



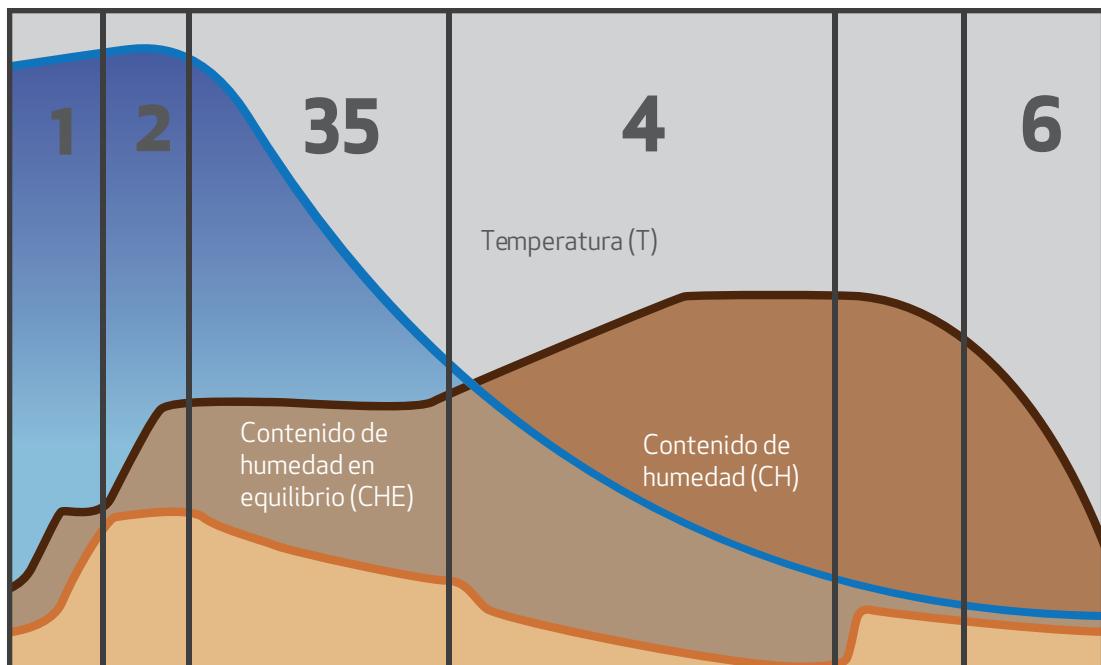
PERÚ

Ministerio  
de la Producción



MANUAL PARA

# OPERADORES DE SECADORES CONVENCIONALES PARA MADERA



**CITE madera**  
Lima



Implementada por  
**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



**Manual para Operadores de Secadores  
Convencionales para Madera**

© Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera – CITEmadera

**Autor - Editor:**

Jose Ugarte Oliva  
Karl-Heinz Stöffler

**Colaboradores:**

Hanz Esteban Martínez  
Clemente Reyes Flores

**Diseño, Diagramación e Ilustración:**

Benny Jackson

Se terminó de Imprimir en marzo del 2017 en :

Omar Carrión López  
Dirección: Jr. San Gabriel 570 urb. San Carlos - Comas  
Telf: 993008551

**Hecho el Deposito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú No. 2017- 03340 1° Edición: Lima, Marzo 2017**

La publicación e impresión de este documento fue posible gracias al apoyo de la Cooperación Alemana implementada por la GIZ, a través de su programa ProAmbiente.



Implementada por



# Manual para Operadores de Secadores Convencionales para Madera

## CONTENIDO

Prólogo .....	09
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. CONCEPTOS BÁSICOS .....	12
2.1. Densidad .....	12
2.1.1. Densidad básica (DB) .....	12
2.1.2. Densidad al 12% .....	12
2.2. Medición de la temperatura (T) .....	14
2.3. Medición de la humedad relativa del aire (HR) .....	15
2.4. Medición de la humedad de la madera .....	17
2.4.1. Método gravimétrico .....	17
2.4.2. Método eléctrico (resistencia) .....	19
2.4.3. Método capacitativo (dieléctrico) .....	24
2.5. Contenido de humedad del equilibrio de la madera (CHE) .....	26
2.6. Punto de saturación de fibra (PSF) .....	30
3. MOVIMIENTO DEL AGUA EN LA MADERA .....	30
4. CONTRACCIONES .....	33
5. GRADIENTE DEL SECADO (GS) .....	35
6. MÉTODOS DE SECADO .....	37
7. PREPARACIÓN DEL SECADO .....	38
7.1. Presecado .....	38
7.2. Armado de paquetes .....	38
7.3. Separadores .....	39
8. MEDICIÓN Y CONTROL .....	42
8.1. Sensores para medición del contenido de humedad (CH) .....	42
8.2. Muestras para el control del contenido de humedad (CH) .....	43
8.3. Verificación de la cámara de secado .....	44
8.4. Conducción del secado .....	44
8.5. Fases del secado .....	47
8.5.1. Calentamiento y penetración de calor .....	47
8.5.2. Acondicionamiento inicial .....	47
8.5.3. Secado antes del punto de saturación de las fibras (PSF) .....	48

8.5.4. Secado después del punto de saturación de las fibras (PSF) .....	48
8.5.5. Acondicionamiento final.....	48
8.5.6. Enfriamiento .....	48
8.6. Programas de secado.....	49
8.7. Control permanente del secado.....	49
8.8. Protocolos o curvas del secado y su análisis .....	51
<b>9. CALIDAD DEL SECADO.....</b>	<b>52</b>
9.1. Contenido de humedad final .....	52
9.2. Determinación de las tensiones en la madera.....	53
9.3. Otros defectos .....	54
<b>10. EQUIPAMIENTO .....</b>	<b>56</b>
10.1. Potencia de la calefacción .....	56
10.2. Fuentes de calentamiento.....	57
10.2.1. Hornos con calefacción directa .....	57
10.2.2. Hornos con calefacción indirecta .....	57
10.2.3. Radiadores .....	59
10.2.4. El combustible madera.....	60
10.3. Humidificación.....	61
10.3.1. Agua pulverizada a baja presión .....	61
10.3.2. Agua pulverizada a alta presión .....	62
10.3.3. Vapor de baja presión .....	63
10.3.4. Mezcla de agua y vapor .....	64
10.3.5. Mezcla de agua y aire .....	64
10.4. Extracción de humedad .....	64
10.5. Circulación del aire .....	66
<b>11. COSTOS.....</b>	<b>68</b>
<b>12. PROGRAMAS DEL SECADO .....</b>	<b>70</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Peso estimado de 1m <sup>3</sup> y 1pt de 29 especies .....	13
Tabla 2. Tabla psicrométrica .....	16
Tabla 3. Grupo de madera según especie para medidores de humedad por resistencia .....	21
Tabla 4. Códigos X-Y según especie para el medidor de dos resistencias (GANN RTU600).....	23
Tabla 5. Códigos según especies para medidor capacitativo (Wagner MMC220) .....	25
Tabla 6. Contenido de humedad de equilibrio de la madera según temperatura y humedad relativa.....	28
Tabla 7. PSF para 37 especies maderables.....	31
Tabla 8. Valores de GS recomendados por la empresa "Hildebrandt" para 14 especies de madera peruanas.....	36
Tabla 9. Programa de secado para melina ( <i>Gmelina arborea</i> ) para espesor de 25mm .....	46
Tabla 10. Ejemplo de un programa de secado. ....	49
Tabla 11. Tolerancias del CH final según el grupo de secado europeo – EDG (CH medido a 1/3 del espesor) .....	52
Tabla 12. Ejemplo diferentes potencias específicas en 2 modelos de marca NIGOS.....	56
Tabla 13. Potencia calorífica requerida para diferentes tipos de madera .....	56
Tabla 14. Programa de secado para Cedro Rojo ( <i>Cedrela montana</i> ) de 50 mm de espesor .....	70
Tabla 15. Programa de secado para Shihuahuaco ( <i>Dipteryx sp.</i> ) de 20 mm de espesor .....	70
Tabla 16. Programa de secado para Huayruro ( <i>Ormosia coccinea</i> ) de 50 mm de espesor.....	71
Tabla 17. Programa de secado para Congona ( <i>Brosimum alicastrum</i> ) de 50 mm de espesor .....	71
Tabla 18. Programa de secado para Pumaquiro ( <i>Aspidosperma macrocarpon</i> ) de 20 mm de espesor.....	71
Tabla 19. Programa de secado para Tornillo ( <i>Cedrelinga cateniformis</i> ) de 50 mm de espesor.....	72
Tabla 20. Programa de secado para Shihuahuaco ( <i>Dipteryx sp.</i> ) de 25 mm de espesor .....	72
Tabla 21. Programa de secado para Cachimbo ( <i>Cariniana domestica</i> ) de 25 mm de espesor .....	72

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Conexión del sensor PT100 al transductor .....	14
Ilustración 2. Medición de temperatura del bulbo húmedo y bulbo seco.....	15
Ilustración 3. Preparación de muestras de control de humedad .....	17
Ilustración 4. Balanza electrónica y estufa .....	18
Ilustración 5. Calibrador de medidores de humedad por resistencia .....	20
Ilustración 6. Medidor de contenido de humedad de resistencia con 4 grupos de madera .....	20
Ilustración 7. Medidor GANN RTU 600 .....	22
Ilustración 8. Higrómetro de contacto .....	24
Ilustración 9. Estación de medición de temperatura y contenido de humedad de equilibrio.....	26
Ilustración 10. Mapa de contenido de humedad de equilibrio del Perú (promedio anual). .....	29
Ilustración 11. Movimiento del agua en la madera durante el secado .....	32
Ilustración 12. Valor máximo de la contracción de la madera según el sentido de la fibra. ....	33
Ilustración 13. Deformaciones de la madera de acuerdo al tipo de corte .....	33
Ilustración 14. Típica configuración de una cámara convencional .....	38
Ilustración 15. Llenado correcto de cámara de secado .....	39

Ilustración 16. Detalle de colocación de separadores en paquetes o rumas .....	40
Ilustración 17. Detalle de diferentes tipos de separadores.....	40
Ilustración 18. Ejemplo de protección de extremos en tablas .....	41
Ilustración 19. Llenado correcto de las cámaras de secado (vista de planta).....	42
Ilustración 20. Ejemplo de colocación de sensores en madera para medición de CH.....	43
Ilustración 21. Ubicación de la muestra de control en la ruma de madera.....	43
Ilustración 22. Controlador en modo manual.....	44
Ilustración 23. Controlador en modo semiautomático .....	45
Ilustración 24. Controlador en modo automático .....	45
Ilustración 25. Diagrama de una curva de secado típica.....	47
Ilustración 26. Pantalla principal de un software de secado .....	50
Ilustración 27. Verificación de la tensión en la madera según ENV 14464 .....	53
Ilustración 28. Verificación de las tensiones de la madera mediante la prueba del tenedor .....	54
Ilustración 29. Colapso .....	54
Ilustración 30. Descoloramiento .....	54
Ilustración 31. Grietas .....	55
Ilustración 32. Deformaciones .....	55
Ilustración 33. Caldera con alimentación automática .....	58
Ilustración 34. Radiador de serpentín .....	59
Ilustración 35. Sistema de alimentación de agua a baja presión .....	62
Ilustración 36. Sistema de alimentación de agua a alta presión .....	63
Ilustración 37. Intercambio de aire seco y aire húmedo .....	64
Ilustración 38. Sistema de extracción de humedad.....	65
Ilustración 39. Ventilador axial.....	67
Ilustración 40. Motor clase H (cerrado herméticamente, con engrase continuo) .....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Variación de la resistencia eléctrica vs. Variación del contenido de humedad .....	19
Gráfico 2. Diagrama de Keylwerth.....	27
Gráfico 3. Métodos de secado.....	37
Grafico 4. Ejemplo de curva del secado completa con CH promedio .....	51
Grafico 5. Ejemplo del comportamiento de sensores del CH durante el secado (8 sensores) .....	51
Gráfico 6. Poder calorífico de la madera .....	60

## PRÓLOGO

El Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera – CITEMadera, tiene como misión promover la productividad, competitividad e innovación en las empresas de la cadena productiva de la madera, mediante un proceso continuo de transferencia tecnológica, desarrollo de capacidades e I+D+i orientados a incrementar y diversificar la oferta productiva de calidad en las empresas del sector industrial de la madera, muebles y derivados.

Para fortalecer los servicios anteriormente mencionados, el CITEMadera desarrolla un conjunto de materiales técnico e informativos para el apoyo a la transferencia tecnológica, en especial en los procesos de asistencia técnica y capacitación, con el fin de facilitar el aprendizaje y reforzar la implementación de este en las operaciones productivas.

Por ello y en el marco del trabajo conjunto con el Programa ProAmbiente de la Cooperación Alemana GIZ, se ve oportuno el desarrollo y publicación del presente documento “Manual para Operadores de Secadores Convencionales para Madera” como herramienta para mejorar el conocimiento y las prácticas relacionadas a la operación del proceso de secado de madera, proceso fundamental para la mejora de la calidad e innovación en el procesamiento de la madera, recopilando en este los conocimientos prácticos de especialistas así como también resultados de las últimas investigaciones del CITEMadera en la materia.

**JESSICA MOSCOSO**  
**DIRECTORA CITEMADERA**

## SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

%	:	Porcentaje
"	:	Pulgada
ASTM	:	American Society for Testing Materials
CH	:	Contenido de humedad de la madera
	MC	: (siglas en inglés)
	u	: (sigla en alemán)
CHE	:	Contenido de humedad de equilibrio
	EMC	: (siglas en inglés)
	ugl	: (siglas en alemán)
cm	:	Centímetro
CV	:	Contracción volumétrica
D <sub>a</sub>	:	Densidad del agua en condiciones normales
DB	:	Densidad básica
D <sub>bh</sub>	:	Depresión del bulbo húmedo
g/cm <sup>3</sup>	:	Gramo por centímetro cúbico
GH	:	Gradiente de Humedad de la Madera
GS	:	Gradiente de secado
	DG	: (siglas en inglés)
	TG	: (siglas en alemán)
HR	:	Humedad relativa
	RH	: (siglas en inglés)
	φ	: (sigla en alemán)
kg	:	Kilogramo
M	:	Masa
m	:	Metro
m <sup>3</sup>	:	Metro cúbico
mm	:	Milímetro
M <sub>o</sub>	:	Masa anhidra o al 0% de contenido de humedad
NTP	:	Norma Técnica Peruana
°C	:	Grados centígrados
pH	:	Medida de acidez o alcalinidad de una solución
PSF	:	Punto de saturación de las fibras
pt	:	Pies tablares
T	:	Temperatura
T <sub>bh</sub>	:	Temperatura del bulbo húmedo
T <sub>bs</sub>	:	Temperatura del bulbo seco
T/R	:	Relación entre la contracción tangencial y la contracción radial
V	:	Volumen
V <sub>sat</sub>	:	Volumen saturado

# Manual para Operadores de Secadores Convencionales para Madera

## 1. INTRODUCCIÓN

El secado de la madera es un proceso fundamental para garantizar la calidad en cualquier producto de madera ya que, siendo la madera un material orgánico, este proceso permite la estabilización dimensional al mismo tiempo que aumenta su resistencia mecánica y biológica, además de mejorar sus propiedades como aislante térmico, acústico y eléctrico.

Siendo un proceso fundamental en la cadena de transformación de la madera, también constituye una barrera para la generación de valor agregado en esta industria, así como un obstáculo para incrementar la participación de la madera en el mercado de vivienda y construcción a nivel nacional.

Las principales causas de estas barreras se concentran en el poco conocimiento técnico en la operación de secaderos y en la gran variabilidad de marcas, procedencias y capacidades de secaderos convencionales existentes en el país, a lo que se suma la gran variabilidad de especies maderables existentes en nuestros bosques tropicales.

En este sentido, el presente manual busca complementar el conocimiento de aquellas personas que tienen a su cargo la operación de secaderos convencionales para madera, de una manera práctica y directa, a través de consejos prácticos que permitan resolver los problemas de operación de los mismos.

El presente “Manual para Operadores de Secaderos Convencionales de Madera” permitirá ahondar el conocimiento sobre la operación de un programa de secado y la selección y configuración de una cámara convencional de acuerdo a las necesidades de la empresa.

Este conocimiento se complementa con la información brindada en las anteriores publicaciones del CITEmadera sobre el secado, como son:

Guía de Contenidos. Serie 1. Guía Técnica para el Secado de la Madera, cuyo objetivo es conocer los principios básicos del secado natural y el armado de rumas.

Guía de Contenidos. Serie 2. Buenas Prácticas para el Secado de Madera en Hornos Convencionales, cuyo objetivo es conocer los principios básicos del secado artificial y la interpretación correcta de las distintas variables de control de secado y sus equivalencias.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS

Para secar madera mediante hornos o cámaras de secado convencionales es sumamente importante conocer algunos aspectos elementales relacionados a la madera y a las condiciones ambientales al interior de estos equipos, por ello a continuación se describen algunos conceptos básicos que debemos tener en cuenta.

### 2.1. Densidad

La densidad es un parámetro muy importante en el secado de la madera, entre más densa es una madera, más masa hay que deshumidificar y por ende el secado demora más tiempo. Existen excepciones a la regla como con el Estoraque y el Huayruro, que son especies de densidad alta pero poseen un mejor comportamiento al secado que especies menos densas como el Ishpingo, Nogal o Moena Rosada.

La densidad es útil no sólo para darnos una idea de qué tan compacta es una madera, sino que también a través de unos cálculos sencillos nos permite conocer el peso de una carga de madera. La densidad se determina con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{M}{V}$$

Donde: D: Densidad

M: Masa de la madera

V: Volumen de la madera

#### 2.1.1. Densidad básica (DB)

La densidad básica es la expresión más utilizada cuando nos referimos a maderas peruanas, siendo el dato que encontramos comúnmente cuando buscamos información sobre las propiedades de las mismas. Se determina con la siguiente fórmula:

$$DB = \frac{M_o}{V_{sat}}$$

Donde: DB: Densidad básica

M<sub>o</sub>: Masa anhidra (al 0% de contenido de humedad) de la madera

V<sub>sat</sub>: Volumen saturado o en estado verde (≥30% de CHE)

#### 2.1.2. Densidad al 12%

La densidad al 12% de contenido de humedad es útil para el cálculo de peso de madera seca, y se determina con la siguiente fórmula:

$$D_{12\%} = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}}$$

Donde: D<sub>12%</sub>: Densidad al 12% de humedad

M<sub>12%</sub>: Masa de la madera al 12% de humedad

V<sub>12%</sub>: Volumen de la madera al 12% de humedad

La Tabla 1 presenta los pesos por metro cúbico y por pie tablar de distintas maderas comerciales a nivel nacional, a un contenido de humedad del 12%.

Tabla 1. Peso estimado de 1m<sup>3</sup> y 1pt de 29 especies

Nº	Nombre común	Nombre científico	Densidad básica	Densidad al 12% [g/cm <sup>3</sup> ]	Peso de 1m <sup>3</sup> al 12% [kg]	Peso de 1pt al 12% [kg]
1	Ana Caspi	<i>Apuleia leiocarpa</i>	0.83	1.01	1,014.80	2.39
2	Bolaina	<i>Guazuma crinita</i>	0.41	0.49	490.86	1.16
3	Cachimbo	<i>Cariniana domestica</i>	0.59	0.71	712.35	1.68
4	Capiroña	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0.76	0.94	935.38	2.21
5	Catahua	<i>Hura crepitans</i>	0.41	0.49	485.41	1.14
6	Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	0.42	0.50	502.03	1.18
7	Chontaquito	<i>Diplostropis martiusii</i>	0.74	0.89	885.09	2.09
8	Copaíba	<i>Copaifera officinalis</i>	0.61	0.73	730.07	1.72
9	Cumala	<i>Virola sebifera</i>	0.45	0.55	548.06	1.29
10	Estoraque	<i>Myroxylon balsamum</i>	0.78	0.93	929.18	2.19
11	Huayruro	<i>Ormosia coccinea</i>	0.61	0.72	724.04	1.71
12	Ishpingo	<i>Amburana cearensis</i>	0.43	0.50	504.61	1.19
13	Lagarto Caspi	<i>Calophyllum brasiliense</i>	0.56	0.66	664.69	1.57
14	Marupa	<i>Simarouba amara</i>	0.36	0.43	425.14	1.00
15	Mashonaste	<i>Clarisia racemosa</i>	0.56	0.66	664.69	1.57
16	Moena Amarilla	<i>Aniba puchury-minor</i>	0.56	0.66	664.69	1.57
17	Panguana	<i>Brosimum utile</i>	0.49	0.58	582.68	1.37
18	Pashaco	<i>Albizia sp.</i>	0.40	0.48	477.82	1.13
19	Pumaquito	<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	0.67	0.81	810.72	1.91
20	Quina Quina	<i>Pouteria sp.</i>	0.74	0.91	905.99	2.14
21	Quinilla	<i>Manilkara bidentata</i>	0.84	1.04	1,039.33	2.45
22	Requia	<i>Guarea kunthiana</i>	0.60	0.74	737.97	1.74
23	Shihuahuaco	<i>Dipteryx micrantha</i>	0.87	1.07	1,070.77	2.53
24	Tahuarí	<i>Tabebuia serratifolia</i>	0.92	1.12	1,123.79	2.65
25	Tornillo	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	0.45	0.54	538.40	1.27
26	Ulcumano	<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	0.53	0.63	627.48	1.48
27	Yacushapana	<i>Terminalia oblonga</i>	0.73	0.88	883.32	2.08
28	Yanchama	<i>Pouselnia armata</i>	0.44	0.53	526.95	1.24
29	Zapote	<i>Matisia cordata</i>	0.43	0.52	518.30	1.22

Fuente: Confederación Peruana de la Madera. Elaboración propia

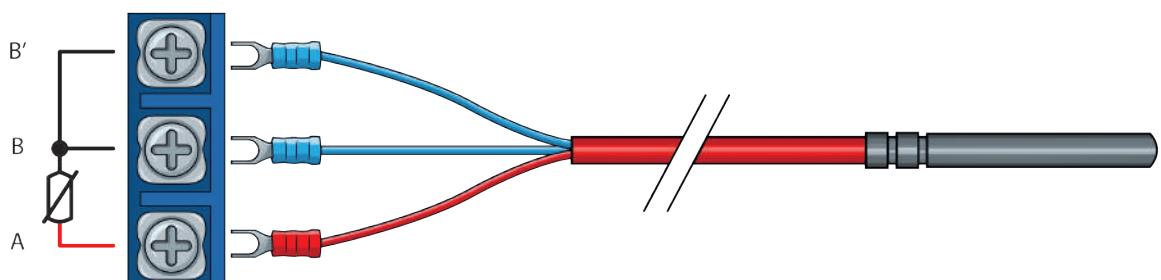
## 2.2. Medición de la temperatura (T)

En los secadores de madera la medición de la temperatura se realiza con termómetros de resistencia, en donde el conductor metálico (p.e. alambre de platino), cambia su resistencia eléctrica en función de la temperatura.

El modelo más común de uso es el PT100 con tres hilos, cuyo nombre proviene de su característica fundamental: a una temperatura de 100°C tiene una resistencia de 100Ω (Ohm). Existen también algunos controladores que utilizan PT100 de 4 hilos o sensores tipo PT1000.

En las cámaras de secado la distancia entre el sensor y el transductor es significativa. Para eliminar la influencia de la resistencia de la línea se usa típicamente de 3 conexiones, donde esa resistencia es compensada en el “puente de Wheatstone” con una alimentación separada de la corriente de medición.

Ilustración 1. Conexión del sensor PT100 al transductor



Es importante verificar periódicamente el funcionamiento correcto de los sensores de temperatura, ya que comúnmente los cables gastados afectan su lectura correcta, esta verificación puede hacerse con agua con hielo (0°C) o agua hirviendo (100°C), también se puede hacer una comparación con la lectura de un termómetro de alcohol.

### 2.3. Medición de la humedad relativa del aire (HR)

Comúnmente la Humedad Relativa se mide a través de la diferencia psicrométrica que existe entre un termómetro que mide la temperatura del aire (bulbo seco) y otro termómetro recubierto con un tejido con capacidad de absorción (humedecido permanentemente a través de un envase con agua) llamado "bulbo húmedo". El flujo de aire (a una velocidad  $> 2 \text{ m/s}$ ) produce una disminución de la temperatura en este último termómetro debido a la vaporización del agua que se encuentra en el tejido. Precisamente, la diferencia entre la temperatura del "bulbo seco" y la temperatura del "bulbo húmedo", denominada "depresión del bulbo húmedo" es un valor relacionado a la humedad relativa del aire que indica su nivel de saturación. El valor de la HR se determina a través de una tabla psicrométrica o por medio del gráfico de "Keylwerth" (Ver gráfico 2), ambos indican además el Contenido de Humedad de Equilibrio de la madera (CHE) que se explicará más adelante. Ver Ilustración 2 y Tabla 2.

Ilustración 2. *Medición de temperatura del bulbo húmedo y bulbo seco*

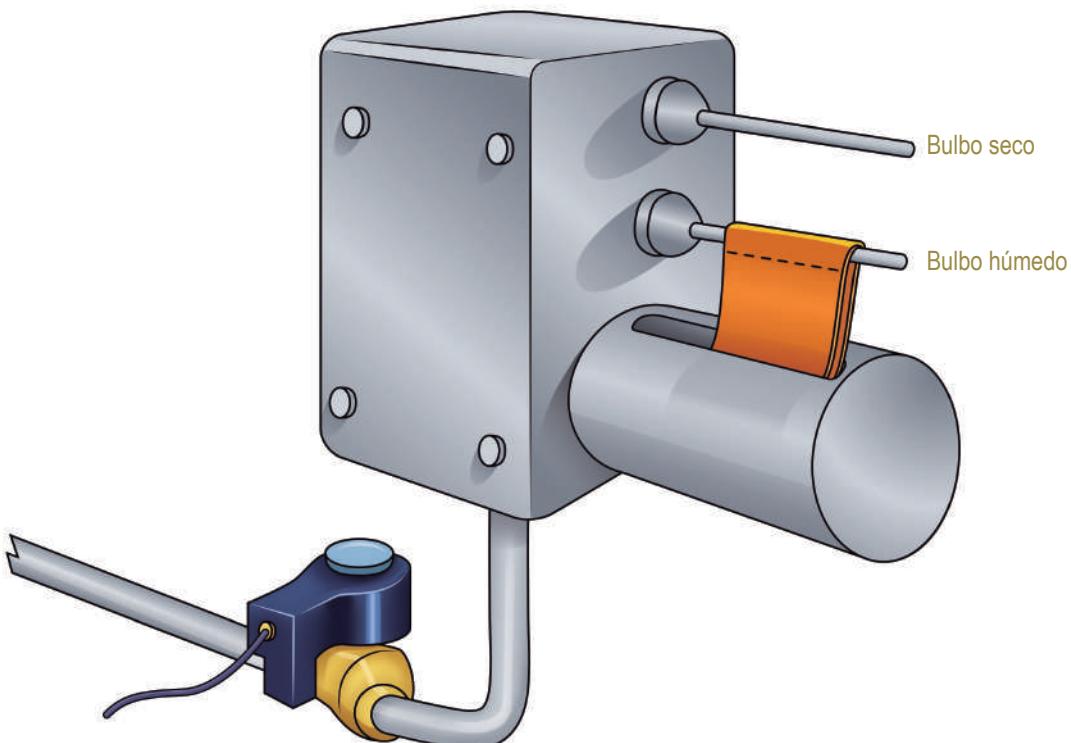


Tabla 2. **Tabla psicrométrica**

Temperatura de bulbo seco [°C]		Depresiones de bulbo húmedo [°C]																				
		1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25
5	H.R (%)	86	79	72	65	58	52	45	39	33	20	7										
	CHE (%)	19	16	14	12	11	9 1/2	8 1/2	7 1/2	6 1/2	4 1/2	1 1/2										
15	H.R (%)	90	85	80	75	71	66	61	57	53	44	36	27	20	13							
	CHE (%)	20 1/2	18	16	14 1/2	13	12	11	10 1/2	10	8	7	6	4 1/2	3							
25	H.R (%)	92	88	84	81	77	74	70	67	63	57	50	44	39	33	22	12					
	CHE (%)	21 1/2	19 1/2	17 1/2	16	15	14	13	12	11 1/2	10	9	8	7 1/2	6 1/2	5	2 1/2					
35	H.R (%)	94	90	87	84	81	78	75	72	69	64	59	54	49	44	36	28	20	13	7		
	CHE (%)	22	19 1/2	18	16 1/2	15 1/2	14 1/2	13 1/2	13	12	11	10	9 1/2	8 1/2	8	6 1/2	6	4	3	1 1/2		
40	H.R (%)	94	91	88	85	82	80	77	74	72	67	62	57	53	48	40	33	26	20	14	6	
	CHE (%)	22	19 1/2	18	17	16	15	14	13	12 1/2	11 1/2	10 1/2	9 1/2	9	8	7	6	5	4	3	1 1/2	
45	H.R (%)	94	91	88	85	83	80	78	75	73	69	64	60	56	52	44	37	30	25	19	14	
	CHE (%)	22	19 1/2	18	17	15 1/2	15	14	13 1/2	12 1/2	11 1/2	10 1/2	10	9	8	7	6 1/2	5 1/2	4 1/2	4	3	
50	H.R (%)	95	92	89	86	83	81	79	76	74	70	65	61	58	54	46	40	34	29	24	18	12
	CHE (%)	22	19 1/2	18	16 1/2	15 1/2	15	14	13 1/2	12 1/2	11 1/2	10 1/2	10	9	8 1/2	7 1/2	6 1/2	5 1/2	5	4	3 1/2	2 1/2
55	H.R (%)	95	92	90	87	84	82	80	78	76	72	67	63	60	56	50	43	37	32	27	22	16
	CHE (%)	21 1/2	19 1/2	18	16 1/2	15 1/2	15	14	13 1/2	12 1/2	11 1/2	10 1/2	10	9	8 1/2	7 1/2	6 1/2	6	5	4 1/2	4	3
60	H.R (%)	95	92	90	88	85	83	81	79	77	73	69	65	61	58	52	45	40	35	30	25	20
	CHE (%)	21 1/2	19	17 1/2	16 1/2	15 1/2	14 1/2	13 1/2	13	12 1/2	11 1/2	10 1/2	10	9	8 1/2	7 1/2	7	6	5 1/2	4 1/2	4	3 1/2
65	H.R (%)	95	93	91	88	86	84	82	80	78	74	70	66	63	60	53	47	42	37	32	28	22
	CHE (%)	21	18 1/2	17	16	15	14	13 1/2	13	12 1/2	11 1/2	10 1/2	10	9	8 1/2	7 1/2	7	6	5 1/2	5	4	3 1/2
70	H.R (%)	96	93	91	88	86	84	83	81	79	75	71	68	65	61	55	50	44	40	35	31	25
	CHE (%)	20 1/2	18 1/2	17	15 1/2	15	14	13 1/2	13	12 1/2	11	10	9 1/2	9	8 1/2	7 1/2	7	6	5 1/2	5	4 1/2	3 1/2
75	H.R (%)	96	93	91	89	87	85	83	82	80	76	72	69	66	63	57	51	46	41	38	33	28
	CHE (%)	20	18	16 1/2	15 1/2	14 1/2	14	13	12 1/2	12	11	10	9 1/2	9	8 1/2	7 1/2	6 1/2	6	5 1/2	5	4 1/2	3 1/2
80	H.R (%)	97	93	91	89	87	86	84	82	81	77	74	70	67	64	59	53	48	43	40	36	30
	CHE (%)	19 1/2	17	16	15	14	13 1/2	13	12 1/2	12	11	10	9 1/2	8 1/2	8	7 1/2	6 1/2	6	5 1/2	5	4 1/2	3 1/2
85	H.R (%)	97	93	91	90	88	86	84	82	81	78	74	71	68	65	60	54	49	45	41	38	32
	CHE (%)	19 1/2	17	16	15	14	13 1/2	13	12 1/2	12	11	10	9 1/2	8 1/2	8	7 1/2	6 1/2	6	5 1/2	5	4 1/2	3 1/2

Fuente: Junta del acuerdo de Cartagena - JUNAC

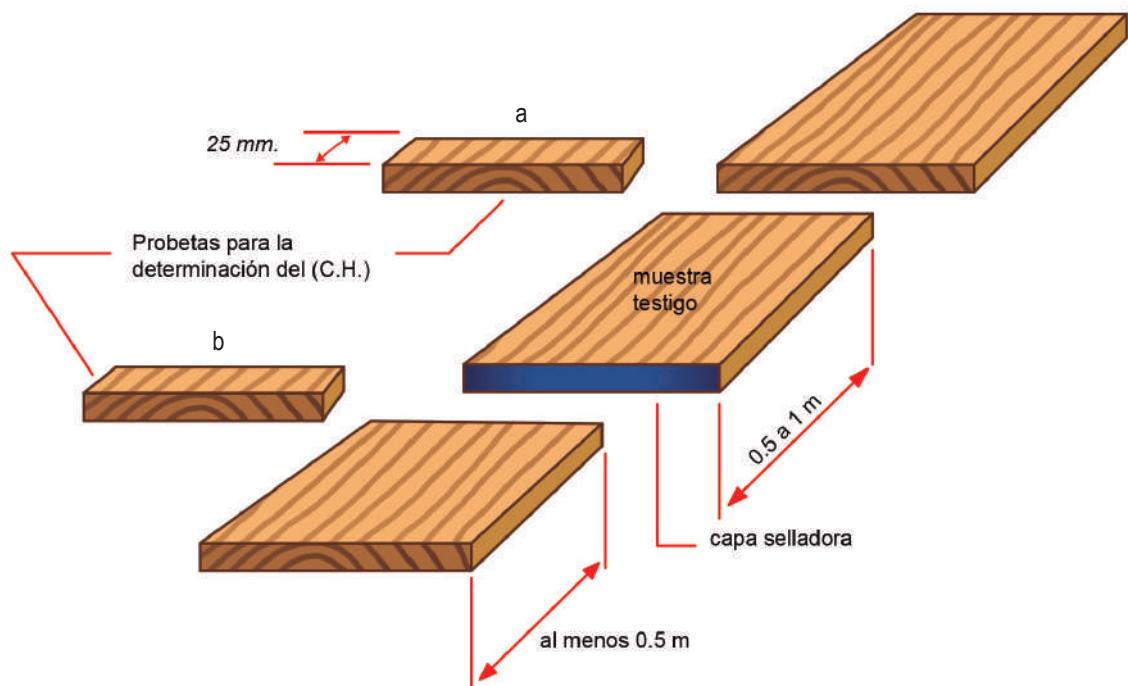
## 2.4. Medición de la humedad de la madera

### 2.4.1. Método gravimétrico

La forma más exacta para determinar la humedad de la madera es mediante el método gravimétrico, el que consiste en pesar periódicamente muestras conforme estas van perdiendo humedad y cuyo procedimiento está detallado en las normas NTP 251.010<sup>1</sup> y ASTM D4442<sup>2</sup>, entre otras.

Debido a su exactitud, es preciso aplicar este método durante el proceso de secado en hornos, para lo cual deben cortarse muestras de algunas tablas a por lo menos 50 cm de sus extremos (Ilustración 3) inmediatamente antes del inicio del secado. Es recomendable realizar el corte de estas muestras con una sierra con buen filo. También es preferible que el horno o cámara disponga de una ventana que permita retirar y colocar las muestras para su pesaje periódico, con el fin de no afectar considerablemente las condiciones ambientales en su interior.

Ilustración 3. Preparación de muestras de control de humedad



1 NTP 251.010:2014. MADERA. Métodos para Determinar el Contenido de Humedad.

2 ASTM D4442:2015 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials

Después del corte, las probetas a y b, deben de limpiarse y pesarse de forma inmediata a fin de que los resultados no se alteren por pérdida de humedad. Se recomienda utilizar para la medición del peso una balanza electrónica de plato con precisión de al menos 1g, la cual se sugiere que esté ubicada cerca del horno de secado.

Ilustración 4. *Balanza electrónica y estufa*



A continuación, ambas probetas se colocan dentro de una estufa a 103 +/- 2°C hasta que su peso no varíe, calculando el contenido de humedad con la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso Final}}{\text{Peso Final}} \times 100\%$$

Simultáneamente, la muestra de control o testigo debe de sellarse con pintura en sus dos extremos y luego debe ser pesada en la balanza. Asumiendo que esta muestra control tiene la misma humedad que el promedio de las probetas a y b, se calcula su peso final (peso seco al horno) despejando esta variable de la fórmula de humedad anterior:

$$\text{Peso Final "calculado"} = \frac{100 \times \text{Peso Inicial}}{\text{Contenido de Humedad promedio de a y b} + 100}$$

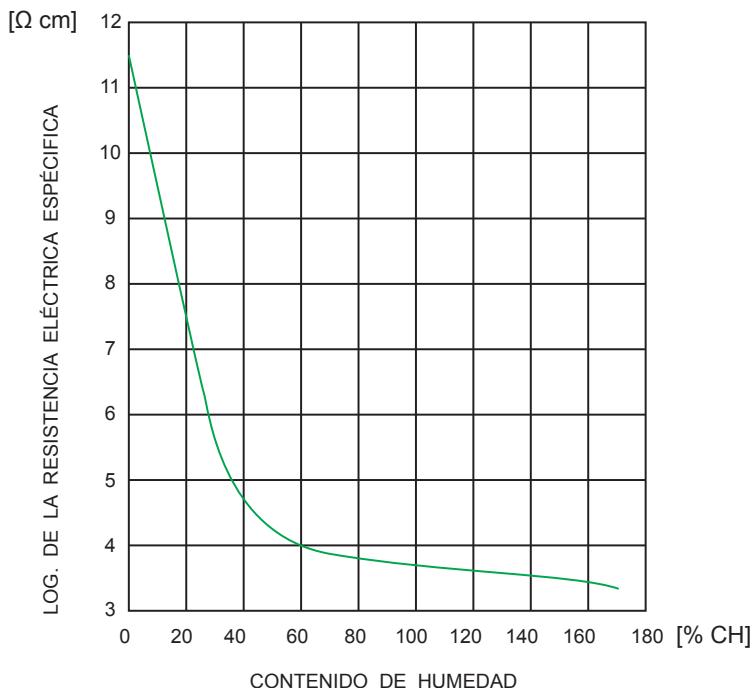
A continuación, la muestra de control se introduce nuevamente en la cámara y se monitorea diariamente su peso para así conocer el contenido de humedad actual de la madera, el que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de Humedad Actual (\%)} = \frac{\text{Peso diario} - \text{Peso Final "calculado"}}{\text{Peso Final "calculado"}} \times 100\%$$

## 2.4.2. Método eléctrico (resistencia)

Este método se basa en la relación que existe entre la resistencia eléctrica específica y el contenido de humedad de la madera. Para humedades de la madera entre 5 y 25% este método tiene una precisión de 1 a 2%, mientras que a un CH mayor a 25 % la precisión disminuye significativamente. Como podemos observar en el gráfico siguiente, a humedades superiores a 60% la medición no es confiable porque la resistencia eléctrica prácticamente no cambia más.

Gráfico 1. Variación de la resistencia eléctrica vs. Variación del contenido de humedad



El instrumento empleado para la medición de la humedad bajo este método es conocido como higrómetro de clavos, de pines o de electrodos. La mayoría estos medidores disponen de perillas para la selección de 4 grupos de maderas (de acuerdo a la densidad) y también para la selección de la temperatura, aunque el ajuste de esta última puede ser automático en algunos higrómetros (ilustración 6). En la Tabla 3 se muestra una lista de especies donde se indica el grupo de madera que debe ser seleccionado cuando utilizamos este tipo de medidores.

Con electrodos o clavos aislados, la humedad de la madera es medida en la profundidad donde se encuentran los puntos sin aislamiento. Si los electrodos son completamente conductivos el CH promedio de una pieza de madera se mide a 1/3 de su espesor. En caso se necesite medir la humedad máxima se deben profundizar los electrodos hasta 1/2 de su espesor, mientras que a 1/6 de profundidad se obtiene la humedad superficial. Para la protección de las roscas del porta electrodos del martillo es importante ajustar bien las tuercas con una llave de boca antes de cada clavada de los electrodos.

Existen resistencias disponibles que nos permiten verificar el funcionamiento adecuado de este tipo de medidores. La pieza mostrada (Ilustración 5) debe dar una lectura de 21% si el medidor está fijado en el grupo 4 o en las resistencias X5-Y9 (Higrómetro GANN RTU 600).

Ilustración 5. Calibrador de medidores de humedad por resistencia

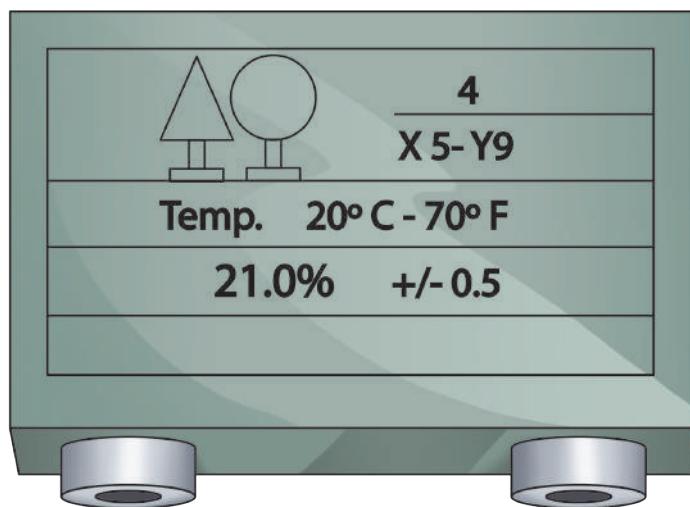


Ilustración 6. Medidor de contenido de humedad de resistencia con 4 grupos de madera

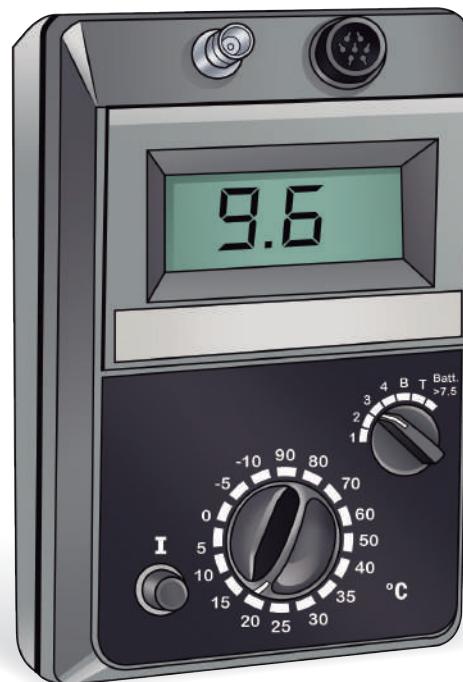


Tabla 3. Grupo de madera según especie para medidores de humedad por resistencia

Grupo	Nombre común	Nombre científico	Densidad Básica
1	Tahuari	<i>Tabebuia serratifolia</i>	0.92
	Palisangre	<i>Brosimum rubescens</i>	0.99
	Chonta	<i>Iriartea deltoidea</i>	1.01
	Iroko	<i>Milicia excelsa</i>	0.66
	Zebrano	<i>Microberlinia brazzavillensis</i>	0.79
2	Shihuahuaco	<i>Dipteryx odorata</i>	0.87
	Estoraque	<i>Myroxylon balsamum</i>	0.78
	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0.76
	Quinilla	<i>Manilkara bidentata</i>	0.87
	Pumaquiro	<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	0.67
	Azucar Huayo	<i>Hymenaea oblongifolia</i>	0.80
	Chontacuero	<i>Dipterocarpus martiusii</i>	0.74
	Diablo Fuerte	<i>Podocarpus sp.</i>	0.53
	Congona	<i>Brosimum alicastrum</i>	0.68
	Lime	<i>Tilia cordata</i>	0.56
3	Poplar	<i>Populus sp.</i>	0.38
	Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	0.42
	Cumala	<i>Virola sp</i>	0.45
	Moena Amarilla	<i>Aniba puchury-minor</i>	0.56
	Maple	<i>Acer saccharum</i>	0.71
	Pino	<i>Pinus sp.</i>	0.42
	Tornillo	<i>Cedrela odorata</i>	0.45
	Cachimbo	<i>Cariniana domestica</i>	0.59
4	Cipres	<i>Cupressus sp.</i>	0.48
	Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	0.43
	Bolaina	<i>Guazuma crinita</i>	0.41
4	Marupa	<i>Simarouba amara</i>	0.36
	Topa	<i>Ochroma pyramidalis</i>	0.18

Fuente: IMAD PERÚ S.A.

También existen medidores que disponen de dos potenciómetros para realizar una lectura más precisa de la humedad de cada especie de madera (ilustración 7). En la tabla 4 se puede apreciar una lista de especies con los códigos que deben ser seleccionados en cada resistencia para una medición correcta de su humedad.

Para la medición, los electrodos deben hincarse en la madera de forma transversal a la fibra y el medidor indicará inmediatamente el valor de la humedad. Activar la medición por mucho tiempo provoca una polarización del área de medición, lo que produce una variación en los valores de humedad obtenidos, por lo que se recomienda tomar la primera lectura que aparece en la pantalla.

Ilustración 7. Medidor GANN RTU 600

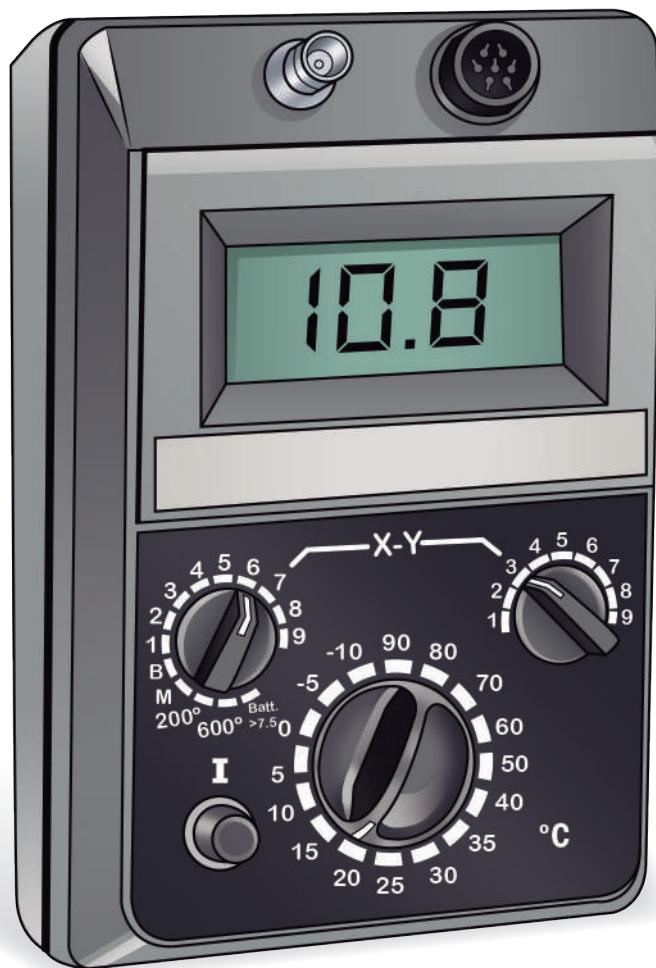


Tabla 4. Códigos X-Y según especie para el medidor de dos resistencias (GANN RTU600)

Nombre común	Nombre científico	Escalas		Densidad Básica
		X	Y	
Almendro	<i>Caryocar glabrum</i>	5	5	0.65
Ana Caspi	<i>Apuleia leiocarpa</i>	4	5	0.80
Bolaina	<i>Guazuma crinita</i>	4	5	0.41
Cachimbo Blanco	<i>Cariniana decandra</i>	6	5	0.55
Cachimbo Rosado	<i>Cariniana domestica</i>	3	7	0.59
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	6	5	0.43
Capiroña	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	1	6	0.76
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	6	3	0.42
Cumala	<i>Virola sp</i>	4	5	0.45
Huacrapona	<i>Iriartea deltoidea</i>	2	8	1.01
Huangana	<i>Sloanea multiflora</i>	1	7	0.62
Huayruro	<i>Ormosia coccinea</i>	6	5	0.60
Maquisapa Ñagcha	<i>Apeiba membranacea</i>	8	1	0.29
Marupa	<i>Simarouba amara</i>	4	5	0.36
Oje Renaco	<i>Ficus schultesii</i>	5	5	0.43
Panguana	<i>Brosimum utile</i>	3	7	0.49
Pashaco	<i>Albizzia sp.</i>	6	5	0.40
Pumaquiro	<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	2	5	0.67
Quinilla	<i>Manilkara bidentata</i>	2	7	0.87
Requia	<i>Guarea guidonia</i>	6	5	0.60
Shihuahuaco	<i>Dipteryx odorata</i>	1	7	0.87
Tornillo	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	5	5	0.45
Topa	<i>Ochroma pyramidalis</i>	8	2	0.18
Ubos	<i>Spondias mombin</i>	2	6	0.35
Yacushapana	<i>Terminalia oblonga</i>	1	6	0.73

Fuente: IMAD PERÚ S.A.

### 2.4.3. Método capacitativo (dieléctrico)

La medición de la humedad de la madera a través de la constante dieléctrica es un método muy utilizado en el control final del secado por ser un método no destructivo. Este método es bastante confiable para mediciones por debajo del 30% de CH. El instrumento empleado para la medición de la humedad bajo este método es un higrómetro de contacto.

Dado que el higrómetro se coloca sobre la superficie de la madera, este mide el CH promedio hasta cierta profundidad (dependerá del fabricante del equipo), alcanzando en la mayoría casos una profundidad máxima de 40mm. Es importante no tener material más húmedo por debajo de la pieza a medir, así como tener cuidado especialmente con la mano que sostiene la pieza (Ilustración 8).

La otra problemática es la capa de aire entre la placa de medición del higrómetro y la superficie de la madera; sobre superficies planas (cepilladas o lijadas) el valor de medición es correcto, mientras que sobre madera aserrada hay que aumentar entre 2 y 4% a la humedad medida dependiendo de su rugosidad.

Ilustración 8. Higrómetro de contacto



Antes de realizar la medición de la humedad se debe ingresar un código apropiado según la especie que se va a evaluar (ver Tabla 5), con el fin de obtener lecturas de humedad precisas.

Cabe mencionar que, al igual que los medidores de resistencia, existen medios para verificar el adecuado funcionamiento de los medidores capacitivos, en este caso son “placas de calibración” que pueden adquirirse con el mismo proveedor de este tipo de instrumentos.

Tabla 5. Códigos según especies para medidor capacitativo (Wagner MMC220)

Nombre común	Nombre científico	Código de uso	Densidad básica
Almendro	<i>Caryocar glabrum</i>	76	0.65
Ana Caspi	<i>Apuleia leiocarpa</i>	69	0.80
Bolaina	<i>Guazuma crinita</i>	38	0.41
Cachimbo Rojo	<i>Cariniana domestica</i>	69	0.59
Camungo Moena	<i>Vochysia ferruginea</i>	42	0.37
Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	74	0.76
Casho Moena	<i>Aniba coto</i>	59	0.61
Congona	<i>Brosimum alicastrum</i>	55	0.65
Higuerilla	<i>Micrandra spruceana</i>	61	0.40
Huayruro	<i>Ormosia coccinea</i>	58	0.60
Lagarto Caspi	<i>Calophyllum brasiliensi</i>	56	0.56
Leche Caspi	<i>Brosimum utile</i>	55	0.40
Marupa	<i>Simaoruba amara</i>	42	0.36
Moena Blanca	<i>Qualea paraensis</i>	59	0.64
Moena Negra	<i>Ocotea sp.</i>	60	0.41
Nogal	<i>Juglans neotropica</i>	56	0.64
Pino Chileno	<i>Pinus radiata</i>	43	0.34
Pumaquiro	<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	60	0.67
Quina Quina Blanca	<i>Pouteria reticulata</i>	54	0.74
Shihuahuaco	<i>Dypteryx odorata</i>	84	0.87
Tornillo	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	49	0.45
Ulcumano	<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	41	0.41
Yacushapana	<i>Terminalia oblonga</i>	75	0.73

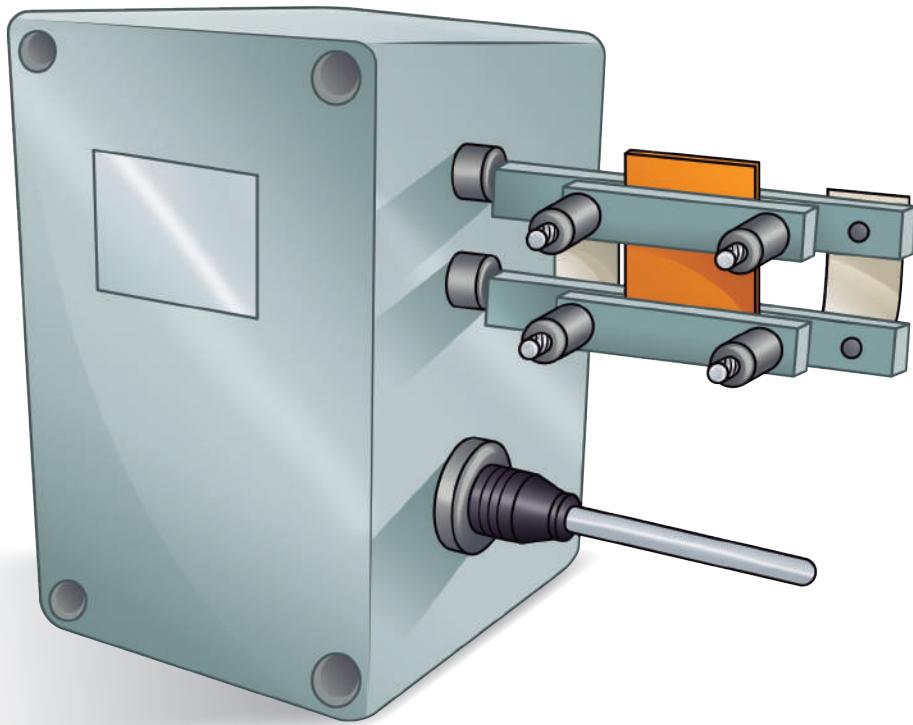
Fuente: CITEmadera. Estudio "Determinación de códigos de higrómetro para la medición de la humedad de 23 especies comerciales del Perú". 2016.

## 2.5. Contenido de humedad del equilibrio de la madera (CHE)

La humedad de equilibrio es la humedad que alcanza una madera cuando está expuesta un tiempo suficientemente largo a un clima determinado. El CHE es muy importante porque es una de las variables fundamentales que se controlan en una cámara durante el proceso de secado convencional. El CHE de una cámara de secado en un momento dado, indica que las condiciones de temperatura y humedad relativa establecidas dentro de la misma generarán un ambiente que hará secar la madera a ese nivel de CHE. Al interior de la cámara, el CHE se determina normalmente midiendo la resistencia eléctrica de una lámina delgada de madera (*Terminalia superba*) o con un papel especial de celulosa.

La parte superior de la Ilustración 9 muestra la medición del CHE con una placa de celulosa (en la parte inferior de la misma se puede observar el PT100 para la medición de la temperatura del bulbo seco). Como la humedad relativa depende de la temperatura es importante que ambas mediciones se tomen sobre el mismo sitio.

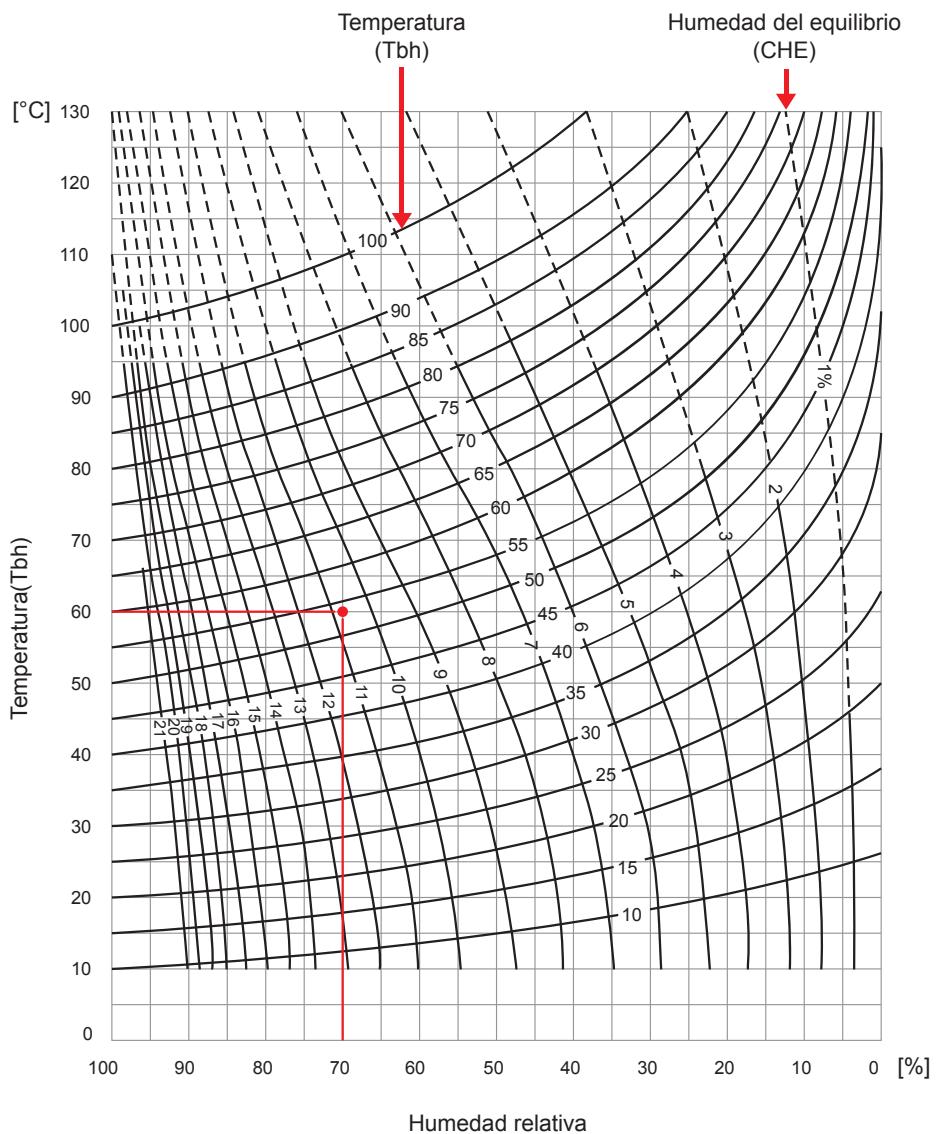
Ilustración 9. Estación de medición de temperatura y contenido de humedad de equilibrio



Todas las relaciones entre el CHE; HR; Tbs y Tbh se pueden observar en el Diagrama de Keylwerth (Gráfico 2). Este diagrama fue desarrollado para la madera de Abeto (*Picea sitchensis*) pero es válido con menor exactitud para otras especies. El diagrama de Keylwerth es la base para el desarrollo de programas de secado porque indica la relación existente entre el contenido de humedad de equilibrio de la madera, la temperatura y la humedad relativa del aire.

También existen tablas donde se refleja este diagrama, como por ejemplo la que se muestra en la Tabla 6.

Gráfico 2. Diagrama de Keylwerth.



Fuente: Keylwerth, R.: Betriebsblatt 1, Sorptionsgleichgewicht von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) Heft 1, S. 31

Ejemplo:

$$T = 60^\circ\text{C}, HR = 70\% \longrightarrow \text{CHE} = 11\%$$

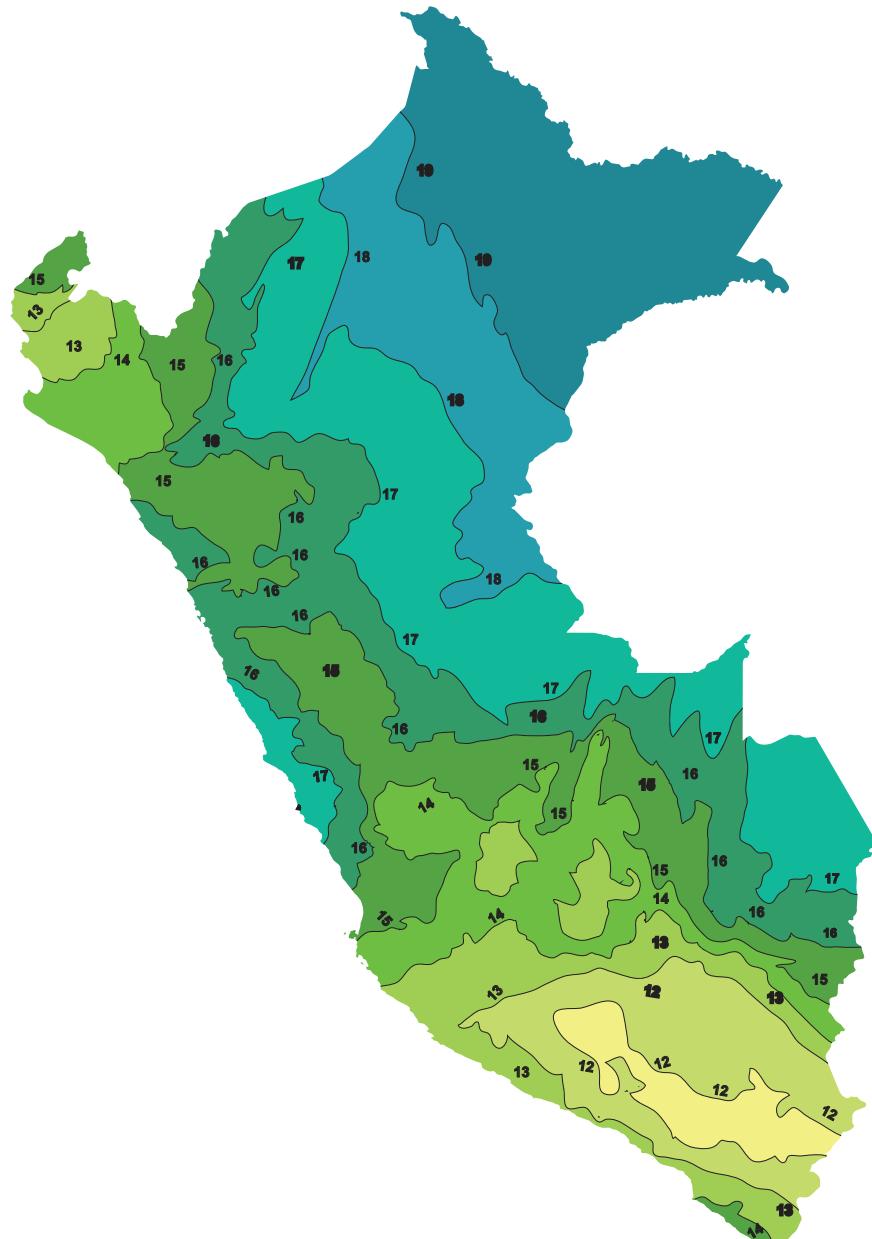
Tabla 6. Contenido de humedad de equilibrio de la madera según temperatura y humedad relativa

Temperatura		Contenido de humedad de equilibrio (%) a diferentes valores de humedad relativa																		
°C	(°F)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	30	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	40	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	50	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	60	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	70	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	80	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	90	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	100	1.2	2.4	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	110	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	120	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	130	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	140	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	150	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	160	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	170	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	180	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	190	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	200	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	210	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	220	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	230	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	240	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	250	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	260	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	270	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

Fuente: United States Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory  
"Wood Handbook, Wood as an Engineering Material". Wisconsin, USA. 2010.

La recopilación histórica de registros de temperatura y humedad relativa de diversos lugares permiten desarrollar mapas del Contenido de Humedad de Equilibrio muy útiles para identificar con facilidad a qué humedad debemos secar la madera según el lugar donde prestarán servicio los productos elaborados a partir de ella. La ilustración 10 es un ejemplo de ello.

Ilustración 10. *Mapa de contenido de humedad de equilibrio del Perú (promedio anual).*<sup>3</sup>



Fuente: CITEmadera y SENAMHI. Elaboración propia.

3 Estudio preliminar en base a registros climáticos del SENAMHI de los últimos 20 años. Validación de información se encuentra en proceso.

## 2.6. Punto de saturación de fibra (PSF)

El Punto de Saturación de Fibra (PSF) indica el contenido de humedad en el que las fibras de la madera están saturadas de humedad y los lúmenes celulares están libres de agua. Este valor varía en cada especie, fluctuando para la mayoría de las mismas entre 22 y 34% de CH. Tiene una relación inversamente proporcional a la densidad de la madera (Mayor densidad menor PSF). Hay casos muy especiales como la madera Topa o Balsa cuyo PSF es de 34% debido a su baja densidad (DB = 0.13 g/cm<sup>3</sup>) o el Ishpingo que alcanza un PSF = 19% por la presencia de contenidos dentro de su estructura celular.

El PSF es muy importante para el manejo de las condiciones climáticas del secado. Por encima del PSF se deben aplicar condiciones mucho más suaves por el peligro de que se produzca un endurecimiento superficial de la madera (y por consiguiente colapso). Por debajo del PSF, la madera soporta condiciones mucho más fuertes, mayor temperatura y menor Contenido de Humedad de Equilibrio - CHE.

La tabla 7 contiene valores del PSF de algunas especies investigadas por el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo – CIRAD; también muestra valores del PSF estimados de manera teórica en base a una fórmula que ha sido publicada en la Revista Chapingo de México, por lo que estos últimos deben considerarse sólo como referenciales.

## 3. MOVIMIENTO DEL AGUA EN LA MADERA

La madera es un material higroscópico, lo que significa que puede absorber humedad del aire y fijarla en sus fibras, de igual modo puede liberar humedad cuando el aire que la rodea es suficientemente seco.

El agua que no está fijada en las fibras (agua libre) se encuentra en los lúmenes celulares y es liberada con facilidad. Por el contrario, el agua que está fijada en las paredes de las células (agua ligada) resiste mucho más a la desorción (disminución de humedad de la madera) y requiere de energía en forma de calor para poder ser liberada. Durante el proceso de secado, cuando la madera se encuentra por encima del punto de saturación de fibra solo se libera agua libre, mientras que por debajo de este punto se elimina agua ligada. La ilustración siguiente muestra el movimiento del agua de la madera conforme va disminuyendo su humedad.

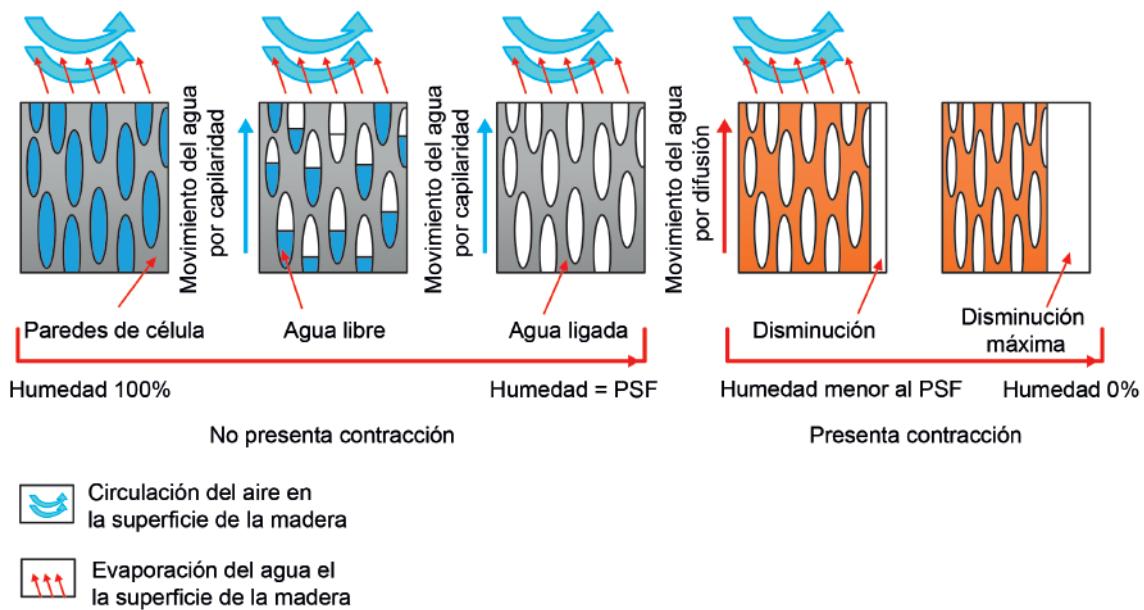
Tabla 7. PSF para 37 especies maderables

Nº	Nombre común	Nombre científico	Densidad al 12% [g/cm3]	Densidad básica	Contracción volumétrica [%]	PSF [%] <sup>4</sup>
1	Aliso	<i>Alnus jorullensis</i>	0.42	-	14.30	30.00
2	Ana Caspi	<i>Apuleia leiocarpa</i>	0.93	0.83	14.00	22.00
3	Azucar Huayo	<i>Hymenaea parvifolia</i>	0.94	0.80	11.70	23.00
4	Bolaina	<i>Guazuma crinita</i>	0.46	0.41	10.75	29.13
5	Cachimbo	<i>Cariniana domestica</i>	0.66	0.59	12.06	22.71
6	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0.85	0.76	15.00	21.93
7	Catahua	<i>Hura crepitans</i>	0.46	0.41	9.00	24.39
8	Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	0.46	0.42	10.13	29.00
9	Chonta Quiro	<i>Dipterocarpus martiusii</i>	0.83	0.74	10.60	24.00
10	Copaiba	<i>Carapa guianensis</i>	0.68	0.61	10.70	27.00
11	Copal	<i>Protium sp</i>	0.64	-	16.05	28.00
12	Cumala	<i>Virola sp</i>	0.50	0.45	13.40	34.00
13	Estoraque	<i>Myroxylon balsamum</i>	0.87	0.78	9.97	14.20
14	Goma Pashaco	<i>Parkia nitida</i>	0.47	-	9.99	29.00
15	Huayruro	<i>Ormosia coccinea</i>	0.68	0.61	9.40	24.00
16	Ishpingo	<i>Amburana cearensis</i>	0.48	0.43	7.60	19.00
17	Lagarto Caspi	<i>Calophyllum brasiliense</i>	0.63	0.56	9.40	18.65
18	Moena Amarilla	<i>Aniba puchury-minor</i>	0.56	0.56	9.40	18.65
19	Marupa	<i>Simarouba amara</i>	0.40	0.36	8.60	32.00
20	Mashonaste	<i>Clarisia racemosa</i>	0.63	0.56	9.40	18.65
21	Ocotal	<i>Pinus montezumae</i>	0.42	-	10.70	36.00
22	Panguana	<i>Brosimum utile</i>	0.55	0.49	9.69	21.97
23	Pashaco	<i>Schizolobium parahibum</i>	0.30	0.40	9.39	33.10
24	Pino Real Americano	<i>Pinus ponderosa</i>	0.39	-	10.67	30.55
25	Pumaquiro	<i>Aspidosperma sp</i>	0.75	0.67	12.40	26.00
26	Quina Quina	<i>Pouteria sp.</i>	0.83	0.74	14.20	21.32
27	Quinilla Colorada	<i>Manilkara bidentata</i>	0.86	0.84	12.24	23.00
28	Requia	<i>Guarea kunthiana</i>	0.67	0.60	14.90	27.59
29	Shihuahuaco	<i>Dipteryx odorata</i>	0.97	0.87	15.00	22.00
30	Shiringa	<i>Hevea sp</i>	0.65	-	7.92	24.00
31	Tahuari	<i>Tabebuia serratifolia</i>	1.03	0.92	13.85	20.00
32	Topa	<i>Ochroma pyramidale</i>	0.14	0.13	7.51	34.00
33	Tornillo	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	0.50	0.45	10.65	29.00
34	Ulcumano	<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	0.59	0.53	9.00	18.87
35	Yacushapna	<i>Terminalia amazonia</i>	0.82	0.73	12.40	25.00
36	Yanchama	<i>Pouselnia armata</i>	0.49	0.44	10.80	27.27
37	Zapote	<i>Matisia cordata</i>	0.48	0.43	11.80	30.49

Fuente: CIRAD, CITEADERA. Elaboración: CITEADERA

<sup>4</sup> Los valores enteros (\*\*.00) han sido determinados por el CIRAD. Los valores con decimales han sido calculados con la fórmula PSF=(contracción volumétrica/(densidad básica x 0.9)), según nota científica publicada en la Revista Chapingo.

Ilustración 11. Movimiento del agua en la madera durante el secado



Durante el proceso de secado, el agua libre y parte del agua higroscópica (agua ligada) de la madera son removidas simultáneamente de la siguiente forma:

- **Evaporación del agua de la superficie** de la madera.
- Desplazamiento del agua dentro de la madera, desde el interior hacia el exterior de la misma, por **capilaridad** (por encima del PSF) y **por difusión** (por debajo del PSF).

Por encima del PSF, el agua se mueve por capilaridad. Este principio físico permite el movimiento del agua libre desde el interior hacia el exterior de la madera, como consecuencia de las fuerzas de atracción que se originan al evaporarse el agua de su superficie. Así el agua libre se mueve rápidamente por capilaridad y no genera tensiones ni cambios dimensionales en la madera.

Por debajo del PSF, el agua higroscópica se mueve por difusión a través de las paredes celulares, fenómeno provocado por las diferentes gradientes de presión y humedad de las células. En este caso, el movimiento ocurre de zonas más húmedas a zonas más secas hasta alcanzar la superficie de la madera.

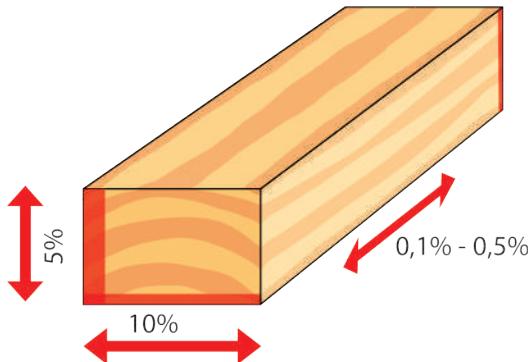
Por ello se dice que la madera seca desde adentro hacia afuera, siendo muy importante tener en cuenta las características anatómicas de las especies para conocer las dificultades que podría tener el movimiento del agua ya sea por la presencia abundante de gomas o tilosis, tamaño y cantidad de poros, entre otros.

Cabe resaltar que la circulación o movimiento del agua en el eje longitudinal se produce con mayor facilidad que en los otros dos ejes, es por esto que durante el secado los extremos de las tablas tienden a agrietarse, siendo necesario protegerlos con pintura látex simple o con cola, parafina o esmalte sintético. Con esto se evita la pérdida brusca de humedad por los extremos y los defectos como consecuencia de esto.

#### 4. CONTRACCIONES

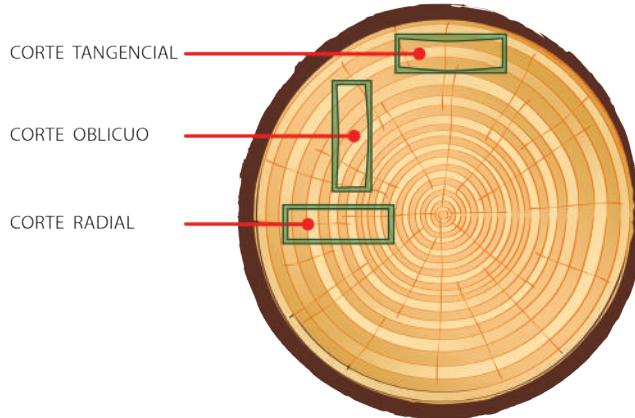
Mientras haya agua libre en los lúmenes celulares, las fibras se mantendrán húmedas y las dimensiones de la madera no cambiarán. Por debajo del PSF, la eliminación del agua higroscópica o ligada origina una contracción de las paredes celulares de las fibras y por consiguiente una reducción de las dimensiones de la madera. Si el secado se efectuara hasta un  $\text{CH}=0\%$  (anhidro) se produciría el máximo cambio dimensional (contracción) posible en las piezas de madera (Ilustración 12).

Ilustración 12. *Valor máximo de la contracción de la madera según el sentido de la fibra.*



El cambio dimensional siempre es mayor en la cara tangencial, siendo aproximadamente 1.5 a 2.5 veces la contracción radial, mientras que la contracción longitudinal, al ser mínima, se considera despreciable. La contracción siempre sigue la orientación de los anillos de crecimiento, la ilustración 13 muestra las diferentes deformaciones que se producen en la madera de acuerdo al tipo de corte.

Ilustración 13. *Deformaciones de la madera de acuerdo al tipo de corte*



Normalmente las contracciones que se producen en una pieza de madera corresponden solamente a la mitad de los valores máximos indicados en la Ilustración 12, porque la mayoría de las maderas tienen un PSF entre 22% y 36% y el CHE en el lugar final de su uso es alrededor de un  $\text{CH}=12\%$ . A continuación se puede apreciar un ejemplo de cálculo:

Se tiene una pieza de “Decking” en corte tangencial con las siguientes características:

#### Decking Seco al 12 % y cepillado

Espesor final : 19mm

Ancho final : 140mm



Para obtener las dimensiones del decking seco sin cepillar debemos sumar la merma que se produce en las operaciones de garlopeado y cepillado:

$$19\text{mm} + 5\text{mm} = 24\text{mm}$$

$$140\text{mm} + 6\text{mm} = 146\text{mm}$$

#### Decking Seco al 12 % y sin cepillar

Espesor : 24mm

Ancho : 146mm



Para obtener las dimensiones de las tablillas húmedas y sin cepillar necesarias para la fabricación del decking debemos sumar la contracción que se produce en la operación del secado:

Contracción radial (5%)

Fracción de Contracción desde PSF(29%) hasta CH=12%

$$24\text{mm} + (24\text{mm} \times 0,05 \times \frac{29-12}{29}) = 25\text{mm}$$

Contracción tangencial (10%)

Fracción de Contracción desde PSF(29%) hasta CH=12%

$$146\text{mm} + (146\text{mm} \times 0,1 \times \frac{29-12}{29}) = 155\text{mm}$$

#### Decking húmedo (>36%) y sin cepillar

Espesor : 25mm

Ancho : 155mm



## 5. GRADIENTE DEL SECADO (GS)

El gradiente del secado GS es un valor que ayuda mucho al manejo de los programas del secado. Indica la intensidad del secado de la madera y se define como la relación entre el CH actual de la madera y el CHE de la cámara.

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

Esta fórmula solamente es válida cuando el CH es menor o igual al PSF de la madera a secar. Cuando el CH es mayor al PSF, no existe equilibrio higroscópico con el aire, por lo que el GS se calcula con la siguiente fórmula:

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

**Ejemplo: Estamos secando la madera “Huayruro” (PSF=24%) en 2 hornos con las siguientes condiciones:**

### Horno 1

Temperatura: 50°C

CHE: 15%

CH: 45%

### Horno 2

Temperatura: 60°C

CHE: 7%

CH: 22%

En el horno 1 el CH > PSF, entonces el GS = PSF/CHE = 24/15 = 1.6

En el horno 1 el CH ≤ PSF, entonces el GS = CH/CHE = 22/7 = 3.1

Dependiendo de la especie y el espesor, el GS puede variar entre 1.5 y 4.5. Si es muy bajo, el tiempo de secado se prolongará innecesariamente; si es demasiado alto, el secado se acelerará pero pueden generarse diferencias grandes de CH en el perfil transversal de la madera, lo que ocasiona un endurecimiento superficial y la aparición de grietas internas en los extremos de las piezas.

En la Tabla 8 se presentan los valores de GS recomendados por la empresa “Hildebrandt” para 14 especies maderables peruanas en diferentes espesores.

Tabla 8. Valores de GS recomendados por la empresa "Hildebrandt" para 14 especies de madera peruanas

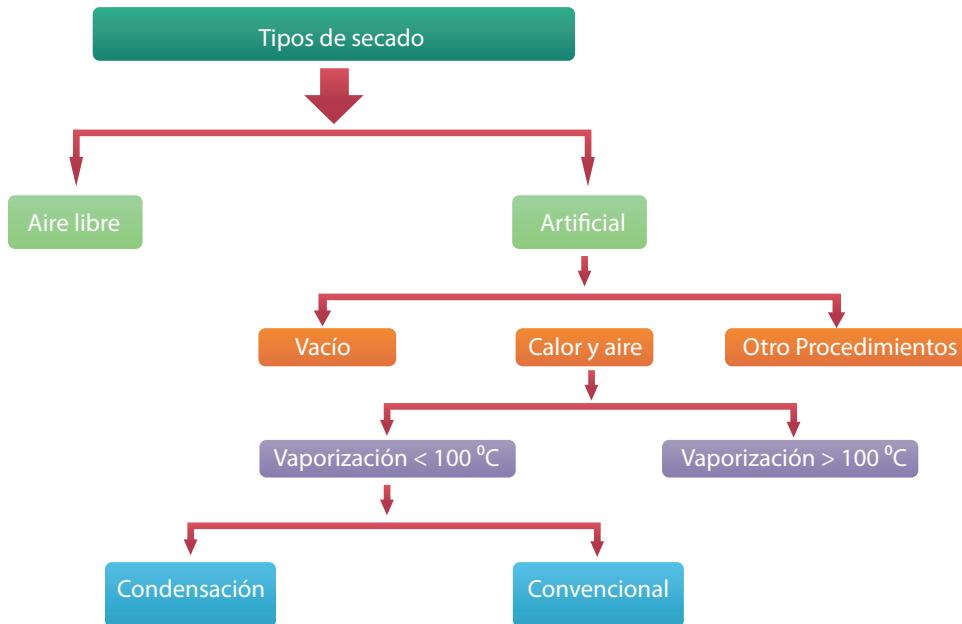
Nombre común	Nombre botánico	Densidad básica [g/cm <sup>3</sup> ]	CHE de calentamiento [%]	Temperatura del bulbo seco °C						Gradiente de secado (GS)					
				Por encima del PSF			Por debajo del PSF			Por encima de la madera		Por debajo de la madera			
				≤30mm	35-60mm	≥60mm	≤30mm	35-60mm	≥60mm	≤30mm	35-60mm	≥60mm	≤30mm		
Palo Violeta	<i>Peltogyne paniculata</i>	0.83	18	50	45	45	70	65	60	2.2	2.2	2.0	2.6	2.4	2.4
Andiroba	<i>Carapa guianensis</i>	0.59	17	60	55	50	70	65	65	2.8	2.6	2.4	3.8	3.6	3.4
Catahua	<i>Hura crepitans</i>	0.39	16	60	60	55	75	70	65	3.6	3.4	3.2	4.4	4.4	4.4
Cumala	<i>Virola surinamensis</i>	0.41	17	60	55	55	80	75	70	3.2	3.0	2.8	4.2	4.0	3.8
Estorache	<i>Myroxylon balsamum</i>	0.88	18	45	40	40	60	55	55	2.4	2.2	2.0	2.6	2.4	2.2
-Topa	<i>Ochroma pyramidalis</i>	0.13	16	75	70	80	90	90	80	3.8	3.6	3.4	4.4	4.4	4.4
Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	0.77	18	35	35	30	50	50	50	2.4	2.2	2.0	3.0	2.8	2.6
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	0.42	17	60	55	55	80	75	70	3.4	3.2	3.0	4.4	4.4	4.4
Lupuna	<i>Ceiba pentandra</i>	0.27	16	75	70	80	80	80	80	3.6	3.4	3.2	4.4	4.4	4.4
Azúcar Huayo	<i>Hymenaea courbaril</i>	0.83	18	50	45	45	70	65	60	2.4	2.2	2.0	2.6	2.4	2.2
Tahuari	<i>Tabebuia serratifolia</i>	1.03	18	40	35	35	60	60	55	2.2	2.2	2.2	2.6	2.4	2.4
Lagarto Caspi	<i>Calophyllum brasiliense</i>	0.56	17	40	35	35	60	60	55	3.2	3.0	2.8	4.0	3.8	3.6
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	0.58	17	55	50	50	80	75	70	2.8	2.6	2.4	3.6	3.4	3.2
Quinilla Colorada	<i>Manilkara bidentata</i>	0.96	18	40	35	35	60	55	50	2.4	2.2	2.0	2.6	2.4	2.2

Fuente: Robert Hildebrandt Maschinenbau GmbH

## 6. MÉTODOS DE SECADO

Para el secado de madera de espesores entre 12 y 55 mm se usa principalmente el secado convencional con ventilación transversal, sin embargo, en la siguiente ilustración se muestran algunos otros métodos, además de describir brevemente sus usos y limitaciones.

Gráfico 3. *Métodos de secado*



### Secado al vacío

Para espesores mayores a 55 mm y para maderas susceptibles a cambio de color.

### Secado con lámparas infrarrojas

Por la baja penetración solamente usado para láminas (chapas) muy delgadas.

### Secado con Alta frecuencia (Radiofrecuencia)

Por el alto costo de la energía eléctrica y de la inversión inicial solamente se justifica para piezas muy gruesas ( $e > 80\text{mm}$ ) y de longitudes cortas ( $l < 2500\text{mm}$ ).

### Secado con vapor mayor a 100° C

Solamente es aplicado a coníferas fáciles a secar.

### Secado con condensación

Es utilizado en maderas que son difíciles de secar por debajo de 15% de CH.

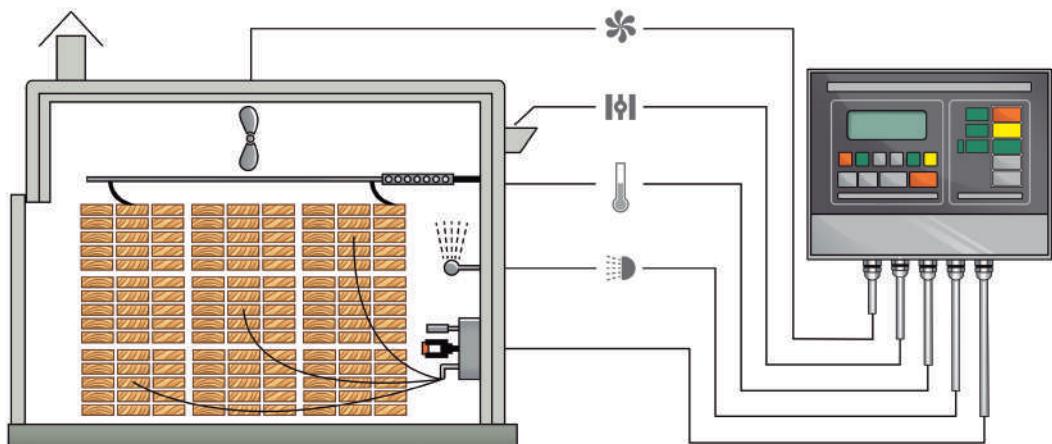
### Secado convencional con ventilación longitudinal

Para cargas pequeñas, uso de separadores especiales.

## Secado convencional con ventilación transversal

El secado convencional también se conoce como el secado con intercambio de aire húmedo y aire seco. Las ventanas mostradas en el gráfico siguiente (depresión) se encargan de la entrada de aire seco, que con el calentamiento se pone más seco aún. Mientras la madera va eliminando humedad durante el secado, el aire seco absorbe esta humedad, evacuándose luego el aire húmedo a través de las otras ventanas (presión).

Ilustración 14. Típica configuración de una cámara convencional



## 7. PREPARACIÓN DEL SECADO

### 7.1. Presecado

El secado al aire libre ayuda a reducir considerablemente los tiempos de secado porque se elimina una parte del agua libre que también en el secado artificial tomaría mucho tiempo por las condiciones suaves que exige esta fase.

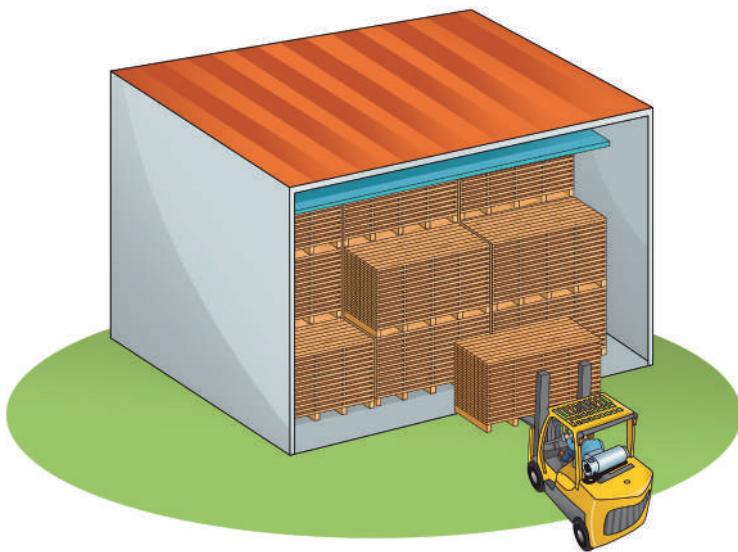
Sin embargo, es necesario aplicar algunas medidas de precaución como la protección contra la lluvia y el sol, orientación de los paquetes hacia la dirección del viento, distanciamiento suficiente hacia el suelo, eliminación de vegetación del suelo, terreno suficientemente firme para evitar hundimiento de los paquetes de madera, apilamiento de paquetes con una altura total máxima de tres veces el ancho de los mismos (3 a 1), entre las más importantes.

Hay que tener presente que el secado por debajo del PSF es bastante lento; además, es imposible secar la madera a una humedad inferior al CHE del lugar del presecado.

### 7.2. Armado de paquetes

El ancho de los paquetes normalmente está entre 1.0 y 2.0m, dependiendo en parte del tipo de carguío (montacarga / carro) utilizado para el llenado de la cámara, siendo típicamente de 1.25m. Considerando la regla de 3 a 1 se alcanza normalmente una altura interna de la cámara (hasta el cielo raso o falso techo) de 4.20m, que es la que generalmente presentan aquellas de volumen superior a 50m<sup>3</sup>.

Ilustración 15. Llenado correcto de cámara de secado



Se debe tratar de formar paquetes lo más uniformes posible en relación a los siguientes aspectos:

- No mezclar especies, de lo contrario, se debe ubicar sensores en las maderas más difíciles de secar.
- No mezclar diversos espesores, de lo contrario, hay que conducir el secado hacia la madera de mayor espesor y aceptar que la humedad final de la madera de menor espesor va a ser inferior.
- No mezclar maderas con humedades iniciales muy diferentes, de lo contrario, hay que tener presente que esta diferencia no se va a homogenizar completamente durante el secado.

### 7.3. Separadores

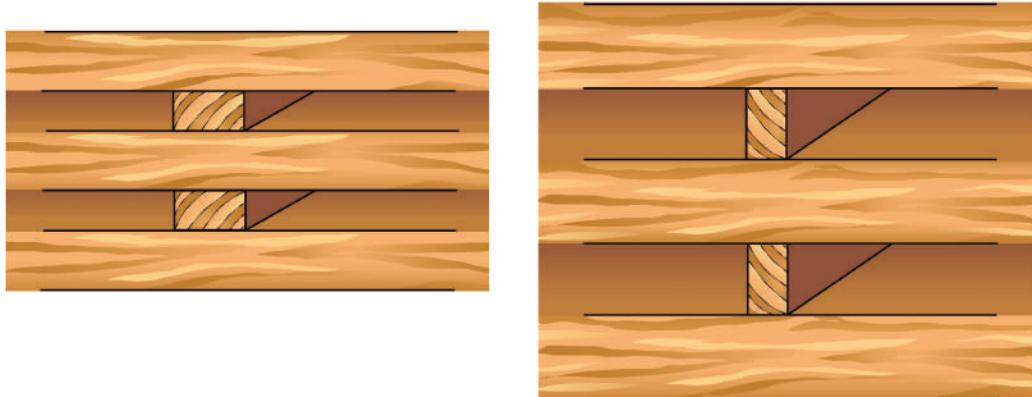
El espesor de los separadores a utilizar para el armado de paquetes dependerá del espesor de la madera a secar, en teoría se debe seguir la siguiente regla:

Espesor de piezas (mm)	Espesor de separadores (mm)
<20	20
20-25	25
40-50	30
50-65	35
65-80	40

Fuente: Norma andina NA 0049  
"Madera. Procedimientos para el secado artificial de madera húmeda (verde)". 2008

De forma práctica es recomendable utilizar separadores de 20 mm x 30 mm de sección. Para tablas de espesor menor a 30 mm se debe utilizar como altura del separador el lado de 20 mm, mientras que para tablas de espesor entre 30 mm y 50 mm se debe utilizar el lado de 30mm (ilustración 16).

Ilustración 16. Detalle de colocación de separadores en paquetes o rumas

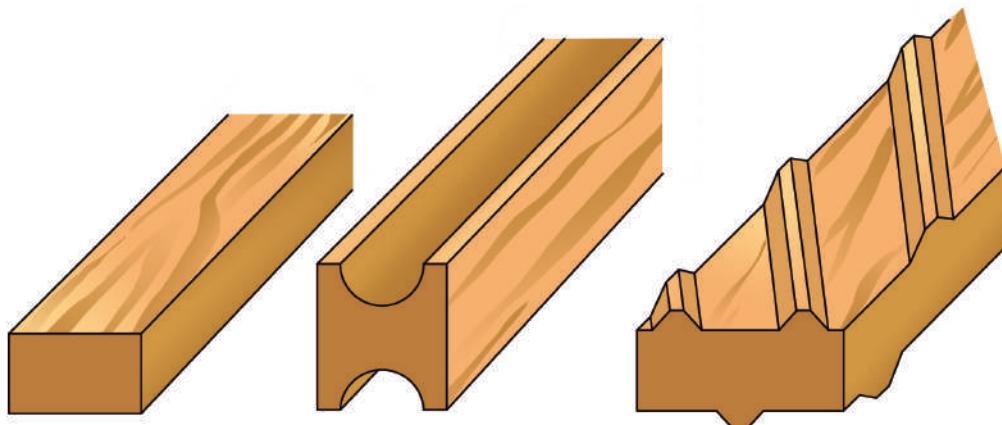


Es común que algunas empresas tengan separadores de 1.9 x 1.9 cm de sección, y aunque esto no es lo recomendable, se pueden apilar uno con otro para alcanzar una separación de 38 mm entre tablas para el secado de madera gruesa.

Cuando los separadores son preparados de madera húmeda de recuperación hay que usarlos solamente en el primer secado de esa forma. Recién una vez secos deben ser cepillados a la medida y forma final.

Muchas veces el contacto con los separadores produce manchas en las tablas de madera, así como zonas donde se concentra la humedad, existen diferentes tipos de separadores que disminuyen el área de contacto:

Ilustración 17. Detalle de diferentes tipos de separadores



Por otro lado, la distancia entre los separadores dependerá del espesor de la pieza, en teoría se debe seguir la siguiente regla:

Espesor de piezas (cm)	Distancia entre separadores (cm)
<20	30-40
20-25	40-50
40-50	50-60
50-65	70-80
65-80	90

Fuente: Norma andina NA 0049  
"Madera. Procedimientos para el secado artificial de madera húmeda (verde)". 2008

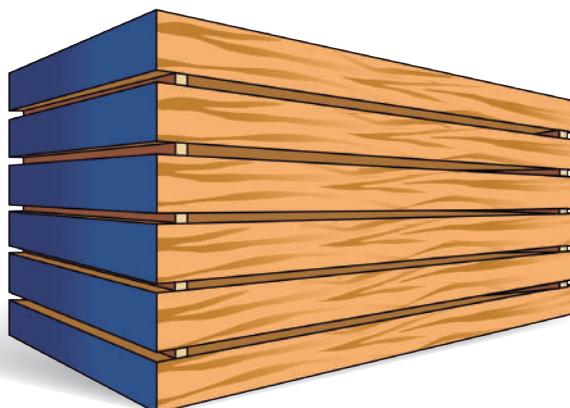
De forma práctica se puede utilizar una separación de 50 cm para secar madera de entre 25mm y 50 mm de espesor. Es importante respetar este distanciamiento en todos los paquetes, en el caso de que en uno de los extremos haya menos distancia se debe colocar una línea de separadores adicional, de esta manera es posible colocar paquetes de diferentes largos unos encima de otros y que se mantenga la alineación de los separadores.

Los separadores deben estar perfectamente alineados en dirección vertical y espaciados unos con otros de acuerdo a lo recomendado, lo que es indispensable para evitar el combado y revirado de las piezas. Esto también evita el bloqueo del paso del aire entre las filas de la carga cuando los separadores tienen espesor irregular. La primera y la última fila de separadores deben estar lo más cerca posible de los extremos de las tablas para evitar el "voladizo", que ocasiona el agrietamiento y rajado de las testas.

Es importante que las tablas que se van a secar tengan un espesor uniforme, con pocas variaciones entre ellas (+/- 1mm), el aserrío preciso de la madera es vital para formar paquetes de la misma altura que permitan que el aire circule adecuadamente entre las tablas. En casos extremos donde exista demasiada variación del espesor, es recomendable igualar los espesores en una cepilladora.

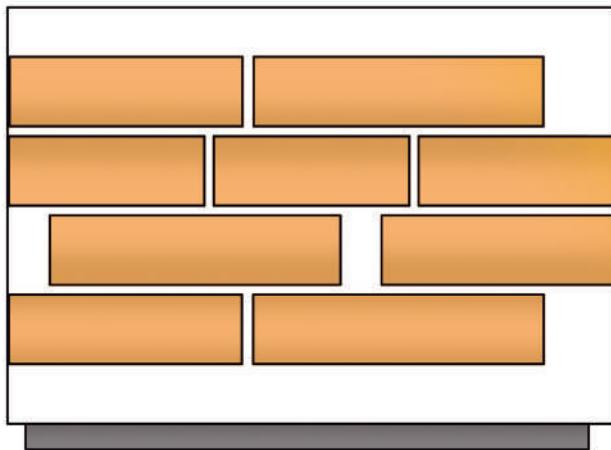
Se debe proteger los extremos o testas de las tablas para evitar que se agrieten. Esta protección se consigue aplicando sobre los extremos de las tablas pintura látex simple o con cola, parafina, cera o pintura acrílica.

Ilustración 18. *Ejemplo de protección de extremos en tablas*



Como el aire fluye por las zonas por donde existe menor resistencia (espacios vacíos), es necesario llenar la cámara completamente. Si esto no es posible, es muy importante tapar las áreas libres, puede ser colocando compuertas laterales o alineando los paquetes de manera alternativa con las paredes laterales de la cámara (Ilustración 19). Es preferible tener muchos espacios pequeños que uno grande

Ilustración 19. *Llenado correcto de las cámaras de secado (vista de planta)*



En maderas de baja densidad, especialmente coníferas, un apoyo mecánico (peso) ayuda a prevenir la deformación de las piezas. Este apoyo puede ser, otros paquetes colocados encima, placas de concreto (entre 0.4 a 1 t/m<sup>2</sup>) o madera gruesa defectuosa.

## 8. MEDICIÓN Y CONTROL

### 8.1. Sensores para medición del contenido de humedad (CH)

Mientras más sensores para la medición de la humedad tenga la cámara, mayor y mejor información tendremos sobre el comportamiento de la humedad dentro de la misma. La mayoría de las cámaras poseen 8 sensores, los que deben ser distribuidos en toda la carga, lo ideal es seguir una diagonal espacial dentro de la misma.

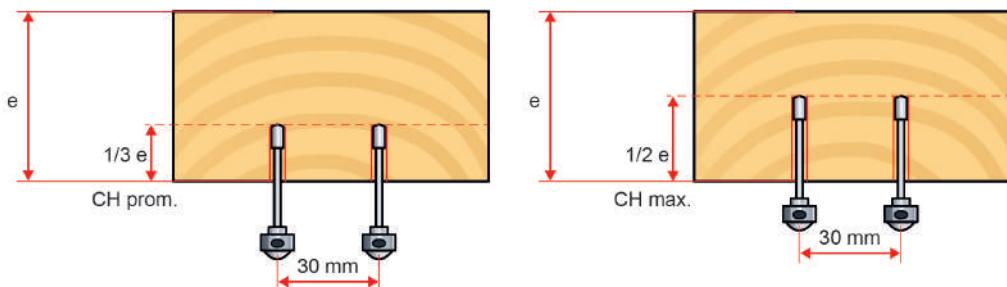
Especialmente en madera con un espesor mayor a 25mm, es recomendable colocar contactos superficiales (5mm de profundidad para el CH mínimo) y profundos (a la mitad del espesor para el CH máximo) para el monitoreo de la gradiente de humedad durante el proceso de secado.

Normalmente una carga de secado debería ser de una sola especie de un mismo espesor. Sin embargo, si no se puede cumplir con esa regla los sensores de humedad deben colocarse sobre las tablas que esperamos demoren más en secar (las más húmedas, las de mayor densidad, las de mayor espesor y las más anchas).

Cada par de electrodos debe mantener una distancia mínima de 50cm con respecto a los extremos de las tablas, debiendo ser colocados de manera perpendicular a las fibras y con una separación entre electrodos de 30 mm (ilustración 20).

Los electrodos deben ubicarse en la parte inferior de las tablas para evitar lecturas falsas de la humedad producidas por una posible condensación durante el proceso.

Ilustración 20. *Ejemplo de colocación de sensores en madera para medición de CH.*

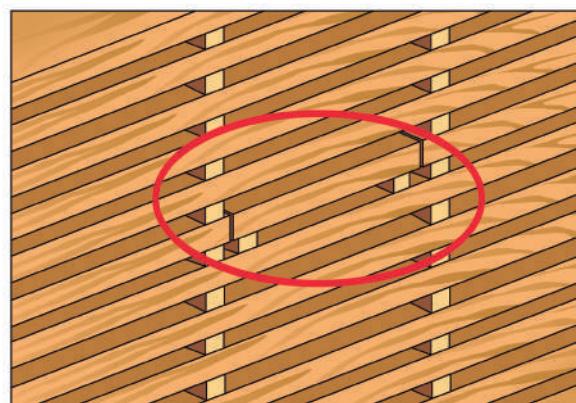


## 8.2. Muestras para el control del contenido de humedad (CH)

El pesaje periódico de muestras de control de madera, realizado conforme al método gravimétrico descrito en la parte 2.4.1 de este manual, es una forma bastante confiable de determinar el CH de la madera durante el proceso de secado. Hace algún tiempo, fue la única forma de controlar el secado y hoy en día se utiliza también para verificar la confiabilidad de las lecturas que proporcionan los sensores de humedad de la cámara.

Una vez determinada la humedad inicial con las probetas y el peso inicial del testigo o muestra control (con los extremos bien sellados), esta última se coloca dentro de la cámara en la misma posición que las tablas a secar (ilustración 21).

Ilustración 21. *Ubicación de la muestra de control en la ruma de madera*



El testigo es sacado periódicamente del horno y se debe determinar la humedad actual de la madera con la fórmula siguiente.

$$CH_{act} = (M_{act} (CH_{inic} + 100) / M_{inic}) - 100 [\%]$$

### 8.3. Verificación de la cámara de secado

Como es difícil de interferir en el equipamiento una vez iniciado el proceso de secado, es muy importante revisar los siguientes puntos, especialmente lo referente a la humidificación, ya que este es un punto sensible por el frecuente taponeo de los aspersores (cal, suciedad):

- Revisar válvulas de ingreso de agua.
- Revisar y limpiar los aspersores. Es común que se “taponen”.
- Cambio de la placa de celulosa / verificación del bulbo húmedo.
- Verificar disponibilidad de combustible.
- Revisar el funcionamiento de ventiladores y ventilas.
- Revisar el funcionamiento de la caldera.
- Verificar cierre hermético de puertas.
- Verificar conexión correcta de los sensores de humedad de la madera.
- Verificar el buen estado de las paredes del horno

### 8.4. Conducción del secado

Teniendo en cuenta la especie y espesor de la carga de madera que será secada, el operador debe encender el horno y manejar el controlador para mantener las condiciones climáticas apropiadas para el secado de dicha carga.

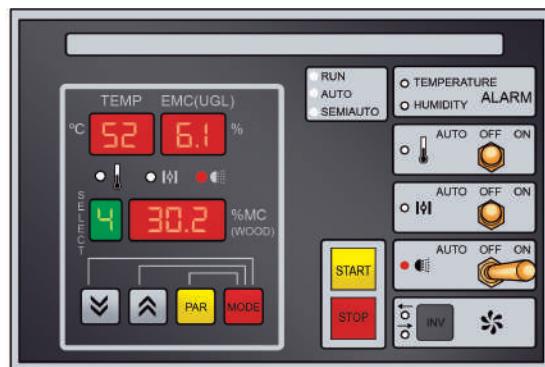
El operador debe vigilar que las condiciones reales se aproximen a las que se han programado y debe estar atento a cualquier caída o incremento excesivo de temperatura y humedad en la cámara. Periódicamente, el operador debe ingresar al horno y observar si han aparecido defectos en la madera, sobre todo después de programar un incremento de temperatura.

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

**Manual:** De acuerdo a la humedad de la madera se abren y cierran manualmente las válvulas de la calefacción, aspersión de agua y ventilas para alcanzar las condiciones deseadas en la cámara.

Humidificación en el horno en modo manual: perillas de calefacción y ventilas apagadas “off”, perilla de aspersión de agua encendida “on”.

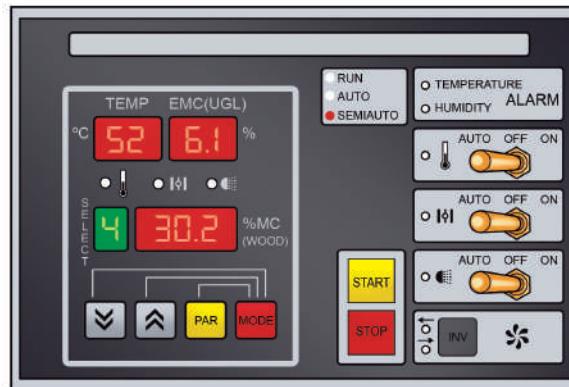
Ilustración 22. Controlador en modo manual



**Semiautomático:** Con un controlador en modo semiautomático, en cada etapa del secado se establecen los valores de CHE y temperatura que se desean alcanzar al interior de la cámara. El equipo se encarga de forma automática de controlar las válvulas para alcanzar estos valores fijados. En esta modalidad, cuando se quiere pasar a la siguiente etapa de secado se fijan los nuevos valores de CHE y temperatura que se esperan alcanzar.

Los controladores disponen de la posibilidad de cambiar al modo manual y así poder cambiar las condiciones en la cámara si se detecta un comportamiento no deseado.

Ilustración 23. Controlador en modo semiautomático



**Automática:** En el modo automático se selecciona un programa de secado que está en la memoria del controlador. El controlador se encarga de establecer y mantener de forma automática las condiciones determinadas en cada etapa de secado, pasando de una etapa a la siguiente cada vez que se alcanzan ciertos valores preestablecidos (pueden ser condiciones ambientales, tiempo o humedad de la madera).

Independientemente del “modo”, los controladores permiten manejar de forma manual e individual cada válvula para poder cambiar las condiciones en la cámara si se detecta un comportamiento no deseado.

Los valores de T y CHE son alcanzados y mantenidos de manera automática de acuerdo a un programa de secado seleccionado.

Ilustración 24. Controlador en modo automático



A continuación se muestra como ejemplo el programa de secado para Melina (*Gmelina arborea*). Con el controlador en modo automático la condición de cada fase o etapa del programa se mantendrá hasta que la madera alcance el CH programado en la misma. Así, por ejemplo en la etapa de secado, el tiempo de establecimiento de 4h indica que a la cámara le tomará dicho tiempo para alcanzar las condiciones programadas ( $T = 50^{\circ}\text{C}$  y  $\text{CHE} = 20\%$ ) y estas se mantendrán hasta que la madera disminuya su CH hasta el valor programado de 50%. Una vez alcanzado este valor, las condiciones de la cámara se ajustarán de manera automática según lo programado en la siguiente etapa de secado, en este caso  $T = 55^{\circ}\text{C}$  y  $\text{CHE} = 19\%$ .

Tabla 9. **Programa de secado para melina (*Gmelina arborea*) para espesor de 25mm**

Programa de secado para melina 25mm ( <i>Gmelina arborea</i> )					
Etapa	tiempo de establecimiento [hh.mm <sup>3</sup> ]	Temperatura [°C]	Humedad de equilibrio UGL [%]	Humedad de la madera [%]	Tiempo de mantenimiento [hh.mm]
X Calefacción	3.0	35	20		2.0
	2.0	40	20		2.0
X Secado	4.0	50	20	50	1.0
	2.0	55	19	45	1.0
	2.0	60	18	40	1.0
	2.0	65	17	35	1.0
	2.0	65	16	30	1.0
	2.0	70	15	25	1.0
	1.0	70	14	20	1.0
	1.0	73	13	18	1.0
	1.0	75	12	16	1.0
	1.0	77	11	14	1.0
	1.0	80	10	12	1.0
	2.0	80	8	10	1.0
	2.0	80	6.5	8	1.0
X Igualación	5.0	80	8.0		19.0
X Acondicionamiento	4.0	70	8.0		4.0
O Enfriamiento	8.0	50	8.0		8.0

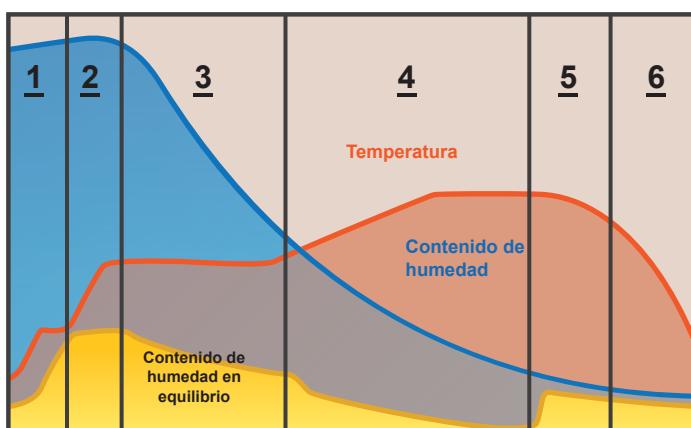
Fuente: Control Leonardo de NARDI

## 8.5. Fases del secado

Normalmente, un secado convencional pasa por las fases siguientes:

1. Calentamiento y penetración de calor
2. Acondicionamiento inicial
3. Secado antes del punto de saturación de fibra
4. Secado después del punto de saturación de fibra
5. Acondicionamiento final
6. Enfriamiento

Ilustración 25. Diagrama de una curva de secado típica



### 8.5.1. Calentamiento y penetración de calor

Durante el calentamiento inicial es sumamente importante controlar la humedad de equilibrio – CHE y manejarla constantemente en un valor elevado (CHE entre 16 y 19%). Hay que impedir totalmente el secado de la madera durante esta fase.

Una vez que la cámara ha alcanzado la temperatura inicial programada, esta solamente ha llegado a la superficie de la madera, por lo que se requiere tiempo adicional para que penetre hasta el centro e iguale todo su perfil.

Hay que calcular entre 1 hora (madera blanda) y 2 horas (madera dura) por cada centímetro de espesor de la madera que se está secando.

### 8.5.2. Acondicionamiento inicial

La madera que ingresa al horno tiene un CH variable, además debido a que 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 homogenizar la humedad de la madera, eliminando así las tensiones de secado. Además, esto favorece 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 el CHE no es alcanzado en el interior de la cámara.

### 8.5.3. Secado antes del punto de saturación de las fibras (PSF)

El secado a humedades superiores al PSF se debe realizar con un clima apacible con valores de temperatura y de CHE casi constantes. El gradiente de secado en esta fase se aplica en base al punto de saturación de fibra. Si el equipo dispone de convertidores de frecuencia para variar la velocidad de los ventiladores, en esta fase debe usarse la velocidad más alta para evacuar la mayor cantidad de humedad posible. Sin embargo, maderas sensibles y de alta densidad pueden exigir sus propios parámetros para no generar defectos.

### 8.5.4. Secado después del punto de saturación de las fibras (PSF)

El secado con humedades inferiores al PSF se deben realizar con un clima mucho más severo. La temperatura debe aumentarse gradualmente hasta alcanzar el valor recomendado para esta fase. El aumento paulatino de temperatura es necesario porque al inicio de esta fase no todas las piezas han llegado aún al PSF, por lo que no debemos forzar la salida del agua para evitar la aparición de defectos. El gradiente del secado ahora se determina en base a la humedad actual de la madera (CH). El valor del GS en esa fase es normalmente 50% a 200% mayor que antes del PSF. Si el equipo dispone de convertidores de frecuencia para variar la velocidad de los ventiladores, en esta fase se usa la velocidad un poco reducida para ahorrar electricidad, porque ya no hay evacuar mucha humedad. Sin embargo, a menor velocidad del aire, menos calor llega a la madera y esto puede reducir la velocidad del secado.

### 8.5.5. Acondicionamiento final

Al final del secado, cuando se ha alcanzado en promedio el CH deseado, la madera posee tensiones entre su superficie y el centro, además el CH final es bastante variable entre las piezas. Para igualar estas diferencias es indispensable realizar un acondicionamiento final, que consiste en aumentar el CHE de la cámara hasta el CH meta de la madera. El tiempo recomendado de acondicionamiento es mínimo de 2 horas por cada cm de espesor de la madera. El acondicionamiento final realizado con vapor de agua es más eficiente que con agua fría, sin embargo, este debería ser de baja presión para no aumentar la temperatura innecesariamente. Con agua fría el acondicionamiento transcurre más lento, pero tiene la ventaja que ya está iniciando el enfriamiento.

### 8.5.6. Enfriamiento

Esta fase solamente se aplica en lugares donde la diferencia entre la temperatura final dentro de la cámara y la temperatura del ambiente fuera de la cámara es mayor a 40 °C. Diferencias mayores provocan grietas inmediatas en la madera. La aparición de grietas en los extremos de las piezas acompañada por un sonido de crujido es un indicador claro de la llegada abrupta de aire frío a la madera caliente.

## 8.6. Programas de secado

Un programa de secado indica la secuencia de condiciones climáticas que el operador debe establecer en el controlador del horno de acuerdo a los niveles de humedad de la madera durante el secado. Los programas de secado se determinan principalmente según la especie y el espesor.

Véase que en el caso del siguiente programa cuando la humedad de la madera es mayor a 35% (paso 1), el programa indica que la  $T_{bs}^{\circ}C$  debe ser  $48^{\circ}C$  y la  $T_{bh}^{\circ}C$   $46.5^{\circ}C$ , siendo el CHE 20% y la HR 95%, mientras que la GS se mantiene en 1.5 por encontrarse muy superior al PSF. Una vez que la humedad de la madera baje hasta 35%, se procede a programar las condiciones establecidas en el paso 2, hasta que la madera disminuya su humedad hasta 30%. Esta misma lógica se aplica para los siguientes pasos hasta que la madera llegue al contenido de humedad final deseado.

Tabla 10. *Ejemplo de un programa de secado.*

Paso	CH promedio [%]	$T_{bs}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{bh}$ [ $^{\circ}C$ ]	CHE [%]	GS	HR [%]
1	CH > 35	48.0	46.5	20	1.5	95
2	35 > CH > 30	50.0	44.5	12	2.5	73
3	30 > CH > 25	55.0	49.0	9	3	60
4	25 > CH > 15	60.0	47.0	7	3	49
5	CH < 15	55.0	34.0	4	3	25

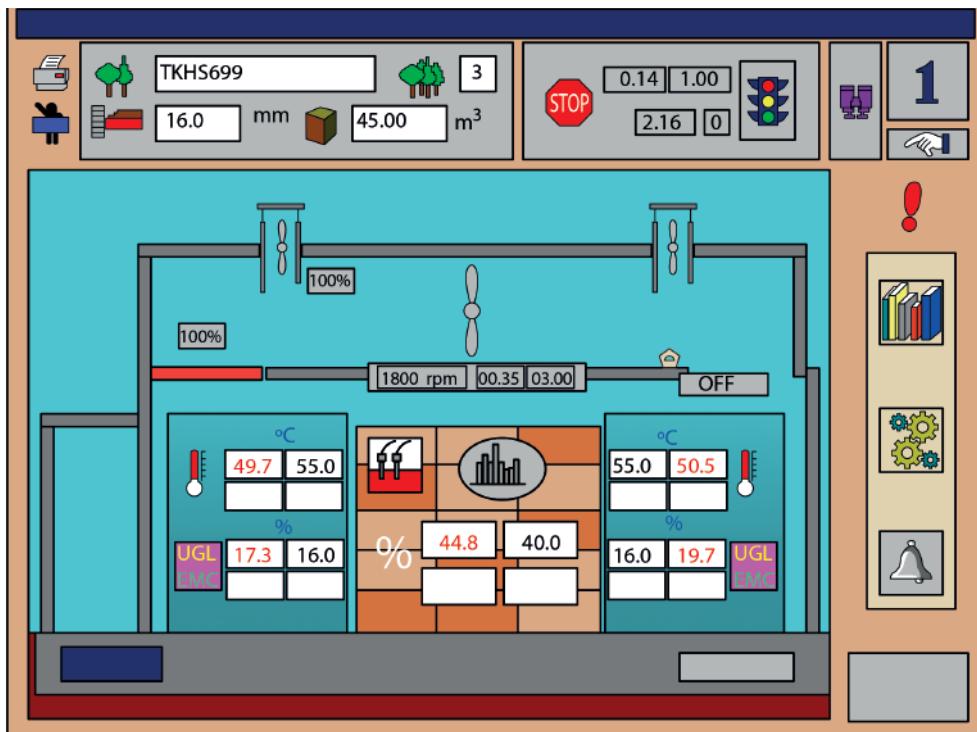
Los programas de secado sólo indican las condiciones de la etapa de secado propiamente dicho (antes y después del PSF), y no aquellas del calentamiento, acondicionamiento inicial y acondicionamiento final porque dependen de otros factores como especie, espesor, humedad inicial de la madera, gradiente de humedad, humedad final de la madera, etc.

Además, en vista de los múltiples factores que intervienen en el secado de la madera y la variedad de diseños de hornos, ningún programa u horario se considera como ideal sino como referencial.

## 8.7. Control permanente del secado

Durante el secado, el control permanente de las variables y la documentación de los datos es algo indispensable, ya que las decisiones que se deban tomar al respecto deben basarse en datos o estadísticas y no en la intuición.

Ilustración 26. Pantalla principal de un software de secado



Normalmente, los controladores de las cámaras de secado tienen softwares disponibles que permiten monitorear, registrar y controlar las variables del secado a través de una PC o un Smartphone. Por lo general, la pantalla principal de un software de secado muestra un corte de la cámara donde aparece la siguiente información:

- Posición de apertura de las ventilas (%)
- Función de los ventiladores (% revoluciones / dirección)
- Apertura de la válvula de la calefacción (%)
- Temperatura (actual y programada)
- CHE (actual y programada)
- CH de los sensores (individual y promedio)

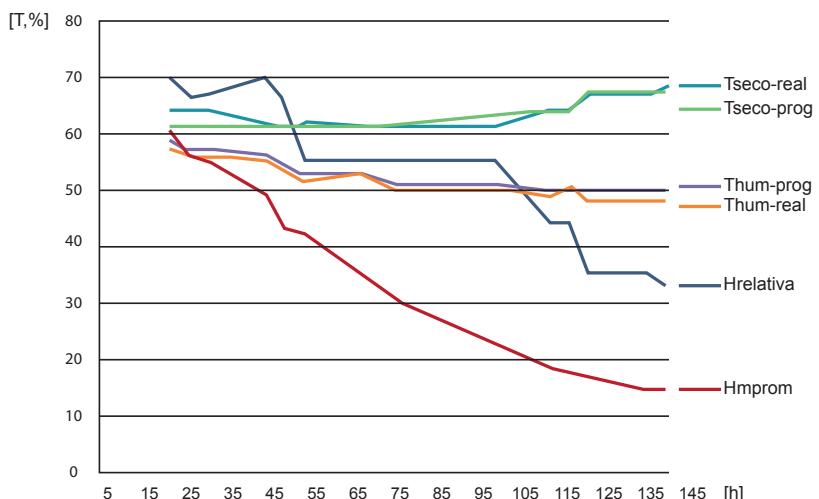
Esta pantalla del software nos debe permitir evaluar rápidamente la situación actual de las variables de secado en comparación con los valores programados.

Es recomendable realizar el registro de las condiciones del secado cada 2 horas, lo que se sugiere hacerlo tanto de manera digital (software del controlador) como de manera manual (formato) por si hay algún inconveniente. Algunos softwares permiten realizar la transferencia de datos a una hoja de cálculo o a una base de datos, lo que facilita mucho la labor posterior de análisis de información.

## 8.8. Protocolos o curvas del secado y su análisis

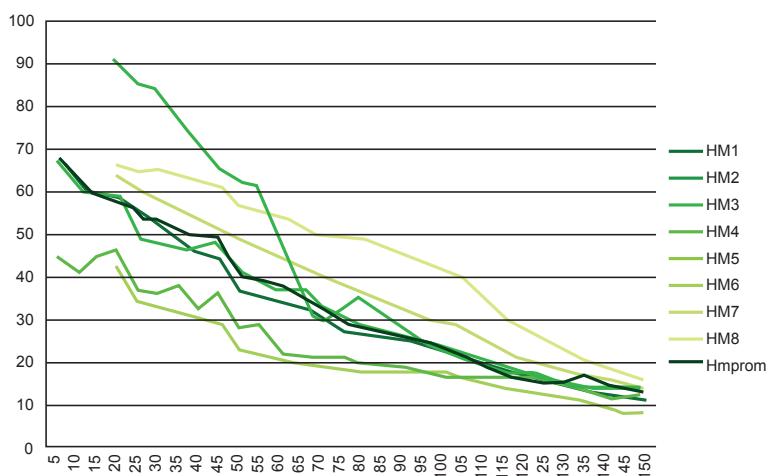
Una vez terminado el secado de una carga, es recomendable imprimir el gráfico de todo el proceso (curva de secado) ya que gráficamente se puede identificar fácilmente el comportamiento de las variables registradas. Solamente comparando los diferentes comportamientos se pueden obtener conclusiones y analizar razones de defectos y/o reclamaciones. Por otro lado, una comparación entre los valores programados y los valores reales nos permiten identificar problemas del funcionamiento de la cámara.

Grafico 4. Ejemplo de curva del secado completa con CH promedio



Es importante evaluar no solamente el comportamiento promedio de los sensores del CH de la madera, sino también se debe realizar un análisis individual de los mismos, ya que en algunos casos pueden existir graves diferencias tal como se observa en el siguiente gráfico.

Grafico 5. Ejemplo del comportamiento de sensores del CH durante el secado (8 sensores)



## 9. CALIDAD DEL SECADO

Generalmente, los defectos que se revisan en la madera seca son los siguientes:

- Contenido de humedad (CH) final
- Tensiones de secado
- Colapso celular
- Grietas
- Descoloramiento
- Deformación

Es importante diferenciar entre los defectos que ya tenía la madera antes de ser secada y aquellos que se originaron durante el secado. En este sentido, se diferencia entre la calidad de la madera y la calidad del secado:

-Calidad de la madera: Son todas las características de la madera previas al secado. Esto incluye: densidad, nudos, ancho de los anillos de crecimiento, orientación de las fibras, grietas, médula incluida; además de los defectos producidos por animales, insectos y hongos.

-Calidad del secado: Está referida a las características y los posibles defectos presentes en la madera seca que son atribuibles al proceso de secado, como contenido de humedad final, tensiones de secado, grietas en los extremos, colapso, deformaciones, etc.

### 9.1. Contenido de humedad final

El Grupo de Secado Europeo -EDG<sup>5</sup> (por sus siglas en inglés) define tres clases de calidad de secado: "Estándar" (S), "Secado de calidad" (Q) y "Exclusivo" (E), establecidas de acuerdo a la variación del contenido de humedad final de las piezas de un lote de secado.

**S (Estándar):** Se refiere a un lote para el cual su uso final aún no ha sido definido y que presenta requisitos de calidad no muy altos.

**Q (Secado de calidad):** Se sugiere para lotes con requisitos más altos.

**E (Exclusivos):** Se relaciona con usos finales específicos, con altos requisitos de calidad de secado.

Tabla 11. Tolerancias del CH final según el grupo de secado europeo – EDG (CH medido a 1/3 del espesor)

Clase	90% de las pruebas	Ejemplos		
		10%	14%	18%
S estándar	CH X 0.3	7.0 - 13.0	9.8 - 18.2	12.6 - 23.4
Q calidad	CH X 0.2	8.0 - 12.0	11.2 - 16.8	14.4 - 21.6
E exclusivo	CH X 0.1	9.0 - 11.0	12.6 - 15.4	16.2 - 19.8

5 European Drying Group (EDG)

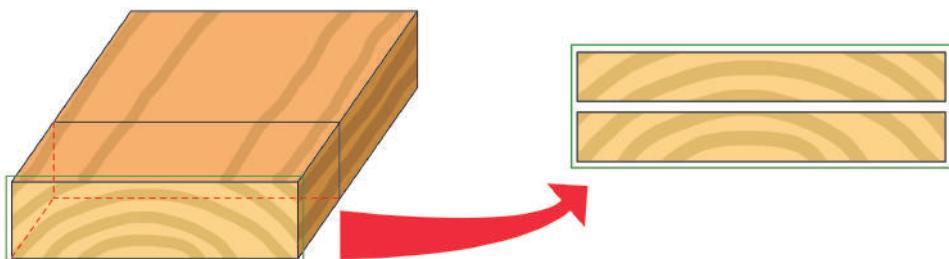
También existen tolerancias respecto a la diferencia de humedad entre la superficie y la parte interior de las piezas de madera. En el caso que la medición se realice con un higrómetro de resistencia, se mide en dos profundidades, primero a 1/6 del espesor para obtener la humedad superficial (CH1/6) y después a la mitad del espesor para determinar la humedad máxima (CH1/2). La tolerancia típica aceptada dentro de cada tabla está entre 1% y 2.5%.

## 9.2. Determinación de las tensiones en la madera

### Corte central (ENV 14464)<sup>6</sup>

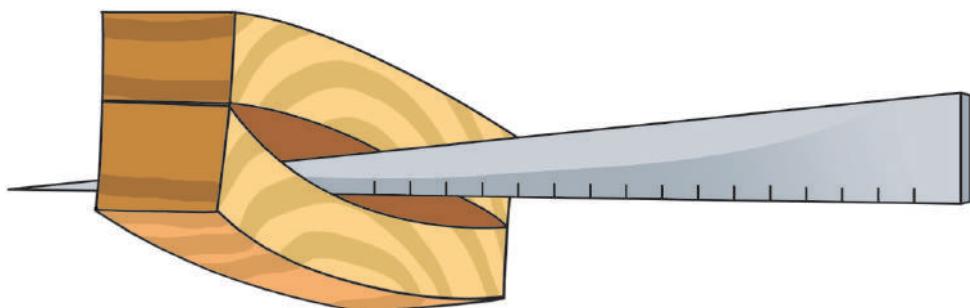
Se debe cortar una pieza de 15mm de largo, ancho >75mm, mínimo 300mm de distancia del extremo de la tabla. La pieza obtenida debe ser cortada a la mitad de su espesor.

Ilustración 27. Verificación de la tensión en la madera según ENV 14464



Se mide la abertura entre las 2 porciones de la pieza después de un tiempo de acondicionamiento de 48 horas en una bolsa plástica.

Calidad según las reglas de la EDG:	$S < 3 \text{ mm}$
	$Q < 2 \text{ mm}$
	$E < 1 \text{ mm}$

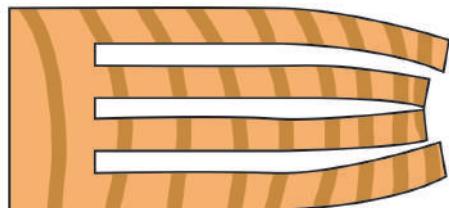
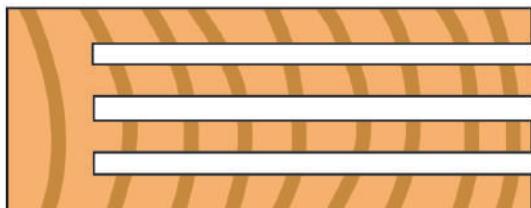


<sup>6</sup> Propuesta de Norma Europea 14464. Madera aserrada, método para determinar el endurecimiento

## **Prueba del tenedor**

Con una prueba de tenedor es posible de determinar el grado de endurecimiento superficial generado durante el secado. La posición de los “dientes” indica el nivel de tensiones que tiene la madera en su sección transversal. La ilustración 28 muestra una madera libre de tensiones (dientes rectos) y una madera con un grado de endurecimiento avanzado (dientes torcidos). Para observar mejor la gravedad de las tensiones se deben quitar los dientes del centro.

*Ilustración 28. Verificación de las tensiones de la madera mediante la prueba del tenedor*

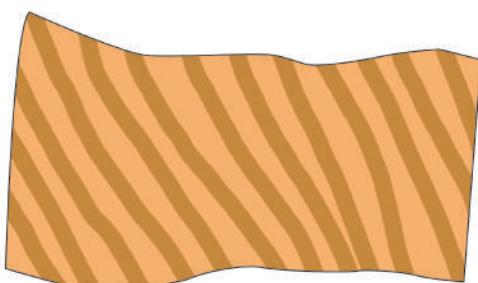


Durante el secado, alrededor del PSF, la madera trata de contraerse pero esto no es posible porque el centro todavía es más húmedo. Debido a este fenómeno, se genera una fuerza de tracción en la superficie y un esfuerzo de compresión en el centro. Una vez que avanza el secado, el centro también va secando y todos los “dientes” muestran la fuerza de compresión.

### **9.3. Otros defectos**

Determinar porcentaje de defectos como:

*Ilustración 29. Colapso*



*Ilustración 30. Descoloramiento*



Ilustración 31. **Grietas**

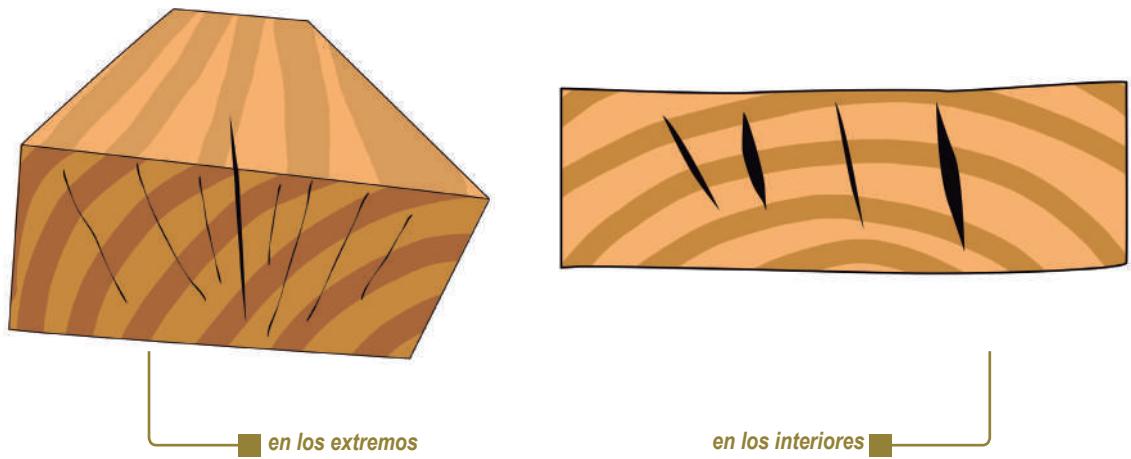
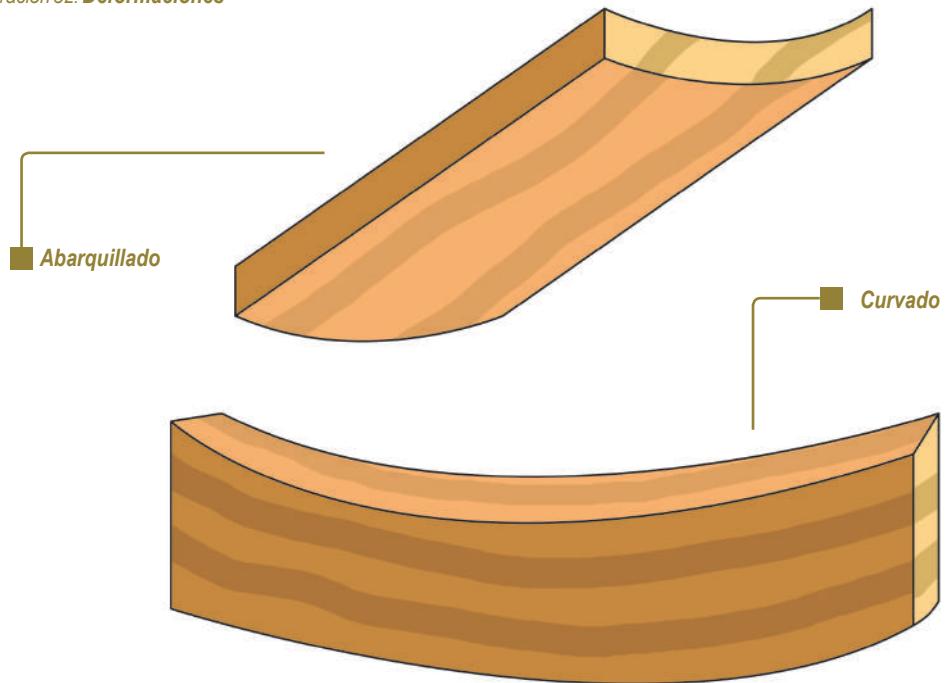


Ilustración 32. **Deformaciones**



En general, la mayoría de estos defectos son generados por condiciones fuertes al inicio del secado!

## 10. EQUIPAMIENTO

### 10.1. Potencia de la calefacción

La mayoría de las cámaras en el Perú están equipadas para el secado de madera de alta densidad ( $>0.7\text{kg/cm}^3$ ) con temperaturas bajas ( $<55^\circ\text{C}$ ). Para el secado de madera con densidades más bajas el equipo llega rápidamente a sus límites con respecto a la potencia de la caldera y el área de intercambio de calor.

A continuación comparamos dos secadores de la marca NIGOS con una capacidad de  $60\text{m}^3$  de madera: El Modelo VKS-60 para el secado lento de madera dura (latifoliadas) y el modelo SKS-60 para el secado rápido de madera blanda (coníferas). Podemos observar la gran diferencia en la potencia específica que exigen estos dos grupos de madera.

Tabla 12. Ejemplo diferentes potencias específicas en 2 modelos de marca NIGOS

Modelo	Capacidad	Potencia instalada	Ventiladores	Potencia eléctrica	Dimensiones frente x fondo x alto	Apilar frente x fondo x alto	Potencia específica
	[ $\text{m}^3$ ]	[kW]			[m]		[kW/ $\text{m}^3$ ]
VKS-60	50-70	240	4 x Ø800	13.5	6.6x8.5x5.5	6.6x6.5x4.3	4
SKS-60	50-70	1,163	7 x Ø900	26.0	8.6x7.0x5.5	8.6x4.0x4.3	20

Tabla 13. Potencia calorífica requerida para diferentes tipos de madera

Tipo de madera	Ejemplo	[kW/ $\text{m}^3$ ]			T máxima [°C]
		Min	Prom	Máx	
Latifoliadas, alta densidad, preseca	Shihuahuaco	1.5	3	4.5	60
Latifoliadas, alta densidad, verde	Shihuahuaco	4	6	8	60
Latifoliadas, med. densidad, verde	Tornillo	4	8	10	70
Latifoliadas, baja densidad, verde	Bolaina	8	10	12	80
Coníferas, verde	Pino	10	14	16	90

La diferencia de potencia calorífica necesaria para el secado de madera es grande entre la madera preseca y aquella en estado verde, lo que se debe a la cantidad de agua a vaporizar. La potencia es dominada por  $\text{kW/kg H}_2\text{O}$ .

También existe una gran diferencia entre el consumo de energía de una cámara durante la etapa de calentamiento y la etapa de secado, siendo mayor en la primera.

**En la etapa de calentamiento requerimos calor para:**

- Calentar el agua contenida en la madera
- Calentar la madera
- Calentar separadores y tacos
- Calentar el aire contenido en el secador
- Calentar pesos, carros, y estructura
- Pérdidas por paredes y piso

**Ya en la etapa de secado se requiere calor para:**

- Evaporar el agua libre
- Evaporar el agua ligada o higroscópica
- Calentar el aire de renovación
- Pérdidas por paredes y piso
- Pérdidas de calor por la ventilar

Los valores mostrados anteriormente (Tabla 13) son para el manejo de una cámara durante el calentamiento, una vez terminada esta fase los requerimientos disminuyen significativamente. Por cada cámara adicional, hay que sumar solamente entre 20 y 40% la demanda en potencia.

Supongamos que durante el secado (ya caliente la cámara), la demanda de potencia por cada cámara adicional es solamente de 33%, entonces la potencia total requerida para cuatro cámaras de 125m<sup>3</sup> es la siguiente:

$$(6kW/m^3 + 2kW/m^3 \times 3 \text{ cámaras}) \times 125m^3 = 1500 \text{ kW}$$

Para determinar la capacidad de la caldera hay que aplicar todavía un factor de rendimiento de 0.8. La capacidad de la caldera necesaria para alimentar las 4 cámaras será:

$$1500 \text{ kW} / 0.8 = 1875 \text{ kW} (1.613288 \text{ kcal/h})$$

## 10.2. Fuentes de calentamiento

### 10.2.1. Hornos con calefacción directa

En estos casos, el horno cuenta con un quemador de gas, petróleo o desechos de madera y los productos de la combustión son ingresados directamente al secador. Esta tecnología es utilizada en el secado de maderas de secado rápido y en el tratamiento térmico de embalajes, también es adecuado para plantas pequeñas en las cuales se ahorra la inversión de una caldera.

Otra posibilidad es el calentamiento del aire con resistencias eléctricas. Debido al costo del kWh, esto es utilizado solamente en cámaras de volúmenes pequeños (laboratorios, carpinterías, hornos experimentales).

### 10.2.2. Hornos con calefacción indirecta

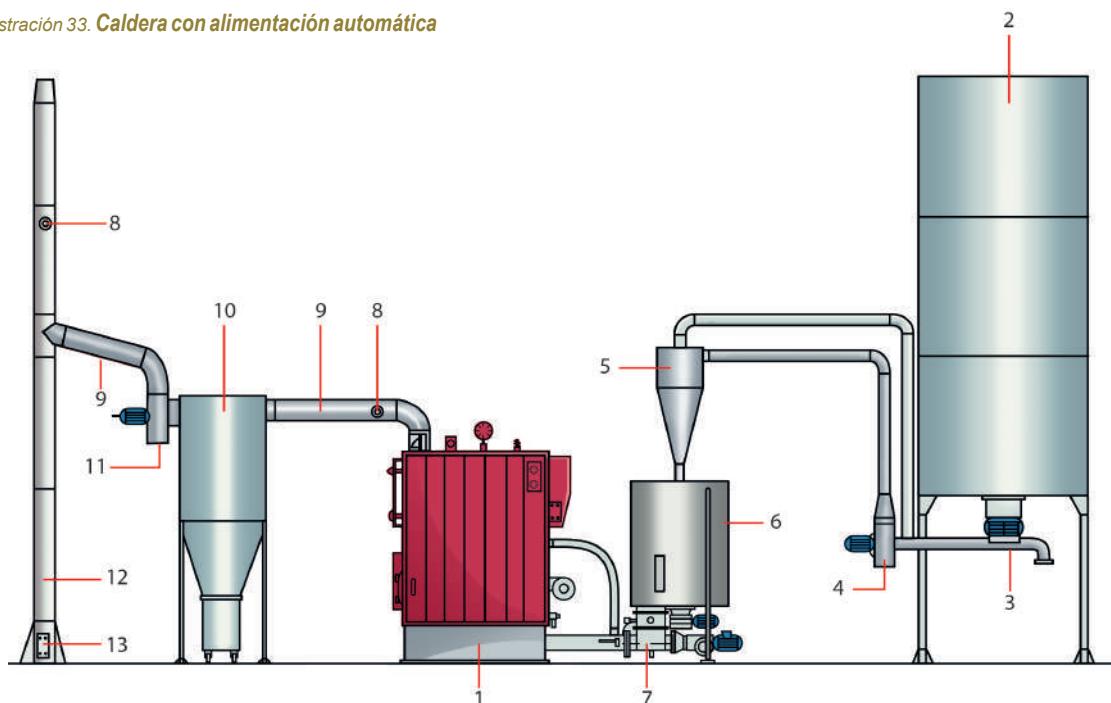
Secador con intercambiador (aire/aire) de gas indirecto: consiste en calentar un intercambiador de calor de acero inoxidable y este a su vez con la ayuda del aire transmite el calor al interior del horno. Este sistema es bastante seguro, los gases de la combustión no ingresan al horno y se puede lograr un buen control de la temperatura.

Una versión mejorada de este intercambiador sería el de un serpentín de acero inoxidable ubicado delante de los ventiladores del horno. Este sistema no requiere de un ventilador adicional que transmita el calor del intercambiador ya que utiliza los ventiladores existentes.

**Secador con intercambiador de calor (aire/aire) utilizando aserrín:** consiste en calentar tubos utilizando aserrín (húmedo o seco), que es introducido en una caldera mediante un tornillo sinfín. Este sistema es sencillo y de fácil manejo, pero requiere un mantenimiento constante ya que los residuos de la combustión se adhieren en el interior los tubos, por lo que deben ser limpiados constantemente. En caso de no realizar esta limpieza se requerirá cada vez más poder calorífico para elevar la temperatura del horno.

**Secado con caldera y fluido intermedio (agua caliente, agua sobreacalentado, vapor, aceite):** en una caldera se calienta un fluido que lleva el calor a los intercambiadores (radiadores) dentro de la cámara. Estos radiadores entregan el calor al aire circulante. La caldera puede ser abastecida con gas, petróleo, aserrín o leña. En caso de utilizar aserrín se puede instalar un sistema de alimentación automática tal como se muestra en el dibujo siguiente.

Ilustración 33. Caldera con alimentación automática



- |                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1. Caldera                  | 8. Medición de humo       |
| 2. Silo                     | 9. Ducto de humos         |
| 3. Válvula rotativa         | 10. Multiciclón           |
| 4. Ventilador de transporte | 11. Extractor de humos    |
| 5. Ciclón                   | 12. Chimenea              |
| 6. Minisilo de alimentación | 13. Compuerta de limpieza |
| 7. Tornillo sin fin         |                           |

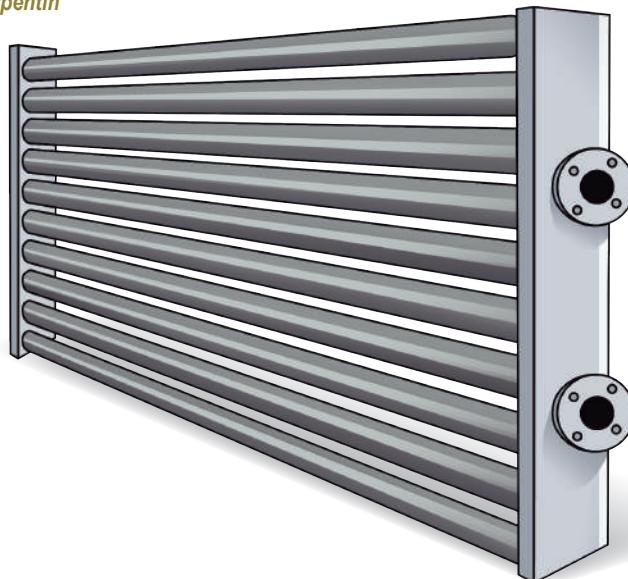
### 10.2.3. Radiadores

Los radiadores están formados por tubos aletados, los que tienen por finalidad aumentar el área de transferencia de calor. Es recomendable utilizar radiadores con tubos fabricados en acero inoxidable debido a que resisten la corrosión que produce al agua de la cadera, pero deben tener aletas de aluminio ya que así resistirán las condiciones ácidas del interior de la cámara.

Las características típicas de un radiador con una potencia de 80 kW (con una temperatura del agua de 90 °C) es la siguiente:

- Material: tubo de acero inox C4580 / aletas de aluminio
- Tubos: 16 tubos con 2 metros de largo y 25mm de diámetro exterior.
- Aletas: 57mm de diámetro exterior a una distancia de 2.54mm
- Ancho del radiador: 1 metro
- N° de Colectores: 2
- Área aletada: 1.57 m<sup>2</sup>
- Área total: 2 m<sup>2</sup>
- Caudal: 6 m<sup>3</sup>/h
- Temperatura del fluido: 90/70 °C
- Contenido de agua: 20 litros

Ilustración 34. Radiador de serpentín



Este mismo radiador, al utilizar con vapor, variará su potencia según la presión del vapor. A mayor presión del vapor, mayor será la potencia en los radiadores.

Presión de vapor	2.5 bar (140°C)	2 bar (134°C)	0.5 bar (110°C)
Inox/AI 25/57, 16 tubos	186 kW	177 kW	123 kW

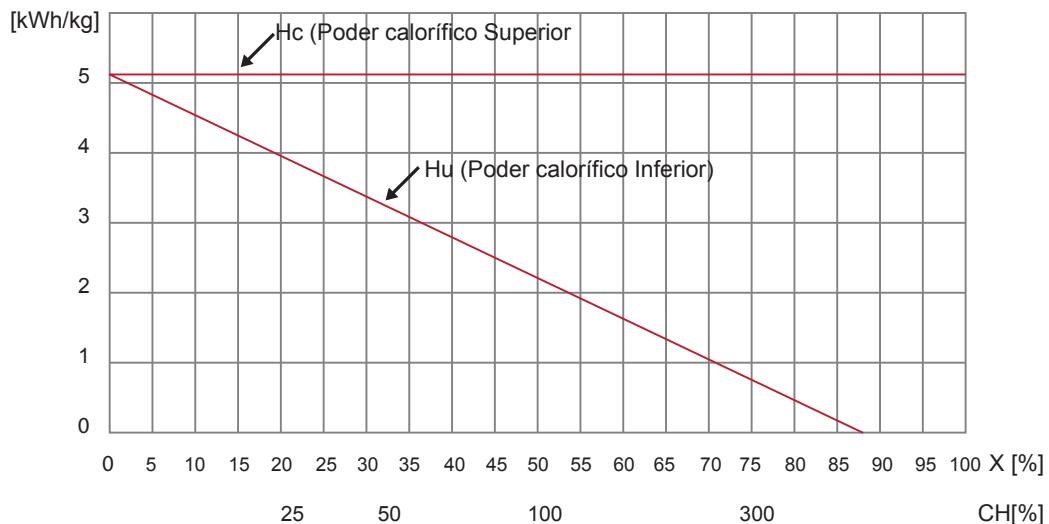
Existen varias fuentes para el calentamiento del aire al interior de la cámara, la elección de cada una dependerá del tipo de industria y la disponibilidad de combustible:

- **Vapor a baja presión:** Presión menor a 1.03 bar (15 psi). Recomendado para secar maderas latifoliadas a bajas temperaturas, inferiores a 85 °C.
- **Vapor a media presión:** Con presiones cercanas a 10.34 bar (150 psi), se pueden obtener temperaturas de cámara cercanas a 115 °C, permite un buen control de la temperatura.
- **Agua Caliente:** El agua alcanza temperaturas cercanas a 90 °C con presiones de 10 psi, las cámaras no pueden alcanzar temperaturas superiores a 70 °C.
- **Agua Sobre Calentada:** El agua alcanza temperaturas cercanas a 120 °C con presiones de 5.17 bar (75 psi), las cámaras no pueden alcanzar temperaturas superiores a 85 °C.
- **Aceite térmico:** El aceite puede llegar a 220 °C y la temperatura dentro de la cámara puede alcanzar los 180 °C, sistema muy útil para llegar altas temperaturas.

#### 10.2.4. El combustible madera

El calor generado por los residuos de madera es el más común en las calderas utilizadas en la industria maderera del Perú, aparte de electricidad, energía solar, gas o petróleo. El poder calorífico de la madera varía mucho dependiendo de la cantidad de material y su humedad. El gráfico siguiente muestra la relación entre el contenido de humedad y el valor calorífico de la madera.

Gráfico 6. Poder calorífico de la madera



El gráfico anterior muestra la cantidad de kWh que produce un kilogramo de madera según su humedad. Para determinar el volumen de madera requerido para cubrir las necesidades energéticas de una cámara, debemos todavía considerar su densidad y el factor a granel de la biomasa.

El factor a granel de la madera varía según la naturaleza del residuo:

<i>Madera – Astillas/leña</i>	=	1.5
<i>Madera – Aserrín</i>	=	2.5
<i>Madera – Viruta</i>	=	3.5

### 10.3. Humidificación

La función de los sistemas de humidificación es regular la humedad relativa del horno durante el proceso de secado. Los medios de humidificación más utilizados son:

*Agua pulverizada (baja y alta presión)*

*Vapor*

*Mezcla de agua y vapor*

#### 10.3.1. Agua pulverizada a baja presión

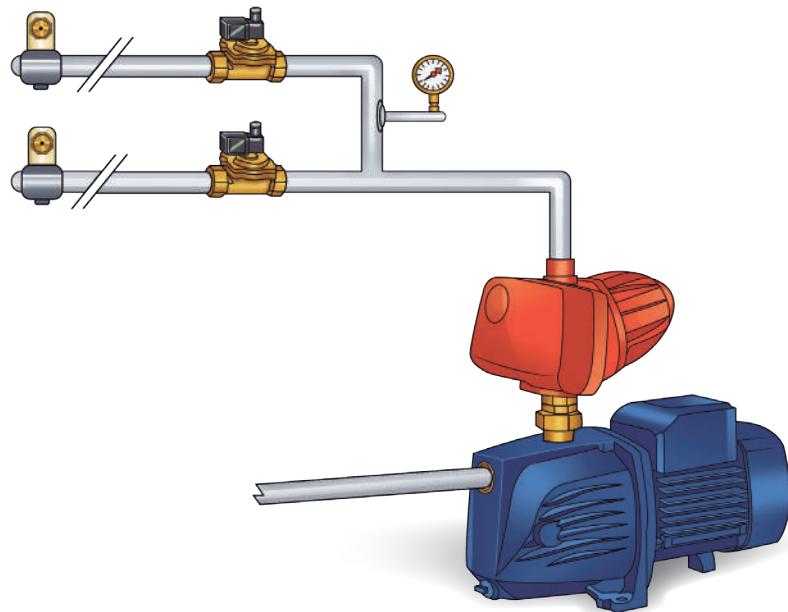
Es la forma más simple y económica para humedecer el clima de la cámara. Este sistema consiste en inyectar agua a presión entre 3 y 5 bar por un tubo el cual tiene unas boquillas que permiten la salida del agua atomizada (tamaño de gota entre 100 a 130 micras). Como se trata de agua fría, se produce un ligero enfriamiento de la temperatura en la cámara.

Para que las gotas de agua tengan tiempo suficiente para vaporizarse, es común que su inyección se realice de manera intermitente, orientando las boquillas hacia la pared o hacia la calefacción. Algunos fabricantes de secadores ubican las boquillas delante de los ventiladores para que las gotas de agua se dispersen por efecto de las aspas del ventilador.

En este caso es necesario colocar dos líneas de boquillas, una a cada lado de los ventiladores, para que funcione una línea de boquillas cuando los ventiladores giren en un sentido y cuando los ventiladores cambien de giro actuará la otra línea de boquillas.

Este sistema funciona muy bien en las etapas intermedias del secado, pero en el acondicionamiento se requiere mayor tiempo para alcanzar las altas humedades requeridas. Este método de pulverización del agua es el más difundido en Europa, siendo muy pocos los casos de humidificación con vapor.

Ilustración 35. Sistema de alimentación de agua a baja presión



Es importante disponer siempre de un juego adicional de boquillas limpias y operativas, para poder cambiar inmediatamente las que se encuentran en el horno en caso de estar obstruidas. Se recomienda el uso de vinagre para la limpieza de la cal acumulada en las boquillas.

### 10.3.2. Agua pulverizada a alta presión

Este sistema es muy utilizado por muchos fabricantes de hornos durante estos últimos años debido a los buenos resultados obtenidos. Con este sistema se producen gotas de 5 a 10 micras, lo que genera la evaporación instantánea del agua, humidificando así el aire de la cámara rápidamente.

Este tamaño de gota se obtiene con bombas que trabajan en el rango de 50 a 100 bar. Este sistema logra mejorar la calidad de secado de la madera y reducir los tiempos del mismo.

Una gota de 100 micras de diámetro en un ambiente del 95% de humedad relativa tarda más de 200 segundos en evaporarse (más de 3 minutos), mientras que una gota de 10 micras de diámetro se evapora en menos de 3 segundos.

Una unidad de humidificación de alta presión está compuesta por: a) un depósito de agua blanda, b) una bomba, c) un motor eléctrico, d) válvulas y e) un sistema de control.

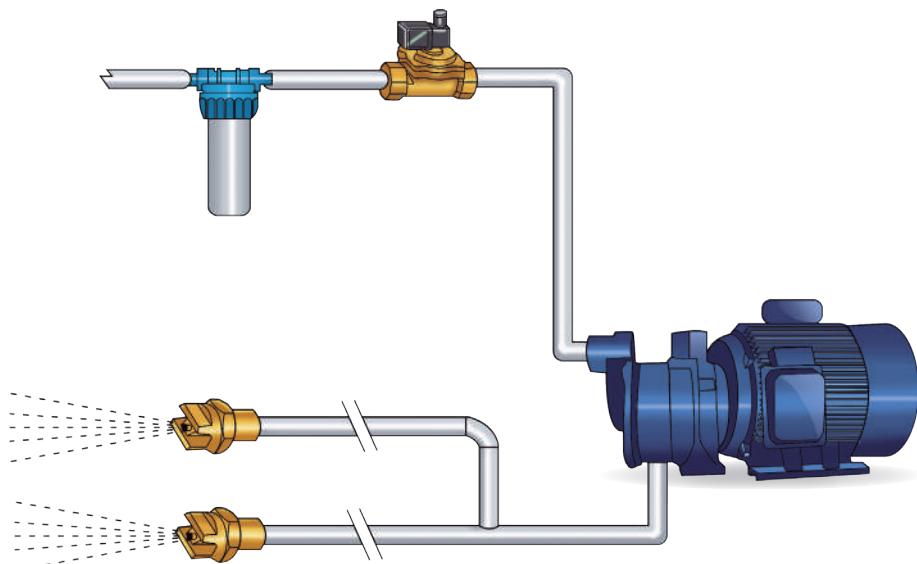
Es necesario contar con un buen sistema de filtros para agua contra carbonatos y sílice, ya que estos compuestos se depositan en las boquillas y obstruyen el flujo de agua.

Las ventajas de trabajar con humidificación a alta presión son:

- Funciona bien en cualquier etapa del secado, es de respuesta muy rápida y de fácil control.
- En la etapa de acondicionamiento, se pueden alcanzar valores de humedad relativa y CHE elevados.
- Los tiempos de acondicionamiento pueden ser considerablemente menores.

- En la etapa de enfriamiento, las partículas de agua absorben la energía liberada en el enfriamiento y se evaporan, esta etapa se hace en un clima muy húmedo y se previene la aparición de grietas superficiales.
- No humedece la madera seca porque no genera condensación de agua.
- Es un sistema muy efectivo en la etapa de calentamiento, cuando existe mucha variabilidad en el contenido de humedad de la madera.

Ilustración 36. Sistema de alimentación de agua a alta presión



### 10.3.3. Vapor de baja presión

Esta forma es la mejor para la fase de calentamiento y acondicionamiento inicial, ya que se alcanzan rápidamente las condiciones deseadas y se elimina el endurecimiento superficial que pueda tener la madera debido al presecado. El vapor proviene normalmente de la misma caldera de calefacción. El consumo permanente de agua exige un eficiente tratamiento del agua (filtros, ablandamiento, pH).

Para la aplicación directa de vapor es necesario colocar una válvula reductora de presión (1 a 1.5 bar), luego el vapor se inyecta por medio de un tubo con perforaciones.

El gran problema que tiene este sistema es que el vapor sale a temperaturas mayores a 100°C, lo que produce un sobrecalentamiento de la madera (y por consiguiente la aparición de defectos) en vez de lograr humectarla.

Una forma de mejorar la humidificación de la madera con vapor es utilizando tinas. Este sistema genera vapor saturado a 100 °C, lo que permite alcanzar con facilidad humedades relativas altas en el horno, lo que es especialmente importante para homogenizar con rapidez la humedad de la madera durante la fase de acondicionamiento. Con esto se reducen los tiempos en comparación con un sistema de inyección de agua a baja presión, además se ahorra dinero en el tratamiento del agua.

#### 10.3.4. Mezcla de agua y vapor

En este sistema, se inyecta agua a mayor presión que el vapor con el objetivo de bajar la temperatura, el problema es que se debe lograr una regulación óptima debido a que se tienen que controlar muchos parámetros: a) presión de vapor, b) cantidad de vapor, c) presión del agua y d) cantidad de agua.

#### 10.3.5. Mezcla de agua y aire

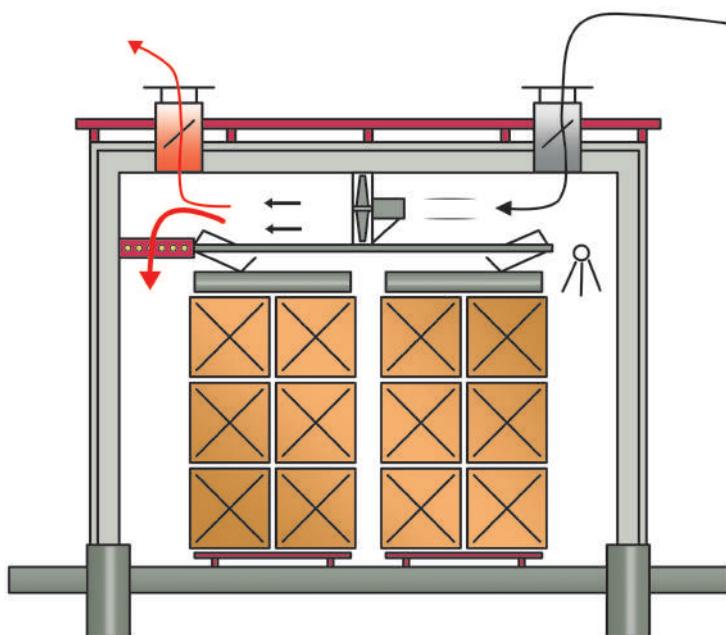
Algunos fabricantes de secadores ofrecen sistemas mixtos de agua y aire comprimido, lo que permite mantener limpias las boquillas. Para ello es indispensable tener aire comprimido durante a tiempo completo o contar con boquillas de auto limpieza, cuyo costo es bastante elevado.

### 10.4. Extracción de humedad

Este sistema está formado por las ventanas y en algunos casos adicionalmente por motores extractores que son los encargados de renovar el aire dentro del horno, es decir de extraer el aire húmedo y reemplazarlo por aire más seco. Este sistema debe estar bien diseñado para que pueda satisfacer las necesidades de secado, por ejemplo un horno que seca maderas blandas (coníferas) recién aserradas necesita extraer más aire húmedo que un horno de secado de maderas duras (latifoliadas), por lo tanto el número de ventanas o el tamaño de estas debe ser mayor.

La apertura o cierre de las ventanas se realiza en base a un sistema de control y va depender de la humedad relativa dentro del horno y la temperatura. Normalmente, cuando la humedad está por encima del valor programado las ventanas se abren, si observamos la gráfica se puede apreciar que las ventanas que están detrás del ventilador absorben aire seco del exterior y las ventanas ubicadas delante del ventilador expulsan el aire húmedo del horno.

Ilustración 37. Intercambio de aire seco y aire húmedo



Cuando se abren las ventillas, no sólo se expulsa humedad sino que también se pierde calor, es por esto que en algunos hornos cuando la temperatura empieza a descender el sistema de control se regula para que no lo haga tan rápido o por último bloquea la extracción hasta que el horno recupere temperatura.

Los componentes más utilizados en esta operación son los servomotores, que básicamente son motores de corriente continua que tienen la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación y mantenerse estables en dicha posición.

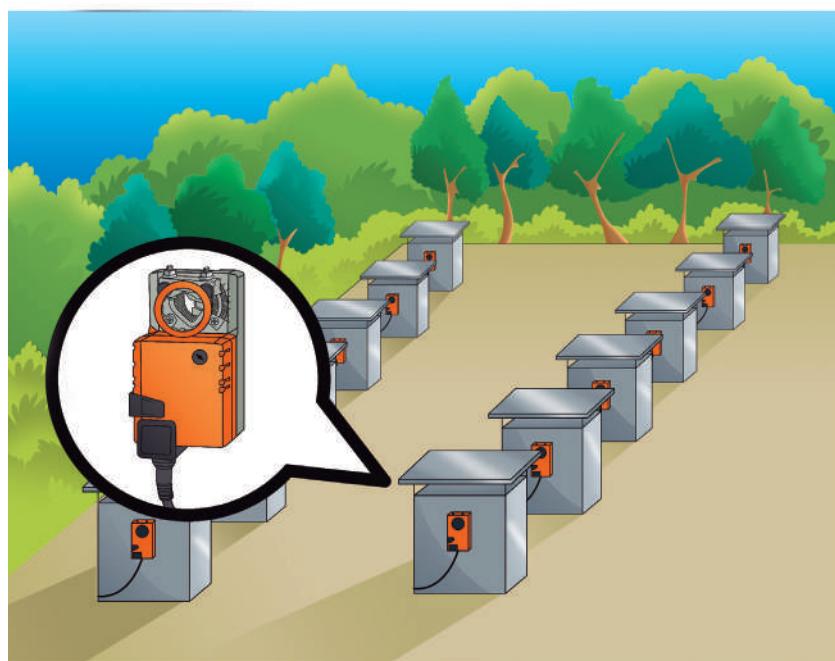
En el caso de las ventillas el ángulo de apertura va de 0° a 90°, pudiendo regularse en el servomotor a través de un control “on” / “off” o proporcional al voltaje (de 0 a 10 voltios).

Estos servomotores tienen un torque nominal y cada fabricante proporciona el tamaño de la ventila que puede operar; por ejemplo un servomotor de 5 Nm puede abrir una o más ventillas de hasta 1 m<sup>2</sup> de área en total y uno de 20 Nm puede hacer lo propio con ventillas de hasta 4 m<sup>2</sup>. Esto significa que con un solo servomotor se pueden abrir varias ventillas a la vez siempre que su área no supere la recomendada.

Torque nominal	[Nm]	2	5	10	20
Área de la ventila	m <sup>2</sup>	0.4	1	2	4

Lo recomendable es tener un motor para cada ventila para no interrumpir el proceso en caso falle uno de ellos.

Ilustración 38. Sistema de extracción de humedad



## 10.5. Circulación del aire

El sistema de ventilación es el encargado de difundir el calor en el interior del horno, extraer el aire húmedo e introducir aire seco por las ventanas. El sistema de ventilación está formado por los ventiladores, motores, deflectores y soportes de motores. Los variadores de velocidad son usados con frecuencia en la configuración de los hornos y se pueden considerar como parte del sistema de ventilación.

Las velocidades del aire que se deben producir en el interior de los hornos son:

**Maderas duras: 1.5 a 2.5 m/s**

**Maderas blandas: 3 a 5 m/s**

Velocidades por encima de los 5 m/s no aceleran el secado en los hornos convencionales. Se puede reducir la velocidad del aire cuando la madera está por debajo del punto de saturación de las fibras, ya que en esta etapa el aire no es determinante en la extracción de agua de las paredes celulares de la madera.

El cambio de giro de los ventiladores en procesos largos de secado (semanas) puede ser fijado en un rango de 3 a 8 horas, mientras que en procesos cortos (24 horas) el cambio puede establecerse cada 2 horas. Hay que tener en cuenta que la razón fundamental del cambio de giro de los ventiladores es homogenizar la humedad en el ancho de la carga.

En la actualidad se encuentran en el mercado ventiladores que ofrecen el mismo caudal de aire y la misma presión para ambas direcciones de funcionamiento. Debido a que los hornos funcionan a altas temperaturas ambientales y elevadas humedades relativas, es crítico que los ventiladores puedan resistir entre 50 ° y 90 °C y sean resistentes a la corrosión, por esto se utilizan hélices de aluminio.

Las características técnicas de los motores más usados en los hornos son:

- Protección IP55
- 4 Polos
- Clase H
- Protección en caja de terminales

Tenemos que tener en cuenta que los motores van perdiendo eficiencia debido a la altitud del lugar donde operan y esto tiene que ser compensado seleccionando un motor más potente que trabaje en conjunto con la hélice.

Altura [msnm]	Factor de derrateo
1,000	1.00
1,220	0.98
1,524	0.95
3,048	0.80

Para saber la presión total de un ventilador se deben conocer todas las pérdidas de carga que se producen desde que sale del ventilador hasta su retorno, es decir, cuando pasa por los calefactores, con la pared, recorrido del falso techo al piso, por la madera y estructura del horno. El valor de pérdida de presión estática para el secado en hornos convencionales fluctúa entre 90 a 120 Pa.

En el mercado se pueden encontrar diferentes configuraciones de ventiladores para hornos, cuyos caudales se muestran a continuación:

Motor	Diámetro de hélice	Caudal [m <sup>3</sup> /h]
4 kW	90 cm (9 aspas)	33,400
3 kW	80 cm (9 aspas)	30,000
2.4 kW	80 cm (5 aspas)	23,000

En secadores de madera, generalmente se utilizan ventiladores axiales debido al alto caudal que requiere el secado. La forma de las hélices permite tener el mismo caudal cuando gira en ambos sentidos. Se debe tener en cuenta que al cambiar el ángulo de posición de las hélices, cambiará también el caudal y por consiguiente la potencia requerida del motor.

Ilustración 39. *Ventilador axial*

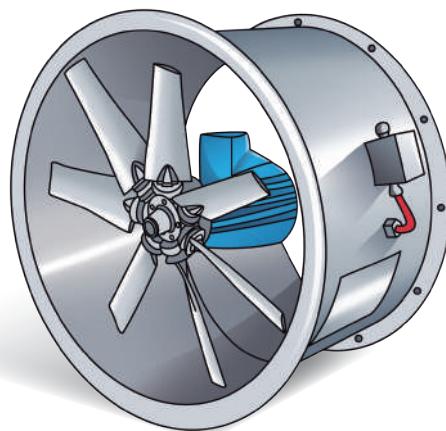
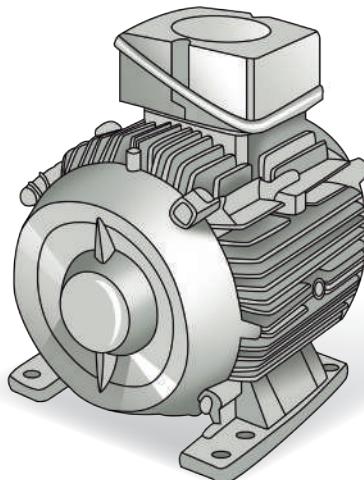


Ilustración 40. *Motor clase H (cerrado herméticamente, con engrase continuo)*



## 11. COSTOS

A continuación se muestra un ejemplo de una estructura de costos para una empresa que presta servicio de secado con 3 secadores de 80m3. Cada cámara seca dos veces al mes tablillas de madera “Shihuahuaco”. Los costos varían mucho de una zona a otra, sin embargo, la influencia mayor en el costo es el tiempo de secado.

Producción	Capacidad [m3/cámara]	Cantidad de cámaras	Secado/mes	Producción [m3/mes]	Producción [m3/año]
Tablillas	80	3	2	480	5,760

Inversiones	Cantidad	Precio unitario [US\$]	Precio total [US\$]
Hornos	3	72,500	293,625
Losa hornos [m <sup>2</sup> ]	400	27	10,800
Losa almacén [m <sup>2</sup> ]	1,000	23	23,000
Techo almacén [m <sup>2</sup> ]	1,000	70	70,000
Caldera	1	100,000	135,000
Subestación (150kW) para 90kW	1	40,000	40,000
Cableado de hornos	3	5,800	17,400
Montacarga de 3.5 Ton	1	28,000	28,000
Separadores	100,000	0.12	12,000
Tacos	2,500	1.5	3,750
Higrómetro de contacto	1	600	600
Higrómetro de clavos	1	800	800
<b>Total de inversión</b>			<b>634,975</b>

Costos operativos / mes	Cantidad	Costo unitario [US\$]	Costo total [US\$]
Operador de montacarga	1	442	442
Calderista	3	353	1,059
Supervisor	1	588	588
Emparrilladores	5	294	1,470
Supervisor de secado	1	736	736
Consumo eléctrico	1	3,529	3,529
Mantenimiento	1	441	441
Movimiento montacargas/camión	1	1,177	1,177
Reposición de separadores y tacos	1	356	356
<b>Total de costos operativos</b>			<b>9,798</b>

Gastos administrativos/mes	Cantidad	Costo unitario [US\$]	Costo total [US\$]
Gerente	1	1,471	1,471
Secretaria	1	588	588
Contador	1	588	588
Seguridad	1	442	442
Mensajero	1	353	353
Limpieza	1	294	294
<b>Total gastos administrativos</b>			<b>3,736</b>

Resumen	US\$/mes	US\$/m <sup>3</sup>	US\$/p.t.
Depreciación (634,975 / (10 x 12))	5,292	11.03	0.026
Interés (634,975 x 0.5 x 0.1) / 12	2,646	5.51	0.013
Seguros	1,000	2.08	0.005
Costos operativos	9,798	20.41	0.048
Gastos administrativos	3,736	7.78	0.018
<b>Costo total</b>	<b>22,292</b>	<b>46.81</b>	<b>0.110</b>



## 12. PROGRAMAS DEL SECADO

A continuación se muestran unos ejemplos de programas de secado utilizados por la empresa PARKETON SAC, ubicada en Villa María del Triunfo, la que presta servicios de secado de diversas especies de madera. Estos programas constituyen una guía u orientación de las posibles temperaturas y CHE que pueden aplicarse en caso de requerir secar estas especies.

Tabla 14. *Programa de secado para Cedro Rojo (Cedrela montana) de 50 mm de espesor*

Cedro Rojo (50mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	63										
CH [%] final promedio	17										
Tiempo total [días]	18										
Temperatura [°C]	42		44	48	50	54				50	28
Tiempo [h]	30		61	92	144	88				12	11
CHE [%]	22		19	16	12	9				14	9
CH [%]	x		65	45	25	16				x	x

Tabla 15. *Programa de secado para Shihuahuaco (Dipteryx sp.) de 20 mm de espesor*

Shihuahuaco Decking (20mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	47										
CH [%] final promedio	9										
Tiempo total [días]	13										
Temperatura [°C]	40		43	46	48	50	52	48		42	28
Tiempo [h]	21		121	48	16	15	20	47		21	5
CHE [%]	19		16	15	14	13	12	11		14	10
CH [%]	x		30	22	20	18	16	13		x	x

Tabla 16. Programa de secado para Huayruro (*Ormosia coccinea*) de 50 mm de espesor

Huayruro (50mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	85										
CH [%] final promedio		14									
Tiempo total [días]		24									
Temperatura [°C]		40	50	53	54	55	56	57	60	45	28
Tiempo [h]		29	141	93	74	99	21	66	17	16	11
CHE [%]		22	16	14	13	12	11	9	8	16	10
CH [%]		x	50	40	30	25	20	18	14	x	x

Tabla 17. Programa de secado para Congona (*Brosimum alicastrum*) de 50 mm de espesor

Congona (50mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	54										
CH [%] final promedio		13									
Tiempo total [días]		34									
Temperatura [°C]		44	48	52	54	52	50	46	44	42	28
Tiempo [h]		37	77	114	387	49	54	43	39	21	2
CHE [%]		22	21	20	18	17	16	12	11	15	11
CH [%]		x	30	25	20	18	16	12	10	x	x

Tabla 18. Programa de secado para Pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon*) de 20 mm de espesor

Pumaquiro (20mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	34										
CH [%] final promedio		12									
Tiempo total [días]		21									
Temperatura [°C]		40	45	47	49	50	52			45	28
Tiempo [h]		46	86	44	102	121	72			12	10
CHE [%]		19	18	16	15	14	12			15	12
CH [%]		x	35	26	20	18	16			x	x

Tabla 19. Programa de secado para Tornillo (*Cedrelina cateniformis*) de 50 mm de espesor

Tornillo (50mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	41										
CH [%] final promedio	15										
Tiempo total [días]	19										
Temperatura [°C]	48	48	52	56	58	60	62		38	28	
Tiempo [h]	29	198	76	63	19	25	21		15	11	
CHE [%]	16	15	14	13	11	10	9		14	12	
CH [%]	x	35	30	25	22	20	15		x	x	

Tabla 20. Programa de secado para Shihuahuaco (*Dipteryx sp.*) de 25 mm de espesor

Shihuahuaco (25mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio	39										
CH [%] final promedio	10										
Tiempo total [días]	17										
Temperatura [°C]	40	43	44	46	47	49	48		40	28	
Tiempo [h]	74	54	24	82	50	110	3		14	10	
CHE [%]	19	17	16	15	14	13	12		14	9	
CH [%]	x	35	30	22	19	16	14		x	x	

Tabla 21. Programa de secado para Cachimbo (*Cariniana domestica*) de 25 mm de espesor

Cachimbo (25mm)		Calentamiento	Secado	Acondicionamiento	Enfriamiento						
CH [%] inicial promedio											
CH [%] final promedio											
Tiempo total [días]	22										
Temperatura [°C]	42	44	46	52	54	56			40	28	
Tiempo [h]	26	120	106	143	59	46			14	6	
CHE [%]	22	18	16	14	13	12			15	9	
CH [%]	x	50	40	30	25	20			x	x	

## 13. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM D4442:2015 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials
- CIRAD. "The Main Technological Characteristics of 245 Tropical Woods Species" Tropix 7. 2016. Disponible en: <http://tropix.cirad.fr/en/list-of-data-sheets-available>
- CITEmadera. Estudio "Determinación de Códigos de Higrómetro para la Medición de la Humedad de 23 Especies Comerciales del Perú". 2016.
- CITEmadera - Ministerio de la Producción. "Manual de Buenas Prácticas para el secado de la Madera en Hornos Convencionales". 1era Edición. Lima, Perú. 2014.
- CITEmadera; SENAMHI. Estudio "Determinación del Contenido de Humedad de Equilibrio (CHE) de la Madera a Nivel Nacional para Garantizar la Funcionalidad de Productos Maderables Terminados". 2017
- Confederación Peruana de la Madera - CPM. "Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales". Tomos I y II. 2da Edición. Lima, Perú. 2008.
- European Drying Group – EDG "Assesment of Drying Quality of Timber". EDG Recommendation. Pilot Edition (for testing). 1994. Disponible en : [http://www.timberdry.net/downloads/EDG/EDG-Recommendation\(eng\).pdf](http://www.timberdry.net/downloads/EDG/EDG-Recommendation(eng).pdf)
- Fuentes, M. "Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas". División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6(1): 79-81. 2000
- Gann Mess- u. Regeltechnik GmbH, Schillerstr. 63, 70839 Gerlingen, Germany, [www.gann.de](http://www.gann.de)
- IMAD Peru S.A., Av. Industrial 813 A.H. Tablada, Villa Maria del Triunfo, Lima.
- Junta del Acuerdo de Cartagena - JUNAC. "Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas". 1era Edición. Perú, 1989.
- Keylwerth, R.: Betriebsblatt 1, Sorptionsgleichgewicht von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) Heft 1, S. 31.
- NIGOS Elektronik, 18000 Niš, Srbija Borislava Nikoli, Serjože 12. [www.nigos.rs](http://www.nigos.rs)
- Norma Andina NA 0049 "Madera. Procedimientos para el secado artificial de madera húmeda (verde)". 2008
- NTP 251.010:2014. MADERA. Métodos para Determinar el Contenido de Humedad.
- Robert Hildebrandt Maschinenbau GmbH, "Schnittholztrocknung" 1979.
- Simpson, William T. Research FPL-RN-268 "Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide". Forest Products Laboratory, Wisconsin, USA.1998.
- Thomas Trübwetter "Holztrocknung". Hanser Fachbuchverlag. 2006.
- United States Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory. "Drying Kiln Operator's Manual". Wisconsin, USA. 1991
- United States Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Wisconsin, USA. 2010.





-  [www.citemadera.gob.pe](http://www.citemadera.gob.pe)
-  [citemadera@itp.gob.pe](mailto:citemadera@itp.gob.pe)
-  288-0941/ 288-0931
-  Calle Solidaridad Cdr. 3 s/n  
Parque industrial Villa El Salvador - Lima



PERÚ

Ministerio  
de la Producción

