

## MODELACIÓN FENOMENOLÓGICA DE LAS CURVAS DE SECADO POR ALTA TEMPERATURA DE PINO RADIATA

### PHENOMENOLOGICAL MODELING OF HIGH TEMPERATURE DRYING CURVES OF RADIATA PINE

Carlos Salinas<sup>1</sup>, Rubén Ananías<sup>2</sup>, Pamela Ruminot<sup>3</sup>

#### RESUMEN

Se realizaron experimentos a escala industrial tendiente a caracterizar el secado por alta temperatura del pino radiata (curvas de secado) y obtener parámetros físicos de fenómenos de transporte (coeficientes globales de convección de calor y masa) requeridos por los modelos matemáticos para la simulación fenomenológica del proceso de secado. Resultados de coeficientes de transporte y curvas de secado experimentales y simuladas fueron obtenidos. Se concluyó, que la simulación del proceso de secado por alta temperatura del pino radiata puede ser realizada satisfactoriamente por modelos fenomenológicos basados en el coeficiente global de transferencia de masa. Los valores de dicho coeficiente para diversas condiciones de secado variaron entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $4.2 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s.

**Palabras clave:** Secado por alta temperatura, modelación del secado, coeficiente de transferencia de masa, *Pinus radiata*.

#### ABSTRACT

Experiments at industrial scale to show the high temperature wood drying of radiata pine were performed. After that, physical parameters of transport phenomena (global heat and mass transfer coefficients), required by the phenomenological mathematical models for the simulation of the drying process, were determined. Results of global heat transfer coefficients, experimental drying curves and simulated process were shown. It was concluded that the simulation of the drying process at high temperature of radiata pine can be satisfactorily carried out by phenomenological model based on the global mass transfer coefficient. The values of these coefficients were between  $1 \times 10^{-4}$  and  $4.2 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s.

**Keywords:** High temperature drying, drying modeling, mass transfer coefficient, *Pinus radiata*.

#### INTRODUCCIÓN

El pino radiata es una especie aclimatada en Chile de gran importancia en la industria maderera nacional. El año 2006 se produjeron más de 8.3 millones de metros cúbicos de madera aserrada, de las cuales alrededor de un 52 (%) fue secada artificialmente (Infor 2007). Esta madera se caracteriza por tener una estructura anatómica que se deja permear con facilidad (Salvo *et al.* 2004). Esta característica permite la aplicación de altas temperaturas para su secado rápido. No obstante, la permeabilidad del pino radiata puede ser reducida por la aspiración de las punteaduras, en tal caso, el secado se hace más lento debido a que es gobernado por mecanismos difusionales (Keey *et al.* 2000). El secado por alta

<sup>1</sup> Profesor Asistente. Depto. Ing. Mecánica. Fac. Ingeniería. Universidad del Bío-Bío. casali@ubiobio.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado. Depto. Ing en Maderas. Fac. Ingeniería. Universidad del Bío-Bío. ananias@ubiobio.cl

<sup>3</sup> Jefe Control Calidad. Planta Horcones I. Aserraderos Arauco. S.A. pruminot@gmail.com

Autor para correspondencia: casali@ubiobio.cl

Recibido: 01.06.2008. Aceptado: 26.09.2008.

temperatura (SAT) de pino radiata con condiciones de secado entre 110/70 (°C/°C) hasta 140/90 (°C/°C) es usual en la industria chilena (Ananías y Venegas 2005). Ananías y Venegas (2005) utilizan un modelo estocástico para predecir el tiempo mínimo para esterilizar la madera radiata con calor: 170 minutos para 92 (mm) de espesor con programa 125/75 (°C/°C).

Por otra parte, diversos modelos teóricos basados en las ecuaciones de transporte de calor y masa (Luikov 1966, Whitaker 1977), son utilizados para predecir el comportamiento de la temperatura y la humedad en la madera durante el SAT de pino radiata (Pang 2007, Haque *et al.* 2007, McCurdy and Pang 2007). De acuerdo con Pang (2007), la simulación de una carga de secado permite optimizar las condiciones de secado y conseguir una mejor relación entre la calidad de la madera seca y el tiempo de secado. Particularmente, la aplicación de condiciones SAT cuando la humedad de la madera esta alrededor del 70 (%) permiten acelerar el secado sin ocasionar excesivo daño en la calidad de la madera. Haque *et al.* (2007), en base a un modelo desarrollado en trabajos anteriores (Keey and Pang 1994, Pang and Haslett 1995), muestran que el tiempo de secado de pino radiata de 40 (mm) de espesor disminuye en alrededor de un 50% bajo un programa SAT 140/90 (°C/°C) en comparación a un programa de secado convencional acelerado 90/60 (°C/°C).

Los modelos fenomenológicos, a ser usado en el presente trabajo, se basan también en ecuaciones de transporte de calor y masa de primer orden, describen el comportamiento transiente del secado de toda una carga de madera sin mediar cálculos exhaustivos (Karabagli *et al.* 1997). Estos modelos empíricos presentan la ventaja de ser simples pero fuertemente dependientes de coeficientes experimentales, tales como, los coeficientes globales de transferencia de calor y masa. Dichos coeficientes normalmente son obtenidos en base a resultados experimentales, a través, de optimización y/o usando correlaciones del tipo propuesta por Chrusciel *et al.* (1999). En particular, el modelo de Karabagli *et al.* (1997), se aplicó en un trabajo anterior para simular el secado convencional acelerado 90/60 (°C/°C) en pino radiata de 50 y 25 mm de espesor, resultando los coeficientes globales de transferencia de masa entre  $5.8 \times 10^{-5}$  y  $6.9 \times 10^{-5}$  (kg/m<sup>2</sup>s) respectivamente (Ananías *et al.* 2005).

En este trabajo, se conducen experimentos a escala industrial de SAT, en pino radiata para embalaje y uso industrial de 27 y 46 (mm) de espesor, con el fin de determinar el coeficiente global de transferencia de calor y masa. Además, dichos coeficientes son el principal insumo fenomenológico para la presente simulación de las curvas de SAT del pino radiata.

## METODOLOGÍA

La metodología considera un enfoque mixto teórico/experimental. Lo primero en cuanto al modelo matemático fenomenológico para el secado y lo segundo en cuanto a la conducción de experimentos para determinar parámetros físicos requeridos por el modelo y su validación. Detalles de la metodología experimental y los modelos matemáticos y numéricos son dados a continuación.

### *Modelo Experimental*

Madera aserrada de pino radiata para embalaje y uso industrial fue recogida en estado verde a la salida del aserradero. Inmediatamente fue empalillada con separadores de 15 (mm) de espesor y dispuesta en el horno secador. Cada carga de madera quedó conformada por 4 paquetes, 2 de ancho y 2 de alto, de dimensiones 1.1x1.2x4 (m).

Los experimentos se realizaron en un horno industrial de 30 (m<sup>3</sup>) de capacidad, equipado con un sistema de celdas de cargas y de sensores de temperatura. Un sistema de control y adquisición permite la operación y registro continuo de los parámetros de secado: Humedades y temperaturas en el ambiente de secado y en la madera masa y temperatura. Las temperaturas del ambiente de secado son obtenidas en ambos lados de la carga de madera: A la entrada y salida de la pila.

Se realizaron 4 experimentos de secado, siendo considerados como variables el espesor de la madera (27 y 46 mm) y la velocidad del aire (fija en 6.5 m/s y variable de 5 a 7 m/s). Las condiciones de secado fueron 120/70 (°C/°C). Este programa es usualmente utilizado para el SAT del pino radiata en Chile (Ananías y Venegas 2005). El diseño experimental se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Diseño de experimentos.

Ensayo	e (mm)	v (m/s)
1	46	Fija en 6.5
2	46	Variable entre 5 y 7
3	27	Fija en 6.5
4	27	Variable entre 5 y 7

Para la obtención del contenido de humedad experimental se determinó la humedad inicial de una muestra representativa (5% de la carga de madera). Se utilizó el método gravímetro según la Norma Chilena Oficial 176/1 (INN 1982), a partir de la cual se determina la masa anhidra de toda la carga de madera. Luego, en base a la evolución temporal de la masa y la masa anhidra calculada se determina el contenido de humedad experimental para cada instante de tiempo.

En adición, un conjunto de 4 termocuplas tipo K fueron instaladas en el centro de 4 piezas de madera, para evaluar la evolución temporal de la temperatura de la madera.

**Modelo Matemático**

Según Karabagli *et al.* (1997), bajo condiciones de secado constantes, despreciando las pérdidas térmicas y en base a la conservación de entalpía y masa, se pueden obtener para un instante de tiempo  $\tau$  y  $\tau + \Delta \tau$  las siguientes ecuaciones (ver definición de parámetros en listado de símbolos):

Del balance de masa en el aire y en la madera:

$$G * (W - W_E) = k_m * S * (CH - CHE) \tag{1}$$

$$-M_0 * \frac{dCH}{dt} = k_m * S * (CH - CHE) \tag{2}$$

Y del balance entálpico en el aire y la madera

$$G * \left[ \left\{ c_{pa} * T_a + W_s * (\Delta h_o + c_{pv} * T_a) \right\} - \left\{ c_{pa} * T_e + W_e * (\Delta h_o + c_{pv} * T_e) \right\} \right] = k_m * S * \Delta h_v * (CH - CHE) - h * S * (T_a - T_m) \tag{3}$$

$$M_0 * (c_{pm} + c_{pl} * CH) * \frac{dT_m}{dt} = -G * \left[ \begin{matrix} c_{pa} * (T_a - T_e) - (c_{pl} * T_m) * (W - W_e) + c_{pv} * (W * T_a - W_e * T_e) \\ -\Delta h_o * (W - W_e) \end{matrix} \right] \tag{4}$$

Este sistema de ecuaciones representa un problema de valor inicial resuelto según modelo numérico discutido a seguir.

### Modelo Numérico

El sistema de 4 ecuaciones (2 diferenciales no lineales de 1er orden (2 y 4), y 2 algebraicas no lineales (1 y 3), requiere ser resueltos en términos numéricos. Para este fin se integran en forma explícita las mencionadas ecuaciones de acuerdo con el método de diferencias finitas. Esto es:

$$W^{n+1} = \frac{k_m S}{G} (CH - CHE) + W_e \quad (5)$$

$$T_a^{n+1} = \frac{c_{p_a} T_e + k_m S \Delta h_o (CH - CHE) + h S T_a}{G} - \Delta h_o \cdot \frac{(W - W_e) - c_{p_v} W_e T_e}{c_{p_a} + c_{p_v} W + h \frac{S}{G}} \quad (6)$$

$$M^{n+1} = \frac{(2 - K)CH}{2 + K} + \frac{K(CHE + CHE^{n+1})}{2 + K} \quad \text{con } K = \frac{k_m S}{M_o} \Delta t \quad (7)$$

$$T_m^{n+1} = M_o (C_{p_m} + CH c_{p_l}) T_m - \Delta t G L \quad (8)$$

$$\text{Donde } L = \left[ (c_{p_a} (T_a - T_e) - (W - W_e) \Delta h_o + c_{p_v} (W T_a - W_e T_e)) \right] / M_o \left[ c_{p_a} + M c_{p_l} \right] - G (W - W_e) C_{p_l}$$

El sistema de ecuaciones lineales resultantes (5-8) es resuelto, a través del método Gauss-Seidel (Patankar 1980). Dicho sistema permite obtener valores transitorios de humedades y temperaturas de la madera y del ambiente de secado ( $CH$ ,  $T_m$ ,  $W$  y  $T_a$ ), para lo cual es necesario conocer: 1) Condiciones iniciales de estas variables, 2) Coeficientes globales de transferencia de masa  $k_m$  y calor  $h$ . 3) Diversas propiedades termodinámicas del ambiente de secado. Lo anterior es discutido a seguir.

### Coefficiente Global de Transferencia de Masa

La determinación del coeficiente global de transferencia de masa  $k_m$  puede ser realizada basado en datos experimentales de secado o por diversas correlaciones en función de parámetros de secado: Espesor de la madera, temperatura, humedad y velocidad del aire (Chruscziel *et al.* 1999, Ananías *et al.* 2005).

En particular, la determinación de  $k_m$  basado en datos experimentales, optimizada para el presente modelo, es realizada en base a la ecuación de balance de masa en su forma numérica (ecuación 7). Se observa entonces que el problema de optimización radica en la determinación del parámetro  $K$ , tal que sea mínimo el error  $E$ , definido por la diferencia entre los resultados experimentales de contenido de humedad ( $CH_{exp}$ ) y los obtenidos en base a la integración de la ecuación 7 ( $CH_{opt}$ ). Esto es:

$$K = \frac{k_m S}{M_o} \Delta t \quad \text{tal que} \quad \min \left\{ E = ABS \frac{(CH_{exp} - CH_{opt.})}{CH_{exp}} \right\} \quad (9)$$

**Determinación del Coeficiente de Transferencia de Calor**

El coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) es determinado en base a las correlaciones adimensionales de transferencia de calor (Salin 1996, Pang 1996). En particular, para el flujo turbulento entre placas se obtiene que:

$$h = 0.023 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \frac{\lambda}{d_H} \quad (10)$$

Donde el número de Reynolds (Re) y Prandtl (Pr) dado por:

$$\text{Re} = \frac{v d_H \rho}{\nu} \quad (11)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} \quad (12)$$

Siendo  $v$  la velocidad,  $\nu$  la viscosidad cinemática,  $\rho$  la densidad,  $\lambda$  la conductividad térmica y  $c_p$  el calor específico del aire, calculados por las relaciones siguientes:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (13)$$

$$\mu = 1.691 \cdot 10^{-5} + 4.984 \cdot 10^{-8} \cdot T - 3.187 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 1.319 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 \quad (14)$$

$$\rho = \frac{353}{T} \quad (15)$$

$$\lambda = 0.02425 + 7.889 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1.79 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 8.57 \cdot 10^{-12} \cdot T^3 \quad (16)$$

$$c_p = 1009.26 - 0.040403 \cdot T + 6.1759 \cdot 10^{-4} T^2 - 4.097 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (17)$$

El diámetro hidráulico ( $d_H$ ) es definido como:

$$d_H = \frac{4 \cdot S}{P_M} \quad (18)$$

Donde  $S$  y  $P_M$  son la superficie y el perímetro de la madera expuesta al aire de secado, respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### *Coefficientes de Transporte*

Los coeficientes globales de transferencia de masa y calor determinados en base a los datos experimentales, generados en el contexto del presente trabajo, son dados en la Tabla 2 para cada ensayo diferenciados por sus respectivas etapas. Los valores del coeficiente global de transporte de masa oscilan entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $4.2 \times 10^{-4}$  (kg/m<sup>2</sup>s) producidos en las Etapas I y III del ensayo 4 para madera de 27 (mm) de espesor y velocidad de secado entre 5 y 7 (m/s) de un ambiente de secado 120/70 (°C/°C), respectivamente. El coeficiente global de transferencia de calor varía entre 19.1 (W/m<sup>2</sup>K) bajo una combinación 120/70 (°C/°C) en la etapa II del ensayo 1 (espesor 46 (mm) y velocidad del aire 6.5(m/s) y 34.3 (W/m<sup>2</sup>K) en la etapa I del ensayo 3 (espesor 27 (mm) y velocidad del aire 7 (m/s)) secando bajo un programa 100/70 (°C/°C). Estos resultados permiten inducir que los coeficientes globales de transferencia de calor y masa presentan un comportamiento diferente frente a la temperatura y la velocidad del aire. Mientras que el coeficiente global de transferencia de masa es potenciado por el incremento en la temperatura del aire, lo que esta de acuerdo a lo reportado por Chrusciel *et al.* (1999). El coeficiente de transferencia de calor es mayormente dependiente de la velocidad del aire, tal como, lo reportado por Haque (2007).

**Tabla 2.** Resultados experimentales de SAT del pino radiata

Valores Iniciales										
Ensayo	1		2		3			4		
$T_m$	71.8		69.8		77.2			73.1		
$M$	1.42		1.34		1.37			1.39		
$T_a$	85.3		89.9		86.5			81.4		
$W$	0.29		0.26		0.28			0.28		
Constantes										
Ensayo	1		2		3			4		
Etapas	I	II	I	II	I	II	III	I	II	III
$T_e$	110	120	110	120	100	110	120	100	110	120
$W_e$	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
$t$	0-8	8-27	0-7	7-23.5	0-1	1-3.5	3.5-11	0-2	2-5	5-12
$k_m * 10^4$	1.3	2.4	1.4	2.7	3.8	1.9	3.9	1.0	1.7	4.2
$h$	24.6	19.1	23.6	21.6	34.3	29.7	25.1	33.7	31.1	28.3
$G$	15.9	11.0	14.7	14.3	23.7	19.8	16.1	22.0	21.4	20.9
$S$	906.3	906.3	906.3	906.3	1293	1293	1293	1240	1240	1240
$M_o$	7313	7313	7028	7028	6485	6485	6485	6353	6353	6353

La magnitud del coeficiente global de transferencia de masa en estos ensayos de secado por alta temperatura es mayor que la reportada para el secado del pino radiata a temperatura convencional 70/50 (°C/°C): Ananías *et al.* (2005) reportan un coeficiente global de transferencia de masa de  $6.9 \times 10^{-5}$  (kg/m<sup>2</sup>s) en madera de 25 (mm) de espesor secando a una velocidad del aire de 3 m/s bajo un programa de temperaturas 70/50 (°C/°C).

Los valores del coeficiente de transferencia de calor de estos ensayos de secado por alta temperatura del pino radiata presentan el mismo orden de magnitud que los observados por Pang (1996) y Haque (2007). Pang (1996) reportan un valor de alrededor de 30 (W/m<sup>2</sup>K) para el coeficiente de transferencia de calor calculado en base a la analogía de Chilton-Colburn, secando a una velocidad del aire de 7 (m/s) y un programa de temperaturas 120/70 (°C/°C). Haque (2007), basado en una ecuación de balance de energía, determina un coeficiente de transferencia de calor entre 20 y 30 (W/m<sup>2</sup>K) en ensayos de secado de pino radiata secando a una velocidad entre 1 y 1.8 m/s a temperaturas de 120/70 (°C/°C).

En dichos coeficientes se evidencia una compleja relación entre los parámetros de secado, particularmente sensible a las interrelaciones con la velocidad del aire pero no tanto con la temperatura de secado. Este último aspecto en los ensayos experimentales con velocidad de secado variable (ensayos 2 y 4) fue variado de manera inversa. Esto es: Al inicio del secado (etapa I) se utilizó mayor velocidad del aire y más baja temperatura, luego se aumenta la temperatura de secado y se disminuyó la velocidad del aire (etapa II y III). Lo anterior, lo justifica la necesidad de aportar rápidamente el calor necesario para la evaporación del agua en la superficie de la madera: Al inicio del secado por alta temperatura la resistencia externa controla el proceso de secado. Esta combinación inversa entre la velocidad y la temperatura del aire no es recogida por correlaciones del tipo propuesto por Chrusciel *et al.* (1999) y Ananías *et al.* (2005).

**Simulación del Secado**

El modelo matemático del tipo fenomenológico implementado muestra una asertiva simulación de las curvas de secado para los diversos ensayos realizados, lo cual es mostrado en las figuras 1 a 4. En dichas figuras se puede apreciar las marcadas inflexiones de la curva de acuerdo a las condiciones de secado.

La simulación de las curvas de secado por alta temperatura del pino radiata presentan un error entre 9.2 % y 13.8 % en el ensayo 2 y ensayo 3 respectivamente. Este orden de magnitud del error en la predicción es mayor que el reportado en la literatura para el secado a temperaturas convencionales (Karabagli *et al.* 1997). Este comportamiento está relacionado con las mayores dificultades para mantener homogéneas las condiciones de secado en un horno industrial.

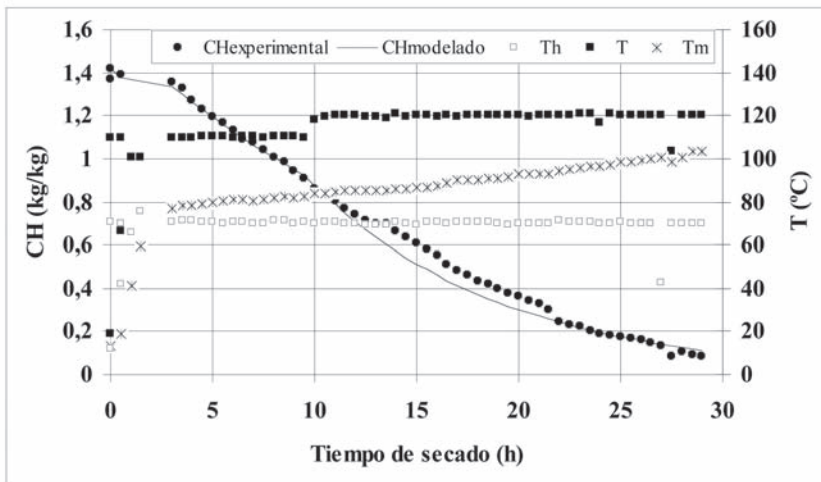


Figura 1: Curva de secado del ensayo 1



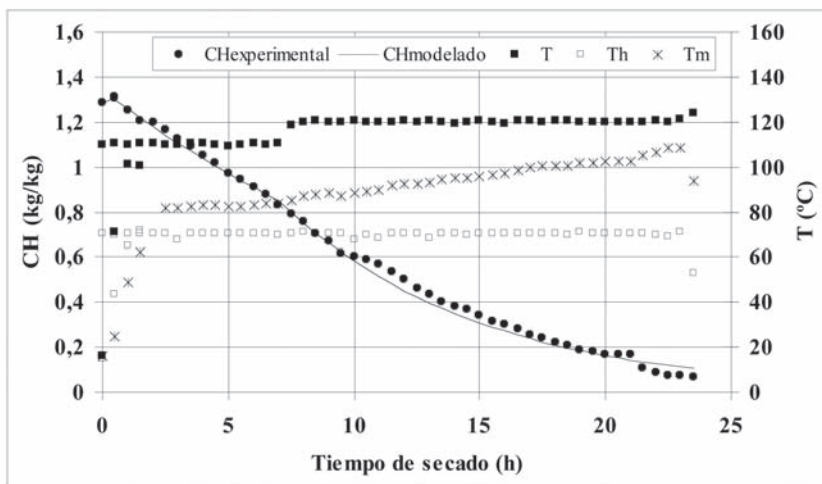


Figura 2: Curva de secado del ensayo 2

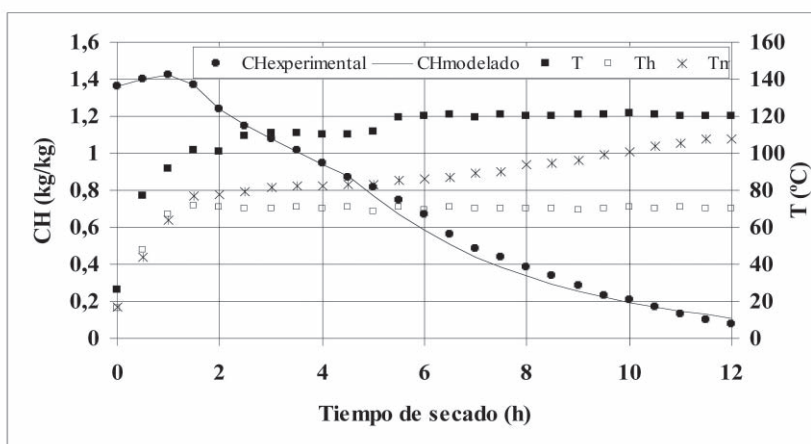


Figura 3: Curva de secado del ensayo 3

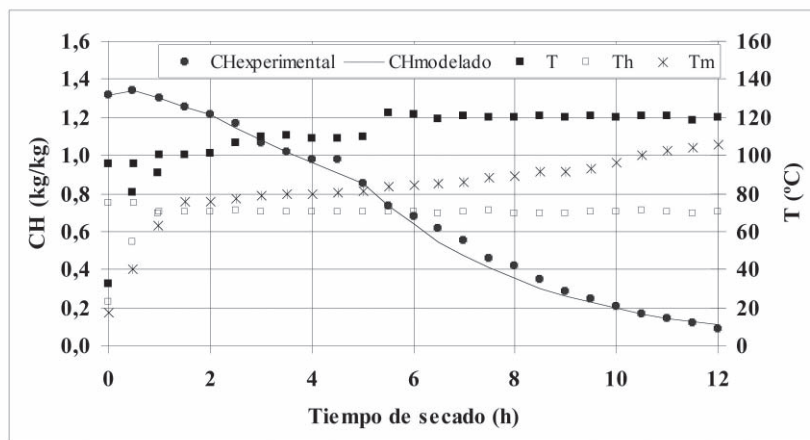


Figura 4: Curva de secado del ensayo 4



También, es particularmente notorio como la variación de las condiciones de secado condicionan la temperatura en el centro de la madera. Se observa que la temperatura en el centro de la madera al inicio del secado es muy cercana a la temperatura de bulbo húmedo y incrementa acercándose a la temperatura del aire. Al inicio del secado la temperatura en el centro de la madera alcanza las condiciones de esterilización con calor de la madera, esto es el tiempo cumplido 56/30 (°C/min) en 1.5 y 2 horas en los ensayos de 27 y 46 (mm) de espesor, respectivamente. Estos valores son consistentes con los valores experimentales descritos por Ananías y Venegas (2005).

## CONCLUSIONES

En términos generales las curvas de secado del pino radiata, simuladas a través del modelo fenomenológico, se ajustan satisfactoriamente a sus similares obtenidas experimentalmente para: Madera de 27 y 46 (mm) de espesor, bajo programas de secado por alta temperatura de hasta 120/70 (°C/°C) y una velocidad del aire de hasta 7 m/s.

La compleja relación, entre los parámetros de secado que determinan el coeficiente global de transferencia de masa, es particularmente sensible a la velocidad del aire de secado pero no con su temperatura. En este sentido, los ensayos con velocidad de secado variable de manera inversa no son bien modeladas por las correlaciones del tipo propuesto por Chrusciel et al. (1999) y Ananías *et al.* (2005).

Los coeficientes globales de transferencia de masa y calor durante el secado por alta temperatura del pino radiata varían entre  $1 \times 10^{-4}$  (kg/m<sup>2</sup>s) a  $4.2 \times 10^{-4}$  (kg/m<sup>2</sup>s) y 19.1 (W/m<sup>2</sup>K) a 34.3 (W/m<sup>2</sup>K), respectivamente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Aserraderos Arauco S.A. por facilitar la madera y las instalaciones industriales necesarias para el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS

**Ananías, R.A.; Vallejos, S.; Salinas, C. 2005.** Estudio de la cinética del secado convencional y bajo vacío del pino radiata. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7(1):37-47.

**Ananías, R.A.; Venegas, R. 2005.** Secado industrial del pino radiata. Tiempo de esterilización con calor y evolución temporal de la temperatura. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7(3): 179-188.

**Chrusciel, L.; Mougel E.; Zoulalian, A.; Meunier, T. 1999.** Characterization of water transfer in a low temperature convective wood drier: influence of the operating parameters on the mass transfer coefficient. *Holz als Roh-und Werkstoff* 57: 439-445

**Haque, M.N. 2007.** Analysis of heat and mass transfer during high-temperature drying of *Pinus radiata*. *Drying Technology* 25(2):379-389.

**Haque, M.N.; Riley, S.G.; Langrish, T.A.G.; Pang, S. 2007.** Model predicted effect of process variables on kiln drying of *Pinus radiata* boards. *Drying Technology* 25(3):455-461.

**INFOR 2007.** *La industria del aserrío.* Boletín Estadístico 118. Instituto Forestal, Santiago-Chile.

**INN. 1982.** Madera. Parte 1. Humedad de la madera. Norma chilena oficial 176/1, Of 82. INN, Santiago. Chile.

**Karabagli, A.; Mougel, E.; Chrusciel, L.; Zoulalian A.1997.** Study on a low temperature convective wood drier. Influence of some operating parameters on drier modeling and on the quality of dried wood. *Holz als Roh-und Werkstoff* 55: 221-226.

**Keey, R.B.; Langrish, T.A.G.; Walker, J.C.F. 2000.** *Kiln-drying of lumber.* Springer, N. York.

**Keey, R.B.; Pang, S. 1994.** The high-temperature drying of softwood boards: A kiln-wide model. *Chemical Engineering Research & Design* 72 (A6): 741-753.

**Luikov, A. V. 1966.** *Heat and mass transfer in capillary porous bodies.* Pergamon Press, Oxford. pp 522.

**McCurdy, M.C.; Pang, S. 2007.** Optimization of kiln drying for softwood through simulation of wood stack drying, energy use, and wood color change. *Drying Technology* 25(10): 1733-1740.

**Pang, S. 1996.** External heat and mass transfer coefficients for kiln drying of timber. *Drying Technology* 14(3-4):859-871.

**Pang, S. 2007.** Mathematical modeling of kiln drying of softwood timber : Model development, validation, and practical application. *Drying technology* 25(3):421-431.

**Pang, S.; Haslett, A. 1995.** The application of mathematical models to the commercial high-temperature drying of softwood lumber. *Drying Technology* 13(8-9):1635-1674.

**Patankar, S. V. 1980.** *Numerical heat transfer and fluid flow.* Hemisphere Publishing, N. Y. 197pp.

**Salin, J.G. 1996.** Prediction of heat and mass transfer coefficients for individuals boards and board surfaces. A review. *5<sup>th</sup> IUFRO Wood Drying Conference* 49-58 pp.

**Salvo, L.; Ananías, R.A.; Cloutier, A. 2004.** Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad transversal al gas de pino radiata. *Maderas. Ciencia y tecnología* 6(1):33-44.

**Whitaker, S. 1977.** Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: A theory of drying. *Advances in Heat Transfer* 13: 119- 203.

## SIMBOLOGÍA

$CH$	Contenidos de humedad de la madera ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{madera-seca}}$ ).
$CHE$	Contenido de Humedad de Equilibrio ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{madera-seca}}$ ).
$c_p$	Calor específico (J/kgK).
$d_H$	Diámetro hidráulico (m).
$\Delta h_0$	Calor latente de vaporización del agua en el aire a 0 °C (J/kgK).
$\Delta h_v$	Calor latente de vaporización del agua en la madera (J/kgK).
$e$	Espesor (m).
$G$	Flujo másico del aire (kg/s).
$h$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).
$k_m$	Coefficiente global de transferencia de masa ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ).
$\lambda$	Conductividad térmica del aire ( $\text{J}/\text{m kg K}$ ).
$M_o$	Masa de madera anhidra (kg).
$P_M$	Perímetro mojado (m).
$\rho$	Densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
$S$	Área de transferencia ( $\text{m}^2$ ).
$t$	Tiempo (s, h).
$T$	Temperatura (K, °C).
$\mu$	Viscosidad dinámica del aire ( $\text{kg}/\text{m.s}$ ).
$v$	Velocidad del aire de secado (m/s).
$\nu$	Viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).
$W$	Humedad específica ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire-seco}}$ ).

## SUBÍNDICES

$a$	Aire.
$e$	Entrada.
$h$	Húmedo
$l$	Agua líquida.
$m$	Madera
$opt$	Optimización.
$PSF$	Punto de Saturación de la Fibra.
$v$	Vapor de agua.

