

SECADO ARTIFICIAL

Prof. Néstor Mora

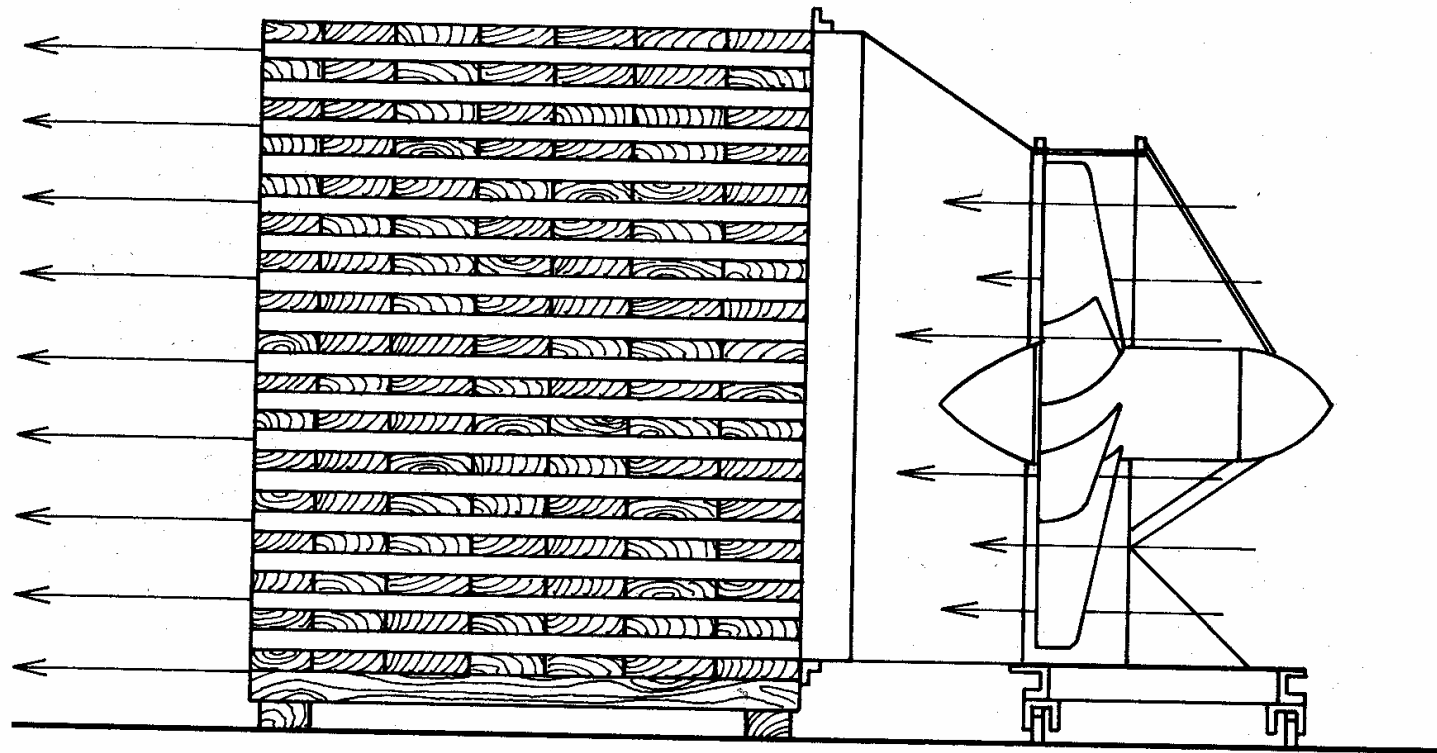
SECADO ARTIFICIAL CONVENCIONAL

- Recintos cerrados (cámaras)
- Climas controlados
- Cada clima se mantiene durante un tiempo determinado
- Sistema mas utilizado a nivel mundial

SECADO A BAJAS TEMPERATURAS

- Temperaturas menores a 45 °C
- Circulación de aire caliente por medio de ventiladores
- Tiene como finalidad reducir el CH de la madera desde la condición verde hasta un 30 0 20 %
- Ventajas sobre el secado natural

PRESECADO



VENTAJAS DEL PRESECCADO

- Reducción de costos de transporte
- Aumenta la productividad de las cámaras
- Disminución de defectos causados por el secado al aire libre
- Disminuye hasta cinco veces el tiempo de secado que se requeriría al aire libre

SECADO A TEMPERATURAS NORMALES

- Temperaturas entre 45 y 90 °C
- Cámaras u hornos controlados
- Diferentes fuentes de calentamiento
- Programa de secado pre-establecido
- Control de condiciones climáticas

INSTALACIONES PARA EL SECADO

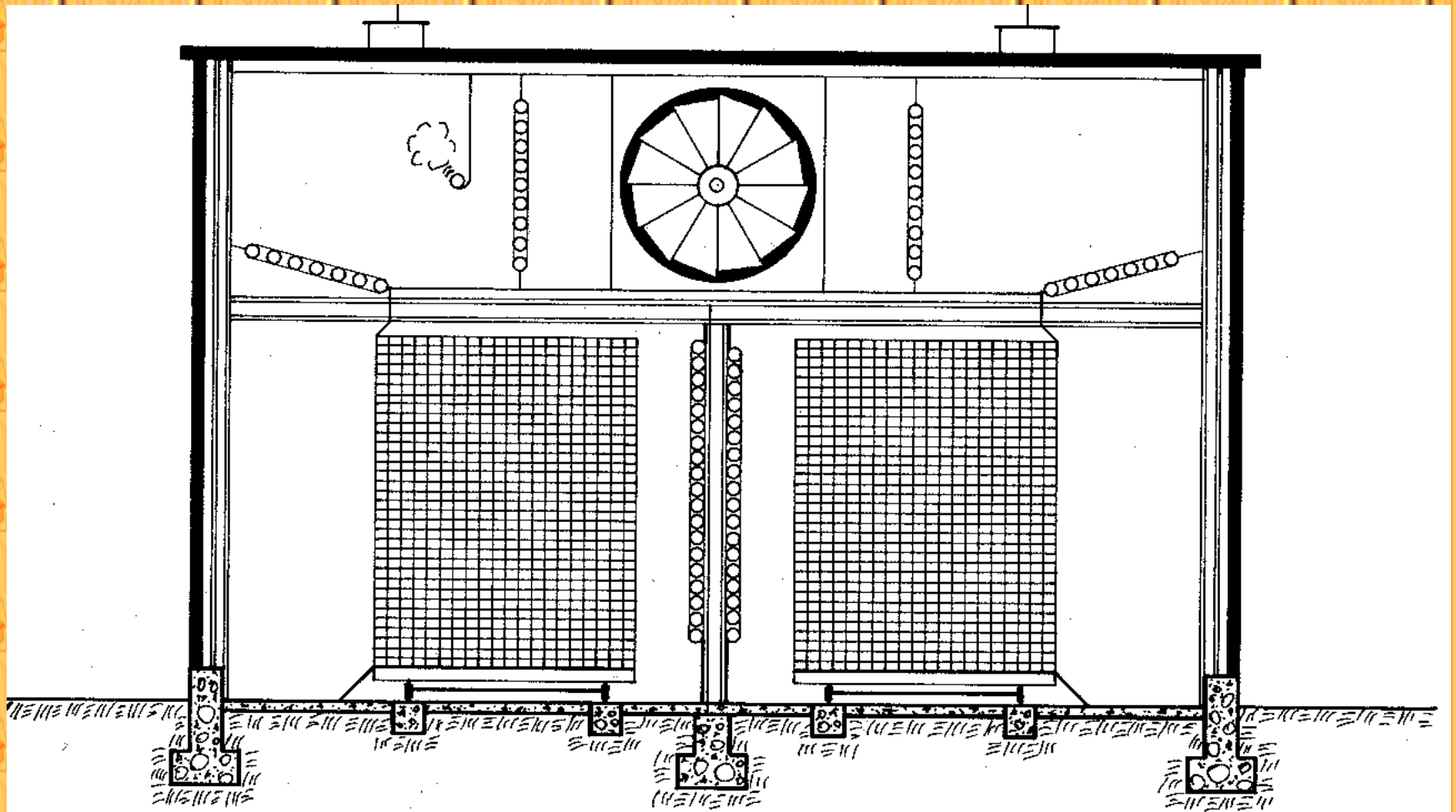
- Cámara aislada del medio ambiente
- Sistemas de control
- Sistemas de calefacción
- Sistema de Ventilación
- Equipo de humidificación
- Válvulas intercambio de aire

SISTEMAS DE VENTILACIÓN

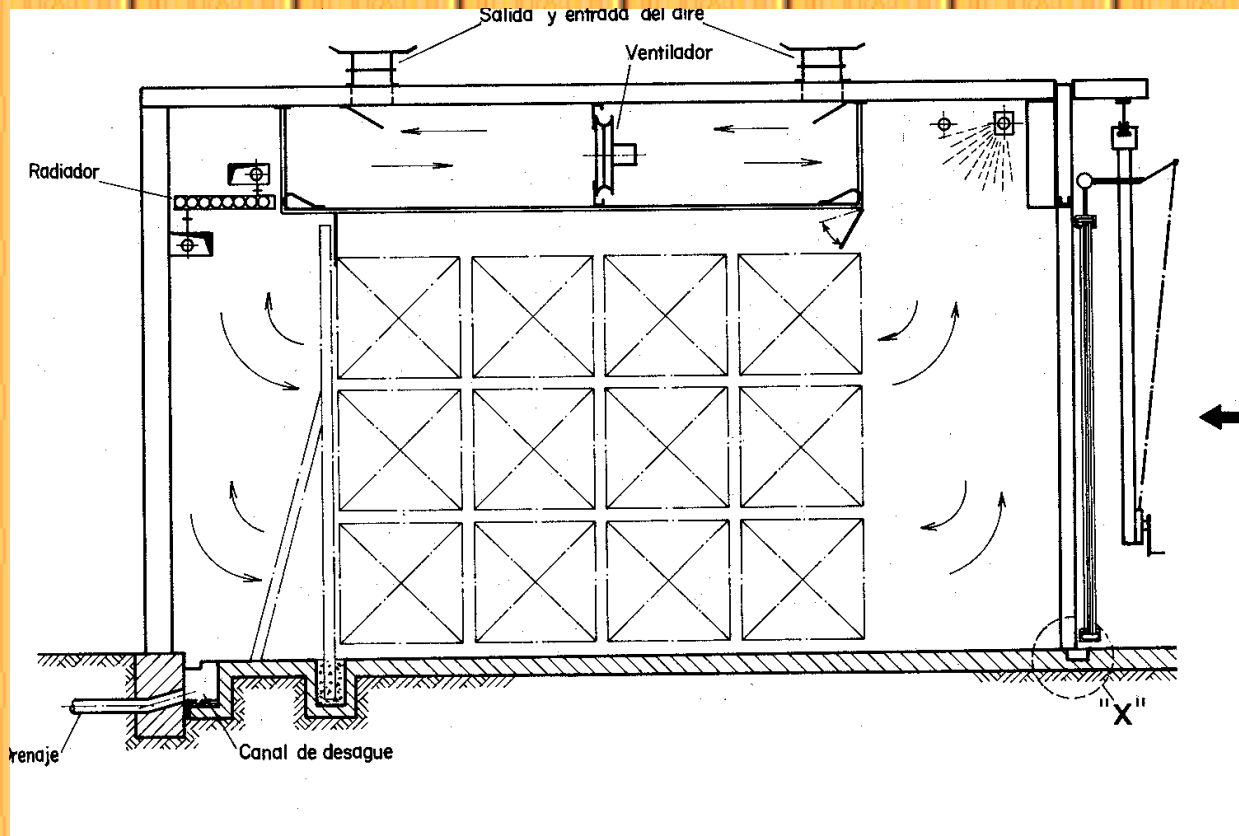
Ventiladores colocados sobre pilas de madera:

- Colocados sobre un eje que se extiende a lo largo de la cámara
- Propulsión axial, lo que requiere desviar el aire en un ángulo de 90°

VENTILACIÓN EN EJE CENTRAL



CIRCULACIÓN DE AIRE EN SENTIDO TRANSVERSAL

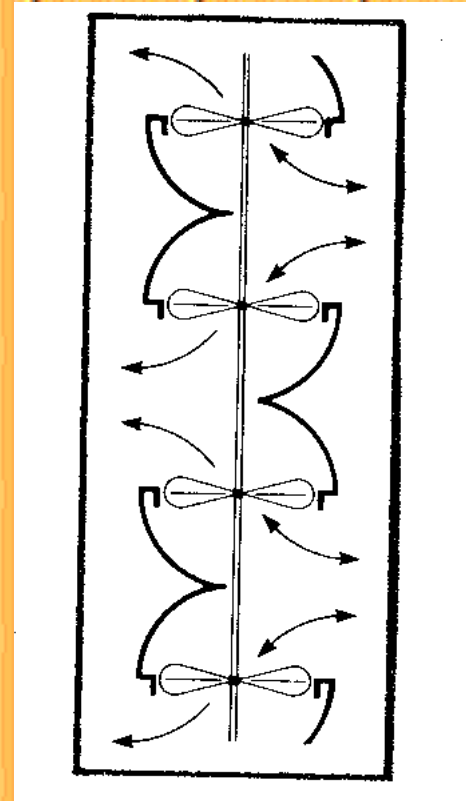


VENTAJAS

- Se logran velocidades entre 0,75 y 2,5 m/s
- Motor externo, es posible colocar varias cámaras
- Un solo motor puede mover grandes volúmenes de aire, impulsado por varios ventiladores localizados sobre el eje

DESVENTAJAS

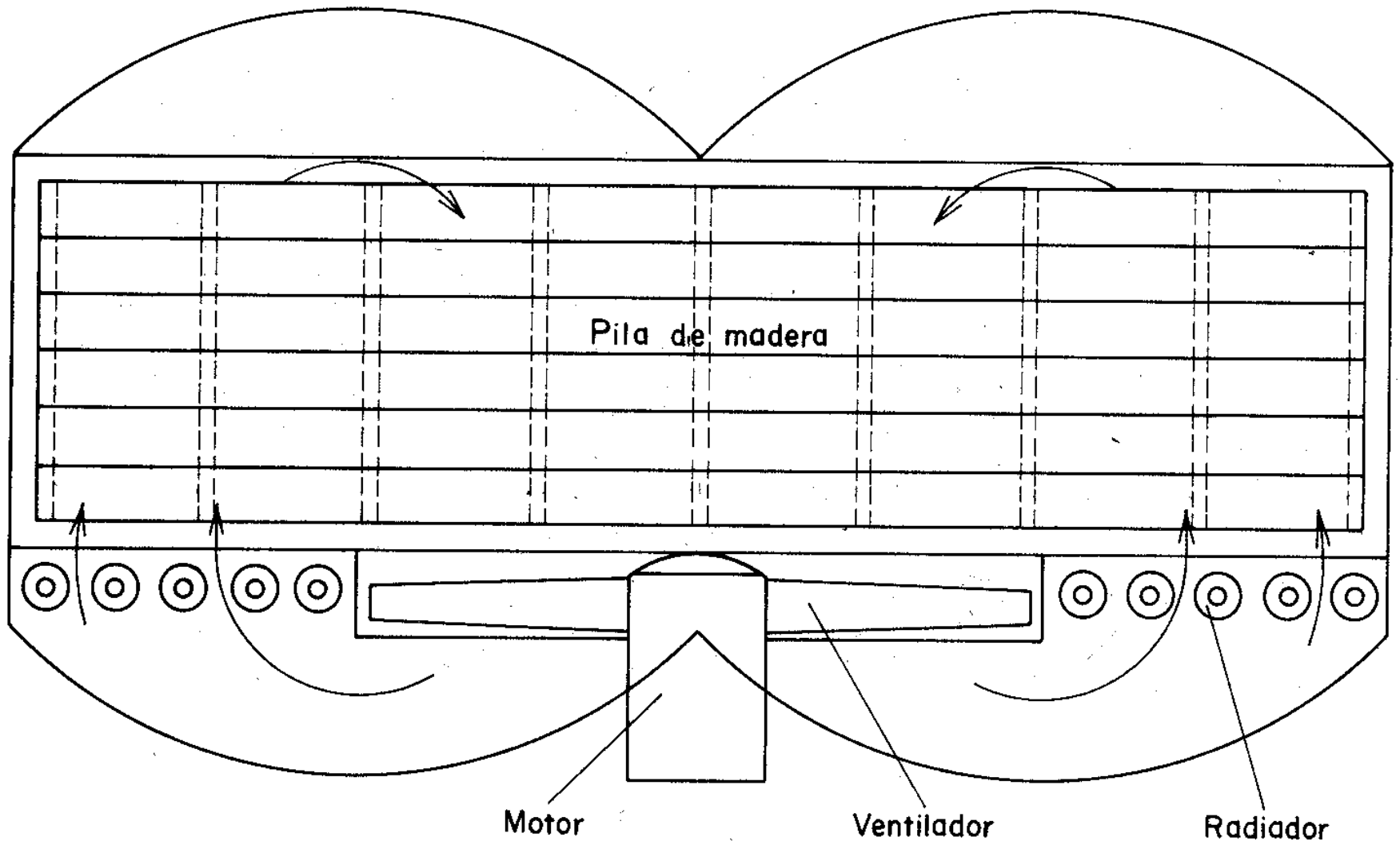
- El aire debe dar un giro de 90°
- En cámaras largas los ejes se descentran fácilmente



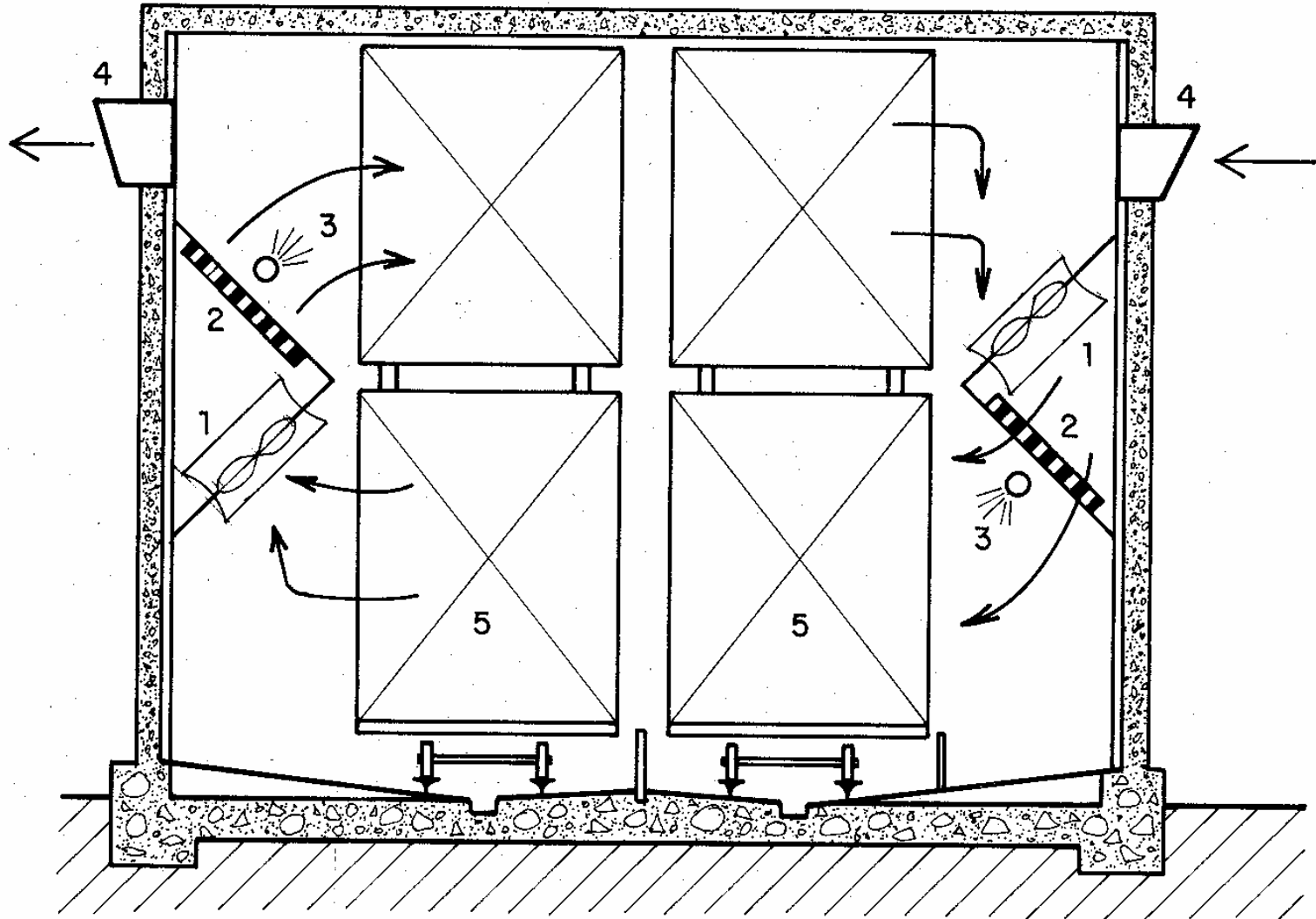
VENTILACIÓN LATERAL

- Ventiladores situados entre una pared lateral y la pila de madera, sujetos en el piso
- Diámetro similar a la pila de madera
- El aire se proyecta horizontalmente a través de la pila de madera
- El retorno se realiza sobre la pila o a través de ella

VENTILACIÓN TRANSVERSAL



VENTILACIÓN TRANSVERSAL EN AMBOS LADOS



VENTAJAS

- Las deficiencias en el apilado no afectan mucho el flujo del aire
- Consumo relativamente bajo de energía
- No se necesitan falsos techos
- La altura de las cámaras se reduce
- Reparación y mantenimiento mas fácil de realizar

DESVENTAJAS

- Diferencia grande en cuanto a la velocidad del aire entre los lados de las pilas de madera
- Se requieren cámaras con anchos mayores
- Largo recorrido del aire ante de su recalentamiento

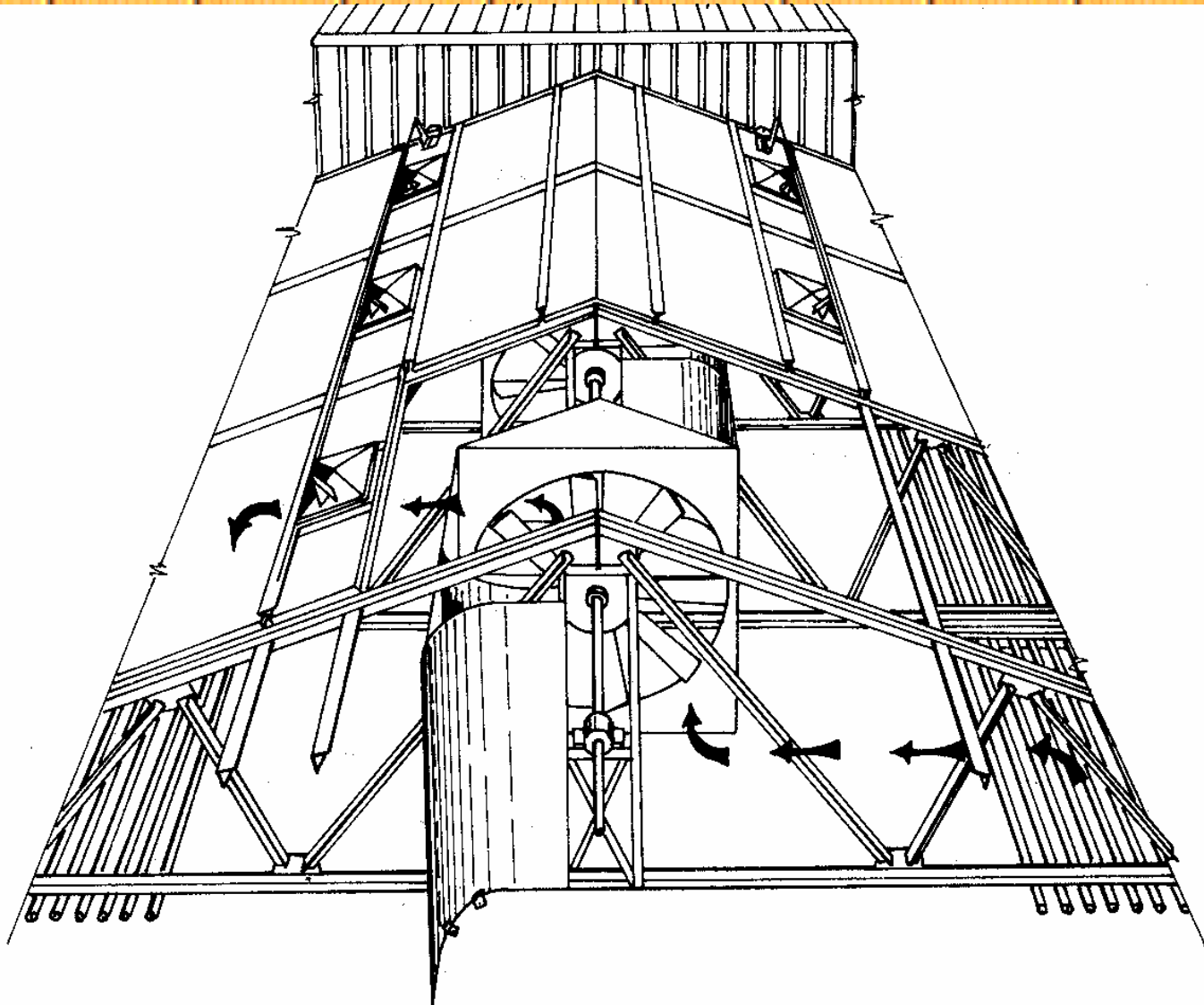
SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

- Vapor a baja presión: 15 psi; 85 °C
- Vapor a media y alta presión: 150 psi; 115 °C
- Agua caliente a baja presión: 50 psi; 120 °C
- Desperdicios de madera
- Calefacción eléctrica
- Aceite térmico: 180-220 °C

CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE SECADO

- Cimientos: soportar la estructura de la cámara
- Piso: resistir peso de las pilar y paso de vagonetas. Superficie lisa y drenaje
- Paredes: adobe cocido, ladrillos de arcilla, paneles de aluminio
- Techo: cámaras de mampostería, techos de concreto.
- Falso techo: material resistente a la corrosión

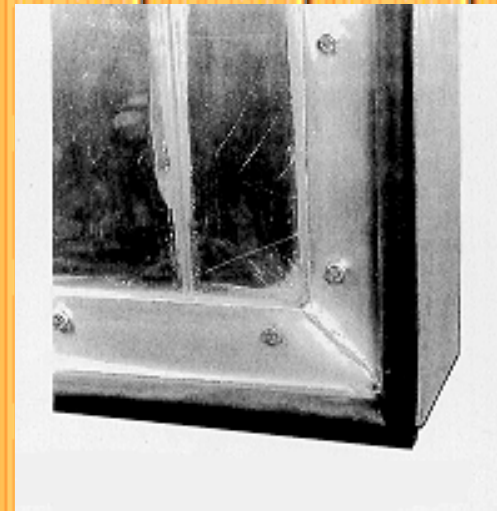
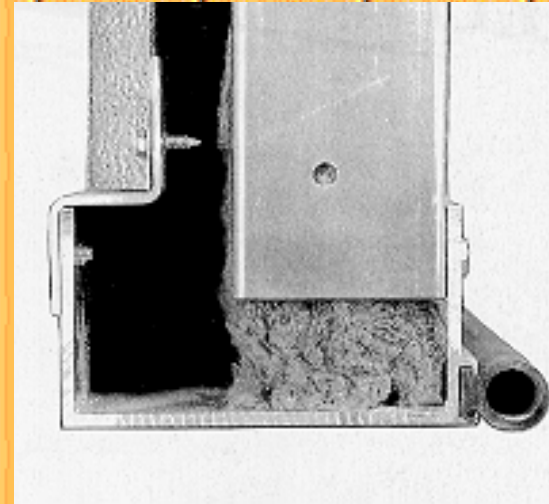
FALSO TECHO



CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE SECADO

- Pasillos laterales: 1,4 a 1,6 m. Circulación de aire y colocación de equipos de control
- Puertas: fácil de maniobrar, bien aisladas y resistentes.
- Ventilas: material resistente a la corrosión y con dispositivo automático para abrir y cerrar.
- Cámaras metálicas: aluminio

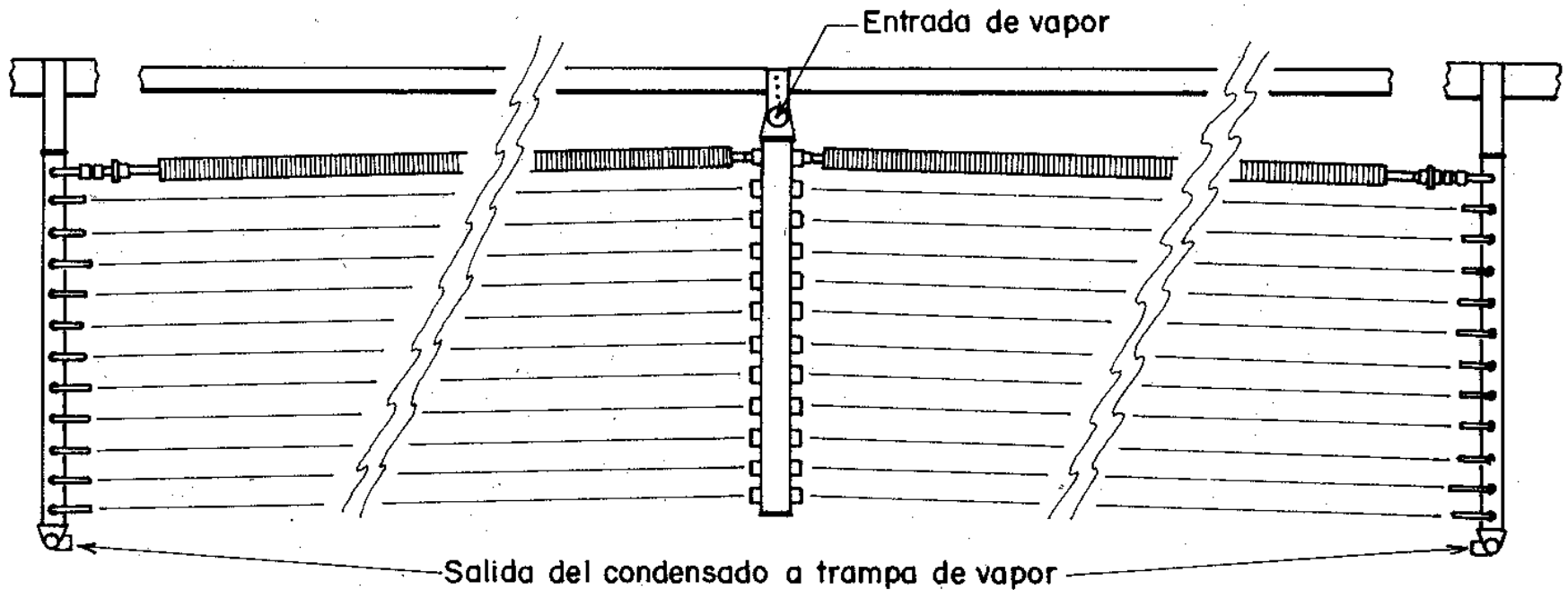
DETALLE CONSTRUCTIVO DE CÁMARAS METÁLICAS



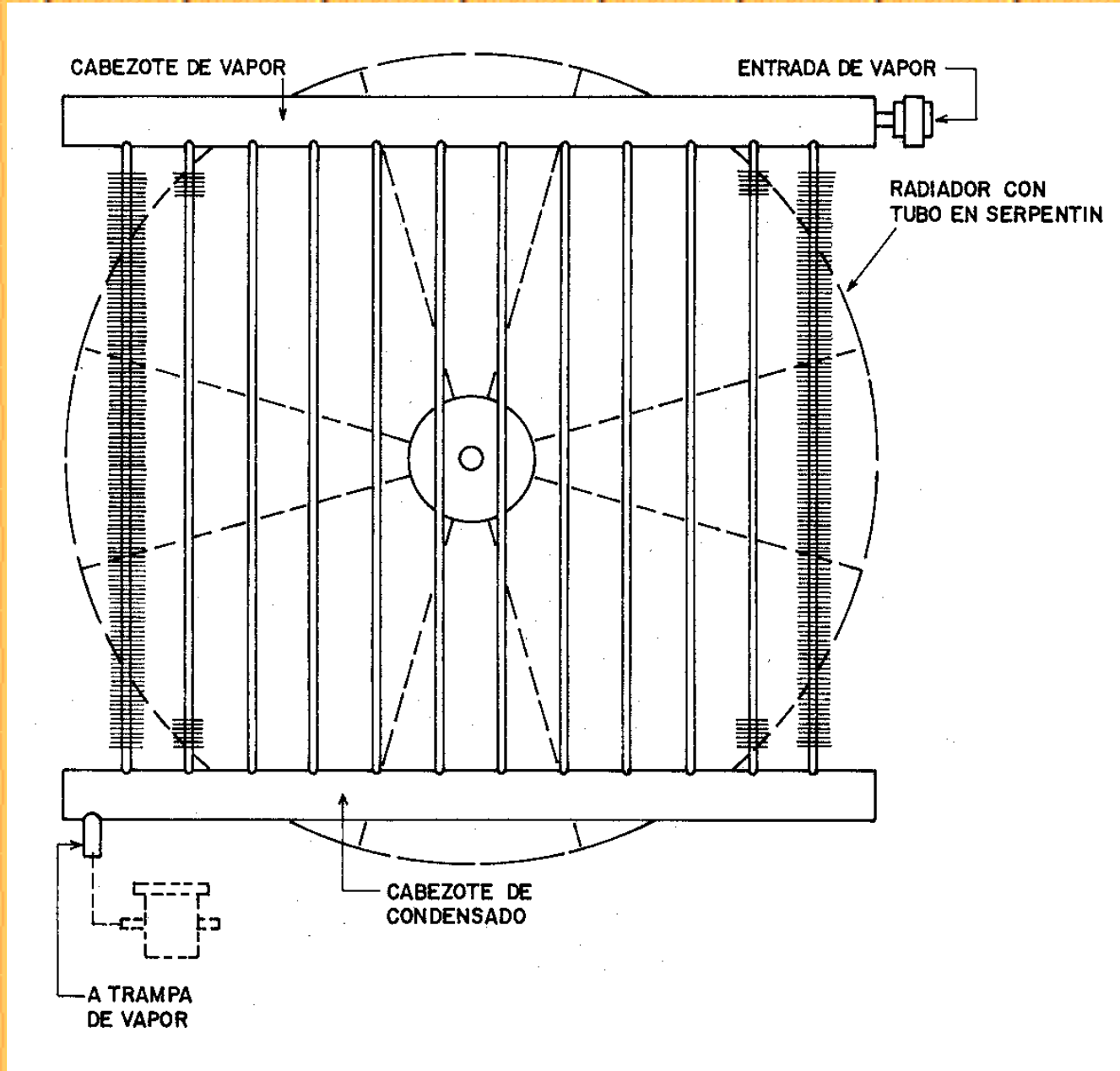
EQUIPAMIENTO DE LAS CÁMARAS DE SECADO

- Medios de calentamiento
- Radiadores
- Humidificadores
- Dispositivos de control

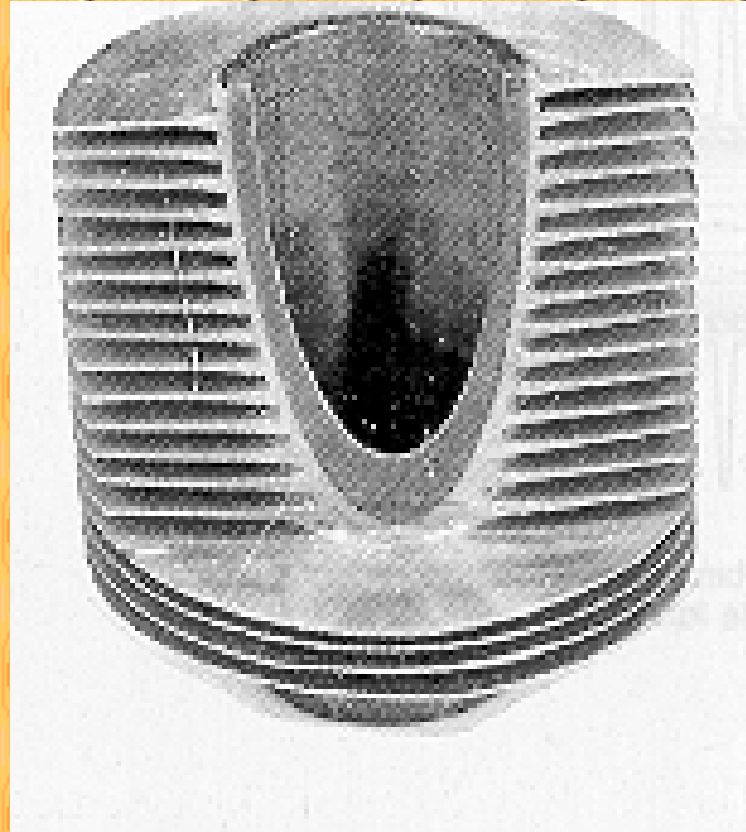
REDIADORES CON TUBOS EN SERPENTIN



RADIADOR CON SERPENTIN



TUBO BIMETÁLICO



CAPACIDAD DE CALEFACCIÓN INSTALADA

- Permitir el calentamiento del aire dentro de la cámara de 20 a 80 °C en aprox. 3 h.
- Buena distribución que permita un calentamiento uniforme y consumo mínimo de calor
- Es importante una distribución rápida y uniforme dentro del sistema de calefacción a lo largo de la cámara

REQUERIMIENTOS TÉRMICOS

- Calentar el edificio y el equipo
- Calentar la madera y el agua que contiene
- Calentar el aire hasta las temperaturas programadas
- Reponer el calor que sale en el aire húmedo y pérdidas por escapes

Consumo específico del vapor de baja presión (1,5 bar)/ kg de agua extraída de la madera

	Kg vapor/kg H ₂ O	Kj/Kg
Secado de madera verde recién cortada (CH ≥ 30 %)		
- Madera dura	2.0 – 3.5	4550 - 7970
- Pino y latifoliadas blandas	1.5 – 2.0	3400 - 4550
Secado por debajo del PSF		
- Madera dura	3.0 – 4.5	6230 - 10240
- Pino y latifoliadas blandas	2.0 – 3.5	4450 - 7970

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA A EVAPORAR Y CANTIDAD DE CALOR REQUERIDO

- DATOS:
- Madera: Saqui-saqui tablas 25 mm espesor.
- Cantidad 50 M³
- Chi= 180%
- Chf= 10%
- Tiempo de secado = 5 días = 120 h
- Gbásico: 0,36

$$PH_{20\uparrow} = (Gb\delta w)(\text{kg/m}^3) \times (CH_i - CH_f) / 100 \times V_m (\text{m}^3)$$

$$PH_{20\uparrow} = 360 \text{ kg/m}^3 \times ((180 - 10) / 100) \times 50 \text{ m}^3$$

$$PH_{20\uparrow} = 30600 \text{ kg}$$

Asumiendo un valor de 3 kg de vapor/kg de H_2O

$$PH_{20\uparrow} = 30600 \text{ kg } H_2O \times 3 \text{ Kg vapor} = 91800 \text{ kg vapor}$$

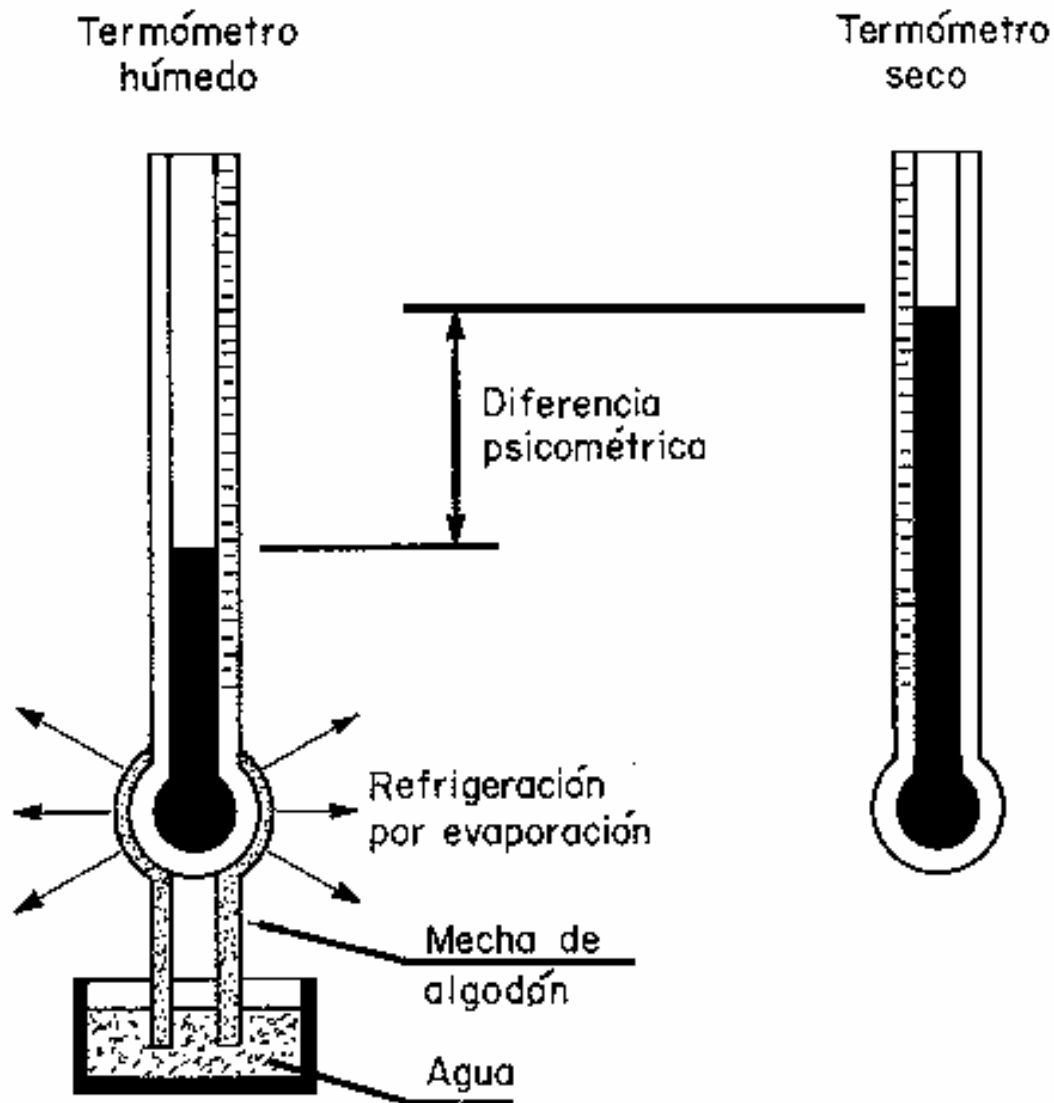
Se necesitan 91800 kg vapor para evaporar 30600 kg agua

$$1 \text{ kg vapor} = 539 \text{ kcal}$$

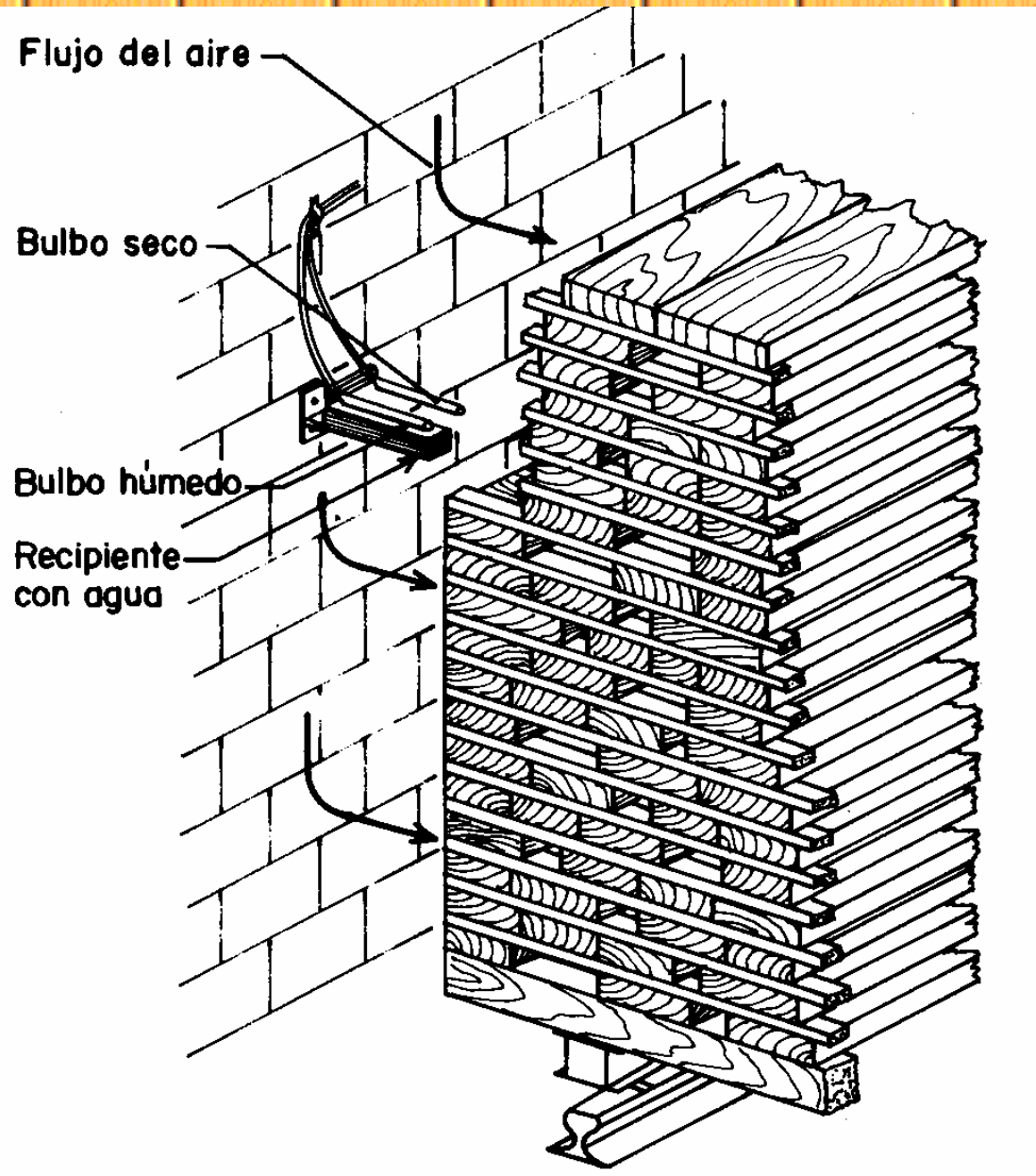
$$= 49480200 \text{ kcal}$$

$$49480200 \text{ kcal} / 120 \text{ h} = 412335 \text{ kcal/h} / 50 \text{ m}^3$$
$$= 8246,7 \text{ kcal/h/m}^3$$

DISPOSITIVOS DE CONTROL



DISPOSITIVOS DE CONTROL



SECADO A ALTAS TEMPERATURAS

- Temperaturas mayores a 100°C
- Instalaciones especiales
- Se precalienta la madera con una T_{bh} muy cercana a 100°C . Una vez la madera en esta condición se incrementa rápidamente la temperatura del bulbo seco

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA

- Metales anticorrosivos (aluminio puro)
- Mayor capacidad de ventiladores
- Mayor eficiencia térmica
- Apilado igual que el secado convencional

SECADO A ALTAS TEMPERATURAS

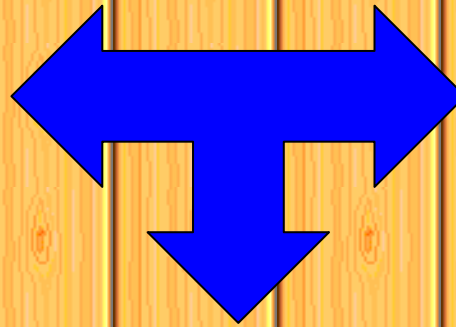
- Para evacuar una lb de agua a 60°C y una diferencia psicrométrica de $4,5^{\circ}\text{C}$ se requieren 1730 BTU. Circulación de aprox. 18 m^3 de aire
- A $115,5^{\circ}\text{C}$ y $4,5^{\circ}\text{C}$ de diferencia psicrométrica se gastan 1090 BTU. Circulación de aprox. 1 m^3 de aire

-

SECADO POR CONDENSACIÓN- DESHUMIFICADORES

Maquina refrigeradora

Sistema calentamiento
aire (compresor)



Deshumificador
(unidad de secamiento
por condensación)

Secador (intercambio
parcial de aire, como un
secador convencional)

FASES DEL PROCESO

- Calentamiento de la madera: aire seco y caliente
- Secamiento con intercambio parcial de aire entre el interior de la cámara y el ambiente externo
- Secamiento por condensación

VENTAJAS

- Utiliza eficazmente el calor disponible
- Inversión inicial y costos de mantenimiento menores
- Se pueden secar especies diferentes
- Económico

DESVENTAJAS

- Mayor tiempo de secado
- El sistema no permite acondicionamiento final
- Rendimientos y costos de secado menores que el secado convencional

MÉTODOS ESPECIALES DE SECADO

Métodos químicos

- Secado mediante solventes: acetona
- Secado con sales: sal común, urea, ureaformaldehído, glicoldietileno
- Secado en líquidos oleosos calientes: aceites
- Secado al vacío

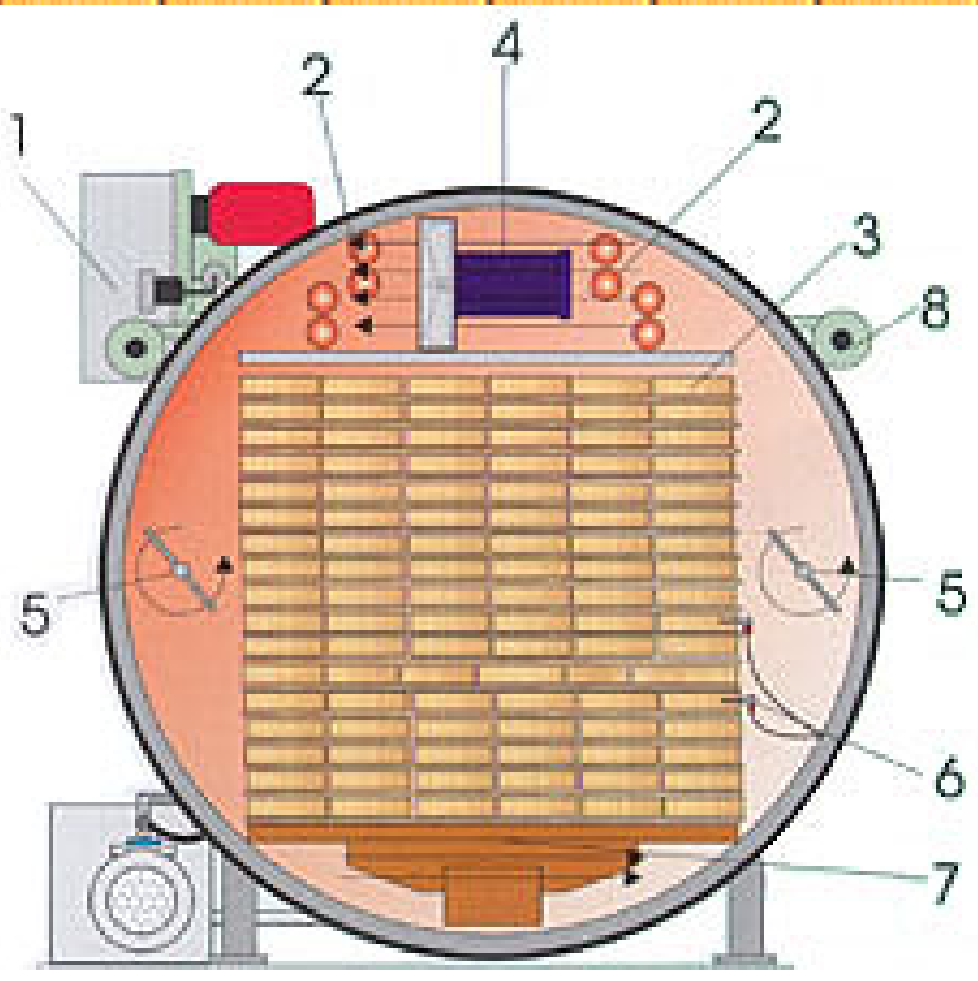
SECADO AL VACÍO

- El secado con la utilización del vacío permite aprovechar dos principios físicos naturales:
- la reducción de presión (creación del vacío) determina la transformación del agua contenida en la madera en vapor a bajas temperaturas (45°C a -700 mmHg);
- el vapor de agua se mueve siempre desde las zonas calientes hacia las frías.

TEMPERATURA DE EBULLICIÓN DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN

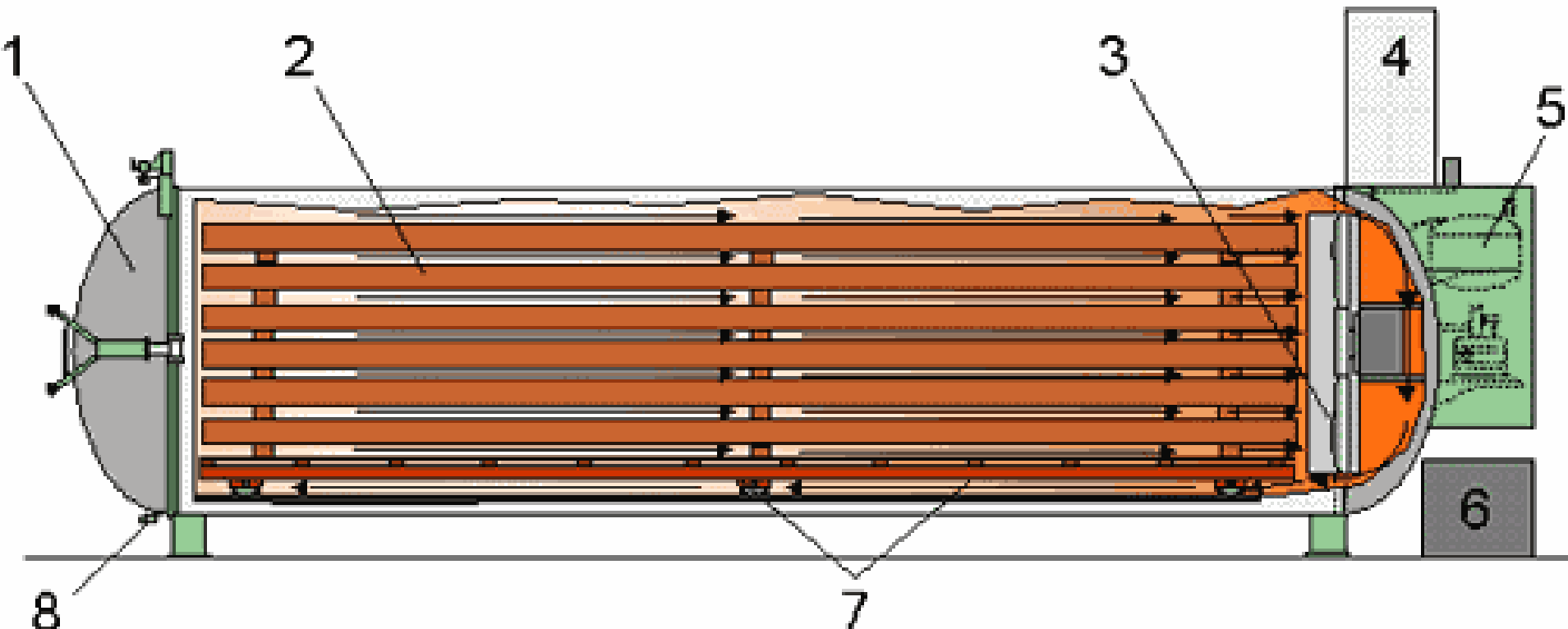
Presión del aire (mm Hg)	Temperatura de evaporación del agua (° C)
760	100
480	88
305	76
240	70
153	60
120	55
76	45
62	42
38	32
8	7

SECADO AL VACÍO



- 1-Panel de control
- 2-Batería agua caliente.
- 3-pila de madera
- 4-Ventilador de flujo alterno.
- 5-Turbulencia.
- 6-Sonda.
- 7-Carro motorizado de carga.
- 8-Condensador

ESQUEMA SECADORA AL VACÍO



1 Puerta, 2 Pila de madera, 3 Electro ventilador, 4 Cuadro eléctrico, 5 Generador de vapor, 6 Bomba de vacío, 7 Carro, 8 Válvula de descarga

VENTAJAS

- La temperatura y presión dentro del autoclave acelera la circulación del agua desde en la madera
- La disminución del punto de ebullición del agua incrementa la tasa de evaporación de la superficie
- Limitados gradientes de humedad entre el interior y la superficie
- La eliminación del riesgo de fisuras, hundimiento o alteración del color
- Fácil utilización
- Mantenimiento reducido de la instalación

LA PRÁCTICA DEL SECADO DE LA MADERA

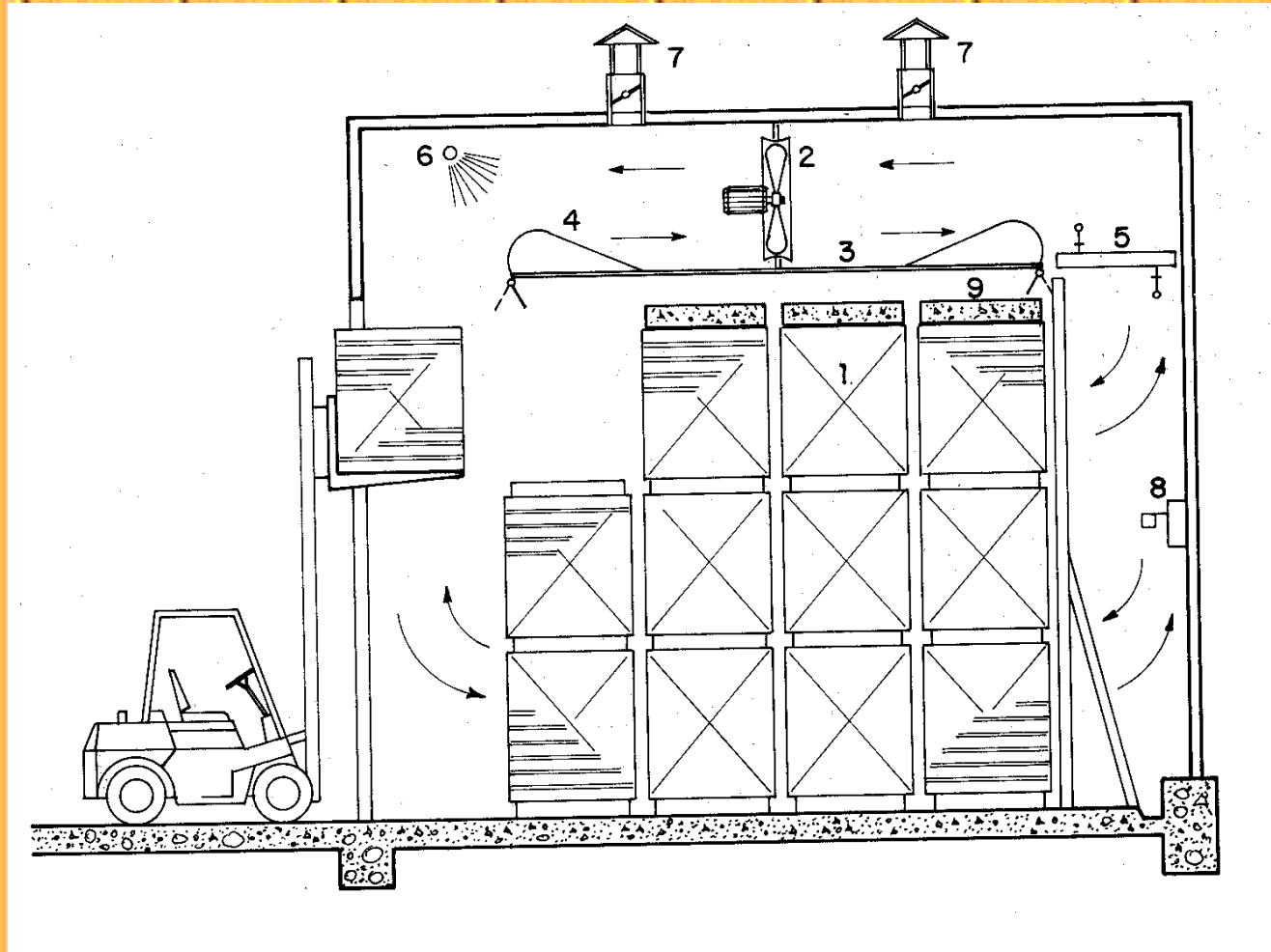
SELECCIÓN DE LA MADERA Y APILADO:

Clasificación: especie, calidad,
dimensiones, estado fitosanitario,
contenido de humedad inicial,
contenido de humedad final

APILADO

- Listones o separadores: madera densa, grano recto y libre de defectos
- Tamaño: anchos latifoliadas 20 y 30 mm; coníferas 50 hasta 100 mm. Recomendados de sección rectangular de 20 x 30 mm
- Distanciamiento: tablas delgadas 40 cm, tablas entre 20 y 30 mm 40 cm, tablón entre 80 y 100 cm.
- Apilado en paquetes

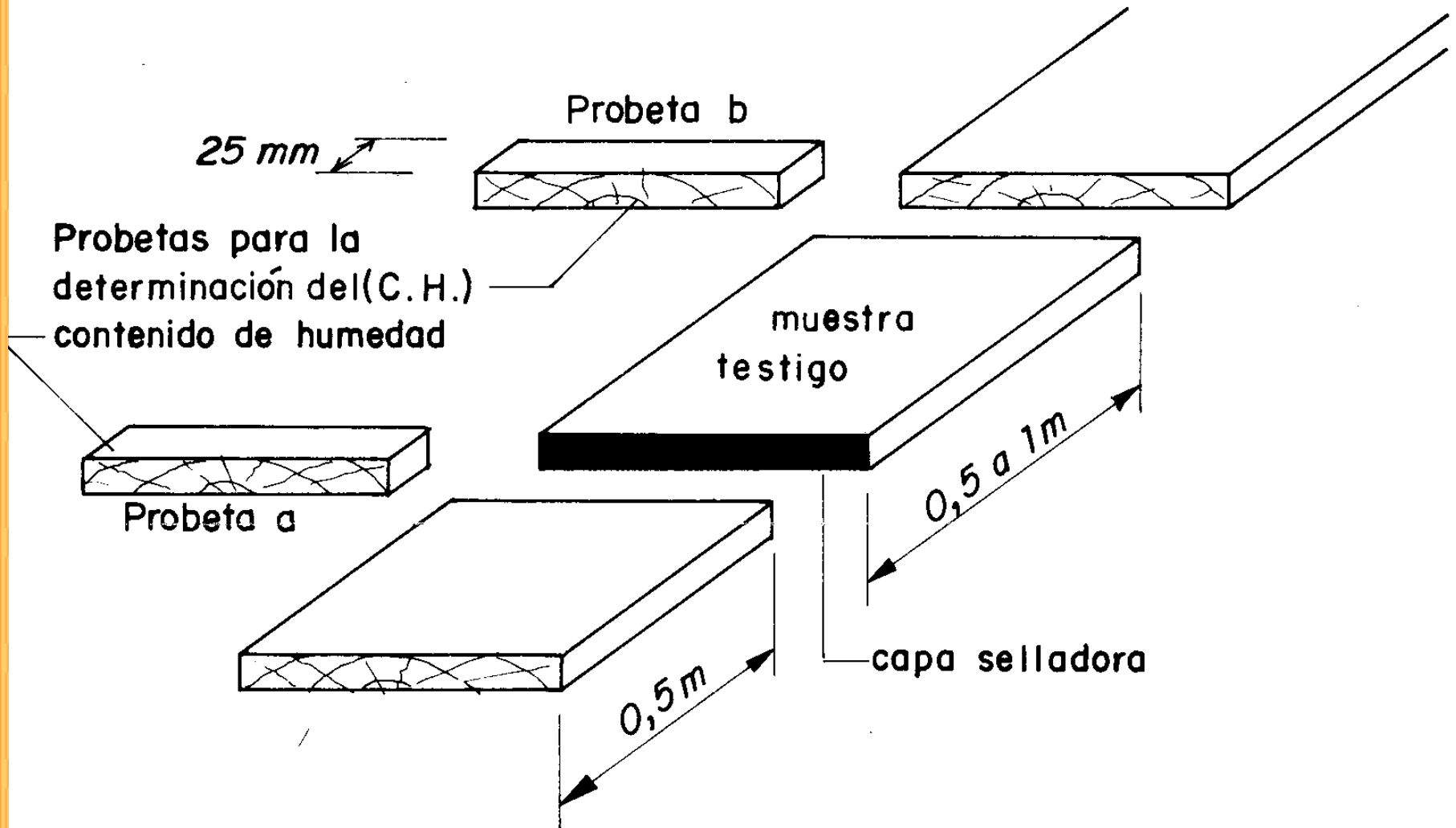
APILADO EN PAQUETES



CONTROL DEL SECADO

- Indica la velocidad del secado
- Permiten detectar fallas que afecten la eficiencias de las cámaras
- Sirven para ajustar el programa de secado
- Indican la necesidad de tratamientos de recuperación o acondicionamientos y su duración
- Permiten controlar el contenido de humedad final
- Ayudan a determinar los horarios de secado

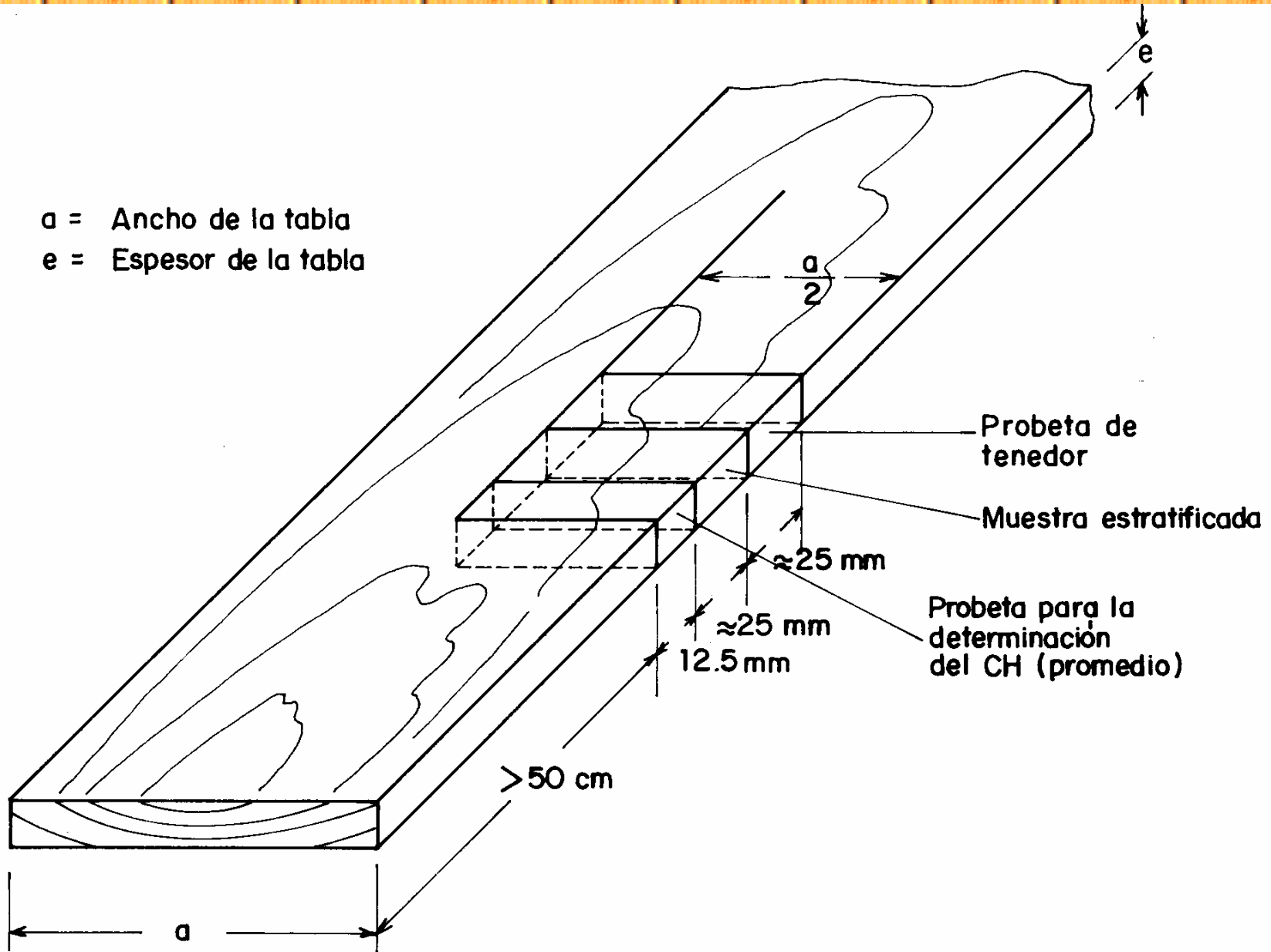
CONTROL MANUAL



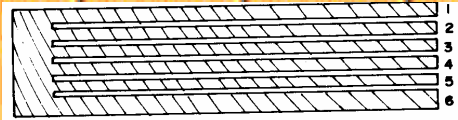
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y DEL PESO SECO AL HORNO DE LAS MUESTRAS

- $$CH = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{Peso final}} \times 100$$
- $$PSH = \frac{\text{peso inicial de la muestra} \times 100}{100 + CH \text{ de la muestra}}$$
- $$CH \text{ actual} = \frac{\text{peso actual} - \text{peso seco calculado}}{\text{peso seco calculado}} \times 100$$

CHEQUEO DE TENSIONES



PRUEBA DE TENEDOR



Se eliminan los elementos 2 y 5 de la probeta

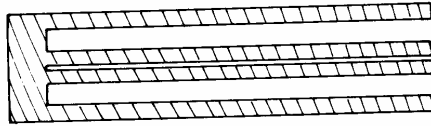
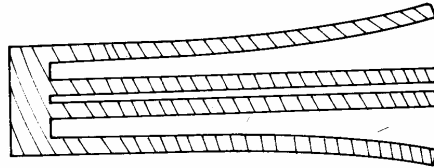
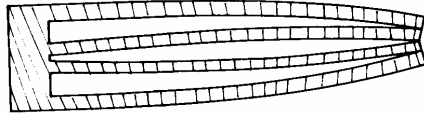


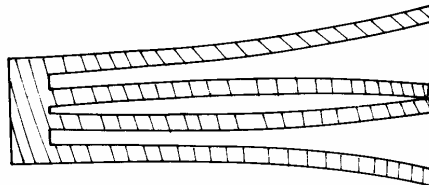
Tabla libre de tensiones



Secado parcial en las partes exteriores



Tensiones fuertes al final del secado



Acondicionamiento excesivo

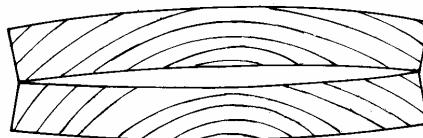
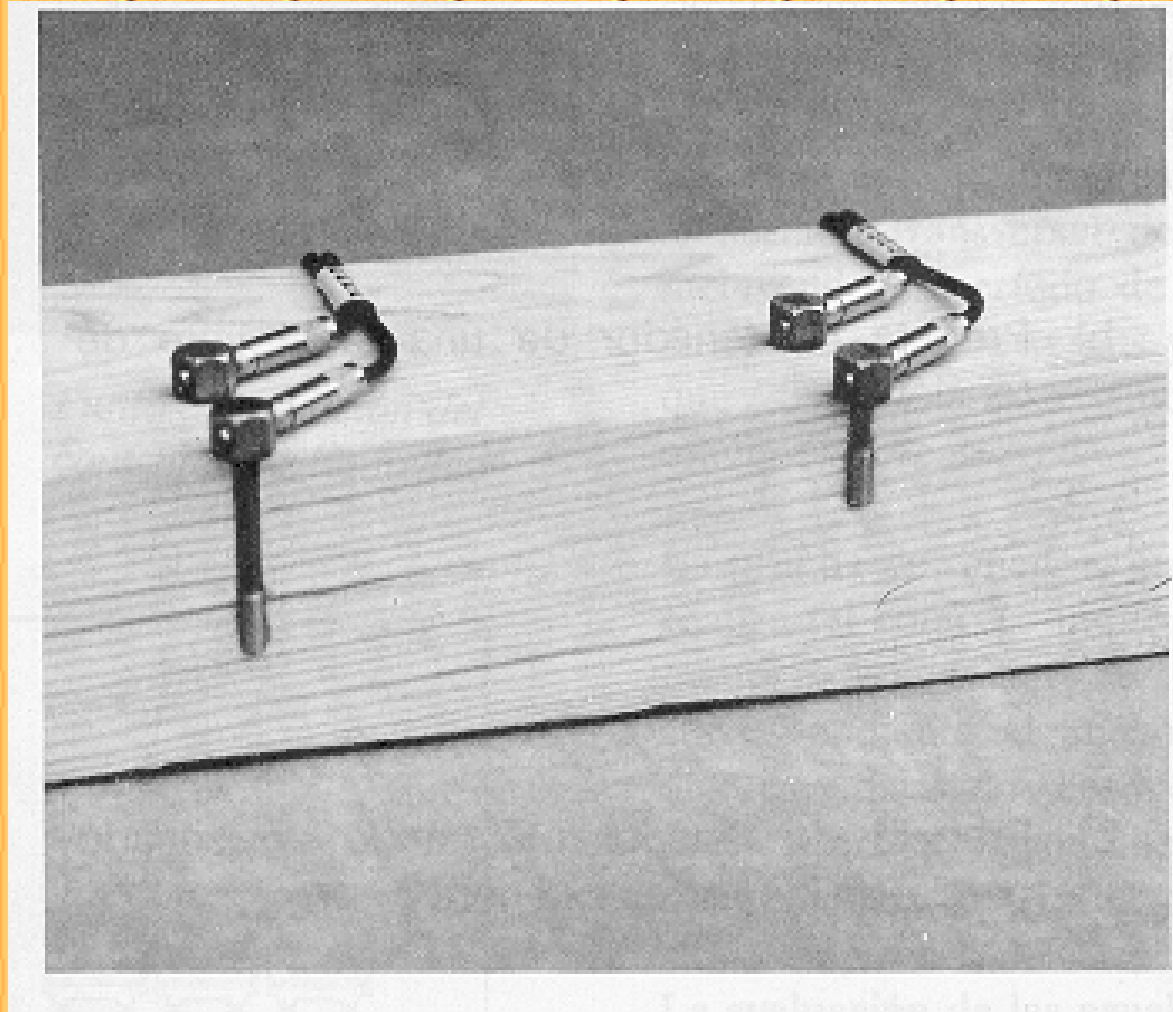
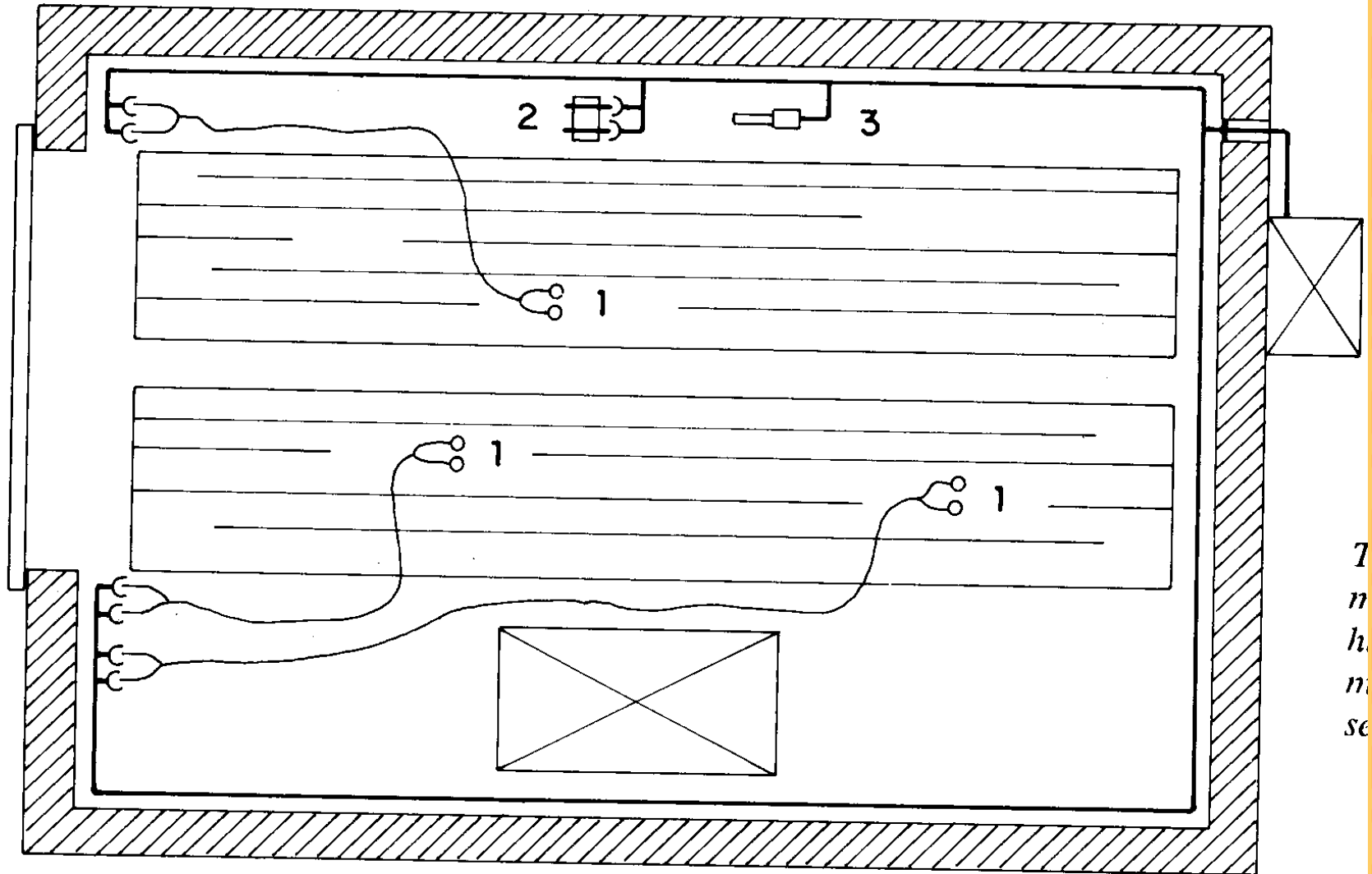


Tabla sin acondicionamiento correcto cortada por la mitad

CONTROL CON ELECTRODOS O SENSORES



DISTRIBUCIÓN DE SENSORES

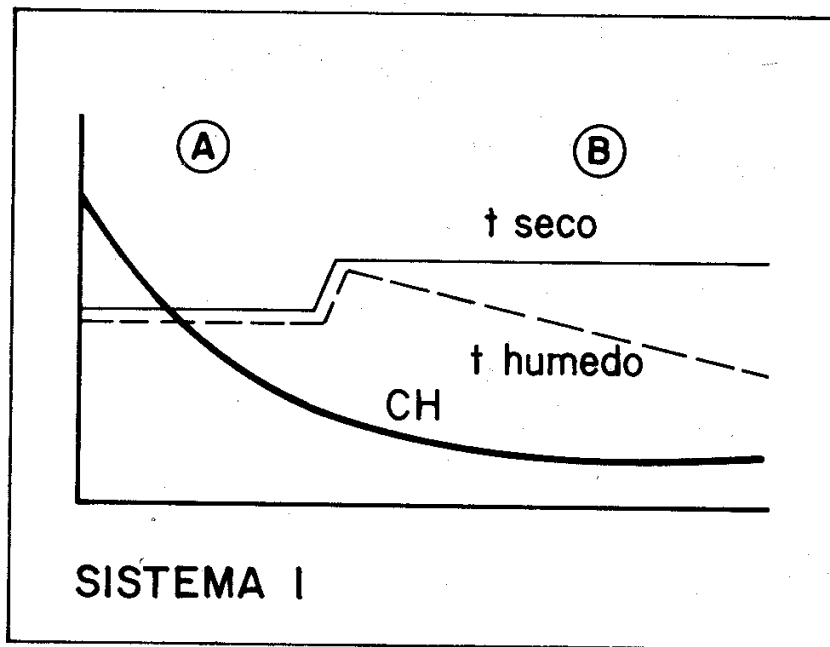


T
n
h
n
se

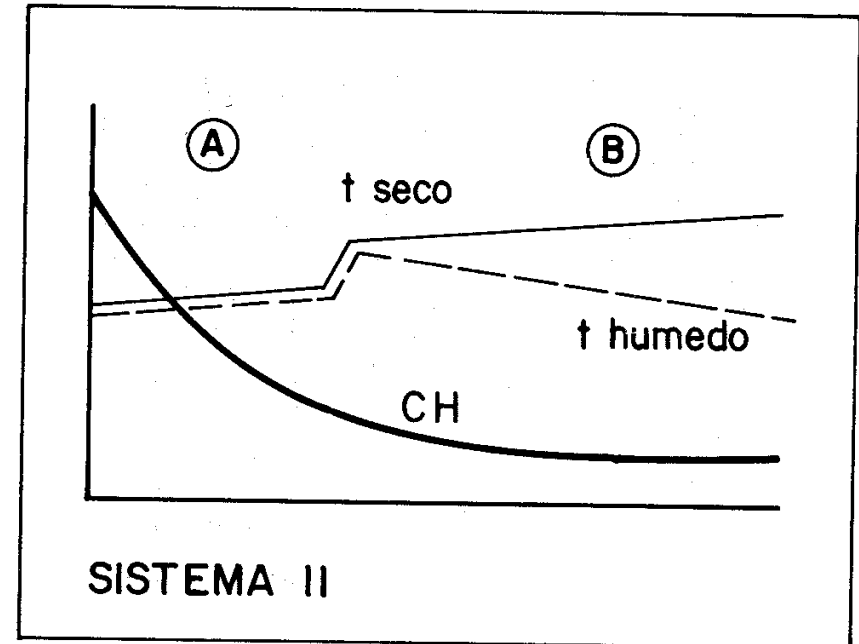
EQUIPOS DE CONTROL SEGÚN GRADO DE AUTOMATIZACIÓN

- Sin automatización: psicrómetro simple
- Automatización parcial: la medición y control del clima dentro del secadero y del CH de la madera se hace automáticamente, pero la modificación de estos parámetros es manual
- Automatización total: medición , control y regulación del proceso es automática

AUTOMATIZACIÓN PARCIAL

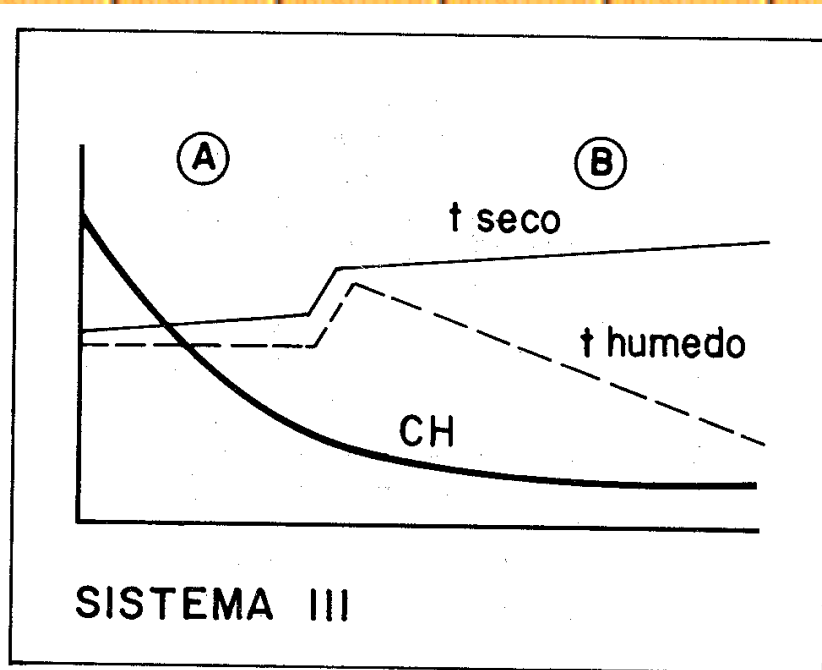


La diferencia psicrométrica se mantiene constante en la fase A y aumenta en forma lineal en la fase B

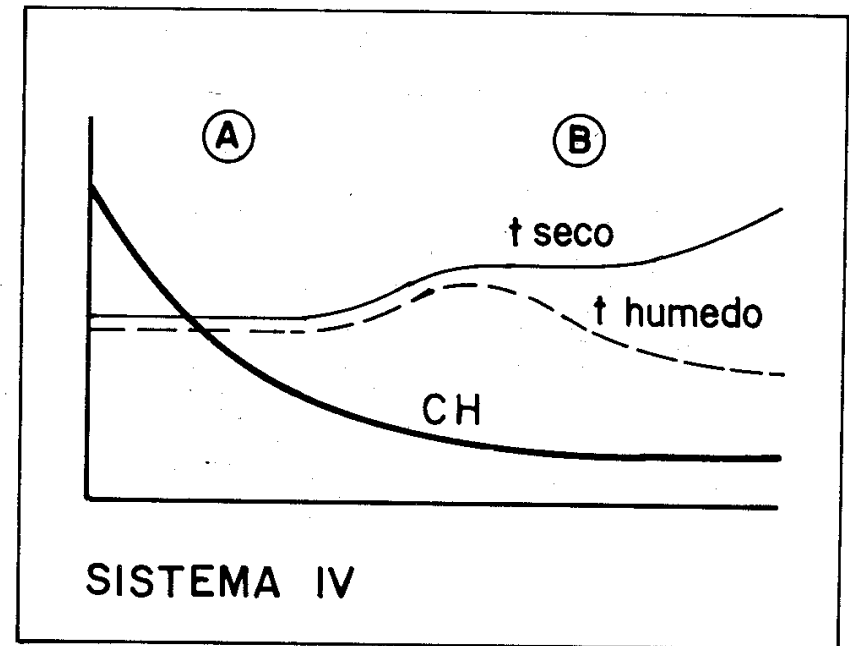


La temperatura del bulbo seco aumenta en forma lineal durante ambas fases. La diferencia psicrométrica se mantiene durante la fase A y aumenta en la fase B

AUTOMATIZACIÓN PARCIAL



La temperatura del bulbo seco y la diferencia psicrométrica aumentan en forma lineal durante las fases A y B



La temperatura del bulbo seco y la diferencia psicrométrica varían en ambas fases en cualquier forma

FASES DEL PROCESO DE SECADO

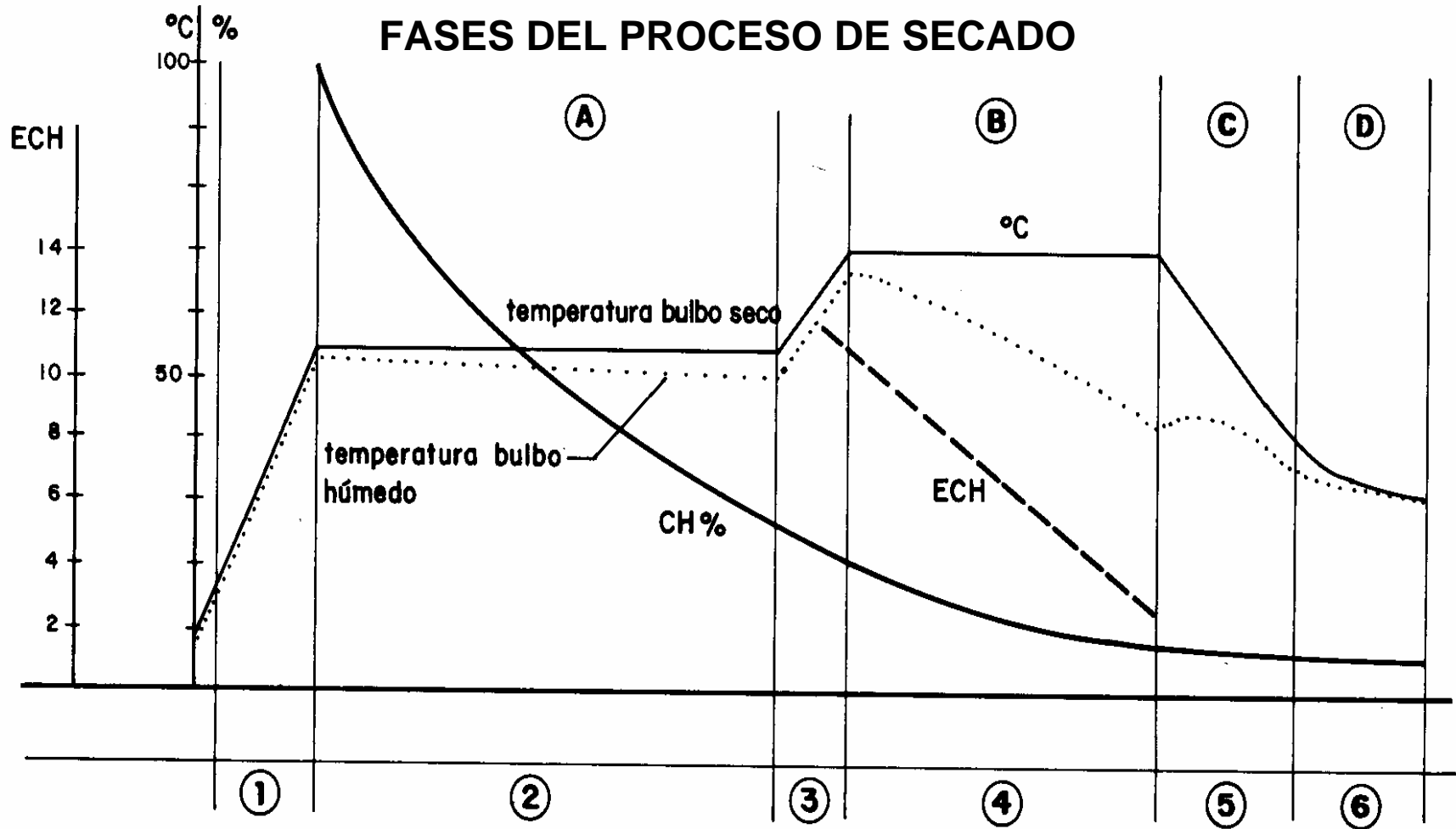
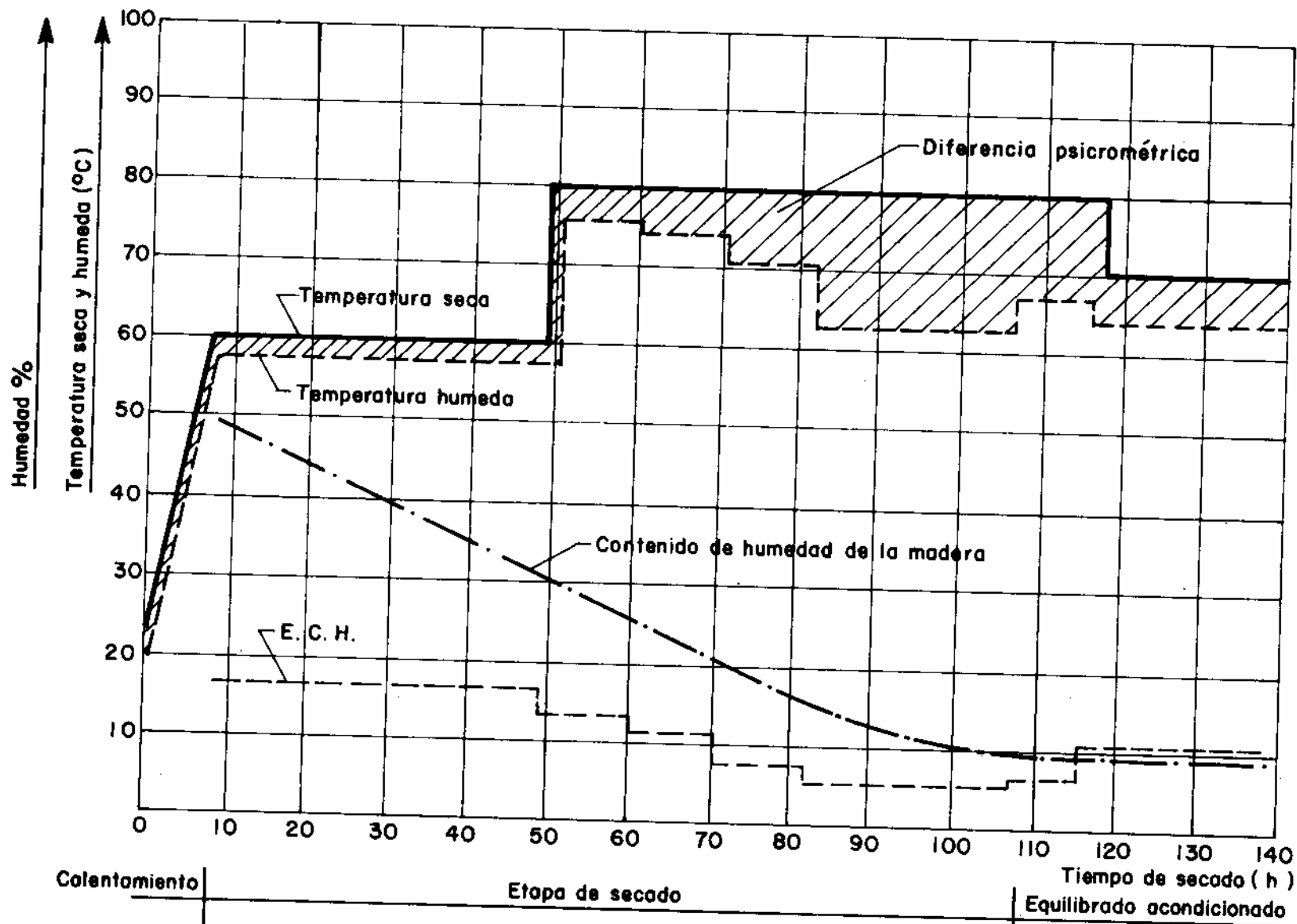


Fig. 4.13 Secado por evaporación, ciclo esquemático (según BOLLMANN 1984).

- | | |
|--|--|
| 1. Calentamiento | 5. Acondicionamiento C. |
| 2. Etapa de secado A (antes del PSF) | 6. Enfriamiento D. |
| 3. Calentamiento intermedio. | ECH = Equilibrio del contenido de humedad. |
| 4. Etapa de secado B (después del PSF) | PSF = Punto de saturación de la fibra. |

DIAGRAMA DE SECADO CONTROLADO CON UN PSICRÓMETRO



TIEMPO DE CALENTAMIENTO SEGÚN LA DENSIDAD DE LA MADERA

CALENTAMIENTO DE LA CARGA

ETAPA A

TIEMPO DE CALENTAMIENTO	ESPEORES	
	≤ 30 mm.	≥ 30 mm.
Maderas con $\rho_0 < 450 \text{ kg/m}^3$	1 - 1.5	1.5 - 2.0
$\rho_0 450 - 600 \text{ kg/m}^3$	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5
$\rho_0 600 - 800 \text{ kg/m}^3$	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0
$\rho_0 > 800 \text{ kg/m}^3$	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5
	Horas por 10 mm de espesor	

ESQUEMA DE CALENTAMIENTO SEGÚN EL CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL

CH inicial de la madera a secar	madera con una densidad ρ_0					
	$\rho_0 \leq 500 \text{ kg/m}^3$			$\rho_0 \geq 500 \text{ kg/cm}^3$		
	$\Delta t^\circ\text{C}$	ECH %	HR %	$\Delta t^\circ\text{C}$	ECH %	HR %
CH $\geq 50 \%$	2 - 3	17 - 15	90 - 84	1.5 - 2.5	18 - 16	92 - 87
30 % - 50 %	2 - 4	17 - 13	90 - 79	2 - 3	17 - 15	90 - 84
20 % - 30 %	3 - 4	15 - 13	84 - 79	2.5 - 3.5	16 - 14	87 - 79
CH $\leq 20 \%$	3 - 4	15 - 13	84 - 79	3 - 4	15 - 13	84 - 79

PROGRAMAS DE SECADO

Secuencia de condiciones climáticas , temperatura y humedad relativa del aire, aplicables durante etapas de secado previamente establecidas para una determinada especie

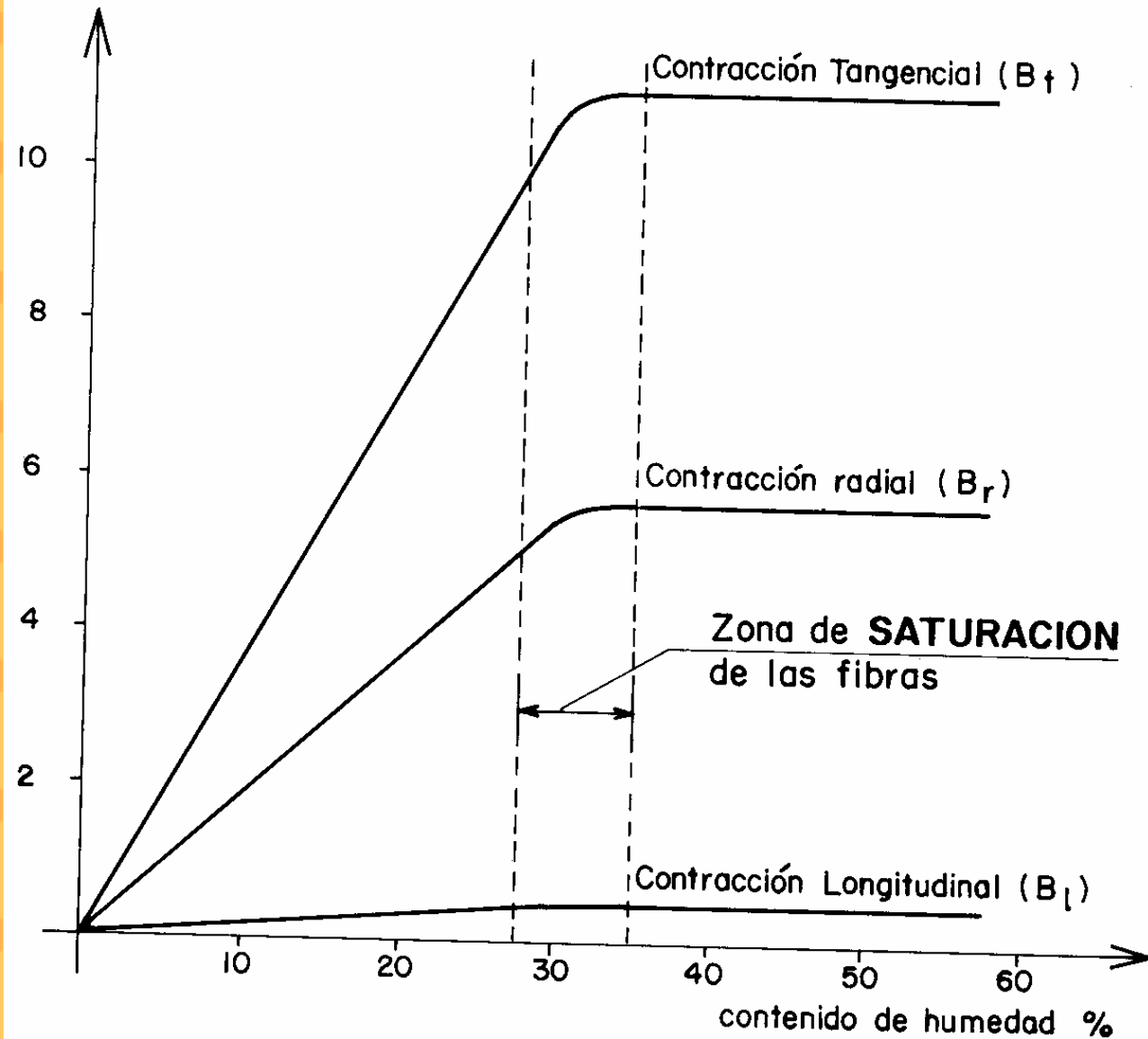
PROGRAMAS DE SECADO SEGUN LA JUNAC

- **FUERTE (F):** Maderas latifoliadas de secado fácil. Saqui-saqui, mureillo, sun-sun
- **MODERADO (M):** Maderas latifoliadas de secado lento y/o propensas a deformaciones y agrietamientos. Mijao, charo, algarrobo
- **SUAVE (S):** Maderas latifoliadas de secado difícil. Eucalipto, carapa, sangre drago

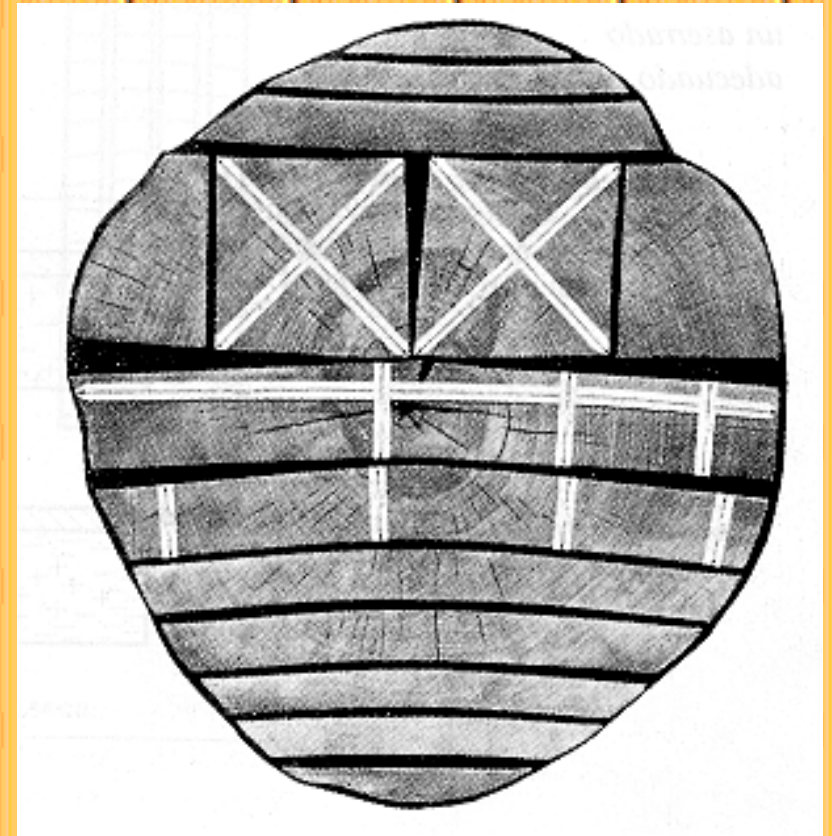
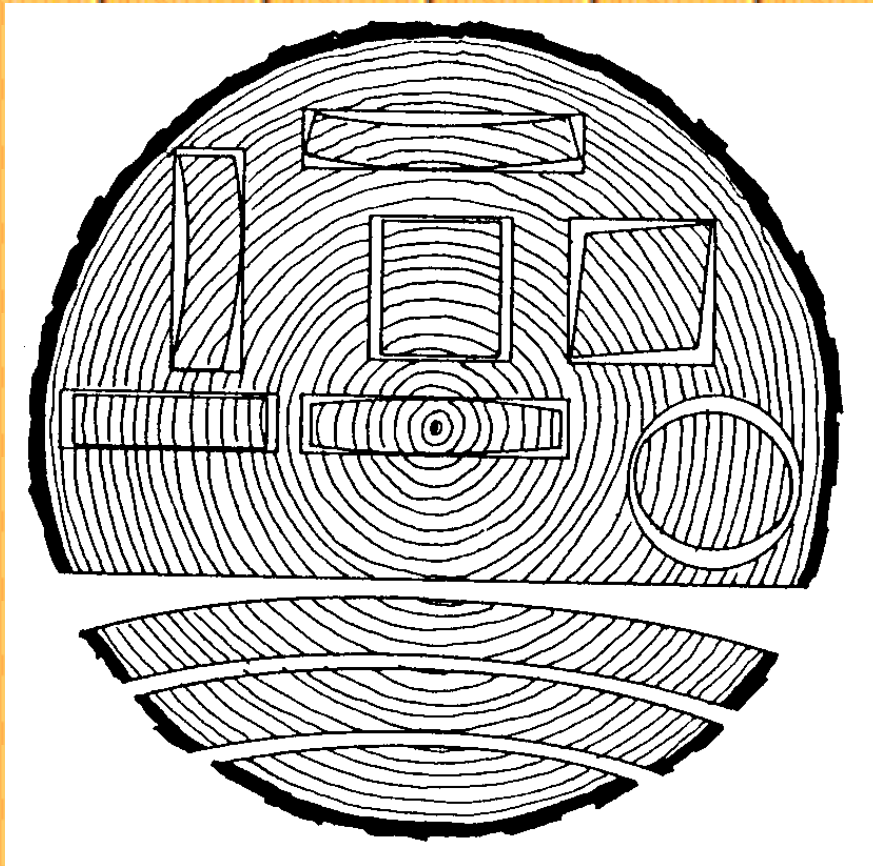
Programa de Secado	Contenido de Humedad de la Madera %	Temperatura (°C)		Humedad
		Term. Seco	Term. Húmedo	Relativa Aprox. %
FUERTE (F)	Verde	60	56	80
	60	65	58	70
	50	70	60	60
	40	75	61	50
	30	80	62	40
	20	80	60	35
MODERADO (M)	Verde	50	47	80
	60	55	49	70
	40	60	51	60
	30	65	52	50
	25	70	54	40
	20	70	50	35
SUAVE (S)	Verde	40	37	80
	40	40	35	70
	30	45	37	60
	25	50	40	50
	20	55	42	40
	15	55	37	30

DEFECTOS DEL SECADO

ANISOTROPÍA EN LA CONTRACCIÓN DE LA MADERA



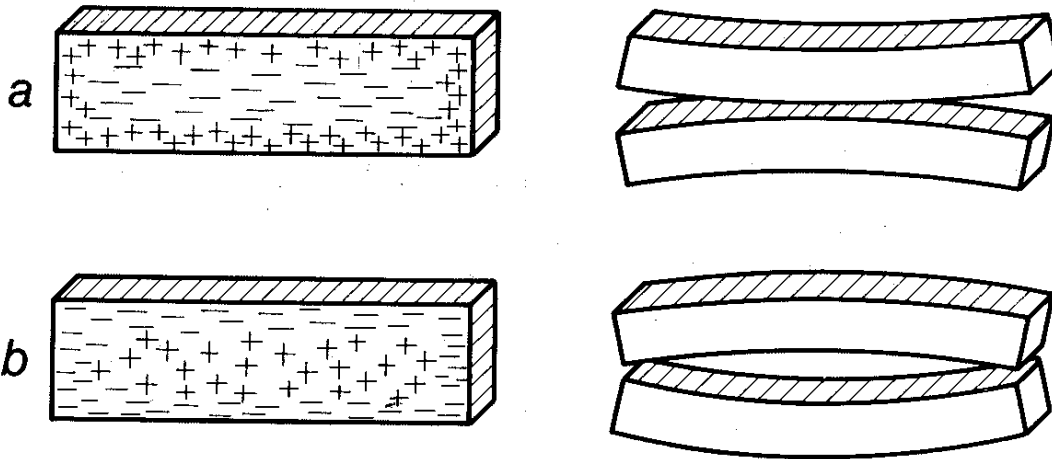
DEFORMACIÓN NATURAL DURANTE EL SECADO



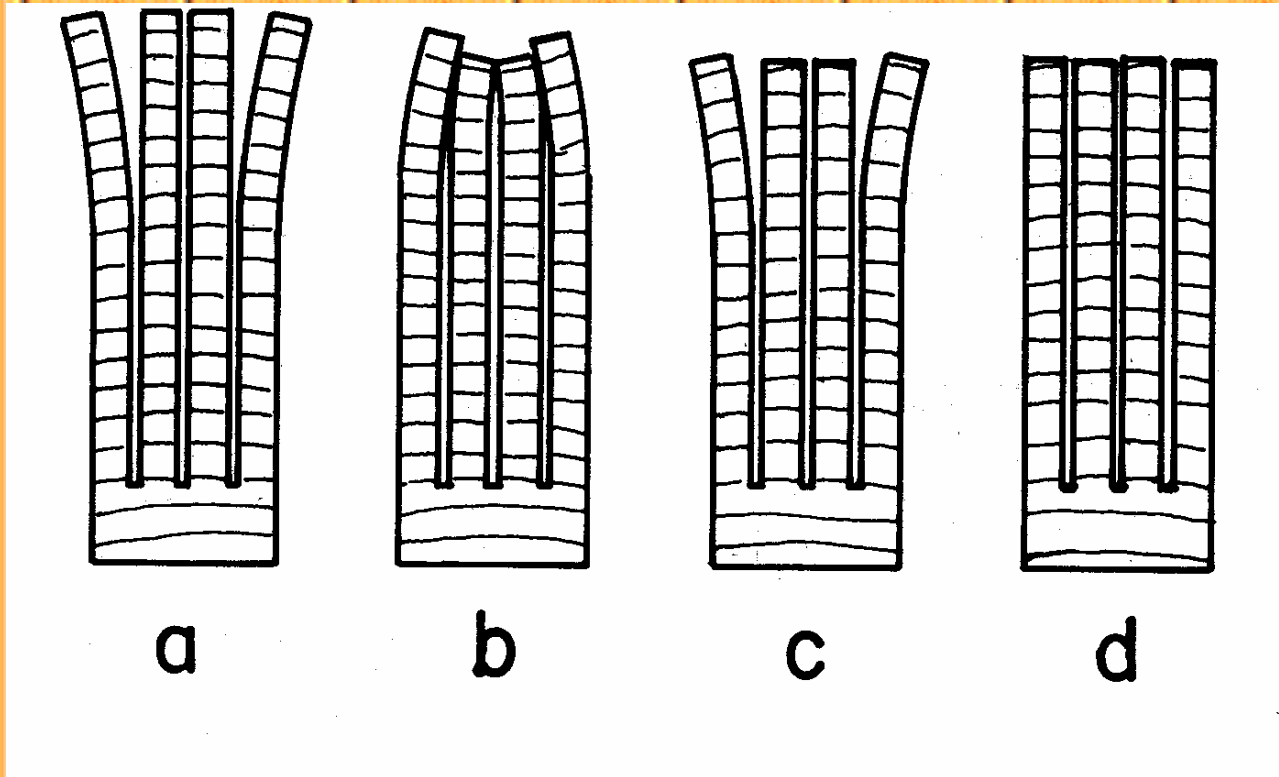
ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

a) Madera al inicio del secado; afuera tensión de tracción, por dentro tensión de compresión

b) Tabla endurecida; afuera tensión de compresión, por dentro tensión de tracción

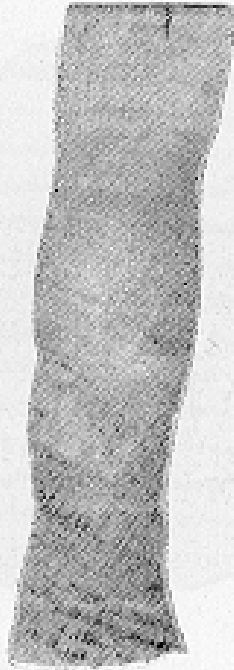


MUESTRAS DE TENEDOR PARA DETECTAR TENSIONES EN MADERA SECA

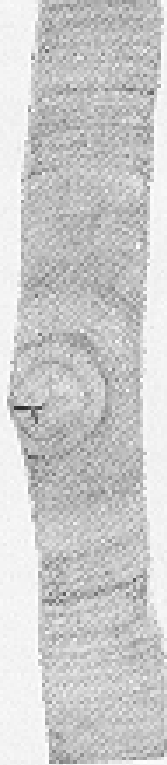


a) Inicio del secado; b) Endurecimiento; c) Endurecimiento eliminado mediante vaporización d) Madera seca sin tensiones

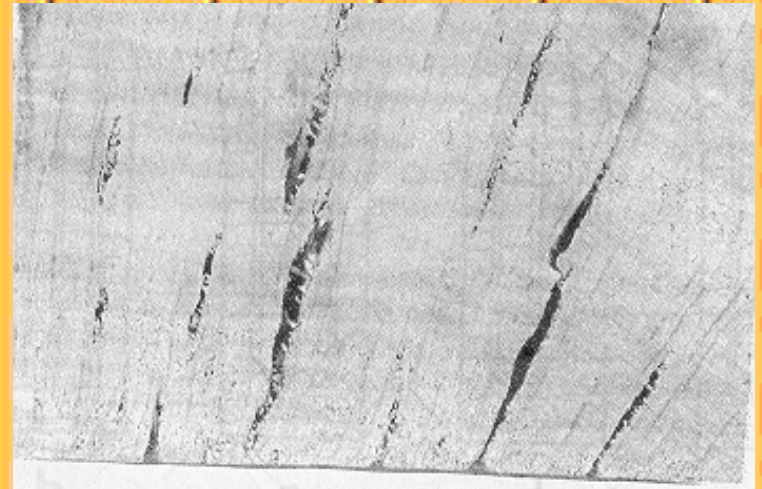
COLAPSO CELULAR



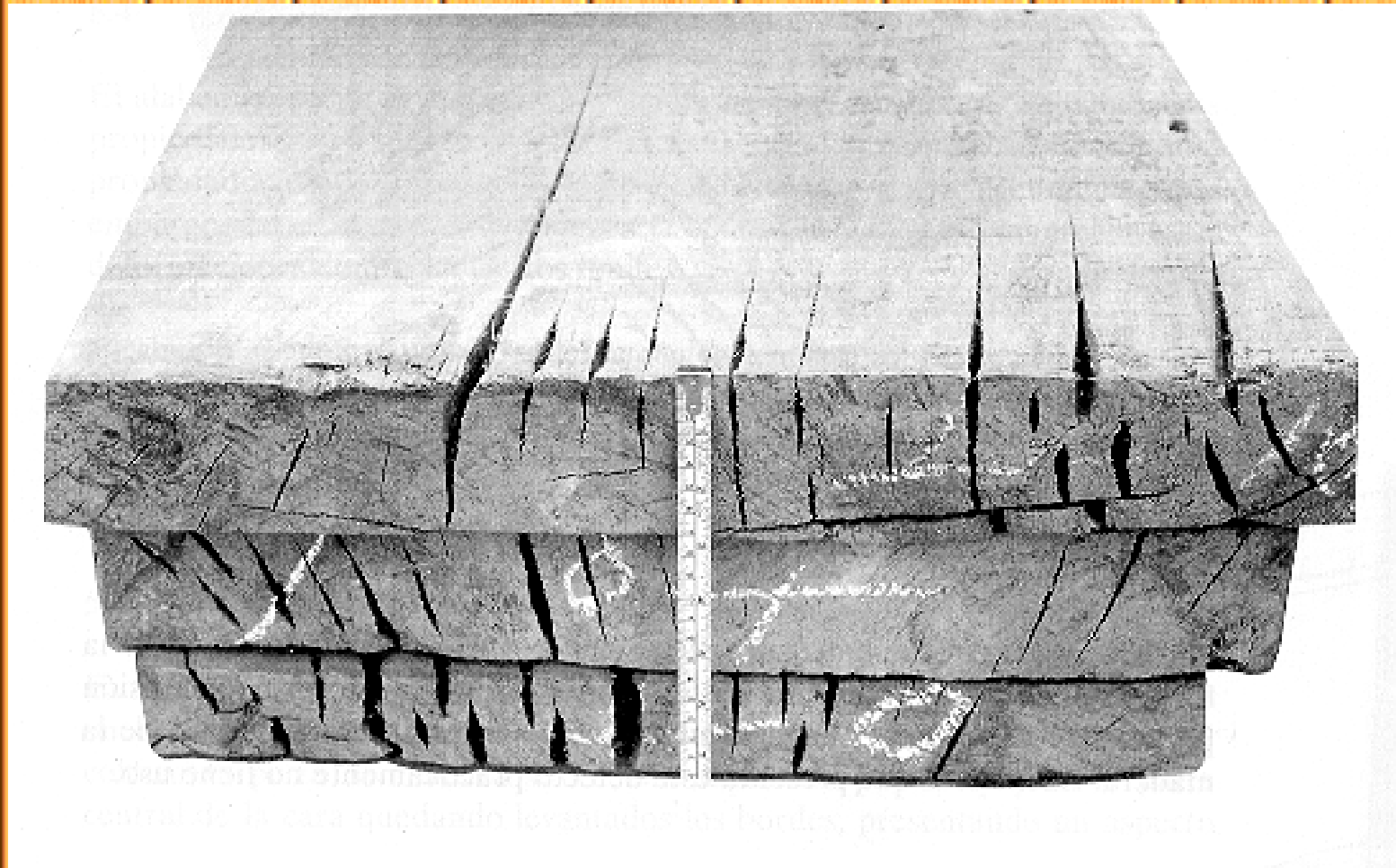
*Colapso de una
tabla de CEDRO
(Cedrela sp.)
después del
secado al aire libre*



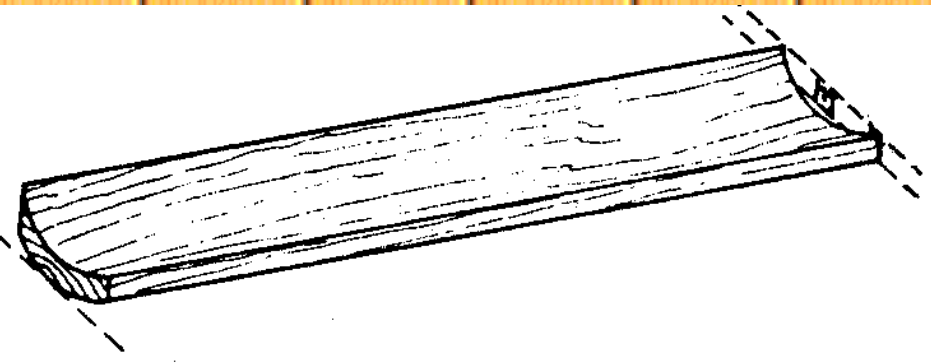
*Colapso de una tabla
de EUCALIPTO
(secado normal)*



GRIETAS SUPERFICIALES Y EN LOS EXTREMOS



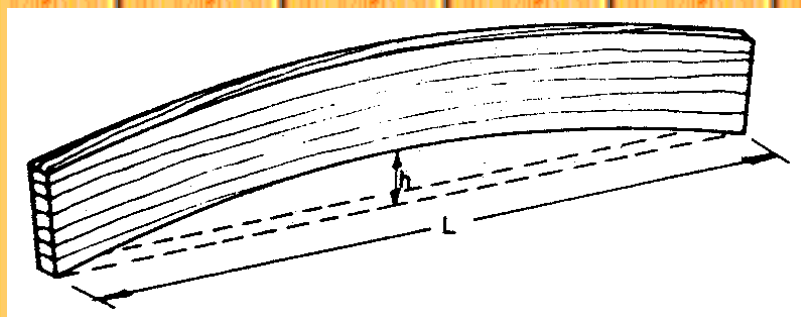
ALABEO



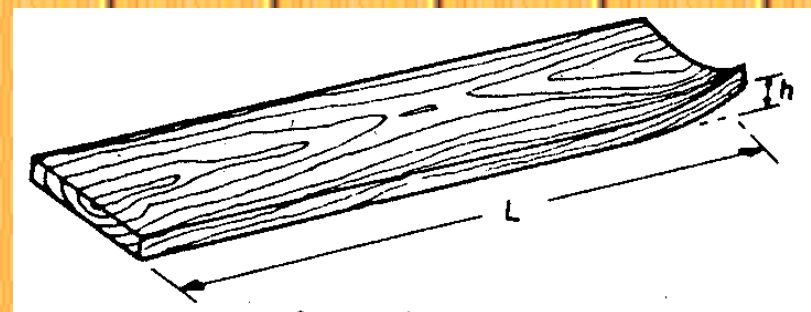
Abarquillado



Arqueadura



Encorvadura



Torcedura

