

SECADO

1. INTRODUCCIÓN

El secado consiste en la eliminación total o parcial de un líquido que empapa a un sólido. Existen varios modos de llevar a cabo el secado, pero el más importante consiste en la evaporación del líquido hacia un gas inerte mediante la aportación de calor. También puede efectuarse de forma mecánica, por expresión o centrifugación.

Una operación relacionada es la liofilización, en la que el líquido se congela y posteriormente se produce la sublimación del sólido.

En general el secado puede aplicarse a cualquier líquido que empapa a un sólido, utilizando un gas inerte cualquiera para arrastrar el vapor. Sin embargo, en la mayor parte de las ocasiones el líquido es agua y el gas de arrastre el aire.

Mediante el secado se modifican y mejoran las propiedades del sólido (p. ej. en alimentos se evita el deterioro por microorganismos), se facilita su manejo (se evita p. ej. la aglomeración de los sólidos granulares húmedos) y se abarata su transporte. El secado suele ser la etapa final de muchos procesos de fabricación, resultando esencial en algunas industrias como la papelera, cerámica y maderera.

Las operaciones de secado requieren un consumo elevado de energía.

Existe una gran variedad de procesos de secado, que parten de la diversidad de materiales a secar: sólidos granulares, sólidos porosos y no porosos, pastas, geles, materiales biológicos, productos alimenticios (leche, tomate, granos, etc.)

Desde el punto de vista de la operación los procesos de secado se diferencian en el método seguido para transmitir calor, que puede ser por convección, conducción o radiación y también por métodos dieléctricos o de microondas.

La conducción se puede llevar a cabo desde las paredes que estén en contacto con el sólido, p. ej. desde las bandejas que lo soportan. Este mecanismo puede interesar si se trata de sólidos muy húmedos, con poco espesor. En este caso, la temperatura del sólido puede ser más elevada en unas zonas que en otras.

La convección se lleva a cabo mediante gases calientes (aire o gases de combustión). Es el método más empleado. Permite una buena regulación de la humedad y de la temperatura y con ello un control de la velocidad de secado.

La radiación suele estar presente como un mecanismo adicional en todos los secaderos, combinada con la convección. Tan solo es el mecanismo predominante en el caso de la liofilización, ya que al efectuarse a vacío no es posible utilizar la convección.

El secado dieléctrico o por microondas es muy uniforme y rápido, pero tiene un coste elevado, por lo que solo se aplica en productos de alto valor añadido.

Desde otro punto de vista los secaderos pueden ser continuos o intermitentes, dependiendo básicamente de la producción requerida y, por supuesto, de la economía del proceso.

La gran variedad de productos y la complejidad del proceso de secado hacen que no exista un modelo único que represente la operación y que permita el diseño preciso de los secaderos. Por esta razón, el diseño específico de secaderos para una operación dada suele llevarse a cabo por las propias empresas fabricantes de los equipos, que suelen disponer de mucha información procedente de equipos instalados con anterioridad.

2. TIPOS DE SECADEROS

Los secaderos pueden clasificarse de muy diferentes modos, atendiendo a:

- Naturaleza de los sólidos
- Alimentación continua o intermitente
- Flujo de aire en los secaderos continuos (paralelo, contracorriente o cruzado)

- Calefacción (directa o indirecta)
- Método de transmisión de calor

A continuación se resumen los tipos de secaderos más frecuentes. Su descripción y las características más relevantes de cada uno se pueden encontrar en la bibliografía (obras generales de Ingeniería Química, como McCabe-Smith, Coulson-Richardson, o en obras específicas de secado, como: Nonhebel y Moss: *El secado de sólidos en la Industria Química*, Reverté, 1979).

a). Secaderos intermitentes:

- Convección: Armarios o habitaciones
- Convección-conducción: Armarios con bandejas de soporte del sólido calentadas interiormente por vapor, operando a presión atmosférica
- Conducción: Armarios de bandejas calentadas operando a presión reducida

b). Secaderos continuos:

- Convección:
 - Túnel con vagonetas
 - Cinta transportadora
 - Rotatorio con calefacción directa desde el gas
 - Lecho fluidizado
 - Transporte neumático
 - Pulverización
 - Estantes rotatorios
- Conducción:
 - Rotatorio con calefacción a través de la pared
 - De rodillos
 - De cilindros múltiples
 - Discos
- Radiación
- Dieléctricos

3. EQUILIBRIO

Los datos de equilibrio para sólidos húmedos se expresan habitualmente en forma de curvas isotermas que relacionan la humedad relativa del aire en contacto con el sólido con el contenido en humedad del sólido, W_E , kg de agua/kg de sólido seco, una vez alcanzado el equilibrio.

En lo que sigue nos referiremos al agua como líquido que empapa al sólido y al aire como gas de secado por ser la situación más frecuente. En otro caso, los principios que se aplican son válidos teniendo en cuenta las propiedades físicas del sistema de que se trate, aunque debe tenerse siempre presente las particularidades solo aplicables al sistema aire-agua, como la coincidencia de las temperaturas de saturación adiabática y húmeda.

En la Figura 1 se muestran curvas de equilibrio a 25°C para diferentes materiales. Generalmente estas curvas varían relativamente poco cuando se modifica la temperatura.

Sea un sólido húmedo con una humedad W_T que se pone en contacto con aire que tiene una humedad relativa φ_i . El sólido perderá o ganará humedad según que W_T sea mayor o menor que W_E , respectivamente. W_E es la humedad no eliminable en contacto con ese aire; la diferencia $W_T - W_E$ es la **humedad libre**, W_L , o simplemente W , que es la que puede extraerse en la operación de secado.

En las condiciones de equilibrio con aire de $\varphi < 1$, el agua que moja el sólido ejerce una presión de vapor menor que la del agua pura a la misma temperatura (puesto que existe equilibrio con un aire que tiene una $p < p_s$ ($\varphi < 1$)). La disminución de la presión de vapor se debe a interacciones del agua con el sólido: capilaridad, solubilidad parcial del sólido (sólidos higroscópicos), adsorción, reacción química con el agua, etc.

La humedad afectada por la presencia del sólido, es decir, aquella igual o menor que W_E para $\varphi = 1$, se denomina **humedad ligada**. La humedad que excede este valor, $W_T - W_E(\varphi = 1)$, es la **humedad no ligada**, que ejercerá una presión de vapor igual a la del agua pura. Los sólidos que contienen humedad no ligada se denominan **propriadamente húmedos**. Los que contienen humedad ligada, se denominan **higroscópicos**.

La humedad ligada y no ligada depende solamente de la naturaleza del sólido, ya que se definen siempre en función del aire saturado ($\varphi = 1$). Las humedades libre y de equilibrio dependen tanto de la naturaleza del sólido como de las condiciones del aire utilizado para el secado.

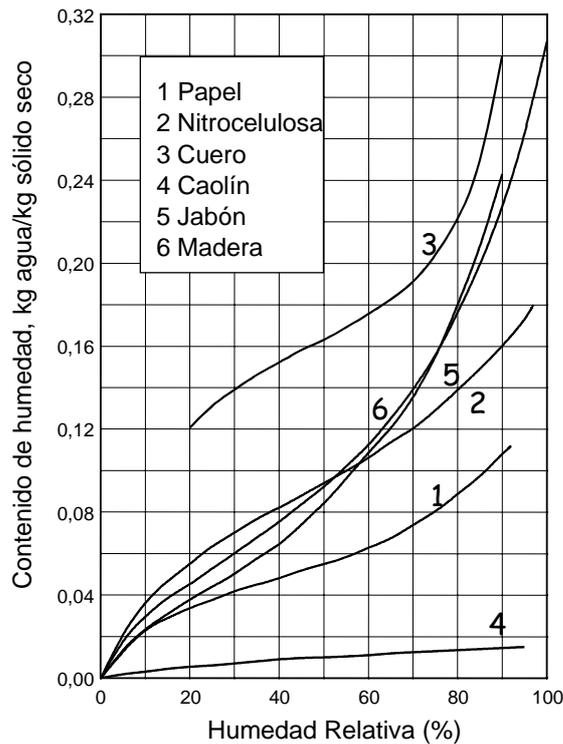


Figura 1. Curvas de equilibrio a 25°C para diferentes materiales

Ejemplo: Cuero que contiene $W_T = 0,4$ kg agua/kg sól. seco se va a secar con aire con $\varphi = 0,3$. Del diagrama de equilibrio se obtiene:

Humedad de equilibrio: $W_E = 0,087$

Humedad libre: $W = 0,4 - 0,087 = 0,313$

Humedad ligada: $W_E(\varphi = 1) = 0,24$

Humedad no ligada: $W - W_E(\varphi = 1) = 0,4 - 0,24 = 0,16$

4. MECANISMO DEL SECADO POR CONVECCIÓN

Cuando se expone un sólido húmedo a una corriente de aire no saturado que se encuentra a temperatura más elevada que el sólido, se producen tres fenómenos de transporte que son en parte semejantes a los descritos al tratar el termómetro húmedo:

- Transmisión de calor desde el aire a la superficie del sólido
- Transferencia del vapor de agua situado en la capa saturada próxima a la interfase gas-sólido húmedo hacia el aire y evaporación de nuevas porciones de agua en la interfase líquido-gas (que inicialmente estará en la superficie externa del sólido)
- Transporte de agua líquida desde el interior del sólido hacia la interfase líquido-gas para reponer el agua evaporada

En la Figura 2 se muestran estas etapas. A continuación se analiza cada etapa por separado.

4.1. Transmisión de calor desde el aire al sólido

Si la superficie del sólido se mantiene húmeda, se establecerá el mismo equilibrio dinámico estudiado al tratar la teoría del termómetro húmedo. Con ello, la superficie interfacial líquido-gas se encontrará a la temperatura húmeda correspondiente al aire, t_w . Así, el caudal de calor transferido desde el aire y las paredes al sólido por convección-radiación (se supone que la temperatura de la pared es igual a la del aire) será:

$$Q = (h_c + h_r)A(t - t_w) \quad [1]$$

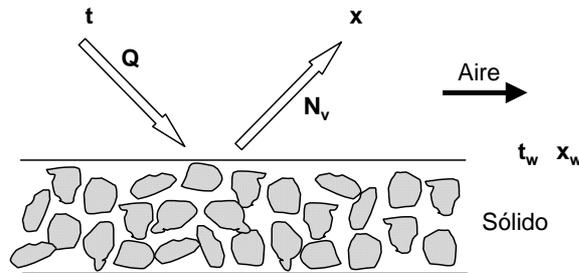


Figura 2. Etapas del mecanismo de secado por convección

Un incremento de la velocidad del aire provoca un aumento del coeficiente individual de transmisión por convección, h_c , con lo que por una parte se establecerá más rápidamente el equilibrio dinámico correspondiente a la temperatura húmeda y por otra, se incrementará el aporte de calor que a su vez incide en la velocidad de secado.

4.2. Transferencia del vapor hacia el aire. Evaporación del líquido.

El caudal de agua transferido hacia el aire será:

$$N_v A = k_g A(p_w - p) = k' A(X_w - X) \quad [2]$$

Un incremento de la velocidad del aire tiene el mismo efecto mencionado anteriormente sobre k' y la velocidad global del secado.

En las ecuaciones [1] y [2] se ha supuesto la misma área para la transmisión de calor y para la transferencia de materia, así como que toda la superficie exterior del sólido está humedecida.

Si el aporte de agua desde el interior del sólido no es suficiente, lo que ocurre en etapas avanzadas del secado, parte de la superficie queda seca, el área no es la misma que la disponible en las primeras etapas y además el calor recibido del aire se invertirá no solo en la evaporación del agua sino también en el calentamiento progresivo del sólido en su parte más externa, cuya temperatura se aproximará a la del aire.

Esta elevación de temperatura no afecta solamente a los caudales de calor y materia expresados por las ecuaciones [1] y [2], sino que puede alterar las propiedades físicas del sólido: agrietamiento, pérdida de agua de constitución, gelificación, cambio en la porosidad, etc. Estos cambios pueden tener mucha importancia en el secado de ciertos materiales, como la cerámica o el papel.

Cuando es insuficiente el aporte de agua desde el interior del sólido, la interfase líquido-gas se desplaza desde la superficie externa hacia el interior del sólido. Esto obliga al agua evaporada a desplazarse a través de los poros del sólido de la zona seca hasta alcanzar la superficie exterior.

4.3. Transferencia del líquido a través del sólido

El flujo de líquido en el interior del sólido puede tener lugar por varios mecanismos, dependiendo de la naturaleza del sólido:

- **Difusión ordinaria**, debida a diferencia de concentraciones

- **Capilaridad**, debida a fuerzas de tensión superficial
- **Diferencias de presión**, debidas a retracciones del sólido (como ocurre p. ej. en las arcillas)

En un proceso de secado intervienen generalmente todos los mecanismos, aunque suele predominar uno de ellos, de acuerdo con las características del sólido.

En los sólidos granulares interviene de forma predominante la capilaridad, que es función del diámetro de los poros y de su distribución. Para un capilar de diámetro uniforme, $2r$, el líquido asciende hasta una altura h_s sobre el nivel normal de acuerdo con la ecuación:

$$h_s = \frac{2\sigma}{r\rho g} \quad [3]$$

donde σ es la tensión superficial del líquido.

En el caso de que los capilares no sean de sección uniforme, lo que ocurre en los sólidos granulares, se produce el ascenso del líquido por los capilares de menor diámetro, vaciándose los poros más grandes. Al desplazarse el líquido intervienen también fuerzas de rozamiento, que se combinan con las de gravedad y tensión superficial.

La importancia relativa de estas fuerzas depende fundamentalmente del tamaño de partícula del sólido de modo que:

- Para partículas de $0,1 \text{ mm} < r < 1 \text{ mm}$ controlan las fuerzas capilares y de gravedad, siendo despreciables las fuerzas de rozamiento.
- Para partículas de $0,001 \text{ m} < r < 0,01 \text{ mm}$ controlan exclusivamente las fuerzas capilares
- Para partículas de $r < 0,001 \text{ mm}$ controlan las fuerzas capilares y las de rozamiento

En el caso de partículas de tamaño muy pequeño el potencial de succión originado por las fuerzas capilares puede ser tan elevado que origine una depresión capaz de vaporizar el líquido, interfiriendo así con el proceso capilar.

5. CINÉTICA DEL SECADO

La velocidad de secado se define como la disminución del contenido en humedad libre de un sólido por unidad de tiempo:

$$-\frac{dW_L}{dt}, \quad \frac{\text{kg agua elim.}}{(\text{kg sól. s})(\text{tiempo})}$$

La velocidad de secado depende de las propiedades del aire utilizado y del contenido en humedad del sólido. Generalmente durante el secado cambian las propiedades del aire, aumentando su humedad y disminuyendo su temperatura, lo que modifica las fuerzas impulsoras para la transferencia de materia y la transmisión de calor. Si el caudal de aire es muy elevado en proporción a la masa de sólido puede admitirse que sus propiedades no se modifican sustancialmente durante el proceso. En este caso se dice que el secado tiene lugar en **condiciones de secado constantes**. Esto puede lograrse en ensayos de laboratorio para determinar la cinética, pero se da rara vez en secaderos industriales.

5.1. Cinética de secado en condiciones constantes

La velocidad de secado puede obtenerse determinando el contenido de humedad libre en función del tiempo para un aire con una cierta temperatura y contenido de humedad. La humedad libre del sólido puede determinarse de varios modos, aunque es muy frecuente llevarlo a cabo por pesada. Sea W_T la humedad total del sólido y $W_L = W_T - W_E$ la humedad libre. En un ensayo de secado en condiciones constantes se obtienen curvas W_T-t y W_L-t como las mostradas en la Figura 3. En los dos casos, prescindiendo de un pequeño tramo inicial, 0, que corresponde a la adaptación de la muestra a las condiciones de temperatura y humedad del aire, aparecen dos tramos, I y II. El tramo I es recto y llega hasta una humedad (total o libre) crítica, W_c para un tiempo correspondiente

t_c . El tramo II tiene lugar para tiempos mayores que t_c y presenta una curva de pendiente decreciente, que tiende a un valor asintótico, W_E en el caso de la curva W_T-t y 0 para la curva W_L-t . La pendiente de cualquiera de las dos curvas (son iguales para un valor dado de t), cambiada de signo representa la velocidad de secado, $-dW_L/dt$. En el tramo I la velocidad de secado es **constante** (no confundir con las condiciones de secado constantes, que se dan en ambos periodos); en el periodo II la velocidad es **decreciente**, e inferior a la del periodo I.

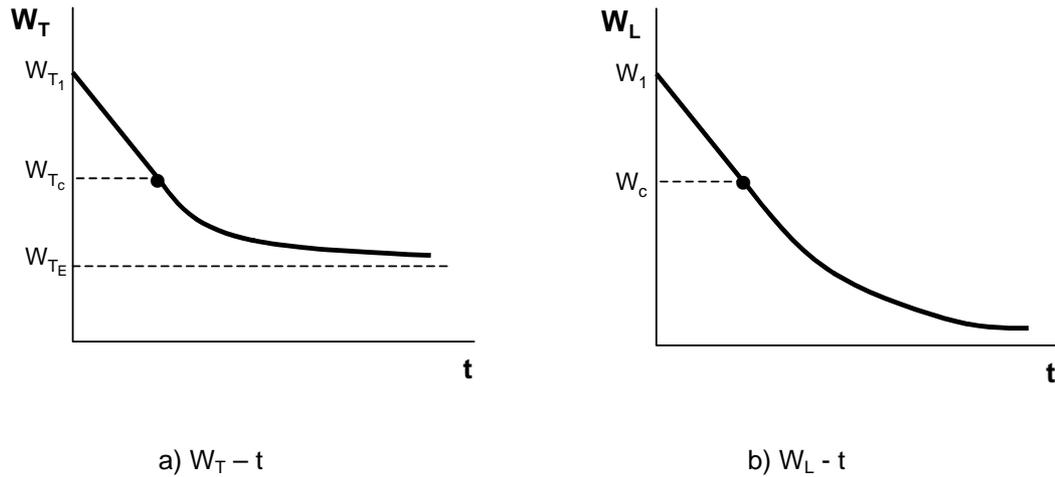


Figura 3. Condiciones de secado constantes: curvas de secado

En la Figura 4 se representa la velocidad de secado frente al contenido de humedad libre, observándose los dos periodos I y II (y también el de adaptación, 0). En lo sucesivo, se manejará únicamente la humedad libre, suprimiéndose el subíndice L, para simplificar las expresiones.

Se observan los dos periodos de velocidad de secado constante, I, y de velocidad de secado decreciente, II, separados por la humedad crítica, W_c :

$$W \geq W_c \quad \left(-\frac{dW}{dt} \right)_I = Cte \quad [4]$$

$$0 \leq W \leq W_c \quad 0 \leq \left(-\frac{dW}{dt} \right)_{II} \leq \left(-\frac{dW}{dt} \right)_I \quad [5]$$

Los dos periodos se justifican considerando el mecanismo de secado.

El tramo I corresponde a la superficie exterior completamente mojada, de modo que a medida que se evapora el líquido, se repone desde el interior, con lo que la superficie se secado es constante, y con ella la velocidad, ya que se suponen condiciones de secado del aire constantes. En este periodo la velocidad no es afectada por el estado del sólido.

Para $W=W_c$ del caudal de líquido aportado desde el interior del sólido a la superficie externa no es capaz de reponer todo el líquido evaporado: En ese momento la superficie exterior empieza a secarse y la interfase líquido gas se desplaza hacia el interior. La velocidad comienza a disminuir ya que por una parte la superficie interfacial disminuye y por otra aparece una nueva resistencia a la transferencia de materia desde el interior del sólido. Si se trata de un sólido homogéneo y poco poroso, el agua se difunde en estado líquido hasta las inmediaciones de la superficie exterior pero la velocidad de difusión disminuye al reducirse la concentración de humedad. En sólidos porosos

granulares y también en los poco porosos que han sufrido una velocidad de secado muy elevada en el periodo I, la superficie interfacial se retrae hacia el interior y la velocidad de difusión disminuye al aumentar la distancia. Por otra parte, el sólido seco comienza a calentarse, con lo que disminuye el gradiente de temperatura para convección y se incrementa el flujo conductivo a través del sólido. La forma de la curva del periodo de velocidad decreciente depende así de la naturaleza del sólido (poroso, granular, gel).

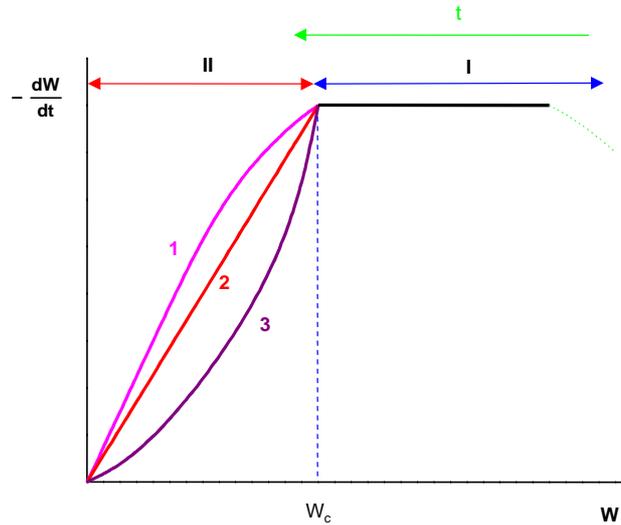


Figura 4. Condiciones de secado constantes: curvas de velocidad de secado características

En las Figuras 5a y 5b se muestra el plano de vaporización y los perfiles de las fuerzas impulsoras de transporte de materia y energía en un sólido poroso propiamente húmedo (a) e higroscópico y con humedad ligada en el segundo (b). La diferencia fundamental entre ambos casos es que en el caso de los sólidos higroscópicos, queda todavía humedad ligada en la zona comprendida entre la superficie externa y el plano de vaporización.

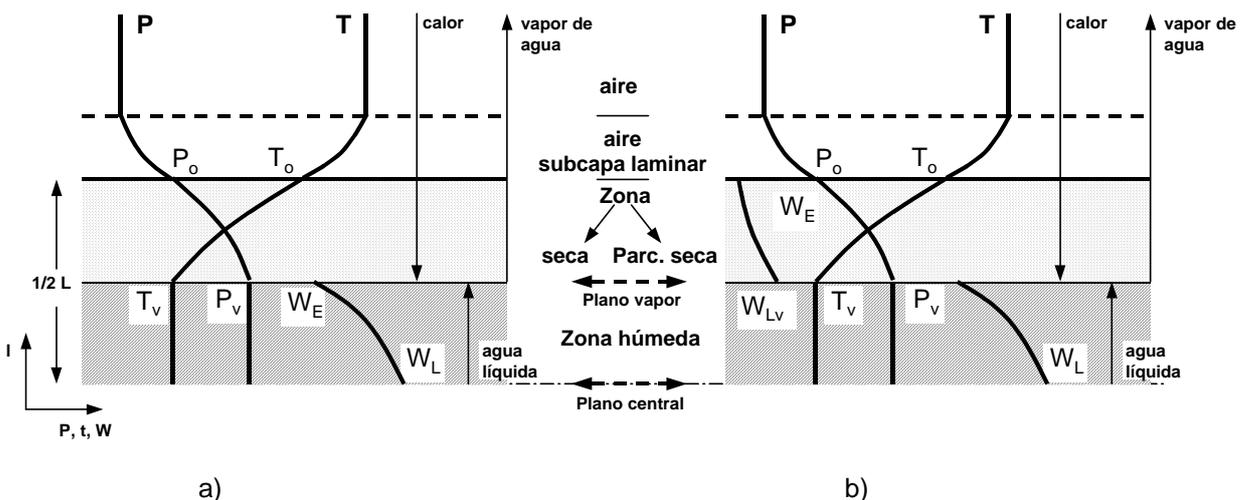


Figura 5. Condiciones de secado constantes: periodo de velocidad de secado decreciente.
a) Sólido poroso propiamente húmedo
b) Sólido poroso higroscópico

5.1.1. Duración del secado en el periodo I (velocidad de secado constante)

La velocidad de secado se mantiene constante debido a que todo el calor recibido del aire por convección-radiación se invierte en vaporizar el líquido desde la superficie.

Así, la velocidad de secado constante se puede expresar en función de la velocidad de transferencia de calor y materia:

$$-\frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho SL} \frac{hS(T - T_0) + h_r S(T_p - T_0)}{r_0} = \frac{1}{\rho SL} k_g S_h (p_0 - p) = \frac{1}{\rho SL} k' S_h (X_0 - X) \quad [6]$$

donde T_0 es la temperatura de la superficie del sólido (prácticamente igual a la temperatura húmeda del aire, T_w); T_p la temperatura de las paredes de la cámara de secado; S , la superficie a través de la que el sólido recibe calor por convección y radiación y S_h la superficie de evaporación.

Si $S_h \sim S$ y $T_p \sim T$, de [6]

$$-\frac{dW}{dt} = B'(T - T_0) = B(X_0 - X) \quad [7]$$

donde

$$B' = \frac{h + h_r}{\rho L r_0} \quad [8]$$

$$B = \frac{k'}{\rho L} \quad [9]$$

que son constantes durante el periodo I, lo mismo que las fuerzas impulsoras $(T - T_0)$ y $(X_0 - X)$.

Durante este periodo la velocidad de secado puede incrementarse:

- Con aire más caliente (mayor T) (aumenta $(T - T_0)$, aunque también se elevan los valores de T_0 y X_0)
- Con aire más seco (menor X) (aumenta $(X_0 - X)$, aunque también en este caso disminuye algo X_0 y T_0 , hasta alcanzarse un nuevo equilibrio en la superficie)
- Incrementando el flujo de calor por radiación (aumenta h_r y B')
- Aumentando la velocidad de la corriente de aire: aumentan los coeficientes h y k'

En este periodo, para secar el sólido desde W_1 hasta W_c puede escribirse:

$$-\frac{dW}{dt} = \frac{W_1 - W_c}{t_I} = Cte \quad [10]$$

o bien:

$$t_I = \frac{W_1 - W_c}{\left(-\frac{dW}{dt}\right)_I} \quad [11]$$

5.1.2. Periodo de velocidad de secado decreciente, II ($W < W_c$)

Se ha intentado explicar las curvas de velocidad de secado en este periodo mediante expresiones basadas en el mecanismo. En el caso de sólidos no porosos, combinando las ecuaciones de conservación de materia y energía en el sólido; en los sólidos porosos, mediante mecanismos capilares. En dichos modelos intervienen las difusividades del compuesto que se evapora en las fases líquida y vapor, las propiedades del sólido y la tensión superficial del líquido, además de los coeficientes de transporte en la fase gas.

Estos modelos no tienen validez general, por lo que es preciso disponer de datos experimentales de velocidad de secado.

En cada instante, la velocidad de secado en este periodo II, con propiedades del aire constantes, es una función de la humedad libre del sólido:

$$-\frac{dW}{dt} = f(W) \quad [12]$$

Separando variables e integrando,

$$\int_{t_c}^{t_f} dt = t_{II} = \int_{W_c}^{W_2} \frac{dW}{f(W)} \quad [13]$$

La integral del segundo miembro puede resolverse en general numéricamente, y, en algunos casos, analíticamente.

Así, si $f(W)$ es lineal, curva 2 de la Figura 4, se tiene:

$$-\frac{dW}{dt} = K.W \quad [14]$$

Integrando analíticamente:

$$t_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{W_c}{W_2} \quad [15]$$

Para las condiciones críticas,

$$-\frac{dW}{dt} k.W_c \quad [16]$$

Teniendo en cuenta [11]:

$$t_I = \frac{W_1 - W_c}{k.W_c} \quad [17]$$

y el tiempo total de secado será:

$$t_{tot} = t_I + t_{II} = \frac{1}{K} \left\{ \frac{W_1 - W_c}{W_c} + \ln \frac{W_c}{W_2} \right\} \quad [18]$$

También pueden obtenerse expresiones analíticas para velocidades de secado de tipo parabólico:

$$\left(-\frac{dW}{dt} \right)_{II} = K.W^2 \quad [19]$$

5.2. Condiciones de secado variables

Cuando las propiedades del aire (X , t) varían, situación habitual en los secaderos industriales, no pueden separarse estrictamente los dos periodos de velocidad constante y decreciente, ni son válidas las ecuaciones anteriores. Sin embargo, resulta conveniente seguir dividiendo la operación en dos periodos, según que la humedad del sólido sea superior o inferior a la crítica, es decir, según que la superficie del sólido se encuentre o no saturada de humedad.

5.2.1. Periodo I: $W > W_c$, superficie del sólido saturada de humedad

En este periodo sigue siendo válido lo indicado en el apartado 5.1.1 para condiciones de secado constantes, cumpliéndose la ecuación [7], si bien la velocidad no es constante, ya que por una parte varían las fuerzas impulsoras ($T - T_0$) ó ($X_0 - X$), y por otra pueden variar los coeficientes B' ó B si cambian los coeficientes h y k' al modificarse las propiedades del aire (temperatura, humedad o caudal).

5.2.2. Periodo II: $W < W_c$, superficie del sólido parcial o totalmente seca

En este caso la velocidad de secado será en general una función de la humedad libre y de la fuerza impulsora a través del aire, $X_0 - X$:

$$-\frac{dW}{dt} = f[W, (X_0 - X)] \quad [20]$$

función que puede ser compleja. En algunos casos se puede ajustar a funciones analíticas sencillas, como, por ejemplo:

$$-\frac{dW}{dt} = k.W.(X_0 - X) \quad [21]$$

o

$$-\frac{dW}{dt} = k.W^n \quad , n \geq 1 \quad [22]$$

Esta última expresión es independiente del gradiente de humedad, y no se da con frecuencia en la práctica.

Para disponer de datos para el diseño de secaderos, primeramente deben obtenerse curvas cinéticas de secado para diferentes valores del gradiente de humedad, $(X_0 - X)$ (o su equivalente de temperatura), tal como las mostradas en la Figura 6.

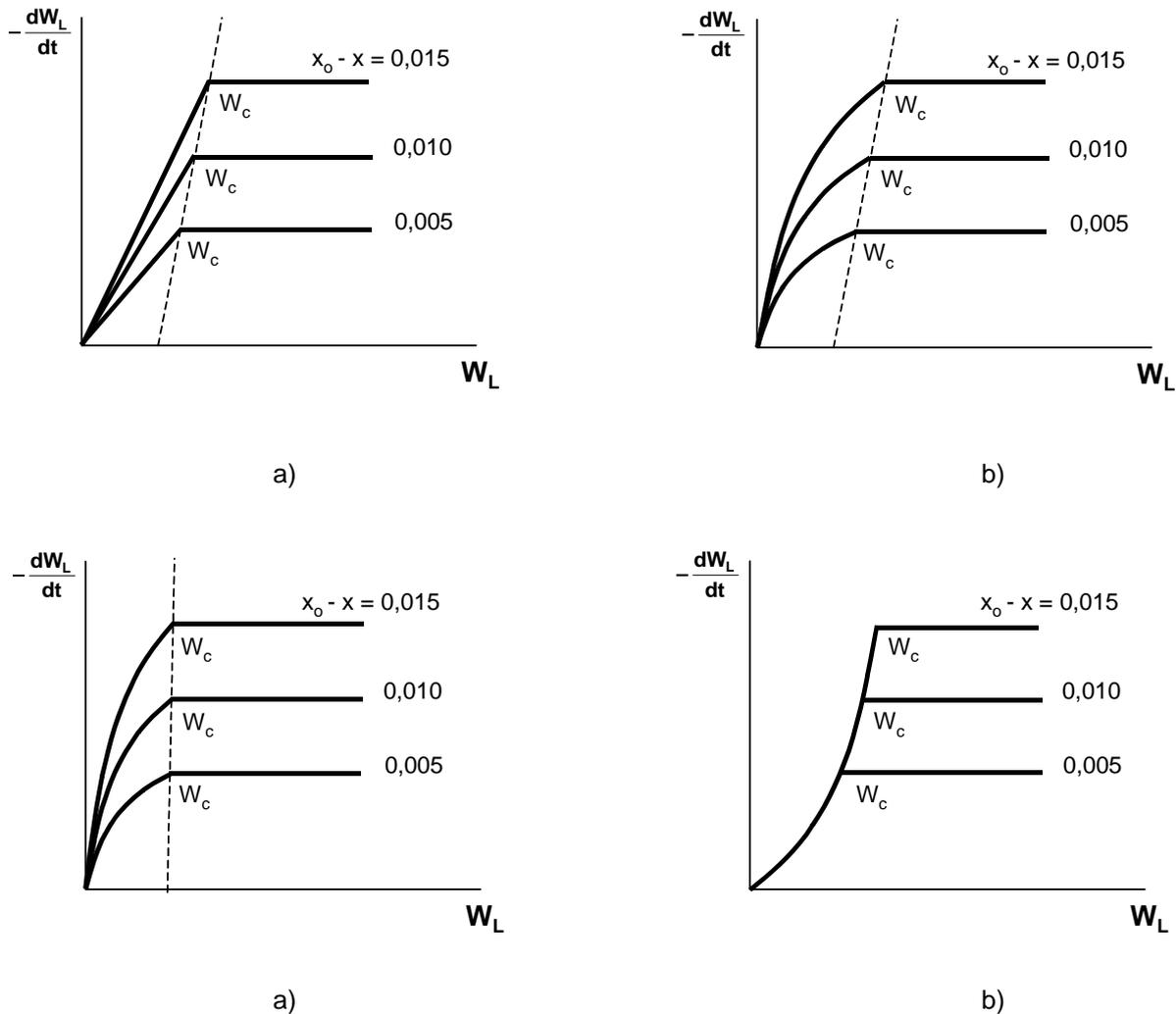


Figura 6. Experimentos de secado en condiciones constantes

6. CALCULO DE SECADEROS

6.1. Secaderos discontinuos

Los secaderos discontinuos de bandejas suelen operar con recirculación parcial del aire húmedo, de modo que inicia el contacto con el material con una humedad X_1 y finaliza con una humedad X_2 . Pueden operar con una sola etapa de calentamiento del aire, seguida de un secado adiabático del material, o bien pueden introducirse elementos de calefacción intermedios.

En el diagrama de humedades (Figura 7) se muestran las trayectorias de humedad y temperatura, poniéndose de manifiesto las ventajas de la calefacción repetida, que permite no utilizar temperaturas demasiado elevadas.

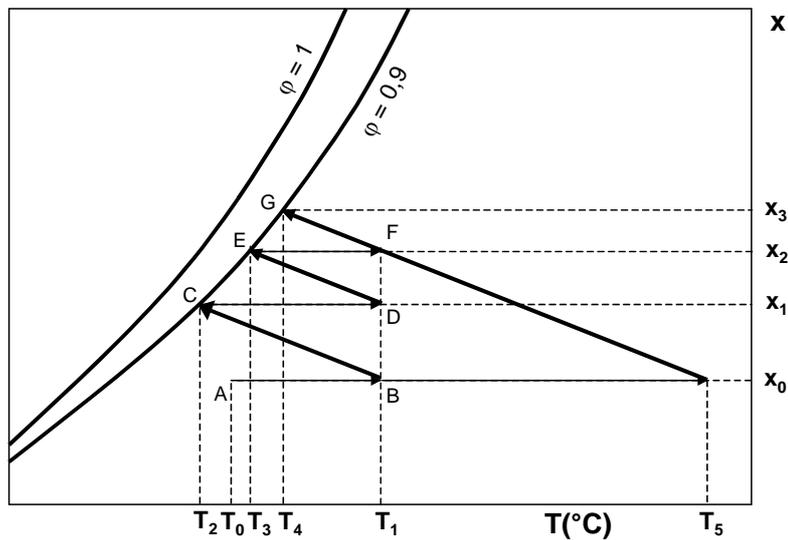


Figura 7. Condiciones del aire mediante secado con calefacción inicial del aire solamente o con recirculación repetida del mismo.

6.2. Secaderos continuos

En la Figura 8 se esquematiza un secadero continuo (túnel, cinta transportadora, rotatorio) con circulación de gas y sólido en contracorriente o en paralelo, con la nomenclatura correspondiente.

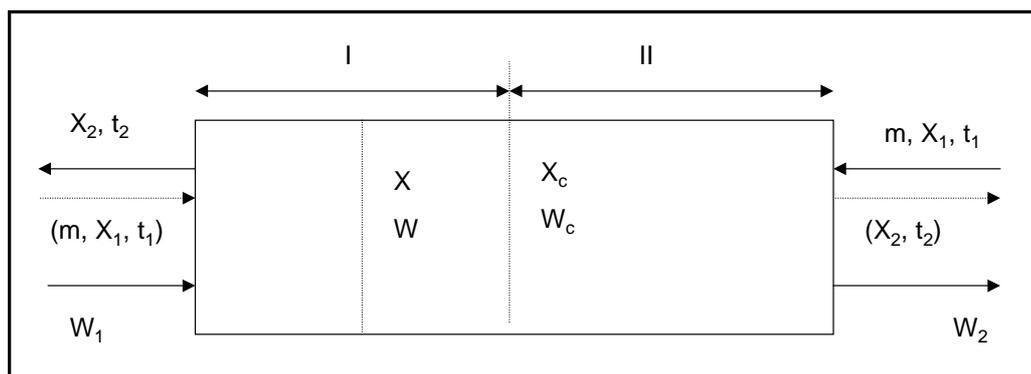


Figura 8. Esquema de un secadero continuo con circulación en contracorriente o en paralelo.

En una determinada sección del secadero el sólido alcanzará su humedad libre crítica, W_c . Sea X_c la humedad del aire correspondiente a la citada sección. Esta sección divide al secadero en dos zonas: I, con $W > W_c$, y II con $W < W_c$. Se admite que en general estos secaderos se encuentran bien aislados del exterior, por lo que en las zonas situadas entre los elementos de calefacción del aire (si existen varias en el secadero) el

secado tiene lugar de forma adiabática, procediendo el calor necesario para la evaporación exclusivamente del aire. Se pueden distinguir así tres tipos de operación:

a). Secaderos adiabáticos: La calefacción del aire se efectúa una sola vez, a la entrada del mismo, enfriándose posteriormente de forma adiabática a lo largo del secadero (Figura 9a). Si la circulación tiene lugar en contracorriente, estos secaderos están indicados con sólidos sensibles al calor cuando se encuentran húmedos pero no si están secos, como p. ej. la gelatina y los azúcares.

b). Secaderos de temperatura media constante: El aire que circula por el secadero se calienta periódicamente hasta una cierta temperatura, enfriándose entre dos calefacciones de forma adiabática (Figura 9b). Si la circulación tiene lugar en contracorriente, estos secaderos están indicados con sólidos sensibles al calor en seco pero no en húmedo, como p. ej. fibras textiles o cauchos.

c). Secaderos de humedad controlada: El aire se calienta también repetidamente mediante cambiadores pero la temperatura se controla de forma que el gradiente máximo de humedades ($X_0 - X$) sea la misma tras cada calefacción, es decir, que $(X_{01} - X_1) = (X_{02} - X_2) = \dots$, tal como se muestra en la Figura 9c. Estos secaderos están indicados para sólidos cristalinos con agua de cristalización y, en general, para sólidos que no soportan velocidades de secado excesivas, como madera, papel, cerámica, etc.

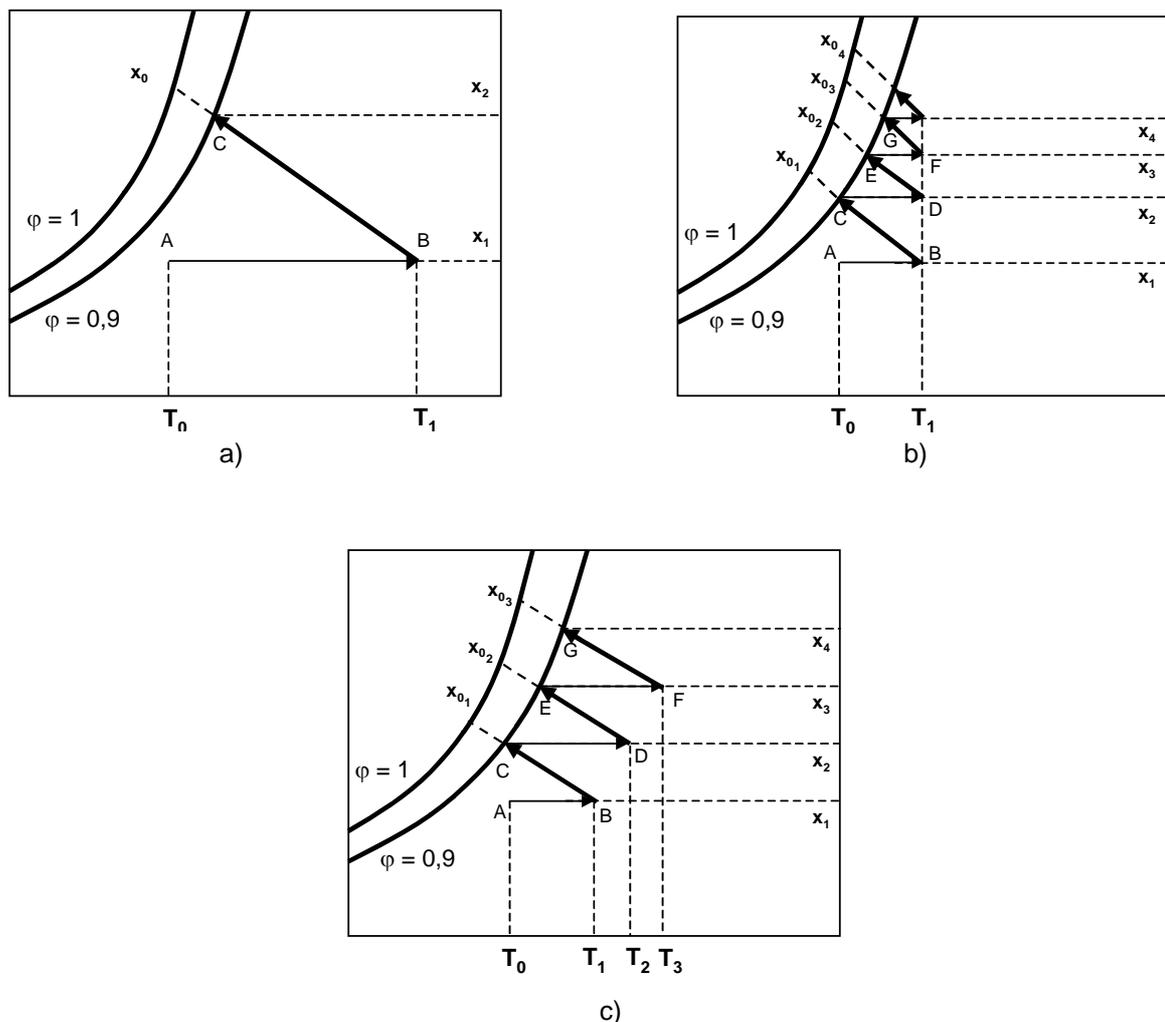


Figura 9. Condiciones del aire en un secadero de túnel
a). Secadero adiabático. b). Secadero de temperatura media constante.
c). Secadero de humedad controlada ($X_0 - X = cte$)

6.2.1. Cálculo de la longitud del secadero

El cálculo de la longitud del secadero resulta sencillo si se supone que la velocidad de secado es independiente de la historia previa del material y se conoce la cantidad de sólido húmedo que puede colocarse en las bandejas, cinta transportadora o cilindro rotatorio por cada unidad de longitud del mismo, N , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$.

Con referencia a la nomenclatura indicada en la Figura 8, m representa los kg de aire seco introducidos por cada kg de sólido seco. Sean t_I y t_{II} los tiempos de residencia del sólido en las zonas I y II del secadero. Los subíndices 1 y 2 indican corrientes de entrada y salida, respectivamente; p , una sección cualquiera y c , la sección correspondiente a la humedad crítica. Al variar la fuerza impulsora (X_0-X) el valor de W_c no es fijo, y depende del tipo de secadero utilizado.

Para el diseño se siguen las siguientes etapas:

a). Balance de agua

- En todo el secadero (base de cálculo, 1 kg de sólido seco):

$$W_1 - W_2 = m.(X_2 - X_1) \quad [23]$$

En esta ecuación se suele conocer W_1 y X_1 , se fijan W_2 y una de las dos variables restantes, X_2 ó m , determinándose la segunda mediante la ecuación.

- Entre un extremo (p. ej., el de alimentación de sólido) y una sección cualquiera, p :

- Circulación en contracorriente:

$$W_1 - W_p = m.(X_2 - X_p) \quad [24 a]$$

- Circulación en paralelo:

$$W_1 - W_p = m.(X_p - X_1) \quad [24 b]$$

Con estas ecuaciones puede calcularse la humedad del aire que corresponde a un contenido de humedad del sólido dado, W_p , o viceversa.

b). Curvas cinéticas de secado

Debe disponerse de las curvas experimentales de velocidad de secado, $-dW/dt$ en función de la humedad libre, W , y de la fuerza impulsora de humedades, (X_0-X).

c). Cálculo del tiempo de secado (tiempo de residencia en el secadero)

Se calcula mediante la ecuación:

$$t = \int_{W_1}^{W_2} \frac{dW}{-dW/dt} = \int_{W_1}^{W_2} \frac{dW}{f[W, (X_0 - X)]} \quad [25]$$

a través de los siguientes pasos:

a). Se seleccionan valores de W entre W_1 y W_2 y mediante el balance de agua se obtienen los correspondientes valores de X .

b). Mediante el diagrama de humedades o aplicando las ecuaciones correspondientes, se determinan los valores de X_0 que corresponden a cada X (o a cada zona del secadero), conforme a lo indicado en las Figuras 9 a), b) y c) según se trate de un secadero adiabático, de temperatura controlada constante o de gradiente de humedad controlado. Se tienen así conjuntos de valores

$$W, X, X_0, X_0-X$$

para distintas secciones del secadero.

c). Con las curvas cinéticas se determina la velocidad de secado correspondiente a cada sección:

$$W, (X_0-X) \Rightarrow -dW/dt$$

d). Se calcula el tiempo de residencia mediante la ecuación [25], bien para todo el secadero, bien para las zonas I y II por separado.

e). Si M es el caudal de sólido húmedo a tratar, la longitud del secadero se calcula mediante la expresión:

$$L = \frac{M}{N} t \quad [26]$$

siendo t el tiempo de residencia total y N , según se indicó, la cantidad de sólido húmedo que se dispone por metro de longitud de secadero.

a). Secadero adiabático

En un secadero adiabático X_0 es constante (Figura 9a) y de la ecuación [24] se deduce que X varía linealmente con W ; por tanto también variará linealmente (X_0-X) con W . Tomando como ejemplo uno de los gráficos de velocidad de secado de la Figura 6, el correspondiente a W_c variable con velocidad de secado en el periodo II decreciente linealmente con W , se ha trazado la recta de operación (X_0-X) frente a W para circulación en paralelo (Figura 10a) y en contracorriente (Figura 10b).

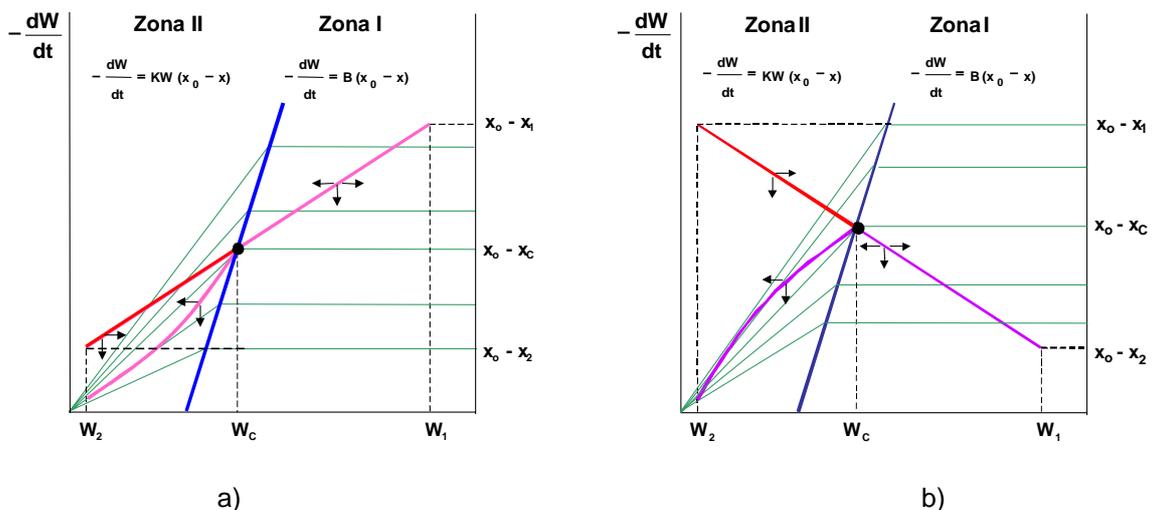


Figura 10. Deseccación adiabática
a) Circulación en paralelo
b) Circulación en contracorriente

En la zona I del secadero, en la que $W > W_c$, la recta $(X_0-X) - W$, cuyas ordenadas se leen sobre el eje derecho de las figuras cuya escala es proporcional con la de velocidad de secado del eje izquierdo según la ecuación [13], también permite obtener directamente la velocidad de secado que corresponde a cada sección (valor de W entre W_1 y W_c), leyendo los valores sobre el mencionado eje izquierdo.

En la zona II esto no es válido, ya que no existe proporcionalidad directa entre la velocidad de secado y la fuerza impulsora (X_0-X) . En este caso, es preciso operar del siguiente modo:

- Para un valor dado de W entre W_c y W_2 se obtiene (X_0-X) de la recta de operación.
- Se identifica la curva de secado correspondiente a esta fuerza impulsora para la zona de velocidad de secado decreciente, interpolando si es necesario entre las curvas disponibles.
- Para el valor de W se lee sobre la curva de secado la velocidad de secado correspondiente a esa sección.

De este modo se obtienen varias parejas de valores $W, -dW/dt$ comprendidas entre W_c y W_2 , con las que puede efectuarse la integración de la ecuación [25] y calcular el correspondiente tiempo de secado, t_{II} .

Si la velocidad de secado para el periodo II puede ajustarse a ciertas funciones, es posible efectuar la integración analítica de la ecuación [25]. Así, si se cumple la ecuación de velocidad [21], $(-dW/dt)_{II} = K.W.(X_0-X)$, se tiene:

Zona I

Circulación en paralelo.

De la Figura 10a se deduce:

$$\frac{d(X_0 - X)}{dW} = \frac{(X_0 - X_1) - (X_0 - X_c)}{W_1 - W_c} \quad \therefore \quad dW = \frac{W_1 - W_c}{(X_0 - X_1) - (X_0 - X_c)} d(X_0 - X) \quad [27]$$

y sustituyendo dW en [7], se deduce:

$$\begin{aligned} -\frac{W_1 - W_c}{(X_0 - X_1) - (X_0 - X_c)} \int_{X_0 - X_1}^{X_0 - X_c} \frac{d(X_0 - X)}{(X_0 - X)} &= B \int_0^{t_I} dt \\ \therefore t_I &= \frac{1}{B} \frac{W_1 - W_c}{\frac{(X_0 - X_1) - (X_0 - X_c)}{\ln \frac{X_0 - X_1}{X_0 - X_c}}} = \frac{1}{B} \frac{W_1 - W_c}{(X_0 - X)_{ml(1 \rightarrow c)}} \end{aligned} \quad [28]$$

Circulación en contracorriente.

Análogamente, de la Figura 10b):

$$\frac{d(X_0 - X)}{dW} = \frac{(X_0 - X_2) - (X_0 - X_c)}{W_1 - W_c} \quad [29]$$

llegándose por el mismo procedimiento a:

$$t_I = \frac{1}{B} \frac{W_1 - W_c}{(X_0 - X)_{ml(c \rightarrow 2)}} \quad [30]$$

Como en un secadero adiabático t_0 también es constante y t varía linealmente con X , también existirá una relación lineal entre $(t-t_0)$ y W , pudiéndose utilizar si se desea la otra forma de la ecuación [7]: $.dW/dt=B'.(t-t_0)$.

Zona II

Sustituyendo la ecuación de velocidad [21] en [25]:

$$t_{II} = -\frac{1}{K} \int_{W_c}^{W_2} \frac{dW}{W(X_0 - X)} \quad [31]$$

Mediante las ecuaciones [24] puede expresarse W en función de X y con ello, llevar a cabo la integración analítica de [31], obteniéndose:

Circulación en paralelo:

$$t_{II} = \frac{1}{K} \frac{W_c - W_2}{\frac{W_c(X_0 - X_2) - W_2(X_0 - X_c)}{\ln \frac{W_c(X_0 - X_2)}{W_2(X_0 - X_c)}}} = \frac{1}{K} \frac{W_c - W_2}{[W(X_0 - X)]_{mlc(c \rightarrow 2)}} \quad [32]$$

Circulación en contracorriente:

$$t_{II} = \frac{1}{K} \frac{W_c - W_2}{[W(X_0 - X)]_{mlc(1 \rightarrow c)}} \quad [33]$$

b). Secadero de humedad controlada

En estos secaderos la fuerza impulsora X_0-X varía poco entre dos calefacciones sucesivas, por lo que puede utilizarse un valor único para dicha zona, igual a la media aritmética de los valores en los extremos de la mismas, $(X_0-X)_{ma}$.

Si se cumple la ecuación lineal [21] para la zona II, puede llevarse a cabo la integración de forma analítica, deduciéndose las expresiones:

$$t_I = \frac{1}{B} \frac{W_1 - W_c}{(X_0 - X)_{ma}} \quad [34]$$

$$t_{II} = \frac{1}{K} \frac{\ln \frac{W_c}{W_2}}{(X_0 - X)_{ma}} \quad [35]$$

6.2.2. Consideraciones finales

El método explicado tiene varias limitaciones. Así se ha supuesto que la velocidad de secado en cada instante es independiente de la historia previa del sólido que se seca. Con ello, al variar el gradiente $(X_0 - X)$ se obtiene una curva cinética que en rigor debería depender de cómo se ha llevado a cabo realmente el proceso hasta ese momento. A pesar de ello, el método conduce a soluciones suficientemente aproximadas, que proporcionan datos útiles para el diseño.

En general, los sólidos con humedad crítica W_c pequeña se secan más rápidamente si el flujo es paralelo, ocurriendo lo contrario si W_c es elevada.

Finalmente, no debe olvidarse que la toma de decisión acerca del método de secado más adecuado no debe contemplar únicamente el tiempo de secado o la longitud de secadero necesaria, sino también la evolución de las propiedades físicas del sólido durante el proceso.