

---

# SECADO DE LA MADERA EN ATMÓSFERA DE VAPOR SOBRECALENTADO Y CONDICIONES DE VACÍO.

Relaciones humedad  
de equilibrio/temperatura/presión

Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco  
Humberto Alvarez Noves

---

CIFOR-INIA

**EL SECADO DE LA MADERA** en atmósfera pura de vapor sobrecalentado a la presión normal es un proceso conocido desde finales del siglo pasado.

Este método implica el empleo de temperaturas secas superiores al punto de ebullición del agua (p.e.), lo que hace que ciertas maderas, especialmente frondosas, presenten una marcada tendencia al agrietamiento interno y al colapso. La ventaja del método radica en la facilidad con la que se controla el proceso ya que basta la monitorización de la temperatura en el centro de los testigos para, a través de relaciones conocidas temperatura/humedad de equilibrio (HEH), determinar el punto final del secado.

Debido a esta evidente ventaja, que permite una total automatización del proceso de forma totalmente fiable, y al problema que presentan las maderas con tendencia al agrietamiento interno, es por lo que se está intentando en la actualidad secar en atmósferas de vapor sobrecalentado bajo presiones inferiores a la normal (1 atm).

De acuerdo con esto, sería posible secar la madera en atmósfera de vapor sobrecalentado

por debajo de 100°C, sin más que hacer descender la presión, y por tanto el p.e.. Así, por ejemplo, trabajando a presiones de 123 mbares se hace descender el p.e. a 50°C, con lo que a esta presión y elevando ligeramente la temperatura por encima de los 50°C se consigue secar en atmósfera de vapor sobrecalentado. Esta forma de proceder permite obviar los defectos que se producen en ciertas maderas por efecto de las altas temperaturas.

Dado el empirismo, más o menos evidente, que rige el proceso del secado de la madera, es necesario determinar de forma experimental para cada madera la presión adecuada de trabajo que lleve a evitar los defectos antes citados.

Finalmente, si se quiere hacer extensible la principal ventaja del proceso de secado bajo atmósfera de vapor sobrecalentado a presión normal, es decir, su fácil automatización, a las operaciones bajo condiciones de vacío, será necesario establecer las relaciones que ligan la temperatura seca con la humedad de equilibrio de la madera.

A lo largo del presente artículo se pasará revista a los conceptos fundamentales de humedad relativa, punto de ebullición y humedad de equilibrio, y su relación con la presión atmosférica.

## Conceptos fundamentales

Consideraciones de tipo general sobre la Termodinámica del secado han sido abordadas por Eckelman y Baker (1976) y sobre el secado al vacío en vapor sobrecalentado por Kauman (1956) y Noack (1958). No obstante, estudios encaminados a la obtención de las curvas que interrelacionan contenidos de humedad, presión, temperatura y humedad relativa en el secado en vacío sobre vapor sobrecalentado a presiones inferiores a 500 mbar no han sido efectuados.

### PUNTO DE EBULLICIÓN DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN

La temperatura que existe justo encima del líquido durante la ebullición se denomina temperatura o punto de ebullición y corres-

ponde a aquella para la cual la tensión máxima de vapor es igual a la presión exterior.

En estas circunstancias el valor de la presión exterior influye directamente en el punto de ebullición. Se ha comprobado que en las proximidades de la presión normal una variación de la presión de 10 mmHg, lleva consigo una modificación en la temperatura de ebullición de 0,0375°C.

De acuerdo con esto, la fórmula que liga el valor del p.e. con la presión, en mmHg, (por encima de los 500 mmHg) es la siguiente:

$$t=100+(P-760)0,0375$$

La figura 1 recoge de forma gráfica la relación entre la presión atmosférica y la temperatura de ebullición.

### HUMEDAD RELATIVA POR ENCIMA DEL P.E.

La humedad relativa de una atmósfera secante a una temperatura seca  $t$ , se puede definir de varias formas, si bien normalmente lo es de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Hr=(p_p/p_s)*100$$

donde  $p_p$ : presión parcial del vapor de agua a la temperatura  $t$

$p_s$ : presión de saturación de dicha atmósfera a la temperatura  $t$

Este concepto, definido de esta manera, puede ser extensible al caso del secado en atmósferas de vapor sobrecalentado a temperaturas por encima del p.e. La única diferencia estribará en la variación de  $p_s$  con la temperatura. El concepto es, asimismo, extensible al caso

de las atmósferas mixtas aire-vapor, que son las empleadas en el secado a alta temperatura con temperaturas húmedas inferiores al p.e. No obstante lo anterior, si el proceso de secado se lleva de forma que la presión dentro del secadero ( $p_p$ ) no supere un valor determinado (la presión normal en los secaderos tradicionales y la programada en función del p.e. exigido en los de vacío),  $p_p$  será constante, variando únicamente  $p_s$ , la cual crecerá con la temperatura seca de la atmósfera secante. De acuerdo con esto, conforme la temperatura seca crezca por encima del p.e., Hr decrecerá y la atmósfera se volverá cada vez más secante. Para el cálculo de la presión de saturación de vapor de agua Skaar (1988) propuso la expresión siguiente (en mmHg):

$$\ln(p_s) = 51,29 - 6651/T - (4,531)\ln(T)$$

Por contra, Siau (1984) propuso la ecuación siguiente (en cmHg):

$$p_s = (8,75 \times 10^7) \exp(-10400/RT)$$

De las dos expresiones la de Skaar parece ajustarse mejor, especialmente para valores altos de temperatura (por encima de 100°C). La tabla I recoge los valores de la humedad relativa en función del p.e. programado y la temperatura seca, para el caso del secado al vacío en atmósfera pura de vapor sobrecalentado.

Análogamente la figura 3 recoge de forma gráfica la interrelación entre presión, temperatura y humedad relativa cuando se trabaja en condiciones de sobrecalentamiento.

### HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA MADERA POR ENCIMA DEL P.E.

La determinación de las curvas que relacionan la humedad de equilibrio de la madera (HEH) con la temperatura seca, en una atmósfera pura de vapor sobrecalentado por encima del p.e., ha sido objeto de numerosos estudios desde comienzos del presente siglo.

Kauman (1.956), recopiló todos estos trabajos aportando una curva de validez general hasta una temperatura seca de 150°C. En esta curva la variación debida a la especie se cifra en un  $\pm 0,5\%$ , habiéndose detectado una diferencia máxima de 1,2% entre los valores experimentales y los extrapolados, si bien estas diferencias máximas se observan siempre por debajo de un contenido de humedad del 4%, lo que apenas si tiene interés industrial. Todo lo anterior era válido en tanto en cuanto se trabajara en condiciones normales (presión atmosférica de 1 atm y p.e. de 100°C), no pudiéndose decir hasta el momento otro tanto cuando la presión reinante dentro de la cámara de secado era inferior a la normal (p.e. < 100°C). Lo único que se conocía a este respecto, y a través de experiencias efectuadas en laboratorio, era que la HEH crecía ligeramente con la presión, siendo lo contrario también cierto.

En función de los valores de la tabla I y de los obtenidos empíricamente en el INIA, mediante el empleo de placas de limba sometidas a diferentes condiciones de presión y temperatura, los autores han podido deducir las relaciones HEH/temperatura seca/Presión, reflejadas en la figura 2.

Desgraciadamente los autores todavía no han podido obtener relaciones matemáticas fiables que ligen entre sí los tres parámetros, motivo

por lo cual el ábaco de la figura 2 es la única fuente posible de información, por el momento.

## Aplicaciones al secado al vacío con vapor sobrecalentado

Las figuras, ábacos y tablas anteriormente citadas permiten controlar, regular y comprender el principio teórico del proceso de secado al vacío por vapor sobrecalentado.

Las figuras 1 y 3 son, en cierto modo, redundantes, si bien los datos de presión los aportan en unidades diferentes (mm Hg en la figura 1 y mbar en la 3). La figura 1 permitirá una primera aproximación al problema y será útil en las fases de vacío inicial y precalentamiento, cuando aún no se trabaja con vapor sobrecalentado.

La figura 2 permite el empleo de termopares, debidamente colocados en la madera, para la determinación del punto de saturación de las fibras y del momento final del secado (Alvarez Noves, H.; Fernández-Golfín Seco, J.I., 1994). El uso de termopares frente a las medidas de la humedad de la madera por xilohigrómetros aporta una gran fiabilidad, permitiendo el uso de termostatos y diversos aparatos de control que llevan a la obtención de una mayor calidad de secado, en lo que se refiere a humedad final, dispersión de esta en la pila y gradientes de humedad presentes.

El análisis de la figura 3 permite explicar

perfectamente el proceso de regulación y control del proceso. Efectivamente, si, por ejemplo, se desea secar una madera a 50°C de punto de ebullición y una humedad relativa del 80%, será necesario que la presión en el interior del secadero sea de 123 mbar y que la temperatura sea de 55 °C.

Los datos anteriores pueden deducirse con facilidad de la figura 3 sin más que trazar una línea paralela al eje de ordenadas, desde el valor del p.e. deseado (en nuestro caso 50°C) hasta la curva correspondiente a una humedad relativa de 100%. El valor indicado en el eje de ordenadas, correspondiente a este punto representa la presión que debe reinar en el autoclave. Análogamente, y como se está exigiendo que en el autoclave haya una humedad relativa del 80% (por lo tanto se exige un cierto sobrecalentamiento del vapor) y no del 100%, será necesario trazar desde el punto de la curva del 100%, antes considerado, una línea paralela al eje de abscisas, hasta interseccionar a la curva del 80%. El valor del eje de abscisas correspondiente a este punto (en nuestro caso 55°C) representa la temperatura que debe reinar en el autoclave y su diferencia con el p.e. el sobrecalentamiento exigido.

En la forma de establecer el proceso de regulación puede o considerarse que la presión debe ser constante y, por tanto, que la temperatura debe ser variable en función de la humedad relativa o bien considerar la temperatura y la humedad relativa fijas y hacer variar la presión. El aceptar una forma u otra lleva a considerar estrategias de regulación diferentes, y por tanto programas de secado.

## BIBLIOGRAFIA

- \* Alvarez Noves, H.; Fernández-Golfín Seco, J.I. (1994). Practical evaluation and operation of superheated drying process with different softwoods and hardwoods. *Holz Als Roh und Werkstoff*. July 1994 (aprobado para publicación).
- \* Eckelman, C.A.; Baker, J.L. (1976). Heat and air requirements in the kiln drying of wood. Research bulletin nº 933. Purdue Univ. Agricultural Experiment Station.
- \* Kauman, W.G. (1956). Equilibrium moisture content relations and drying control in superheated steam drying. *Forest Prod. Journal* September 1956: 328-332.
- \* Noack, D. (1958). Untersuchungen über die Trockung empfindlicher Laubhölzer (Buche, Eiche) in reinem Heissdampf bei Unterdruck. Dissertation zur Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Hamburg. Hamburg 1958.
- \* Siau, J.F. (1984). Transport processes in wood. Springer-Verlag Series in wood Science. 245 pp.
- \* Skaar, C. (1989). Wood-Water relations. Springer-Verlag Series in wood Science. 283 pp.

FIGURA 1

TABLA I	
HUMEDADES RELATIVAS EN VAPOR SOBRECALENTADO BAJO VACIO	
Presión	P.e TEMPERATURAS SECAS (°C)
mmHgmmbar °C	45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 120 130 150 170
760 1013 100	
682 909 97	100 83,8 70,7 51,0 37,4 21,5 13,0
611 814 94	89,7 75,2 63,4 45,7 33,6 19,3 11,7
506 674 89	96 80,3 67,4 56,8 40,9 30,1 17,3 10,5
417 556 84	96 79,5 66,5 55,8 47,0 33,9 24,9 14,3 8,7
301 402 76	96,1 79,2 65,4 54,8 45,9 38,7 27,9 20,5 11,8 7,1
196 261 66	84,8 69,5 57,3 47,3 39,6 33,2 28,0 20,2 14,8 8,5 5,2
149 199 60	55,1 45,1 37,2 30,7 26,7 21,6 18,2 13,1 9,6 5,5 3,4
107 142 53	83,4 67,8 51,6 41,9 34,4 28,3 23,4 19,6 16,4 13,8 10,0 7,3 4,2 2,6
93 123 50	90,8 71,7 57,0 45,8 37,0 30,1 24,6 20,3 16,8 14,0 11,8 9,9 8,4 7,2 3,0 1,8
84 112 48	100 78,3 61,8 49,2 39,5 31,9 25,9 21,2 17,5 14,5 12,1 10,2 8,6 6,2 4,5 2,6 1,6
77 103 46,5	90,4 70,8 55,9 44,5 35,7 28,8 23,5 19,2 15,8 13,1 10,9 9,2 7,7 5,6 4,1 2,3 1,4
71 95 45	83,8 65,6 51,8 41,2 33,1 26,7 21,7 17,8 14,7 12,1 10,1 8,5 7,2 5,2 3,8 2,2 1,3
55 74 40	100 77,6 60,8 48,0 38,2 30,6 24,8 20,1 16,5 13,6 11,2 9,4 7,9 6,6 4,8 3,5 2,0 1,2
	76,9 59,7 46,8 36,9 29,4 23,6 19,0 15,5 12,7 10,5 8,6 6,1 5,1 3,7 2,7 1,6 0,9

FIGURA 2

FIGURA 3