

DETERMINACION COEFICIENTE CONVECTIVO DE MATERIA EN EL SECADO DE SÓLIDOS.

MATHEMATICAL CORRELATION TO GET MASS TRANSFER COEFFICIENT IN SOLIDS DRYING

Reinaldo Sanchez Arriagada¹

RESUMEN

Una correlación matemática para determinar el coeficiente convectivo de materia durante la evaporación de agua desde la superficie húmeda, fue desarrollada para su aplicación con aire húmedo con bajas diferencias sicrométricas y temperaturas del aire sobre los 60°C.

La teoría clásica para determinar coeficientes convectivos de calor y de materia, a través de parámetros adimensionales y de las analogías fenomenológicas difusivas, tienen validez sólo para aire seco.

En el secado de sólidos, donde se requiere controlar las tasas de secado para evitar un daño físico en el producto, se impone la necesidad de operar con temperaturas bulbo húmedo por sobre los 40°C o diferencias sicrométricas moderadas. En esos rangos, las expresiones que relacionan los coeficientes convectivos de calor y materia, presentan errores que varían entre 26% y 113% para temperatura de bulbo húmedo entre 30°C y 70°C con diferencia sicrométrica de 10°C.

La expresión formulada para esta aplicación, se plantea como una función de: el coeficiente convectivo de transferencia de calor, la temperatura bulbo húmedo y la diferencia sicrométrica. Los resultados obtenidos permiten establecer que, para las condiciones extremas de temperatura de bulbo húmedo y diferencia sicrométrica antes señalada el error se sitúa entre -1.4% a 2.14%, respecto del obtenido a partir de la metodología clásica.

La correlación obtenida es de forma polinomial, de fácil operación y viable de ser incorporada a cualquier modelo de simulación para la predicción de la dinámica del secado.

Palabras claves: secado, coeficientes convectivos, evaporación, propiedades físicas.

¹Departamento Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Universidad del Bío-Bío, Concepción – Chile
Autor para correspondencia: rsanchez@ubiobio.cl
Recibido: 30.09. 2006. Aceptado: 09.10 2007.

ABSTRACT

A mathematical correlation to determine the mass coefficient, during the evaporation of water from a wet surface, was developed for their application in wet air with low psychrometric differential and with air temperature above 60°C.

The classic theory that has been used in order to get heat and mass convective coefficients, through non-dimensional parameters and phenomenological analogies, turns out to be valid only for dry air.

In the particular case of solids drying, where operation requires to be performed under controlled drying rates, in order to prevent physical damage from affecting the product, is necessary to operate on a wet bulb temperature above 40°C or at moderate psychrometric differential. When we work under those ranges of temperature, the expressions that relate heat and mass convective coefficients show errors between 26% and 113% for wet temperature between 30°C and 70°C and psychrometric difference of 30°C.

The expression that has been given for this application is stated as a function of the following: heat transfer coefficient, wet bulb temperature, and psychrometric differential.

The obtained results allow to settle down that, for the extreme conditions of wet bulb temperature and psychrometric differences assigned before, the error is located among -1.4% to 2.14%, regarding the obtained through the classic methodology.

The obtained correlation has polynomial form, of easy operation and viable of being incorporate to any simulation pattern for the prediction of the dynamics of the drying.

Keywords: drying, convective coefficient, evaporation, physical properties.

INTRODUCCIÓN

La transferencia convectiva de materia presente en la evaporación de agua libre o ligada durante el secado de sólidos, utilizando aire húmedo como medio para transferir calor y transportar la humedad liberada desde el sólido, es el mecanismo que fundamenta este fenómeno de evaporación, cuantificado a través del proceso de saturación adiabática del aire húmedo a su paso a través de la carga.

Las propiedades difusionales del aire; particularmente su viscosidad cinemática, la difusividad térmica y la difusividad molecular del vapor de agua en el aire, son determinantes en la forma como se desarrollen las capas límites entre la superficie y el fluido. De la misma forma, la analogía entre estos tres fenómenos difusionales permite relacionar de manera simultánea la transferencia de cantidad de movimiento, el transporte de calor por convección y la transferencia convectiva de materia, determinando los respectivos coeficientes convectivos y finalmente la tasa de evaporación por tres formas distinta pero relacionadas entre sí.

Esta analogía se confirma al observar los coeficientes experimentales de las correlaciones de Nusselt para la transferencia de calor que, según Incropera y De Witt (1996) y Kast *et al.* (1974), son los mismos que se utilizan en las correlaciones de Sherwood para la transferencia de materia desde donde además, según Kast *et al.* (1974), Krischer y Kast (1978) y Kayihan (1983), derivan relaciones simplificadas entre coeficientes convectivos, en función de la temperatura superficial del sólido.

Cuando la evaporación ocurre bajo la acción de un proceso de saturación adiabática, se debe cumplir además que; la tasa de evaporación debe ser la misma evaluada a través de: la transferencia de calor aire-superficie, por el incremento de la humedad específica del aire y por transferencia convectiva de materia, teniendo presente que el estado del aire a la salida del proceso relaciona su temperatura, humedad específica y presión de vapor con la entalpía del aire húmedo, cuyo valor es constante en todo el proceso, lo que obliga a una resolución simultánea de las tres ecuaciones de evaporación para encontrar el estado del aire a la salida y, posteriormente, la tasa de evaporación.

El procedimiento antes descrito, para evaluar la tasa de evaporación en procesos de secado, entrega resultados satisfactorios cuando se opera con aire seco, aire con bajos contenidos de humedad específica o altas diferencias sicrométricas, en donde los errores presentados en el cálculo de la tasa de evaporación por transferencia de calor respecto de las calculadas por transferencia convectiva de materia pueden llegar a valores máximos de 11.4% a 17%.

En cambio, cuando los equipos operan con un alto porcentaje de recirculación interna de aire y la condición de entrada del aire en el proceso presenta una alta humedad específica o una baja diferencia sicrométrica los errores antes señalados pueden alcanzar valores cercanos a 100%, esto es para temperatura bulbo seco 130°C y bulbo húmedo 70°C, situación que impide determinar la condición de equilibrio del proceso de secado y el estado del aire a la salida del secador.

La significativa diferencia de los resultados en las tasas de evaporación obtenida por ambos métodos, se debe principalmente al hecho que el coeficiente convectivo de materia se evalúa en función de: el coeficiente convectivo de calor, las propiedades físicas del fluido y la temperatura superficial del producto, dejando sin efecto los potenciales de transferencia de calor y masa como son; la temperatura del aire, su diferencia sicrométrica y sus correspondientes presiones de vapor.

En el presente documento se propone una correlación matemática que permita calcular el coeficiente convectivo de materia en función del coeficiente convectivo de calor, la diferencia sicrométrica y la temperatura de bulbo húmedo. Esta correlación se obtiene a partir de una evaluación teórica de la evaporación superficial, calculada a partir de la transferencia de calor fluido-superficie en un proceso de saturación adiabática.

La expresión final obtenida entrega resultados satisfactorios, con errores inferiores al 2%, para temperaturas de bulbo seco entre 80°C y 160°C con temperatura de bulbo húmedo de 70°C.

Resultados experimentales realizados por Bravo *et al.* (1994), para la evaluación de los coeficientes convectivos de calor y masa a través de un canal de secado en un castillo de madera, con temperatura bulbo seco de 70°C y de bulbo húmedo 65°C, permitieron validar la correlación propuesta. Al comparar valores experimentales de coeficientes convectivos de materia para diferentes velocidades de aire con los que entrega el modelo propuesto se obtienen diferencias mínimas con errores máximos de 5.6%, situación que confirma la validez de éste.

METODOLOGÍA

La evaporación de agua desde una superficie saturada, utilizando aire húmedo como medio para transferir calor y transportar la humedad, se evalúa a través del análisis y evaluación de un proceso de saturación adiabática en donde todo el calor sensible que entrega el aire seco se utiliza para evaporar agua desde la superficie del producto.

La caída de temperatura del aire a través de la carga, se evalúa considerando un proceso de transferencia de calor desde un fluido incompresible hacia una superficie que mantiene su temperatura constante.

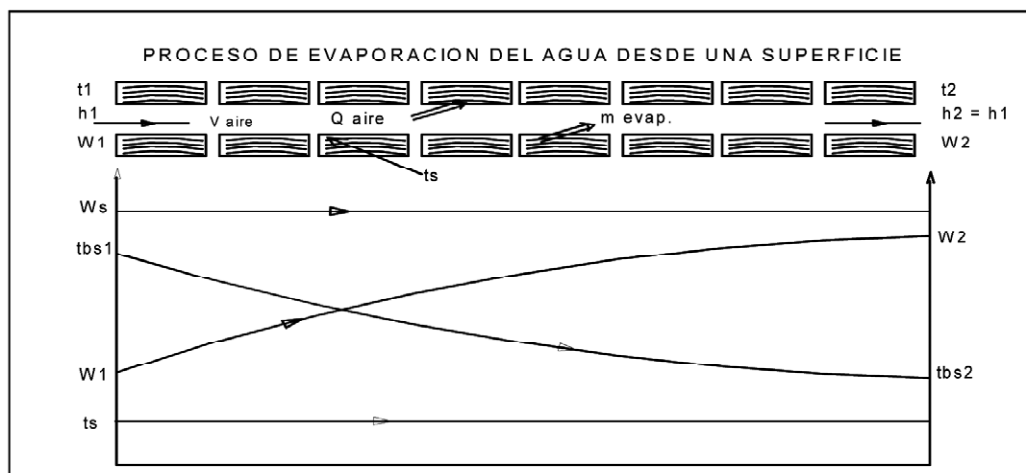
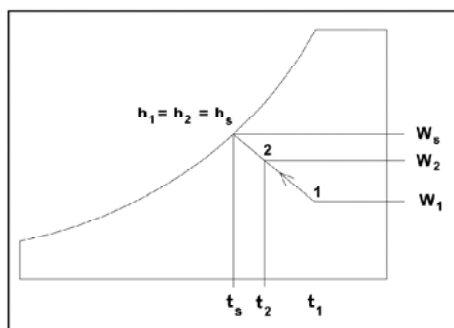


Figura 1. Evolución temperatura y humedad específica del aire a través de la carga

La evolución tanto de la temperatura del aire como de su humedad específica, se representan gráficamente en la figura 1 y, en la figura 2, se muestra el proceso que sigue el aire en la carta sicrométrica.



h : Entalpía del aire húmedo $\frac{kJ}{kg_a}$
W : Humedad específica del aire $\frac{kg_v}{kg_a}$
t : temperatura del aire °C

Figura 2. Representación gráfica proceso evaporación en carta sicrométrica

Las ecuaciones que determinan la tasa de intercambio de calor, la caída de temperatura del aire en la carga, el aumento de la humedad específica del aire y la tasa de evaporación son:

Calor intercambiado aire-superficie:

$$Q = \alpha * A * \frac{t_1 - t_2}{l_n \frac{t_1 - t_s}{t_2 - t_s}} \tag{1}$$

con:

Q: calor intercambiado (W)
 α : coeficiente de convección (W/m²K)
 A: área de transferencia de calor (m²)
 t₁: temperatura entrada del aire (°C)
 t₂: temperatura salida del aire (°C)
 t_s: temperatura superficie (°C)

Este calor que se transfiere desde el fluido a la superficie debe ser igual al que entrega sensiblemente el fluido y está dado por:

$$Q = \dot{m}_a * c p_a * (t_1 - t_2) \quad (2)$$

con:

\dot{m}_a : flujo de aire seco (kg/s)
 $c p_a$: calor específico del aire $\left(\frac{J}{kgK} \right)$

Igualando las ecuaciones (1) y (2), se obtiene la condición de equilibrio para la temperatura de salida del aire.

$$\frac{t_2 - t_s}{t_1 - t_s} = e^{-\frac{\alpha * A}{\dot{m}_a * c p_a}} \quad (3)$$

Conocida la temperatura de salida del aire, es posible calcular el calor transferido y con ello la tasa de evaporación, a través de la expresión:

$$\dot{m}_v = \frac{Q}{h_{fg} \Big]_{t_s}} \quad (4)$$

con:

\dot{m}_v : flujo de agua evaporada (kg/s)
 $h_{fg} \Big]_{t_s}$: calor latente vaporización a t_s (J/kg)

A partir de la temperatura de salida y la condición de entalpía constante del proceso de evaporación, es posible determinar la humedad específica a la salida del proceso y con ello evaluar la cantidad de agua evaporada a partir de la expresión:

$$m_v = m_a * (W_2 - W_1) \quad (5)$$

donde: W₁= humedad específica a la entrada (kgv/kg)

W₂= humedad específica a la salida (kgv/kg)

Finalmente, la metodología se cierra calculando el flujo de evaporación a través de la expresión dada para la transferencia convectiva de materia.

$$m_v = \beta * A * \frac{Ca_2 - Ca_1}{\ln \frac{Ca_s - Ca_1}{Ca_s - Ca_2}} \quad (6)$$

con: β = coeficiente convectivo de materia (m/s)

Ca_1 = concentración vapor de agua a la entrada (kg/m³)

Ca_2 = concentración vapor de agua a la salida (kg/m³)

Ca_s = concentración vapor de agua en la superficie (kg/m³)

La condición efectiva del aire a la salida de la carga en el secador se satisface cuando se igualan los flujos de agua evaporada calculados por las ecuaciones (4), (5) y (6).

Los coeficientes convectivos de calor y materia a utilizar en las ecuaciones (1) y (6) se obtienen a partir de las correlaciones clásicas que entrega la literatura para cada situación de intercambio y relación superficie-fluido dadas por los números de Nusselt y Sherwood de la forma:

$$Nu = c * Re^m * Pr^n \quad (7)$$

$$y \quad Sh = c * Re^m * Sc^n \quad (8)$$

La analogía entre la transferencia convectiva de calor y masa, como fenómenos difusionales establece que, para cada caso, los coeficientes c , m y n son los mismos para las ecuaciones (7) y (8). Si se considera que:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad y \quad Sh = \frac{\beta \cdot l}{D} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad y \quad Sc = \frac{\nu}{D} \quad (10)$$

Con:

l : Longitud característica (m)

λ : Conductividad térmica del aire $\frac{W}{m^2 K}$

D : Difusividad térmica aire $\frac{m^2}{s}$

ν : Viscosidad cinemática del aire $\frac{m^2}{s}$

Relacionando las ecuaciones (7) y (8) con las (9) y (10), se obtiene:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \rho * cp * \left(\frac{a}{D}\right)^{1-n} \tag{11}$$

- con: n = 0 fluidos en reposo
- n = 0,33 fluidos en escurrimiento laminar
- n = 0,44 fluidos en escurrimiento turbulento

Finalmente, una forma simplificada, según Kayihan (1983), de la ecuación (11) válida para 25°C < t < 200°C está dada por:

$$\frac{\alpha}{\beta} = 1100 - 1.8 * t \tag{12}$$

Aplicando la metodología propuesta para evaluar la tasa de evaporación a través de un canal de secado en un castillo de madera; operando con una velocidad de aire de 6.0 m/s y un espesor de separadores de 22 mm es posible observar que; para una temperatura de bulbo húmedo de 60°C y con la temperatura de bulbo seco variando entre 70 y 160°C, la figura 3 muestra que; en la medida que la diferencia sicrométrica aumenta, la tasa de evaporación, calculada según la ecuación (6) con el coeficiente β determinado a partir de la ecuación (8), se incrementa en mayor proporción que las tasas de evaporación calculadas según las ecuaciones (4) y (5), con errores que varían entre 77% a 60%.

Cuando se trabaja a menores temperaturas, como se muestra en la figura 4, donde la temperatura de bulbo húmedo es de 30°C y la de bulbo seco varía entre 40 a 85°C, el error resultante varia sólo entre 26% y 16%.

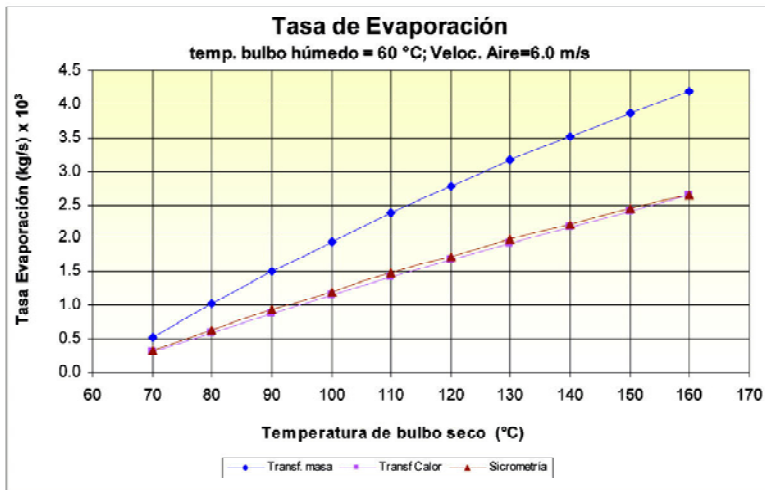


Figura 3. Tasa de evaporación temperatura de bulbo húmedo 60 °C

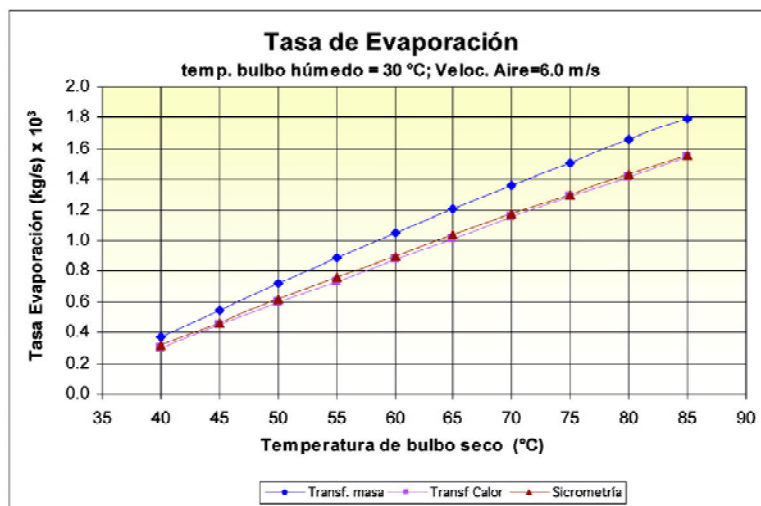


Figura 4. Tasa de evaporación temperatura de bulbo húmedo 30 °C

Se debe tener presente que los potenciales de concentración de la ecuación (6) no son susceptibles de errores ya que éstos se obtienen a partir de la condición de equilibrio alcanzada con las ecuaciones (3), (4) y (5) por lo tanto, el error es sólo atribuible a la forma de cálculo del coeficiente convectivo de materia β , razón por la cual, éste será la variable a utilizar en los siguientes análisis.

Si la metodología anterior se aplica sobre aire seco, la proximidad de las tasas de evaporación y entre coeficientes convectivos es mayor, reduciendo con ello los errores. En las figuras 5 y 6 se presentan los coeficientes convectivos β para temperaturas entre 50 y 120°C, los que se evaluaron según el siguiente procedimiento:

- Beta 1: utilizando ecuación (8)
- Beta 3: utilizando ecuación (12)
- Beta c: valor real obtenido de ecuación (6) con determinado de ecuación (4)

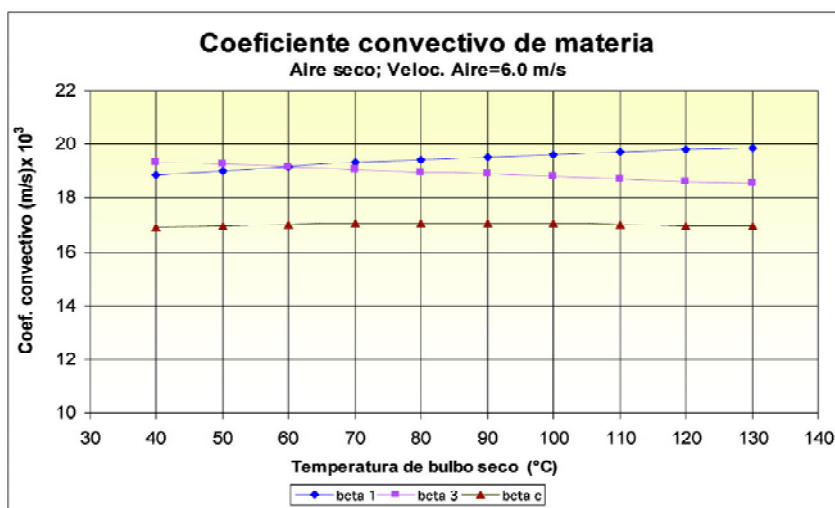


Figura 5. Coeficientes convectivos de materia para aire seco.

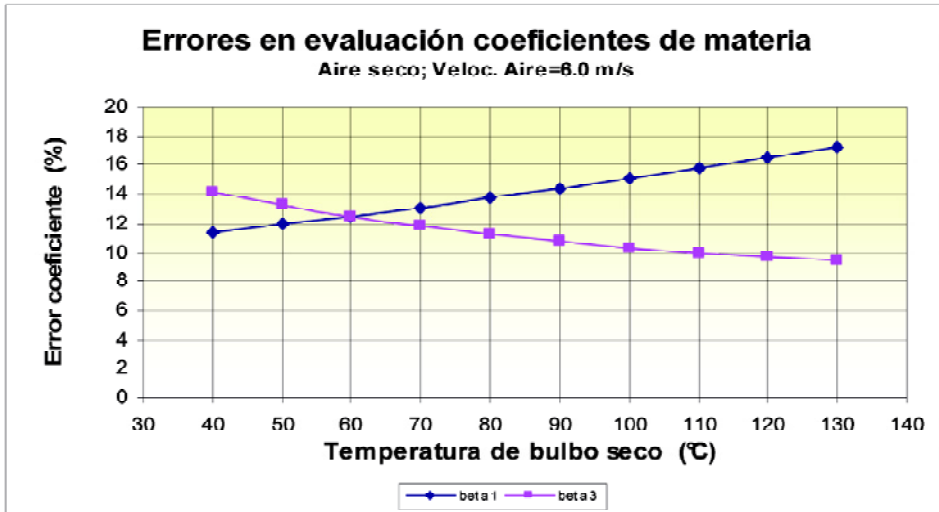


Figura 6. Errores evaluación coeficientes convectivos de materia, respecto valor de referencia

La figura 5 muestra que β_1 y β_3 son siempre mayor que el valor real β_c con errores que varían entre 11.4% a 17.2% para β_1 y entre 14.2% a 9.4% para β_3 en el rango de temperaturas indicado.

Cuando se trabaja con aire húmedo, la diferencia entre coeficientes convectivos de materia aumenta así como los errores asociados. Este comportamiento es más sensible cuando las diferencias sicrométricas son bajas como se muestra en las figuras 7 y 8 para temperatura bulbo húmedo de 60°C, con temperatura bulbo seco variando entre 70°C y 160°C.

El análisis presentado acerca de la metodología actual vigente para evaluar las tasas de evaporación por transferencia convectiva, permite concluir que para establecer el correcto equilibrio en los balances de calor y materia entre las ecuaciones (4), (5) y (6) se debe, necesariamente, corregir y/o modificar la forma de cálculo del coeficiente de transferencia convectiva de materia β .

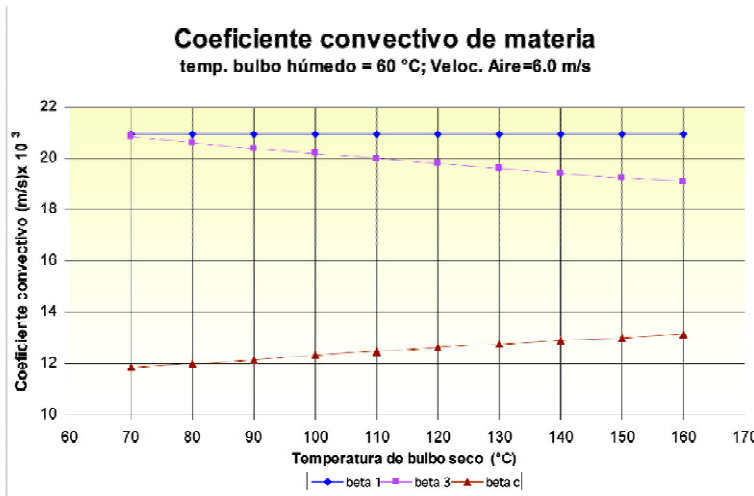


Figura 7. Coeficiente convectivo de materia aire húmedo y temperatura bulbo húmedo 60°C.

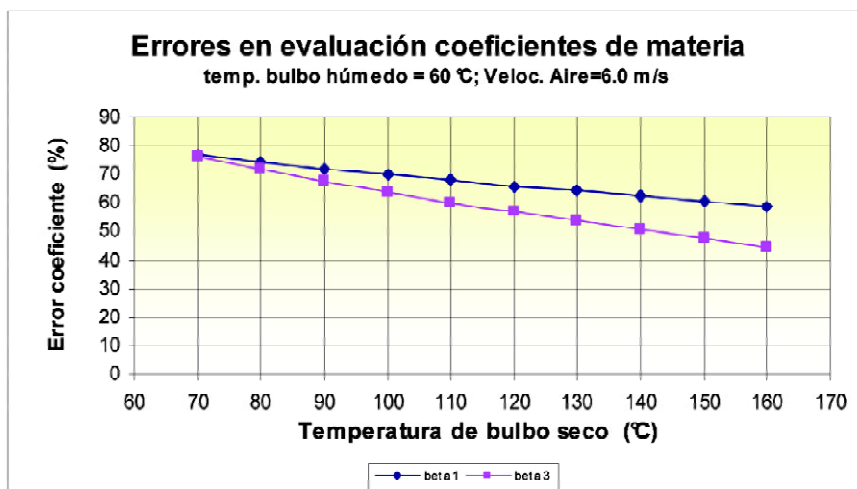


Figura 8. Evaluación errores coeficiente convectivo para $T_{bh}= 60^{\circ}\text{C}$ respecto valor de referencia

PROPUESTA DE CORRELACION PARA CALCULAR β

Este coeficiente debe tener una dependencia más amplia y, particularmente, debe incorporarse el potencial de secado o diferencia sicrométrica.

En consideración a lo antes señalado y teniendo presente que la evaporación de agua desde una superficie húmeda está determinada, para la condición de equilibrio, por la transferencia de calor desde el aire a la superficie, con apoyo de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) es posible determinar el calor suministrado, la tasa de evaporación real, la temperatura de salida del aire y su humedad específica.

Luego, a través de la ecuación (6) es posible determinar el coeficiente convectivo de materia β , como valor real asociado al potencial de secado y la tasa de evaporación real.

Efectuando evaluaciones sucesivas del procedimiento antes señalado para un amplio rango de temperaturas, así como de diferencias sicrométricas y de velocidades de aire, para el canal de secado considerado inicialmente, fue posible obtener una importante tabla de resultados que relacionarán el coeficiente convectivo de materia β con la temperatura de bulbo seco, la diferencia sicrométrica ($t_{bs} - t_{bh}$) y el coeficiente de convección α .

Procesando los resultados obtenidos por medio de análisis de regresión múltiple, con apoyo de software especializado, fue posible obtener la siguiente expresión:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \left(1352.81 + 21.3 \cdot 10^{-4} * t_{bh}^3 - 1.953 * (t_{bs} - t_{bh}) - 16.893 * (t_{bs} - t_{bh})^{0.5} \right) \quad (13)$$

Si se comparan los resultados del coeficiente β de la ecuación anterior con los valores de referencia, se observa que su validez es total para un amplio rango de temperaturas.

Las Figuras 9 a 12 presentan valores del coeficiente convectivo según modelo propuesto y el evaluado por transferencia de calor para temperaturas de bulbo húmedo de 40°C y 70°C en el rango de temperatura bulbo seco entre 50°C y 170°C, con sus respectivos errores.

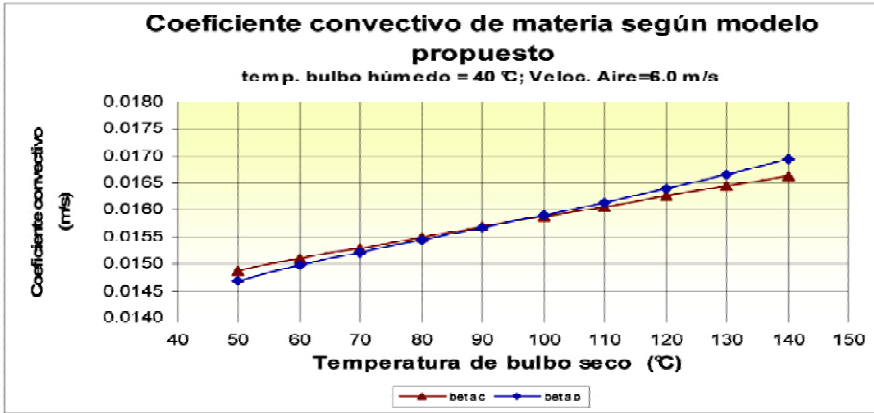


Figura 9. Coeficiente convectivo materia según modelo propuesto y valor referencial a Tbh=40°C

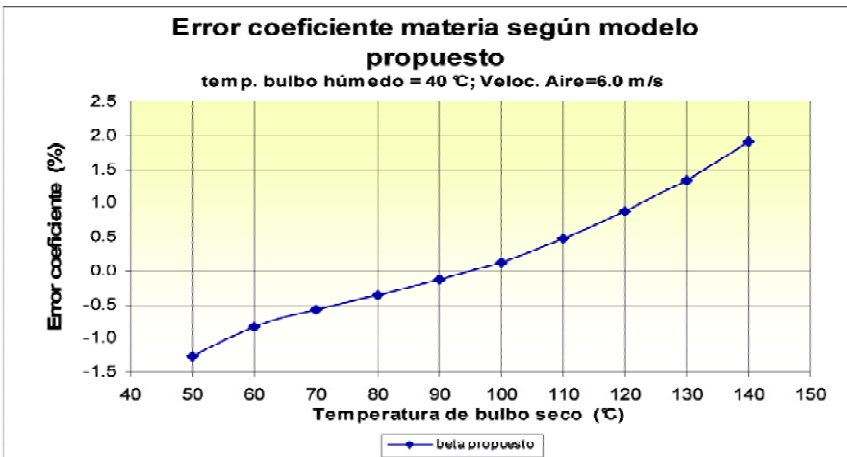


Figura 10. Errores coeficiente convectivo respecto de valor referencial a Tbh=40°C

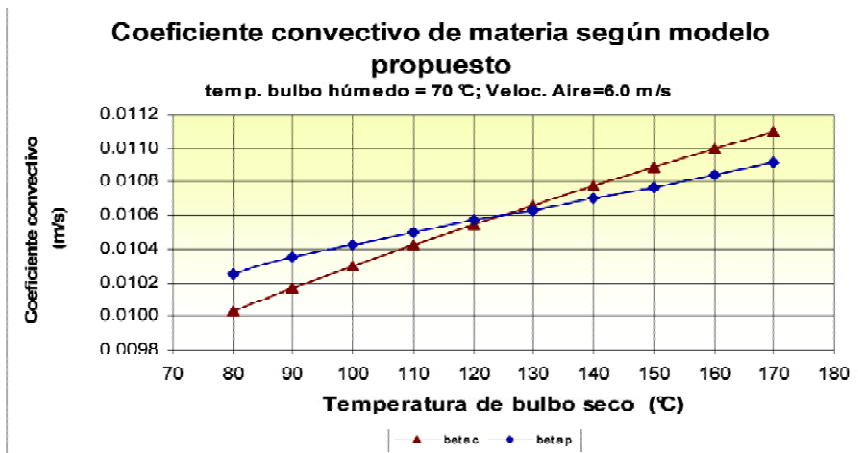


Figura 11. Coeficiente convectivo materia según modelo propuesto y valor referencial a Tbh=70°C

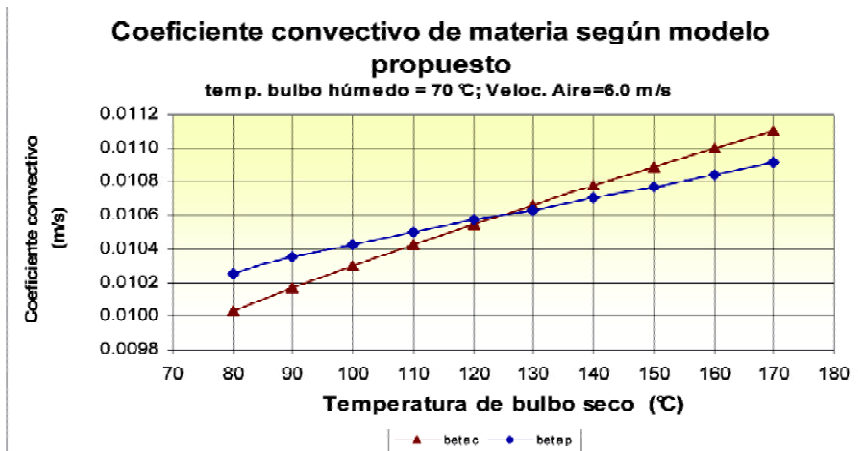


Figura 12. Errores coeficiente convectivo respecto de valor referencial a Tbh=70°C

VALIDACION CORRELACION PROPUESTA

Con el propósito de validar la correlación propuesta con resultados experimentales, se recurre a un estudio realizado por Bravo et al. (1994) y referido a la evaluación de fenómenos convectivos en una pila de madera. En dicho estudio se determinaron los coeficientes convectivos de transferencia de calor y materia, en un canal de secado, para diferentes velocidades de aire con temperatura bulbo seco de 70°C y bulbo húmedo 65°C.

La importancia de este trabajo experimental es que fue posible medir las condiciones de aire tanto a la entrada como a la salida de la carga y, conociendo el flujo de aire, se calculó el calor transferido desde el aire y el flujo de agua evaporada desde la madera.

A partir de estos antecedentes se determinó, en forma independiente, los coeficientes convectivos de calor y de materia, no existiendo relación funcional alguna entre éstos. Los resultados permitieron graficar dichos coeficientes en función de la velocidad del aire y el espesor de los separadores para las temperaturas antes señalados.

Por lo tanto, para validar la correlación propuesta, sólo fue necesario extraer desde los gráficos los valores de cada coeficiente en función de la velocidad y confrontar la relación entre ambos coeficientes con la correlación (13).

Los resultados obtenidos, así como sus errores, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1. Comparación resultados experimentales con modelo propuesto.

Ensayos Bravo et al. (1994)						
Velocidad (m/s)	T _{bs} (°C)	T _{bh} (°C)	α (W/m ² K)	β (m/s)	β modelo (m/s)	Error (%)
2	70	65	21	0.0116	0.0111	4.3
3	70	65	28	0.0154	0.0148	3.9
4	70	65	36	0.0201	0.0190	5.5
5	70	65	44	0.0250	0.0236	5.6

Los antecedentes presentados en la tabla anterior, permiten corroborar la validez de la correlación propuesta; con un error mínimo y teniendo presente, además, que el aire presenta un alto contenido de humedad específica (W= 0,200 kgv/kg).

CONCLUSIONES

La fundamentación y metodología que se presenta en la literatura clásica para evaluar el coeficiente convectivo de materia a partir de los parámetros adimensionales y/o sus correlaciones simplificadas, sólo presentan algún grado de validez cuando se trabaja con aire seco o con un bajo contenido de humedad específica.

Las tasas de evaporación evaluadas a través de la transferencia de calor (Ecs. 1 y 4) y de la transferencia convectiva de materia (Ec 6) no son sólo dependientes de sus respectivos coeficientes convectivos, sino que además son fuertemente dependientes de sus potenciales; temperatura para la transferencia de calor y concentración para la transferencia de materia, los cuales varían de manera diferente en la medida que la temperatura del aire aumenta y la diferencia sicrométrica disminuye, derivadas de la dependencia exponencial entre la presión y la temperatura del vapor de agua.

La correlación propuesta en tanto, a través de su diferencia sicrométrica, relaciona de manera satisfactoria el potencial de transferencia de calor con el de materia y la temperatura de bulbo seco, la cual fija la referencia asociada al potencial anterior.

Los resultados obtenidos para los rangos de temperatura evaluados, demuestran la exactitud y validez de la correlación propuesta, así como su corroboración posterior con los resultados experimentales de Bravo *et al.* (1994).

La estructura polinomial de la correlación no es compleja, es de fácil operación y viable de ser incorporada a cualquier modelo de simulación.

BIBLIOGRAFIA

Incropera, F.P.; De Witt, D.P. 1996. *Fundamentos de transferencia de calor*. 4ª Edición Pearson.

Kast, W.; Krischer, O.; Reinicke, H.; Wintermantel, K.1974. Konvektive Wärme-und Stoffübertraguns. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Kayihan, F. 1983. Stochastic Modeling of Lumber Drying in Batch Kiln. Weyerhaeuser Technology Center Note 045-4402-05, P 145. Tacoma Washington USA

Krischer, O.; Kast, W. 1978. Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin, Heidelberg, New York.

Bravo, M.; Tamm, A.; Neumann, R. 1994. Evaluación de los fenómenos convectivos en una pila de madera. Dpto. Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción. Tesis Magíster. Chile