

Que sucede en el proceso de secado de la madera en un horno



1. Estado inicial: madera húmeda y aire del horno

1.1. Contenido de humedad y tipos de agua en la madera

En un pino recién aserrado tienes:

- **Agua libre:**

En cavidades celulares (lúmenes y espacios intercelulares)

- Esta agua se mueve relativamente fácil (capilaridad, flujo a presión, "escurrimiento interno").

- **Agua ligada:**

Unida por enlaces de hidrógeno a los grupos OH de la pared celular

- Esta agua solo sale cuando rompes parte de esos enlaces y difunde a través de la pared.

- **Punto de saturación de fibras (PSF):**

- Por arriba del PSF: la mayoría del agua que se pierde es libre.
Por debajo del PSF: se trata de agua ligada, y la dinámica de secado cambia radicalmente.

1.2. Aire del horno: temperatura, humedad y presión de vapor

En el horno tienes aire con:

- **Temperatura del bulbo seco** T_{BS}
- **Temperatura del bulbo húmedo** T_{BH}
- **Humedad relativa** RH
- **Presión parcial de vapor de agua** p_v

La **presión de vapor de saturación** del agua depende de la temperatura:

$$p_{vsat} = p_{vsat}(T)$$

La **humedad relativa** es:

$$RH = \frac{p_v}{p_{vsat}(T)} \times 100\%$$

Y esa p_v es clave, porque la madera "decide" si suelta agua o la absorbe comparando su propio estado con el del aire.

2. Idea central: equilibrio higroscópico y gradiente de presión de vapor

2.1. Madera como sistema higroscópico

La madera es un material **higroscópico**: intercambia humedad con el aire hasta que alcanza un:

Contenido de humedad en equilibrio (EMC)

El EMC depende de T y de RH . Para un T y RH dados, hay un único EMC "estable".

- Si $MC_{\text{madera}} > EMC$: la madera **cede** agua al aire.
- Si $MC_{\text{madera}} < EMC$: la madera **absorbe** agua del aire.

Desde el punto de vista físico, esto es un problema de **equilibrio químico de potenciales**: el agua está más "inestable" dentro de la madera que en el aire, por lo que tiende a salir, buscando equilibrio.

2.2. Gradiente de presión de vapor como motor

En el secado, el motor real es el **gradiente de presión de vapor**:

- Dentro de la madera (en los poros) hay una cierta **presión parcial de vapor** $p_{v,madera}$.
- En el aire del horno, hay otra $p_{v,aire}$.

Si:

$$p_{v,madera} > p_{v,aire}$$

entonces el vapor tiende a salir de la madera hacia el aire. Ese gradiente impulsa:

1. La salida del vapor en la **superficie de la madera**.
 2. El flujo interno de humedad desde el interior hacia la superficie (difusión).
-

3.1. De agua líquida a vapor

El proceso tiene dos etapas físicas dentro de la pieza:

1. Transporte interno de agua:

- Por **capilaridad y flujo líquido** (por encima del PSF).
- Por **difusión de agua ligada** (por debajo del PSF).

2. Evaporación en la superficie:

- El agua que llega a la superficie se **evapora**, creando vapor en los poros superficiales.
- Ese vapor se difunde al aire del horno.

La difusión de agua ligada se puede aproximar con una ley tipo Fick:

$$J = -D \cdot \nabla C$$

donde:

- J es el flujo de humedad,
- D es el coeficiente de difusión (depende de T , especie, dirección anatómica),
- ∇C es el gradiente de concentración de humedad en la madera (desde el centro húmedo hacia la superficie más seca).

3.2. Rol de la temperatura

Al aumentar la temperatura:

- **Disminuye el EMC:** el aire a la misma RH "pide" menos agua a la madera.
- **Aumenta la energía cinética de las moléculas:** suben D y la velocidad de difusión.
- Se rompen más fácilmente los enlaces de hidrógeno del agua ligada.

Físicamente, la temperatura hace dos cosas simultáneamente:

1. **Facilita la movilidad interna del agua.**
 2. **Reduce la estabilidad del agua en la pared celular,** favoreciendo su salida.
-

4. Intercambio en la interfaz superficie de la madera – aire

En la superficie de la tabla:

- Se genera un **capa límite de aire** (una lámina delgada pegada a la superficie).
- Dentro de esa capa, la concentración de vapor sube porque la madera está liberando agua.
- La ventilación (ventiladores internos) y la ventila abierta reducen esa concentración, manteniendo $p_{v,\text{aire}}$ bajo.

El flujo de masa (vapor) de superficie al aire se parece a una ley de transferencia de calor, pero para masa:

$$N = k_m \cdot (C_{\text{superficie}} - C_{\text{aire}})$$

donde:

- N es el flujo de vapor de agua de la superficie al aire,
 - k_m es el coeficiente de transferencia de masa (depende de la velocidad del aire y la rugosidad),
 - $C_{\text{superficie}}$ y C_{aire} son las concentraciones de vapor en la superficie y en el aire.
-

5. Ventila abierta: expulsión de vapor y mantenimiento del gradiente

5.1. ¿Qué hace realmente la ventila?

La ventila abierta:

- **Expulsa aire caliente y húmedo** del horno.
- Permite la **entrada de aire más seco** (o recirculación con mezcla) que tiene menor p_v .
- Esto mantiene:

$$p_{v,\text{aire}} \text{ bajo} \Rightarrow p_{v,\text{madera}} - p_{v,\text{aire}} \text{ grande}$$

Es decir, **mantiene el gradiente de presión de vapor** y, por tanto, la fuerza que impulsa el secado.

Sin ventila (o con ventila muy cerrada), el aire se saturaría:

- $RH \rightarrow 100\%$
- $p_{v,\text{aire}} \rightarrow p_{v,\text{sat}}$

y el gradiente se reduciría, frenando el secado.

5.2. Balance de masa de vapor en el horno

Imaginando el horno como un volumen de control:

$$\frac{dM_v}{dt} = \dot{m}_{v,\text{madera} \rightarrow \text{aire}} - \dot{m}_{v,\text{salida por ventila}} + \dot{m}_{v,\text{entrada}}$$

Donde:

- El primer término es el vapor que la madera libera.
- El segundo es el vapor que expulsas por la ventila.
- El tercero es el vapor que entra (normalmente menor, porque el aire entrante es más seco).

El objetivo al manejar la ventila es controlar $\frac{dM_v}{dt}$ para que RH se mantenga en la ventana definida por tu secuela de secado.

6. Etapas de la secuela de secado y cómo cambia la física

Ahora conectemos todo con tu secuela etapa por etapa.

6.1. Acondicionamiento inicial

- **T moderada, RH alta (85–95%).**
- El EMC es relativamente alto: el gradiente entre MC_{madera} y EMC aún existe, pero es **suave**.
- Físicamente:
 - Se busca **igualar temperatura** de la madera con el aire sin generar grandes gradientes de humedad.
 - La ventila está **poco abierta**: se expulsa algo de vapor, pero no tanto como para bajar demasiado RH.
 - El gradiente de presión de vapor es **controlado** para evitar fisuras superficiales.

6.2. Secado primario e intermedio (por encima del PSF)

- La madera todavía tiene mucha **agua libre**.
- La salida de humedad está dominada por:
 - **Movimiento de agua líquida** en cavidades.
 - Evaporación relativamente fácil en la superficie.
- La secuencia aumenta T y baja gradualmente RH:
 - Subes T $\rightarrow$ aumenta p_{vsat} $\rightarrow$ para un mismo p_v , baja RH.
 - Abres más la ventila $\rightarrow$ expulsas más vapor $\rightarrow$ bajas $p_{v,aire}$.

El resultado:

$$p_{v,madera} \gg p_{v,aire} \Rightarrow \text{secado rápido de agua libre}$$

El riesgo físico aquí es que el **gradiente de humedad dentro de la pieza** se vuelva excesivo (superficie muy seca, centro muy húmedo) generando **tensiones** y fisuras. Por eso no bajas RH de golpe.

6.3. Secado avanzado y final (alrededor y por debajo del PSF)

Aquí ya estás atacando principalmente **agua ligada**:

- El transporte interno se vuelve **difusivo**, más lento.
- El gradiente de concentración dentro de la pieza manda.

La secuela sube T y baja más RH:

- Elevas T para aumentar D y romper enlaces agua-madera.
- Bajas RH (ventila más abierta) para que EMC sea de 5–8%.
- El aire está muy “sediento” de agua: el gradiente de presión de vapor es fuerte.

Físicamente, la velocidad de secado deja de estar controlada solo por la superficie y pasa a estar mucho más limitada por la **difusión interna**. Por eso, aunque abras más la ventila, llega un punto de “rendimientos decrecientes”.

6.4. Acondicionamiento final (equalizing)

- Se eleva un poco RH y se ajusta T para que EMC quede cerca de la humedad objetivo final.
- La idea física es reducir los **gradientes de humedad internos**:

$$MC_{\text{superficie}} \approx MC_{\text{centro}}$$

- A nivel de vapor:
 - El $p_{v,\text{aire}}$ se ajusta para que ya no haya un gradiente tan agresivo.
 - Las diferencias de potencial de humedad dentro de la madera se “suavizan”.

6.5. Vaporado (steaming)

Cuando haces steaming:

- Subes T y RH casi a saturación ($RH \rightarrow 100\%$).
- EMC teóricamente sube mucho, pero no estás buscando rehumedecer totalmente la madera, sino:
 - **Relajar tensiones internas** (plasticidad térmica y suavización de gradientes residuales).
 - Mejorar color.

Físicamente:

- El vapor penetra superficialmente y **reblandece** la estructura.
 - El gradiente de presión de vapor se invierte ligeramente en la capa externa (ligera absorción) sin rehidratar a fondo el núcleo, si el tiempo es corto.
 - Se alivian tensiones mecánicas generadas durante el secado.
-

7. Cómo se refleja esto en tu sistema de monitoreo y control

Si lo bajas a tu lógica de secado con sensores:

- **Midiendo T y RH** en el horno, estás midiendo indirectamente:

$$p_{v,\text{aire}} \text{ y } EMC$$

- **Abriendo o cerrando la ventila** controlas:

$$\frac{dp_{v,\text{aire}}}{dt} \text{ y por tanto } \frac{dEMC}{dt}$$

- La estrategia física en cada etapa:
 - **Inicial:** Gradiente de vapor suave, RH alta.
 - **Intermedio:** Gradiente moderado–fuerte, agua libre saliendo, ventila más activa.
 - **Final:** Gradiente fuerte pero limitado por difusión interna, ventila bien controlada.
 - **Equalizing / steaming:** Ajuste del gradiente para equilibrar y relajar tensiones.



1. Diagrama general del proceso de secado en horno

Copiar

AIRE DEL HORNO

Temperatura (T) → Aumenta energía del vapor
Humedad relativa (RH) → Determina EMC
Presión de vapor (pv) → Motor del secado

Ventiladores → Rompen capa límite
Ventila abierta → Expulsa vapor y baja pv



Intercambio de vapor

MADERA

Agua libre → Sale rápido (capilaridad)
Agua ligada → Sale lento (difusión)
Gradiente interno → Centro húmedo → superficie seca
Superficie → Evaporación hacia el aire



2. Diagrama del gradiente de presión de vapor

Este es el motor físico del secado.

 Copiar

Interior de la madera
(alta humedad)

Aire del horno
(más seco)

pv_madera
(alto)



pv_aire
(bajo)

Fuerza impulsora = $pv_madera - pv_aire$

Cuando abres la ventila:

 Copiar

Ventila abierta

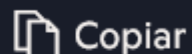


pv_aire ↓↓↓

→ Aumenta el gradiente → Aumenta la velocidad de secado



3. Diagrama del flujo interno de humedad en la madera



Centro de la tabla (muy húmedo)

Agua libre: flujo líquido (rápido)
Agua ligada: difusión (lento)



Superficie de la madera (más seca)



Aire del horno (evaporación)

Representación tipo perfil:

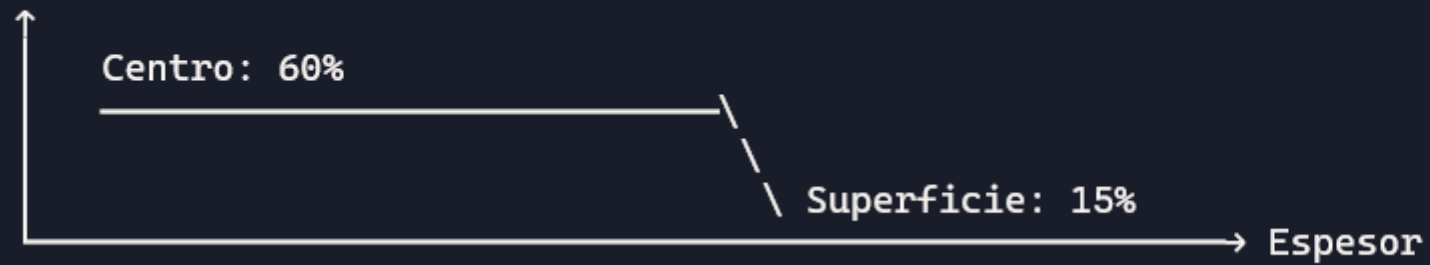
 Copiar

Contenido de humedad (%)

Centro: 60%

Superficie: 15%

→ Espesor



🔥 4. Diagrama del intercambio en la superficie (capa límite)

 Copiar

Madera



Capa límite

← Aire casi inmóvil, vapor se acumula



Aire turbulento

↑ Ventiladores rompen la capa límite

Efecto:

 Copiar

$C_{\text{superficie}} \text{ alta} \rightarrow C_{\text{aire}} \text{ baja} \rightarrow \text{Flujo de vapor grande}$



5. Diagrama del efecto de la ventila en el horno

 Copiar

Horno cerrado:

Vapor se acumula
RH ↑↑
pv_aire ↑
Gradiente ↓

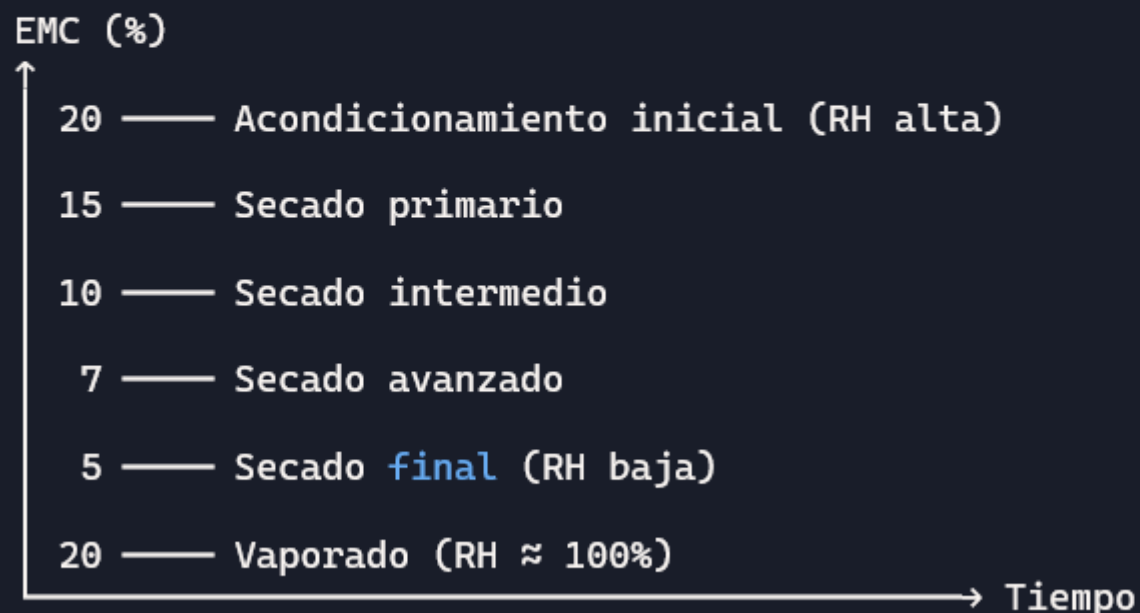
Horno con ventila abierta:

Vapor expulsado
RH ↓
pv_aire ↓↓↓
Gradiente ↑↑↑



6. Diagrama del EMC vs. etapas de secado

 Copiar





7. Diagrama completo del proceso (vista integrada)

 Copiar

ETAPA DEL SECADO
1. Acondicionamiento inicial T baja-media, RH alta → EMC alto → gradiente suave
2. Secado primario T sube, RH baja → EMC baja → gradiente fuerte
3. Secado intermedio Agua libre casi fuera → domina difusión
4. Secado avanzado T alta, RH baja → EMC muy bajo → extracción de agua ligada
5. Secado final Gradiente fuerte pero limitado por difusión interna
6. Equalizing RH sube → EMC sube → se reducen gradientes internos
7. Vaporado RH $\approx$ 100% → relajación de tensiones