa interna de retorno y período de repago para distintos escenarios con 100 m^3 de capacidad instalada basados en un mismo precio de venta del servicio de secado

	Espesor: 28 mm Secado 30 días	Espesor: 28 mm Secado 22 días	Espesor: 50 mm Secado 42 días
Tasa interna de retorno (%)	8,8	18,4	-2,9
Período de repago (años)	9,2	5,2	27,5

EFECTO DE LA MERMA EN EL RENDIMIENTO DE SECADO

En la Tabla 35 se presentan los valores de tasa interna de retorno y período de repago para distintos supuestos de rendimiento para el caso de capacidad

instalada de 100 m³, dejando fijo el precio de venta mínimo. Al no disponer de datos experimentales sobre rendimiento a esta escala, se propusieron dos **valores de rendimiento para el secado en 22 días, de 90 % y 80 %.** Se compararon estos dos escenarios con el secado más conservador, suponiendo que el ingreso por la venta del servicio es de un 90 % y un 80 % respectivamente. En ambos casos, **se sigue manteniendo una situación favorable para las condiciones de pauta de secado más enérgica.** De todas formas, este análisis no contempla el costo de oportunidad de la venta de madera seca del cliente que solicita el servicio de secado, ya que podría estar dispuesto a pagar un precio mayor del servicio por un mayor rendimiento.

TABLA 35. Tasa interna de retorno y período de repago con precio de referencia según precio mínimo de venta con secado a 30 días y 28 mm de espesor, para distintos rendimientos de secado con 100 m³ de capacidad instalada

	Secado 30 días Rendimiento 100 %	Secado 22 días Rendimiento 90 %	Secado 22 días Rendimiento 80 %
Tasa interna de retorno (%)	8,8	15,0	11,3
Período de repago (años)	9,2	6,3	7,8

Caso 2. Industria de escala mediana

Tomando en cuenta el mismo nivel de inversión planteado en el Anexo D en un caso hipotético de capacidad instalada de 1.200 m³ (Tabla 29), se analizan en la Tabla 37 los mismos escenarios planteados para el caso 1.

Se encuentra que, **al bajar el tiempo de secado a 22 días, el mínimo precio que viabiliza la inversión baja a USD 32, mientras que para espesores de 50 mm con tiempo de secado de 42 días el precio mínimo de venta del servicio es de USD 61.**

TABLA 36. Escenarios comparados para 1.200 m³ de capacidad de secado y el precio mínimo que viabiliza la inversión

Espesor (mm)	28	28	50
Tiempo de secado (días)	30	22	42
Precio mínimo de venta (USD/m³)	43	32	61

Se muestran los distintos flujos de fondo para los distintos escenarios y las tasas internas de retorno (Tabla 38) según las distintas condiciones de espesor y tiempos de secado (Tabla 39).

TABLA 37. Flujo de fondos para 1.200 m³ de capacidad de secado según pauta de secado. Precio de venta USD 43/m³

Flujo de fondos del proyecto	**Años 1-20 (USD)**		
	Espesor: 28 mm Secado 30 días	**Espesor: 28 mm Secado 22 días**	**Espesor: 50 mm Secado 42 días**
Ventas netas totales	624.096	851.040	445.783
Servicio de secado	624.096	851.040	445.783
Costos directos de producción	263.247	276.100	264.007
Fleje	1.548	2.111	1.106
Separadores	6.135	8.366	2.917
Personal de planta (Grupo 6.2)			
Peón práctico (2)	18.566	18.566	18.566
Maquinista II / Foguista I (5)	78.032	78.032	78.032
Supervisor	22.425	22.425	22.425
Energía eléctrica, consumo de potencia activa	108.315	111.243	119.558
Consumo de biomasa	23.725	30.857	16.904
Tratamiento de agua (consumo de sal para regeneración de resina)	4.500	4.500	4.500
Resultado bruto	360.849	574.940	181.776
Costos indirectos de producción	77.394	77.394	77.394
Cargas sociales del personal	18.597	18.597	18.597
Energía eléctrica, potencia contratada	4.060	4.060	4.060
Mantenimiento	43.298	43.298	43.298
Comunicaciones	614	614	614
Seguros	10.824	10.824	10.824
Resultado operativo	283.455	497.546	104.382
Amortizaciones	108.245	108.245	108.245
Intereses	0	0	0
Resultado antes de impuestos	175.210	389.301	-3.863

Flujo de fondos del proyecto	Años 1-20 (USD)		
	Espesor: 28 mm Secado 30 días	Espesor: 28 mm Secado 22 días	Espesor: 50 mm Secado 42 días
Impuesto a renta	43.803	97.325	FALSO
Resultado neto	131.407	291.976	-3.863
Amortizaciones	108.245	108.245	108.245
Flujo de fondos	239.652	400.221	104.382

Si el precio de venta del servicio de secado se mantuviera en USD 43, al disminuir el tiempo del proceso a 22 días, aumenta la TIR y el tiempo de repago disminuye a 5,6 años.

En cambio, para el secado tablas de 50 mm en 42 días la TIR se vuelve negativa.

TABLA 38. Tasa interna de retorno y período de repago para distintos escenarios con 1.200 m^3 de capacidad instalada para un precio de venta de USD 43/m^3

	Espesor: 28 mm Secado 30 días	Espesor: 28 mm Secado 22 días	Espesor: 50 mm Secado 42 días
Tasa interna de retorno (%)	8,8	17,7	-0,4
Período de repago (años)	9,2	5,6	20,9

EFECTO DE LA MERMA EN EL RENDIMIENTO DE SECADO

De la misma forma que en el análisis para el caso de pequeña escala, en la Tabla 39 se muestran las tasas internas de retorno y períodos de repago, fijando el precio de venta del servicio de secado según precio mínimo de venta para la condición de 30 días de secado y 28 mm de espesor, y variando los rendimientos de secado para los casos en que se redujo el tiempo de secado con pautas de 22 días.

TABLA 39. Tasa interna de retorno y período de repago con precio de referencia según precio mínimo de venta con secado a 30 días y 28 mm de espesor, para distintos rendimientos de secado con 1.200 m^3 de capacidad instalada

	Secado 30 días Rendimiento 100 %	**Secado 22 días Rendimiento 90 %**	**Secado 22 días Rendimiento 80 %**
Tasa interna de retorno (%)	8,8	14,0	10,7
Período de repago (años)	9,2	6,6	8,1

Los resultados obtenidos para la escala grande son análogos a los obtenidos para la escala pequeña.

Al secar tablas de 28 mm en 22 días con una disminución del 10 % del rendimiento, el proyecto mejora su rentabilidad con una TIR de 14,0 % y un período de repago de 6,6 años.

Con un 20 % de reducción del rendimiento, continúa siendo más rentable y se obtiene una TIR de 10,7 % y 8,1 años de repago.

Referencias

AITIM (1968) "Normas de seguridad en el secado artifical de la Madera", AITIM, (32), pp. [1]. Disponible en https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_312_16238.pdf

Algevasa Logistics, 2018. *Trazabilidad al servicio de la logística* [En línea]. Barcelona: Algevasa Logistics. [Consulta: 22 de marzo de 2024]. Disponible en: https://www.algevasa.com/trazabilidad-al-servicio-de-la-logistica/

Alves Ramos, Letícia Maria; de Figueiredo Latorraca, João Vicente; Scaramussa Pastro, Milena; Teixeira de Souza, Milene; Garcia, Rosilei A. y Monteiro de Carvalho, Alexandre, 2011. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto [En línea]. En: *Piracicaba: Scientia Forestalis*, 39(92), pp. 411-418. [Consulta: febrero 2024]. Disponible en: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr92/cap03.pdf

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2002. *UNE-EN 13183-1: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.* Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2002. *UNE-EN 13183-2: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.* Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2003. *UNE-EN 13183-2 Erratum: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica*. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2004. UNE-EN 13183-2/AC:2004: Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica. Madrid. AENOR

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018. UNE-EN 14298: Madera aserrada. Estimación de la calidad del secado. Madrid: AENOR.

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2010. *EX. UNE-CEN/TS 14464: Madera aserrada. Método de medición del cementado*. Madrid: AENOR.

Atencia, M. E., 2023. *Calidad de secado*. [s.l.]: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concordia.

Batista, D. C.; Klitzke, R. J. y Pereira da Rocha, M., 2015. Qualidade da secagem convencional conjunta da madeira de clones de três espécies de Eucalyptus sp. En: *Ciência Florestal*, 25(3), pp. 711-719.

Board of the Cartagena Agreement, 1989. *Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Junta del Acuerdo de Cartagena*. Lima: Junta del Acuerdo de Cartagena.

Böthig, Silvia; Arrejuría, Stephany; Bonfiglio, Fernando; Cagno, Matías; Delgado, Yamila; Martínez, Santiago; Rey Bentos, Fabiana; Cabot, Pierre y Martínez, Diego, 2021. *Proyecto de valorización de subproductos de la industria de transformación mecánica de la madera* [En línea]. Montevideo: Latitud. [Consulta: abril 2024]. Disponible en: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=32725

Buchner, C.; Cabrera, J. e Ipinza, R., 2014. Identificación de las limitantes de Eucalyptus nitens para madera sólida. En: Ipinza, Roberto; Barros, Santiago; Gutiérrez, Braulio y Borralho, Nuno, eds. *Mejoramiento genético de Eucaliptos en Chile*. Santiago: INFOR – FIA. pp. 363-375.

Catterick, J., 1998. Stepts to efficient kiln drying and cost cutting. En: Toennisson, G. W. A. R., ed. *Lumber drying sourcebook. 40 years of experience*. Madison: Forest Products Society. pp. 372.

CITEmadera - Centro de Innovación Tecnológica de la Madera. (2009). Guía de contenidos: Técnicas de secado de la madera. Serie 1: Competencias básicas para la producción industrial de muebles de madera (1ª ed.). Ministerio de la Producción.

CITEmadera - Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera. (2017). Manual para operadores de secadores convencionales para madera. Ministerio de la Producción.

CITEmadera - Centro de Innovación Tecnológica de la Madera (2020) Guía de contenidos. Serie 2: Competencias básicas para la producción industrial de madera. Buenas prácticas para el secado de madera en hornos convencionales.

Coronel, E. O., 1994. *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. Tomo 1. Santiago del Estero: El Liberal.

Correa Espinal, A. A.; Gómez Montoya, R. A. y Cano Arenas, J. A., 2010. Gestión de almacenes y tecnologías de la información y comunicación (TIC) [En línea]. En: *Estudios Gerenciales*, 26(117), pp. 145-171. [Consulta: 12 de abril de 2024]. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21218551008

Computer Support Group, Inc. (CSG) y CSGNetwork.Com, 2024. *Wood equilibrium moisture content table and calculator* [En línea]. [s.l.]: CSGNetwork.Com [Consulta: marzo 2024]. Disponible en: http://www.csgnetwork.com/emctablecalc.html

Damodaran, A., 2024. *Betas by Sector (US)* [En línea]. [s.l.]: [s.n.]. [Consulta: mayo 2024]. Disponible en: https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html

Denig, J.; Wengert, E. M. y Simpson, W. T., 2000. *Drying hardwood lumber*. Madison: United States Department of Agriculture.

Dias Soares, B. C., Tarcisio Lima, J., & Moreira da Silva, J. R., 2016. Analysing the drying behavior of juvenile and mature Eucalyptus saligna wood in drastic drying test for optimal drying schedule. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, *18*(4), 543-554. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000047

Doldán, J., 2001. *Distribución del grano entrecruzado en el fuste de Eucalyptus spp. y su relación con fines decorativos*. Montevideo: LATU.

Doldán, J., y Böthig, S. 2002. *Propiedades físicas fundamentales en maderas de especies de prioridad forestal*. Montevideo: LATU.

Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 2003a. *Australian hardwood drying best practice manual. Part 1.* Melbourne: Forest and Wood Products Research and Development Corp.

Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 2003b. *Australian hardwood drying best practice manual Part 2*. Melbourne: Forest and Wood Products Research and Development Corp.

Franco, J., 2023. Presentación oral. En: IICA. *Evento cierre del proyecto: Documentos base para la estandarización de edificaciones y construcciones en madera (FONPLATA OCT/NR-URU-56/22).* Montevideo: Comisión Honoraria de la Madera e IICA.

Gjerdrum, P., 2000. *Cost efficient timber drying.* Sopron: s.n. pp. 11-13.

Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto (GT2), 2004. *Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis H. del norte de Uruguay* [En línea]. Montevideo: LATU. [Consulta: marzo 2024. Disponible en: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=3873

Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto (GT2), 2005. *Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis Maiden del norte de Uruguay* [En línea]. Montevideo: LATU. [Consulta: febrero 2024]. Disponible en: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=3871

Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto (GT2), 2006. *Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis Maiden del Centro del Uruguay*. Montevideo: LATU. [Consulta: febrero 2024]. Disponible en: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=3878

GS1, s. d. *RFID* [En línea]. Princeton: GS1. [Consulta: junio 2024]. Disponible en: https://www.gs1.org/standards/epc-rfid

Herramientas de Ingeniería, s. d. *Diagrama psicrométrico* [En línea]. [s.l.]: Herramientas de Ingeniería. [Consulta: marzo 2024]. Disponible en: https://www.herramientasingenieria.com/onlinecalc/spa/psicrometricos/psicrometricos.html

Higgins, s. d. A rule of thumb method for estimating drying time. Citado En: Denig, J.; Wengert, E. y Simpson, W., 2000. *Drying hardwood lumber* [En línea]. Madison: USDA. pp. 90. [Consulta: mayo 2024]. Disponible en: https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fplgtr118.pdf

Ingeniería Química Reviews, 2020. ¿Qué son las cartas psicrométricas? Disponible en: https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/09/cartas-psicrometricas.html

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018. *UNIT 1262: Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (Eucalyptus grandis).* Montevideo: UNIT.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2007. *UNIT 223-2: Contenido de humedad de la madera. Parte 2: Estimación por el método de resistencia eléctrica*. Montevideo: UNIT.

James, W. L., 1988. *Electric moisture meters for Wood*. [En línea]. Madison: USDA. [Consulta: mayo 2024]. Disponible en: https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fplgtr06.pdf

Jankowsky, I. P. y V. dos Santos, G. R., 2005. Drying behavior and permeability of Eucalyptus grandis lumber. En: *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7(1), pp. 17-21.

Jankowsky, I. P.; Vasconcelos do Santos, G. R. y Ariel, D. A., 2003. Secagem da madeira serrada de eucalipto [En línea]. En: *Circular Técnica IPEF*, 199. [Consulta: abril 2024]. Disponible en: https://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr199.pdf

Laguna, Hugo, 2023. Evolución reciente y perspectivas del comercio exterior de productos forestales de Uruguay [En línea]. En: *Uruguay. MGAP. OPYPA. Anuario 2023: análisis sectorial y cadenas productivas,* Montevideo: MGAP. [Consulta: junio 2024]. Disponible en: https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2023/cp/11/cp11web/CP11Evolucionreciente.pdf

LATU y JICA, 2002. *Avances en la caracterización de maderas uruguayas* [En línea]. Montevideo: LATU y JICA. [Consulta: marzo 2024]. Disponible en: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=3610

Mahild Drying Technologies, 2022. Secador continuo [En línea]. Nürtingen: Mahild. [Consulta: enero 2025]. Disponible en: https://www.mahild.com/images/mahild/Sincol-UCK.jpeg#joomlaImage://local-images/mahild/Sincol-UCK.jpeg?width=1079&height=720

Martínez Rojas, I. y Vignote Peña, S., 2005. *Tecnología de la madera*. Madrid: Editoral Mundi-Prensa.

National Hardwool Lumber Association (NHLA), 2023. *Reglas para la medición e inspección de maderas duras y Ciprés. Plus NHLA Sales Code & Inspection Regulations*. Memphis: NHLA.

Pedras Saavedra, F., 2004. Secado de la madera: recomendaciones prácticas [En línea]. En: *Revista CIS-Madera*, pp. 47-57. [Consulta: febrero 2024]. Disponible en: https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual/pluginfile.php/40135/mod_folder/content/0/Extra/Secado_Madeira.pdf?forcedownload=1

Pedras Saavedra, F. y Touzas Vázquez, M., 2005. Una propuesta industrial de secado de madera de eucalipto blanco (Eucalyptus globulus) de Galicia [En línea]. En: *Revista CIS-Madera*, pp. 28-36.

[Consulta: febrero 2024]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/289460836_Una_propuesta_Industrial_de_Secado_de_Madera_de_Eucalipto_blanco_Eucalyptus_globulus_de_Galicia

Pérez del Castillo, Álvaro y Ono, Andrés, 2003. *Diferentes etapas del proceso de secado*. Montevideo: LATU. (Nota Técnica; 1)

Perré, P., 2007. *Fundamentals of wood drying* [En línea]. Nancy: A.R.BO.LOR. [Consulta: marzo 2024]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Patrick-Perre/publication/340941153_Fundamentals_of_wood_drying/links/5ea6de9b299bf11256129e26/Fundamentals-of-wood-drying.pdf

Pezo, J., 2005. *Boletín Técnico*, n.º 1. Nurtigen: Mahild.

Pezo, J., 2007. *Secado de maderas*. Nurtigen: Mahild.

Pezo, J., 2024. *Secado de madera en cámaras de alta tecnología*. [s.l.]: [s.n.].

República Oriental del Uruguay y UPM, 2017. Contrato ROU-UPM [En línea]. Montevideo: Presidencia de la República, UPM. [Consulta: 12 de marzo de 2024]. Disponible en: https://medios.presidencia.gub.uy/tav_portal/2017/noticias/NO_Y823/contrato_final.pdf

Simpson, William, 1998. *Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and worlwide*. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service.

Suirezs, T. M. y Berger, G., 2010. *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Misiones: Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones.

Thybring, E.E.; Fredriksson,M.; Zelinka, S.L.; Glass, S.V. Water in Wood: A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps.Forests 2022, 13, 2051. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/365946619_Water_in_Wood_A_Review_of_Current_Understanding_and_Knowledge_Gaps#fullTextFileContent [accessed Nov 20 2025].

Tomasello Filho, M., 1985. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivas no Brasil. En: *IPEF*, 29, pp. 23-36.

Tuset, R. y Durán, F., 2008. *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización*. 2a. ed. Montevideo: Hemisferio Sur.

United States. Department of Agriculture, 2010. *Wood handbook, wood as an engineering material*. Madison: United States Dep. of Agriculture, Forest Service.

United States. Department of the Treasury, s. d. *Treasury bonds* [En línea]. Washington: Department of the Treasury. [Consulta: abril 2024]. Disponible en: https://treasurydirect.gov/marketable-securities/treasury-bonds/

Uruguay. Ley 15939, de 28 de diciembre de 1987. *Diario Oficial* [En línea], 09 de febrero de 1988. [Consulta: mayo 2024]. Disponible en: https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987

Uruguay. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal, 2022. *Informe cuatrimestral de exportaciones de madera: principales cadenas forestales, segundo cuatrimestre 2021*. Montevideo: MGAP.

Uruguay. Ministerio de Ganadería y Pesca. Dirección General Forestal, 2022. *Superficie forestal del Uruguay (Bosques plantados 1975-2021).* Montevideo: MGAP.

Uruguay. Ministerio de Ganadería y Pesca, 2023. *Exportaciones en valor (miles U$S) con Zona Franca (2012-2022)* [En línea]. Montevideo: MGAP. [Consulta: mayo 2024]. Disponible en: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/exportaciones-valor-miles-us-zona-franca-2012-2021

Uruguay. Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial y Banco Interamericano de Desarrollo, 2022. *Hoja de ruta para la construcción de vivienda social en madera en Uruguay*. Montevideo: MVOT.

Uruguay XXI, 2021. *Sector forestal de Uruguay* [En línea]. Montevideo: Uruguay XXI. [Consulta: mayo 2024]. Disponible en: https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf

USDA, 1991. *Dry Kiln operator's manual*. Ed. rev. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

William, J., 1970. Things to consider in making accurate moisture test on wood. En: *Lumber Drying Sourcebook. 40 years of experience*. [s.l.]: [s.n.], pp. 63-64.