

18.1. Introducción

La deshidratación o secado de alimentos es una de las operaciones unitarias más utilizadas en la conservación de los mismos. Ya era utilizada en tiempos prehistóricos por nuestros antepasados, pues les permitía obtener productos alimenticios con un tiempo de vida superior. Con el paso del tiempo, la demanda de alimentos ha ido creciendo con el aumento de la población, y cada vez es mayor esta demanda, lo que ha acarreado el que la industria de conservación por secado haya adquirido una gran importancia en el sector alimentario. El desarrollo de la industria del secado ha ido ligado a la demanda de alimentos que debían cubrir las necesidades de los soldados en las guerras que se han dado a lo largo del mundo. La deshidratación es especialmente útil para los propósitos militares, ya que reduce el peso y tamaño de los alimentos. Los avances logrados en el campo militar han sido transferidos a la industria del secado en general, lo que ha traído consigo un mejor y mayor avance de la industria del secado de alimentos.

En los procesos de deshidratación el agua del alimento es eliminada, en mayor o menor grado, y se consigue con ello una mejor conservación microbiológica, además de retardar muchas reacciones indeseables. Aunque esta conservación del alimento tiene una gran importancia, con la deshidratación también se logran disminuir los costes de envasado, manejo, almacenado y transporte, ya que se disminuye el peso del alimento, y en algunos casos el volumen.

A pesar de que los términos de secado y deshidratación se utilizan como sinónimos, en realidad no debiera ser así, ya que se considera que un alimento está deshidratado si no contiene más de 2,5% de agua, mientras que uno seco puede contener más de 2,5% (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

A excepción de la liofilización, secado osmótico y secado a vacío, la eliminación del agua del alimento se consigue de forma mayoritaria mediante una corriente de aire seco, que elimina el agua de la superficie del producto hacia el seno de la corriente de aire. El proceso de secado de alimentos no sólo rebaja su contenido en agua, sino que puede afectar otras características físicas y químicas de los mismos, como son destrucción de nutrientes, reacciones enzimáticas y no enzimáticas, entre otras.

En el proceso de secado es importante conocer los mecanismos involucrados en el movimiento del agua en el interior y exterior del alimento. Este movimiento puede ser debido a fuerzas capilares, difusión del agua por gradientes de concentración, difusión en la superficie, difusión del vapor de agua en los poros llenos de aire, flujo debido a gradientes de presión y a la vaporización y condensación del agua.

18.2. Mezcla de dos corrientes de aire

En los procesos de secado por aire, la corriente gaseosa que abandona el secadero suele poseer un contenido energético que induce a pensar en su reutilización, aunque su humedad es más elevada que a la entrada del secadero. Por ello, la recirculación del aire que abandona el secadero es usual, y permite además que el proceso global de secado sea menos costoso. En la mayoría de los casos, una corriente de aire caliente y húmeda es recirculada parcialmente y mezclada con una corriente de aire fresco. Los balances de materia y energía, para esta operación, se pueden expresar como:

$$w_F X_F + w_C X_C = (w_F + w_C) X_m \quad [18.1]$$

$$w_F \hat{H}_F + w_C \hat{H}_C = (w_F + w_C) \hat{H}_m \quad [18.2]$$

en la que w es el caudal o flujo de aire, X es la humedad y H es la entalpía por unidad de masa, representando los subíndices F y C frío y caliente, respectivamente, mientras que el subíndice m se refiere a las condiciones de la mezcla. Este tipo de proceso puede visualizarse en el diagrama humedad-entalpía (figura 18.1), destacando que las diferencias de entalpía entre la corriente mezclada y las iniciales son proporcionales a los caudales másicos.

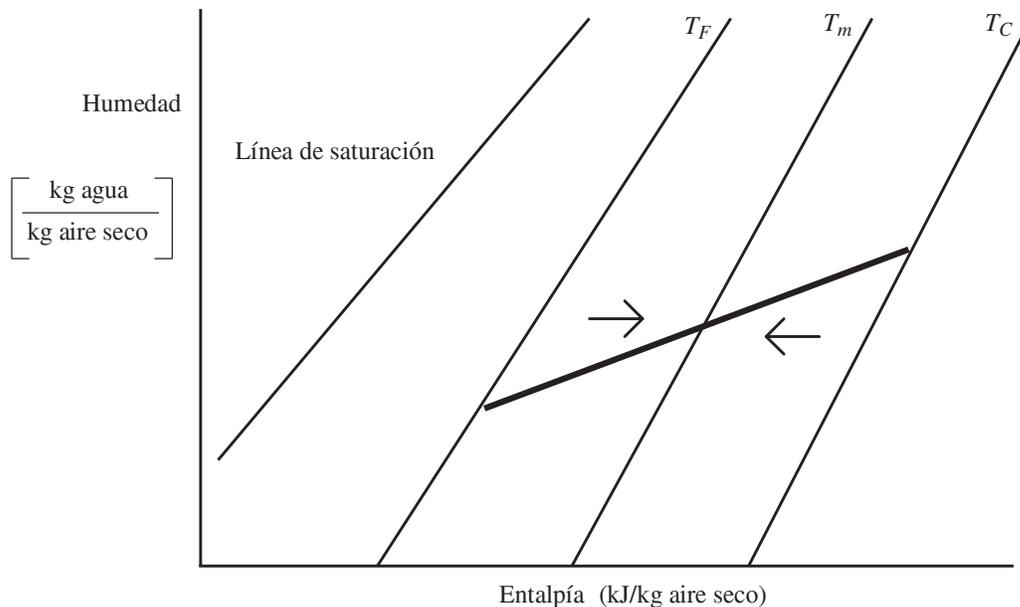


Figura 18.1. Representación de la mezcla de dos corrientes de aire.

18.3. Balances de materia y calor en secaderos ideales

18.3.1. Secadero continuo sin recirculación

Un deshidratador de este tipo consta esencialmente de una cámara en la que fluyen en contracorriente aire y los sólidos a secar (figura 18.2). Los sólidos se introducen a razón de w_S (kg de sólidos secos/h), cuyo contenido en agua es Y_E a una temperatura T_{SE} , abandonando el deshidratador a una temperatura T_{SS} con un contenido en agua Y_S . La corriente de aire se introduce en el secadero con un caudal w'_A (kg de aire seco/h), a una temperatura T_{AE} con un contenido en humedad de X_E (kg de agua/kg aire seco), mientras que lo abandona a una temperatura T_{AS} , con una humedad X_S .

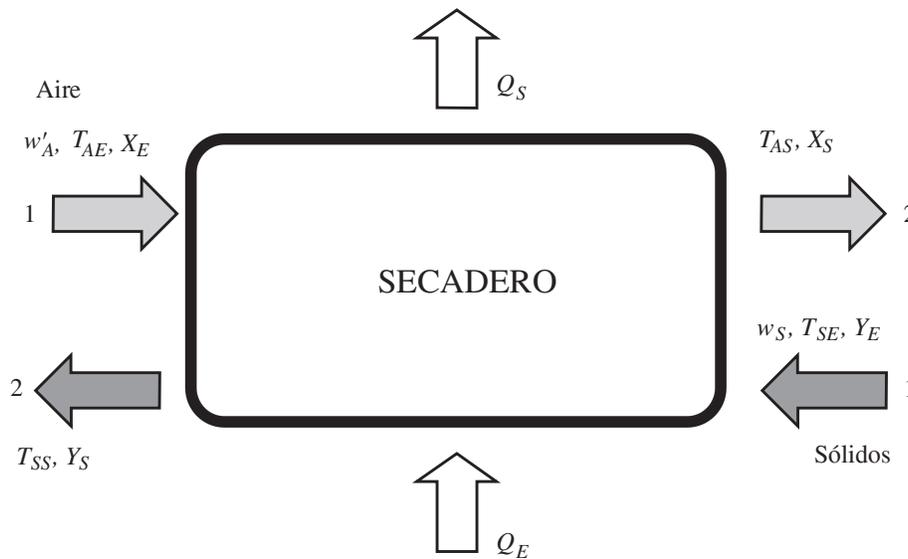


Figura 18.2. Secadero continuo ideal sin recirculación.

Al realizar un balance de materia para el agua se obtiene:

$$w_S (Y_E - Y_S) = w'_A (X_S - X_E) \quad [18.3]$$

mientras que el balance energético conduce a la expresión:

$$\dot{Q}_E + w'_A \hat{i}_E + w_S \hat{h}_E = \dot{Q}_S + w'_A \hat{i}_S + w_S \hat{h}_S \quad [18.4]$$

en la que \dot{Q}_E y \dot{Q}_S son los caudales de calor aportado y perdido en el secadero, respectivamente, siendo \hat{h} la entalpía de los sólidos, mientras que \hat{i} es la entalpía del aire expresada según la ecuación 6.16:

$$\hat{i} = \hat{s} (T - T^*) + \lambda_0 \cdot X = (1 + 1,92 X) (T - T^*) + \lambda_0 X \quad [18.5]$$

siendo \hat{s} el calor específico húmedo del aire. La entalpía del sólido será:

$$\hat{h} = \hat{C}_p)_S (T - T^*) + Y \hat{C}_p)_A (T - T^*) \quad [18.6]$$

en la que $\hat{C}_p)_S$ es el calor específico de los sólidos, y $\hat{C}_p)_A$ el correspondiente al agua que contiene. En estas últimas ecuaciones T^* representa la temperatura de referencia, que suele tomarse como 0 °C.

18.3.2. Secadero continuo con recirculación

En un secadero como el descrito en el apartado anterior, la corriente de aire que abandona el secadero contiene más agua que a la entrada, pero por contra su temperatura es más elevada. Por ello, la energía que contiene esta corriente se suele utilizar en forma de recirculación. Sin embargo, como su contenido en agua no permitiría una buena aplicación en el secado, esta corriente se mezcla con la de aire seco fresco y antes de introducir la mezcla en el secadero se pasa por un calentador, con objeto de subir su contenido entálpico (figura 18.3).

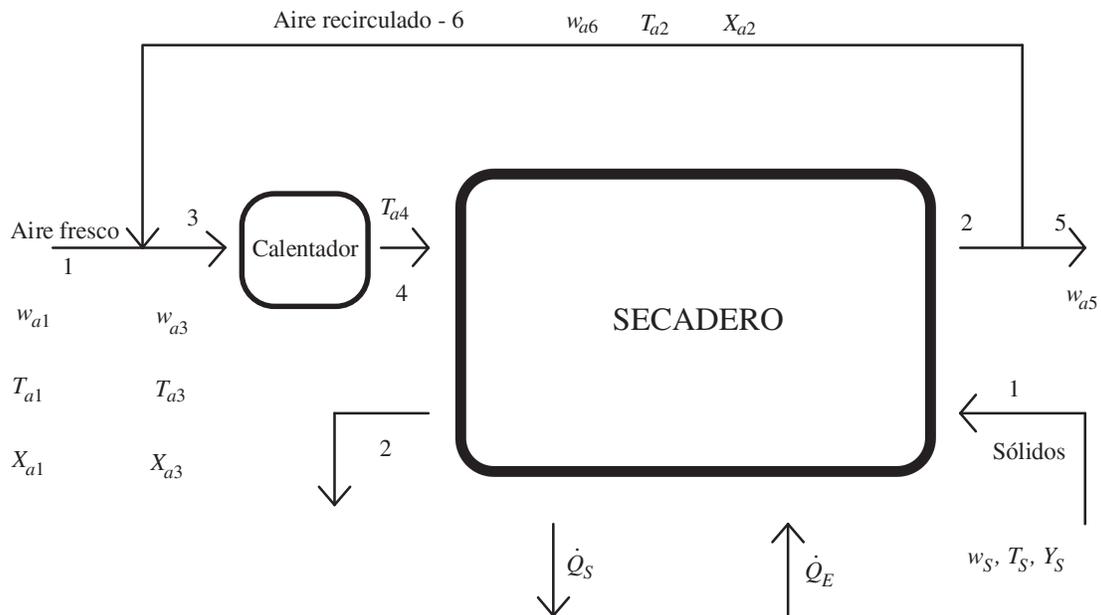


Figura 18.3. Secadero continuo ideal con recirculación.

Un balance másico en el calentador conduce a:

$$w'_1 X_1 + w'_6 X_2 = (w'_1 + w'_6) X_4 \quad [18.7]$$

en la que w'_1 es el caudal de aire fresco seco, w'_6 es el caudal de aire seco recirculado, siendo X_1 la humedad del aire fresco, X_2 la del aire recirculado, y X_4 la de la mezcla que abandona el calentador.

El balance másico realizado en el secadero conduce a la expresión:

$$(w'_1 + w'_6) X_4 + w'_S Y_E = (w'_1 + w'_6) X_2 + w'_S Y_S \quad (18.8)$$

De igual modo pueden realizarse los balances entálpicos para el calentador, secadero o sistema completo.

18.4. Mecanismos de deshidratación

El secado se define como la eliminación de la humedad de un producto, y en la mayoría de las situaciones prácticas la etapa principal durante el secado es la transferencia interna de materia. En los procesos de secado, los mecanismos de transferencia de agua en el producto que se está secando se pueden resumir en los siguientes (Van Arsdel y Copley, 1963): movimiento de agua bajo fuerzas capilares, difusión del líquido por gradientes de concentración, difusión superficial, difusión del vapor de agua en los poros llenos de aire, flujo debido a gradientes de presión, y flujo debido a la vaporización-condensación del vapor de agua. Las fuerzas capilares son responsables de la retención del agua en los poros de los sólidos de construcción rígida, mientras que en sólidos formados por agregados de polvos finos, es la presión osmótica la responsable de esta retención, así como en la superficie del sólido.

El tipo de material que se desea secar es un factor muy importante en todos los procesos de secado, ya que sus propiedades físicas y químicas juegan un papel importante durante el secado, debido a los posibles cambios que puedan ocurrir y al efecto de estos cambios en la eliminación del agua del producto. Un material higroscópico es aquél que contiene agua ligada que ejerce una presión de vapor menor que el agua líquida a la misma temperatura. Productos en los que la base principal son carbohidratos, es de suponer que se comporten de forma higroscópica, pues los grupos hidroxilos alrededor de las moléculas de azúcar permiten que se creen puentes de hidrógeno con el agua. La interacción entre las moléculas de agua y los grupos hidroxilo conllevan la solvatación o solubilización de los azúcares. En proteínas solubles en agua, tal como la mayoría de las proteínas globulares, los aminoácidos polares están distribuidos uniformemente en la superficie, mientras que los grupos hidrófobos tienden a localizarse en el interior de la molécula. Esta disposición ocasiona la formación de puentes de hidrógeno con el agua, lo que explica la solubilidad de este tipo de proteínas.

18.4.1. Proceso de secado

En los procesos de secado, los datos suelen expresarse como la variación que experimenta el peso del producto que se está secando con el tiempo (figura 18.4). Aunque a veces los datos de secado pueden expresarse en términos de velocidad de secado.

El contenido en humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos, y se expresa como:

$$Y_t = \frac{w_T - w'_S}{w'_S} \quad [18.9]$$

en la que w_T es el peso total de material en un tiempo determinado, siendo w'_S el peso de los sólidos secos, e Y_t la humedad expresada como peso de agua/peso de

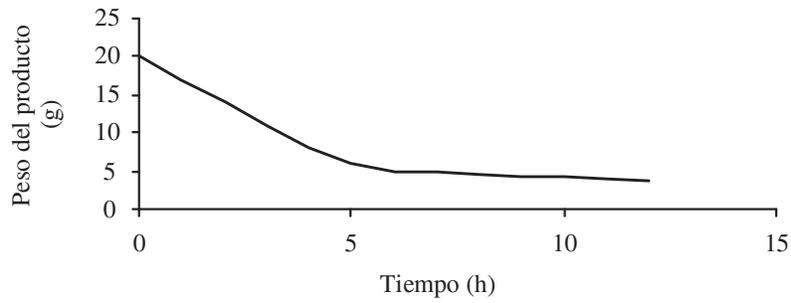


Figura 18.4. Variación del peso del producto en un proceso de secado.

sólido seco. En los procesos de secado, una variable muy importante es la denominada contenido de humedad libre, Y , que se define como:

$$Y = Y_t - Y_{eq} \quad [18.10]$$

en la que Y_{eq} es el contenido de humedad cuando se alcanza el equilibrio. Una típica curva de secado se obtiene al representar el contenido de humedad libre frente al tiempo de secado (figura 18.5).

La velocidad de secado, R , es proporcional al cambio del contenido de humedad con el tiempo:

$$R \propto \frac{dY}{dt} \quad [18.11]$$

A partir de la figura 18.5 se puede obtener el valor de dY/dt para cada punto de la curva, mediante el valor que adquiere la tangente a la misma en cada uno de los puntos.

La velocidad de secado R se puede expresar como (Geankoplis, 1983):

$$R = - \frac{w'_s}{A} \frac{dY}{dt} \quad [18.12]$$

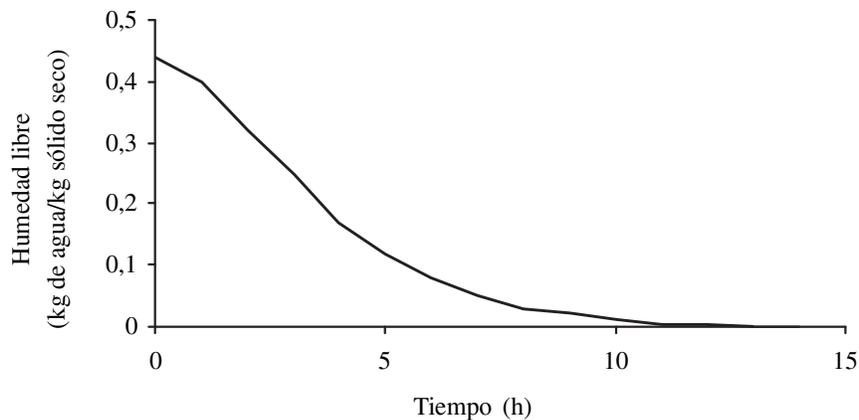


Figura 18.5. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

en la que w'_s es el caudal de sólido seco y A el área de la superficie que se está secando. Al representar la velocidad de secado frente al tiempo se obtiene una curva similar a la 18.4.

El proceso de secado de un material, puede describirse por una serie de etapas en las que la velocidad de secado juega un papel determinante. La figura 18.6 muestra una típica curva de velocidad de secado en la que los puntos A y A' representan el inicio de secado para un material frío y caliente, respectivamente. El punto B representa la condición de temperatura de equilibrio de la superficie del producto. El tiempo transcurrido para pasar de A o A' a B suele ser bajo, y a menudo se desprecia en los cálculos del tiempo de secado. El tramo de la curva $B-C$ es conocido como período de velocidad constante de secado, y está asociado a la eliminación del agua no ligada al producto, en el que el agua se comporta como si el sólido no estuviera presente. Al inicio, la superficie del producto se encuentra muy húmeda, presentando una actividad de agua cercana a la unidad. En los sólidos porosos el agua eliminada en la superficie es compensada por el flujo de agua desde el interior del sólido. El período de velocidad constante continúa mientras el agua evaporada en la superficie pueda ser compensada por la que se encuentra en el interior. La temperatura en la superficie se corresponde aproximadamente a la de bulbo húmedo (Geankoplis, 1983).

El período de velocidad decreciente se da cuando la velocidad de secado no se mantiene constante y empieza a disminuir; además, la actividad de agua en la superficie se hace menor que la unidad. En este caso, la velocidad de secado está gobernada por el flujo interno del agua y vapor. El punto C representa el inicio del pe-

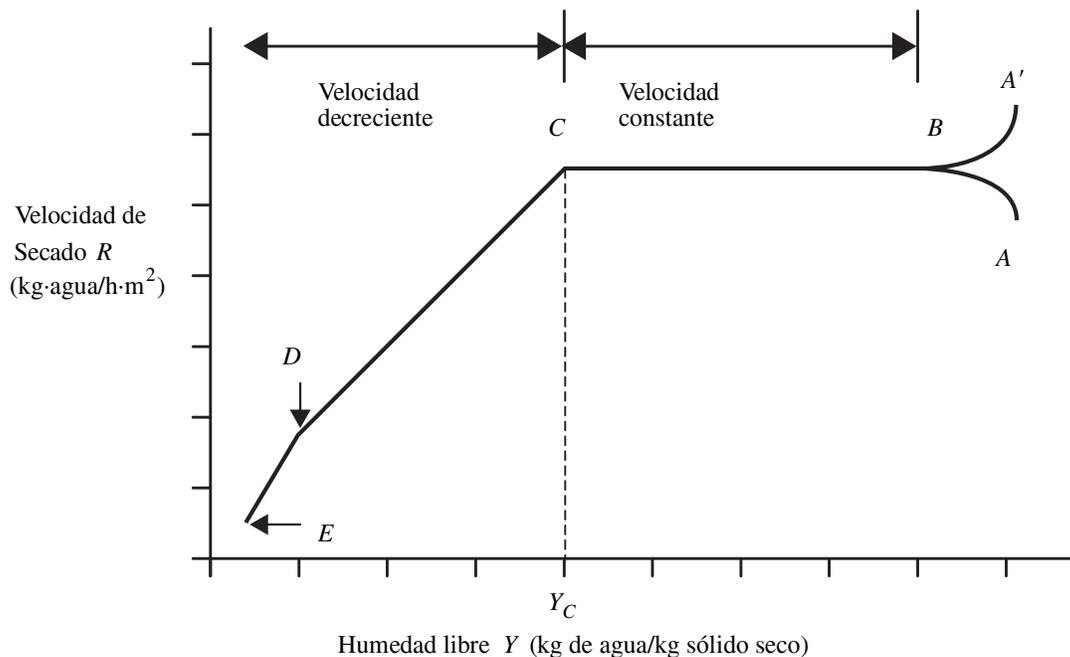


Figura 18.6. Curva de velocidad de secado (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

río de velocidad decreciente, pudiéndose dividir este período en dos etapas. La primera de ellas se da cuando los puntos húmedos en la superficie disminuyen continuamente hasta que la superficie está seca completamente (punto D), mientras que la segunda etapa del período de velocidad de secado decreciente se inicia en el punto D, cuando la superficie está completamente seca, y el plano de evaporación se traslada al interior del sólido. El calor requerido para eliminar la humedad es transferido a través del sólido hasta la superficie de evaporación, y el vapor de agua producido se mueve a través del sólido en la corriente de aire que va hacia la superficie. A veces no existen diferencias remarcables entre el primer y segundo período de velocidad decreciente. La cantidad de agua eliminada en este período puede ser baja, mientras que el tiempo requerido puede ser elevado, ya que la velocidad de secado es baja.

18.4.2. Período de secado a velocidad constante

Durante el período de secado a velocidad constante, los fenómenos de transporte que tienen lugar son la transferencia de materia de vapor de agua hacia el medio ambiente, desde la superficie del producto a través de una película de aire que rodea el material, y la transferencia de calor a través del sólido. Mientras dura el proceso de secado, la superficie del material permanece saturada de agua, ya que la velocidad de movimiento del agua desde el interior del sólido es suficiente para compensar el agua evaporada en la superficie. Si se supone que sólo existe transferencia de calor hacia la superficie del sólido por convección desde el aire caliente, y transferencia de materia desde la superficie hacia el aire caliente (figura 18.7), se obtiene:

$$q = h A (T - T_w) \quad [18.13]$$

$$N_a = k_y (X_w - X) \quad [18.14]$$

en las que h es el coeficiente de transmisión de calor, A es el área que se está secando, T_w es la temperatura de bulbo húmedo, T es la temperatura de secado, N_a es la densidad de flujo de vapor de agua, X_w el contenido de humedad del aire en la

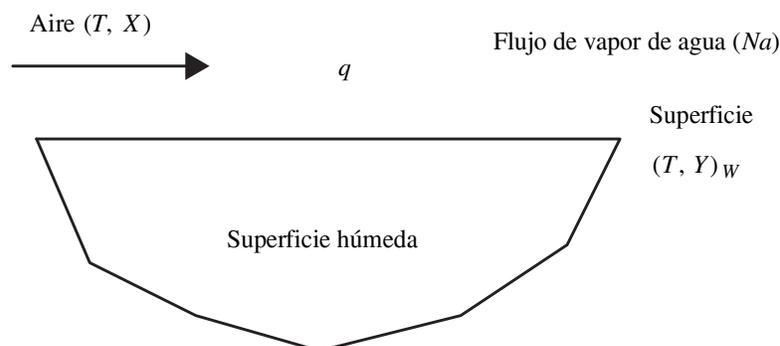


Figura 18.7. Transmisión de calor y materia en el secado (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

superficie del sólido, X el contenido de humedad del aire en el seno de la corriente de secado, y k_y , el coeficiente de transferencia de materia.

El calor necesario para vaporizar el agua en la superficie del producto se puede expresar como:

$$q = N_a M_a \lambda_w A \quad [18.15]$$

en la que M_a es la masa molecular del agua, λ_w el calor latente de vaporización a la temperatura T_w .

La velocidad de secado en el período de velocidad constante se expresa (Okos *et al.*, 1992):

$$R_C = k_y M_b (X_w - X) \quad [18.16]$$

o

$$R_C = \frac{h (T - T_w)}{\lambda_w} = \frac{q}{\lambda_w A} \quad [18.17]$$

en la que M_b es la masa molecular del aire, X_w la humedad correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo, y X es la humedad del aire en el seno de la corriente gaseosa. Si no existe transferencia de calor por conducción y radiación, la temperatura del sólido a la temperatura de bulbo húmedo es la del aire durante el período de velocidad constante de secado.

En los cálculos de secado es imprescindible conocer el coeficiente de transferencia de materia, que puede evaluarse mediante la expresión (Okos *et al.*, 1992):

$$\frac{k_y l}{D_{AB}} = 0,664 (\text{Re})^{1/2} (\text{Sc})^{1/3} \quad [18.18]$$

ecuación válida para flujo laminar paralelo a un plato plano, siendo l la longitud del plato en la dirección del flujo, y en la que los módulos de Reynolds y Schmidt están definidos por las expresiones:

$$(\text{Re}) = \frac{\rho v l}{\eta} \quad (\text{Sc}) = \frac{\eta}{\rho D_{AB}} \quad [18.19]$$

siendo D_{AB} la difusividad molecular de la mezcla aire-agua, l es la longitud característica o el diámetro, v la velocidad del fluido, ρ la densidad, y η la viscosidad.

El coeficiente de transmisión de calor puede obtenerse mediante la ecuación (Geankoplis, 1983):

$$h = 0,0204 (G)^{0,8} \quad [18.20]$$

en la que G es la densidad de flujo másica del aire expresada en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, obteniéndose el coeficiente de transmisión de calor en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. El coeficiente de transmisión de calor en una lámina se puede expresar en función del módulo de Nusselt, según una expresión del tipo (Chirife, 1983):

$$(\text{Nu}) = \frac{h l}{k} = 2 + \alpha (\text{Re})^{1/2} (\text{Pr})^{1/3} \quad [18.21]$$

siendo el módulo de Prandtl:

$$(\text{Pr}) = \frac{\hat{C}_P \eta}{k} \quad [18.22]$$

en las que k es la conductividad térmica, α una constante, y \hat{C}_P el calor específico.

18.4.3. Período de secado a velocidad decreciente

Este período sigue al de velocidad a secado constante, y como su nombre indica, la velocidad de secado R decrece cuando el contenido de humedad sobrepasa el contenido de humedad crítico Y_C . Para resolver este tipo de problemas, la ecuación 18.12 debe resolverse por integración, y el término integral se calcula mediante una integración gráfica al representar $1/R$ frente a Y .

El movimiento del agua en el sólido puede explicarse por distintos mecanismos (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996), como son: difusión del líquido debido a gradientes de concentración, difusión del vapor debido a la presión parcial de vapor, movimiento del líquido por fuerzas capilares, movimiento del líquido por fuerzas de gravedad, y difusión superficial. El movimiento del agua a través del alimento depende tanto de su estructura porosa como de las interacciones del agua con la matriz alimentaria. De las diferentes teorías enumeradas, a continuación sólo se desarrollarán algunas de ellas, pudiéndose encontrar en la bibliografía el desarrollo completo de todas (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996; Chen y Johnson, 1969; Bruin y Luyben, 1980; Fortes y Okos, 1980; Geankoplis, 1983).

Teoría de la difusión

El principal mecanismo en el secado de sólidos es la difusión del agua en sólidos de estructura fina y en los capilares, poros y pequeños huecos llenos con vapor. El vapor difunde hasta que alcanza la superficie donde pasa a la corriente global del aire. La ley de Fick aplicada a un sistema como el mostrado en la figura 18.8 se puede expresar como:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{\text{efect.}} \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \quad [18.23]$$

en la que Y es el contenido de humedad del producto, t el tiempo, x la dimensión en la dirección que ocurre la transferencia, y $D_{\text{efect.}}$ el coeficiente de difusión.

Dependiendo del tipo de geometría considerado, la solución de la ecuación de Fick toma diferentes formas. A continuación se dan estas soluciones para geometrías sencillas: Lámina, cilindro y esfera.

Lámina

$$\Gamma = \frac{Y - Y_s}{Y_0 - Y_s} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} e^{\left(\frac{-h_n^2 \pi^2 D_{\text{efect.}} t}{4 L^2} \right)} \quad [18.24a]$$

$$h_n = 2n - 1$$

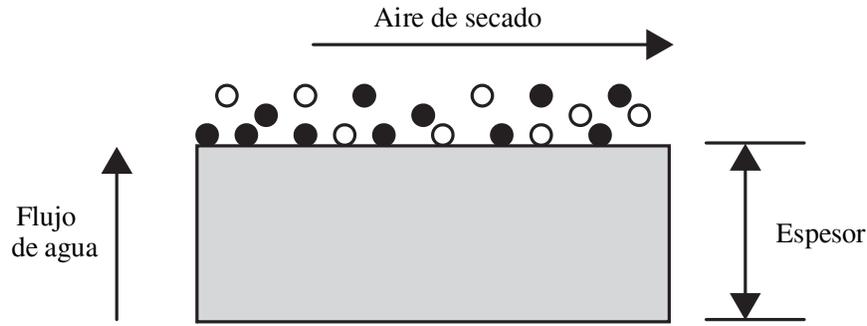


Figura 18.8. Mecanismo de difusión superficial y transporte de vapor de agua (adaptado de Bruin y Luyben, 1980).

en la que Y es el contenido de humedad en el tiempo t , Y_0 es la humedad inicial, Y_s la humedad en la superficie, y L es el espesor de la lámina.

Cilindro

$$\Gamma = \frac{Y - Y_s}{Y_0 - Y_s} = \frac{4}{r_a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} e^{(-\beta_n^2 D_{efect} t)} \quad [18.24b]$$

en la que r_a es el radio del cilindro, y β_n son las raíces de la función de Bessel de primer tipo y orden cero.

Esfera

$$\Gamma = \frac{Y - Y_s}{Y_0 - Y_s} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\left(\frac{-n^2 D_{efect} t}{r^2}\right)} \quad [18.24c]$$

en la que r es el radio de la esfera.

El coeficiente de difusión efectivo se determina experimentalmente a partir de datos de secado, al representar gráficamente el término $\ln \Gamma$ frente al tiempo, la pendiente del tramo lineal da el valor de D_{efect} . (Okos *et al.*, 1992).

La relación entre la difusividad y la humedad se presenta en la figura 18.9. La región A-B representa la adsorción monomolecular en la superficie del sólido que consiste en el movimiento del agua por difusión de la fase vapor. La región B-C cubre la desorción multimolecular donde la humedad empieza el movimiento en la fase líquida. En la región C-D juega un papel importante la microcapilaridad, donde la humedad emigra fácilmente en los poros llenos de agua. En la región D-E la humedad ejerce su máxima presión de vapor y la migración de la humedad es debida primordialmente a la capilaridad.

Valores de la difusividad efectiva para algunos productos alimentarios se dan en la tabla 18.1.

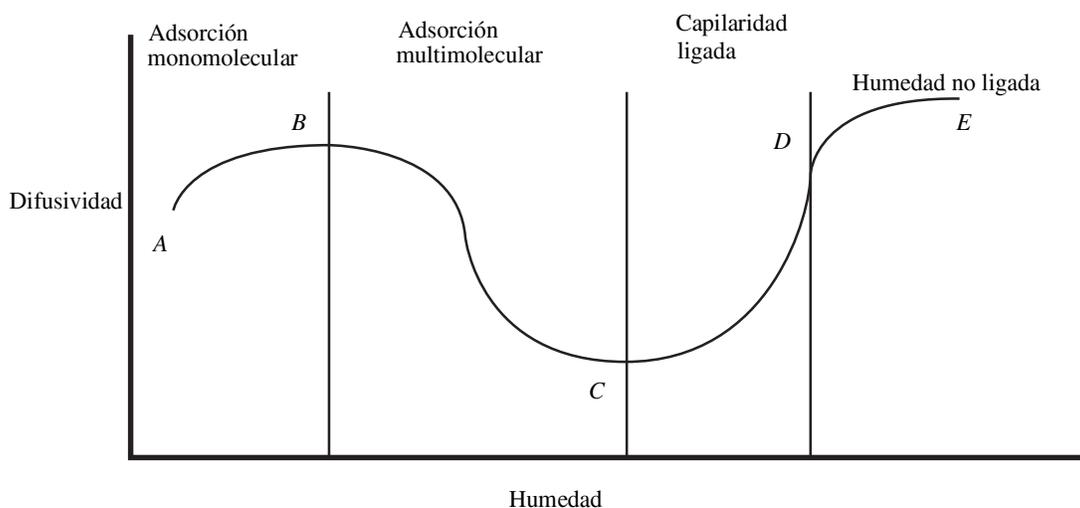


Figura 18.9. Relación entre el contenido de humedad y difusividad (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

Tabla 8.1. Difusividad efectiva de algunos productos alimentarios

Alimento	T ($^{\circ}\text{C}$)	D_{efect} (m^2/s)
Leche entera espuma	50	$2,0 \cdot 10^{-9}$
	40	$1,4 \cdot 10^{-9}$
	35	$8,5 \cdot 10^{-10}$
Manzana	66	$6,40 \cdot 10^{-9}$
Manzana liofilizada	25	$2,43 \cdot 10^{-10}$
Pasas	25	$4,17 \cdot 10^{-11}$
Patata	54	$2,58 \cdot 10^{-11}$
	60	$3,94 \cdot 10^{-11}$
	65,5	$4,37 \cdot 10^{-11}$
	68,8	$6,36 \cdot 10^{-11}$
Peras-láminas	66	$9,63 \cdot 10^{-10}$
Ternera polvo liofilizada	25	$3,07 \cdot 10^{-11}$
Zanahoria en cubos	40	$6,75 \cdot 10^{-11}$
	60	$12,1 \cdot 10^{-11}$
	80	$17,9 \cdot 10^{-11}$
	100	$24,1 \cdot 10^{-11}$

Fuente: Okos *et al.* (1992).

18.5. Secaderos de armario y lecho

El principal objetivo de la deshidratación de los alimentos es alargar la vida comercial del producto final. Para ello se reduce su contenido de humedad, a niveles en que se limite el crecimiento microbiano y se retarden las reacciones químicas deteriorativas. En la mayoría de las operaciones de secado se utiliza aire caliente, habiéndose utilizado este tipo de operación ampliamente a lo largo de mucho tiempo.

La configuración básica de un secadero atmosférico de aire es una cámara en la que se introduce el alimento, equipada con un ventilador y conductos que permiten la circulación de aire caliente a través y alrededor del alimento. El agua se elimina de la superficie del alimento y se conduce fuera del secadero junto con la corriente de aire que lo abandona en una operación simple. El aire se calienta a la entrada del secadero mediante intercambiadores de calor o directamente con una mezcla de gases de combustión. Este tipo de secadero se utiliza ampliamente en la elaboración de galletas, frutos secos y verduras troceadas, y en alimentos para animales domésticos.

En general, el fenómeno de secado depende de las características de transferencia de calor y materia para el aire de secado y el alimento. En el secado en un secador atmosférico hay dos tipos de fenómenos, el calentamiento del producto y la reducción del contenido de humedad, ambos en función del tiempo. En la figura 18.10 se dan los perfiles de humedad y temperatura en función del tiempo de secado.

Ciertos tipos de secaderos exponen al alimento a la corriente directa del aire caliente, que calienta el producto y elimina el vapor de agua. Sin embargo, la naturaleza de algunos alimentos no permite la exposición directa al aire caliente, y el calentamiento se lleva a cabo por medio de intercambiadores de calor, que previenen el contacto directo entre el producto y el medio calefactor. El primer tipo de secaderos se denominan directos, mientras que el segundo tipo se llaman secaderos indirectos, aunque en la operación de secado atmosférico se suelen utilizar los de tipo directo.

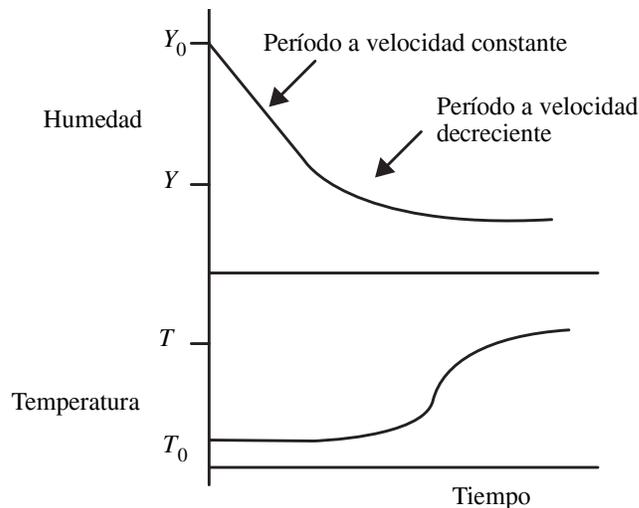


Figura 18.10. Perfiles de humedad y temperatura en la deshidratación de alimentos.

18.5.1. Componentes de un secadero

La configuración básica de un secadero consiste en un alimentador, un calentador, y un colector. La disposición final de estos componentes es característica de cada tipo de secadero. En la figura 18.11 se presenta un esquema básico de un secadero atmosférico.

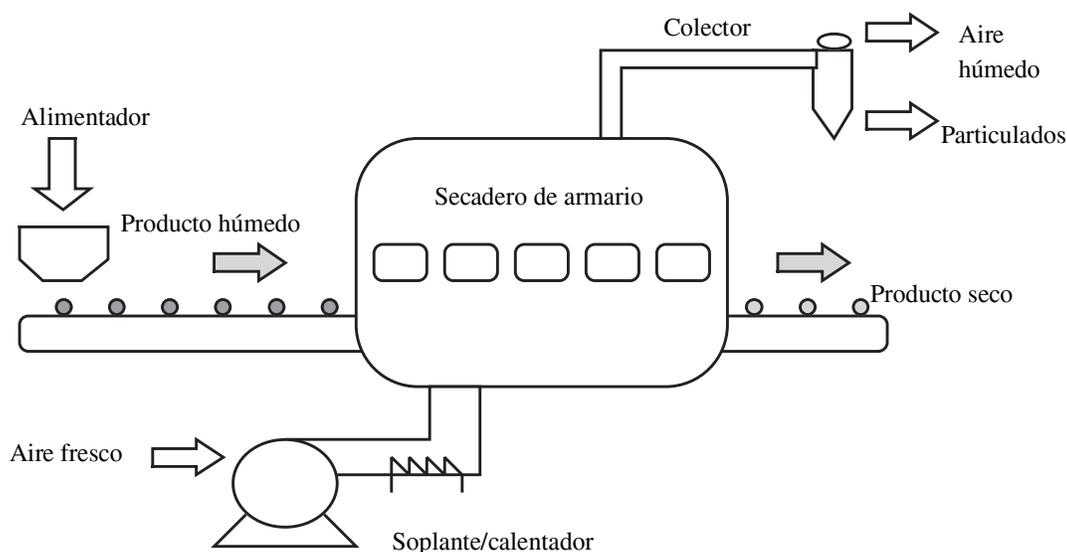


Figura 18.11. Configuración básica de un secadero atmosférico (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

Alimentador: Los más comunes para alimentos son transportadores de tornillo, tablas rotatorias, bandejas vibrantes, y cámaras rotatorias de aire. En algunos casos se necesitan alimentadores especiales, como es el caso de secaderos de lecho, en los que es necesario asegurar una distribución uniforme del material.

Calentador: Existen calentadores directos, en los que el aire es calentado al mezclarlo con gases de combustión. En los indirectos, el aire o el producto se calientan en un intercambiador de calor. El coste de un calentamiento directo es más bajo que el indirecto, pero algunos productos pueden dañarse con los gases. La temperatura máxima posible del aire en un calentador directo está en el intervalo de 648 a 760 °C, mientras que para un calentador indirecto es 425 °C.

Colector: La separación de los productos en polvo o particulados en la corriente del aire se puede conseguir mediante ciclones, filtros de saco o lavadores húmedos.

18.5.2. Balances de materia y calor

18.5.2.1. Secaderos discontinuos

Las condiciones del aire no permanecen constantes en un compartimento o secadero de bandeja durante el proceso de secado. Los balances de calor y materia se utilizan para estimar las condiciones del aire que abandona el secadero.

Para un secadero de bandeja, como el mostrado en la figura 18.12, al realizar un balance de calor para una longitud diferencial dL_t y una sección de anchura z , se puede expresar como:

$$dq = G \hat{C}_s (z b) dT \quad [18.25]$$

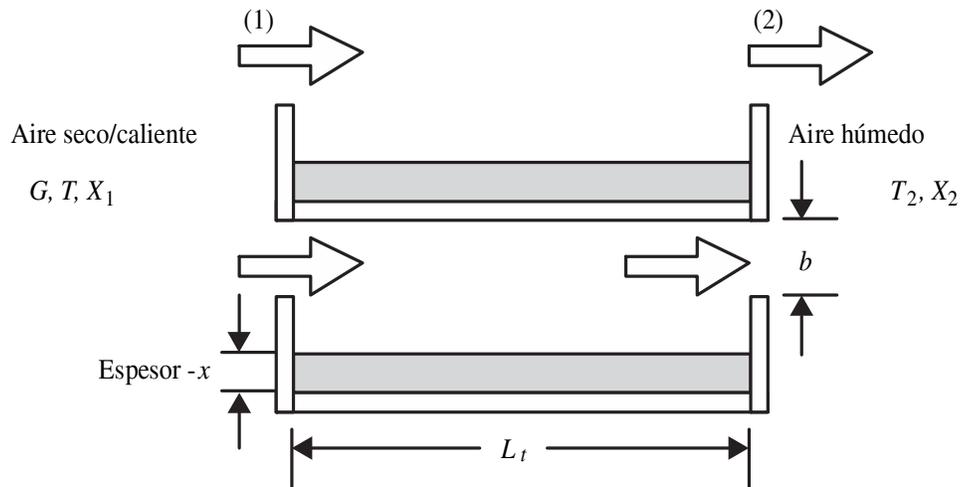


Figura 18.12. Secadero de bandeja (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

en la que G es la densidad de flujo másica del aire, b la distancia entre bandejas, z la anchura de las mismas, q la densidad de flujo de calor, T la temperatura y \hat{C}_s el calor específico húmedo de la mezcla aire-agua.

La densidad de flujo de calor también se puede expresar como:

$$dq = h (z dL_t) (T - T_w) \tag{18.26}$$

en la que h es el coeficiente de transmisión de calor, T_w la temperatura de bulbo húmedo, y L_t la longitud de la bandeja. Suponiendo que h y \hat{C}_s son constantes, al combinar estas dos últimas ecuaciones, por integración se obtiene:

$$\frac{h L_t}{G \hat{C}_s b} = \ln \left(\frac{T_1 - T_w}{T_2 - T_w} \right) \tag{18.27}$$

en las que T_1 y T_2 son las temperaturas del aire a la entrada y salida de la bandeja, respectivamente. La temperatura media logarítmica viene definida por:

$$\Delta T_{ml} = (T - T_w)_{ml} = \frac{(T_1 - T_w) - (T_2 - T_w)}{\ln \left(\frac{T_1 - T_w}{T_2 - T_w} \right)} \tag{18.28}$$

Combinando las ecuaciones [18.27] y [18.28]:

$$(T - T_w)_{ml} = \frac{(T_1 - T_w) \left(1 - \exp \frac{-h L_t}{G \hat{C}_s b} \right)}{\left(\frac{h L_t}{G \hat{C}_s b} \right)} \tag{18.29}$$

El caudal de calor que llega a la superficie desde el aire caliente se puede expresar como:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = h z L_t \Delta T_{ml} \quad [18.30]$$

este calor se utiliza para evaporar el agua de la superficie del alimento. El calor total para pasar de una humedad del producto Y_1 al inicio hasta la final, que se corresponde a la humedad crítica Y_C , será:

$$Q = (z L_t x \rho) \lambda_w (Y_1 - Y_C) \quad [18.31]$$

Al igualar estas dos últimas ecuaciones, y teniendo presente la ecuación 18.29, se obtiene que el tiempo de secado para el período de velocidad constante:

$$t_c = \frac{x \rho_s L_t \lambda_w (Y_1 - Y_C)}{G \hat{C}_s b (T_1 - T_w) \left[1 - \exp\left(\frac{-h L_t}{G \hat{C}_s b}\right) \right]} \quad [18.32]$$

donde Y_1 es el contenido inicial de humedad del producto, Y_C es el contenido de humedad crítica, x es el espesor del lecho, ρ_s es la densidad del sólido, y λ_w es el calor latente a la temperatura T_w .

El cálculo del tiempo de secado para el período de velocidad decreciente se determina del modo siguiente. La ecuación que da la velocidad de secado en este período es:

$$R = -\frac{w_s}{A} \frac{dY}{dt} \quad [18.33]$$

en la que w_s es la cantidad de sólidos. Esta velocidad puede expresarse también según la ecuación (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996):

$$R = \frac{h}{\lambda_w} (T - T_w)_M \quad [18.34]$$

en la que se expresa en función de un incremento de temperaturas medio. Combinando estas ecuaciones, y suponiendo que la velocidad de secado es una función lineal de Y , al integrar con la condición límite para $t = 0$, $Y = Y_C$, y para el tiempo final $t = t_D$, $Y = Y_F$, se obtiene el tiempo de secado para este período decreciente (Geankoplis, 1983):

$$t_D = \frac{w_s \lambda_w Y_C \ln\left(\frac{Y_C}{Y_F}\right)}{A h (T - T_w)_M} \quad [18.35]$$

Si la diferencia media de temperaturas es la logarítmica, se puede sustituir la ecuación 18.29 y se obtiene:

$$t_D = \frac{x \rho_s L_t \lambda_w Y_C \ln \left(\frac{Y_C}{Y_F} \right)}{G \hat{C}_s b (T_1 - T_w) \left[1 - \exp \left(\frac{-h L_t}{G \hat{C}_s b} \right) \right]} \quad [18.36]$$

en la que Y_F representa la humedad final del producto.

El tiempo total de secado para pasar de una humedad Y_1 a la final Y_F se obtiene al sumar los tiempos calculados con las ecuaciones 18.32 y 18.36, siendo el tiempo total de secado $t_s = t_C + t_D$.

18.5.2.2. Secaderos discontinuos con circulación de aire a través del lecho

Otro tipo de secadero discontinuo es aquel en que el aire de secado se hace circular a través del lecho del alimento. En la figura 18.13 se representa un esquema de este tipo de secado. Se supone que el sistema es adiabático, que no existen pérdidas de calor, y que circula aire con una densidad de flujo másica G , entrando a una temperatura T_1 , con una humedad X_1 , mientras que a la salida, el aire posee una temperatura T_2 y una humedad X_2 .

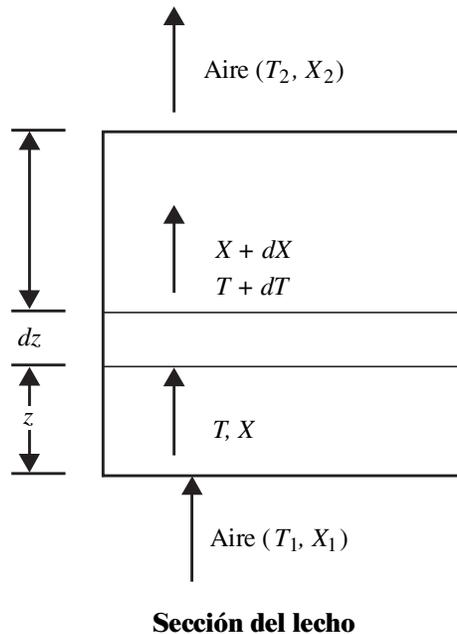


Figura 18.13. Secado por circulación del aire a través del lecho (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

La velocidad global de secado se puede expresar como:

$$R = G (X_2 - X_1) \quad [18.37]$$

mientras que para un diferencial dz de altura del lecho, la densidad de flujo de calor transmitido por el aire será:

$$dq = G \hat{C}_S A dT \quad [18.38]$$

en la que A es la sección transversal de paso. El calor transferido hacia el sólido se puede expresar según la ecuación:

$$dq = h a A (T - T_w) dz \quad [18.39]$$

en la que a es la superficie específica del lecho de partículas. Esta superficie específica se determina dependiendo del tipo de partícula, así:

- Partículas esféricas: $a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{D_p}$ [18.40]

- Partículas cilíndricas: $a = \frac{6(1 - \varepsilon)(1 + 0,5 D_c)}{D_c l}$ [18.41]

en la que l es la longitud de la partícula, D_c es el diámetro del cilindro, D_p es el diámetro de la esfera, y ε es la fracción de huecos de sólido. Suponiendo que h y \hat{C}_S son constantes, al igualar las ecuaciones 18.38 y 18.39, e integrando se obtiene:

$$\frac{h a z}{G \hat{C}_S b} = \ln \left(\frac{T_2 - T_w}{T_1 - T_w} \right) \quad [18.42]$$

Considerando $w_s = A \rho_s / a$, las expresiones para los tiempos de secado serán (Geankoplis, 1983; Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996):

- Período de velocidad constante:

$$t_C = \frac{\rho_s \lambda_w (Y_l - Y_c)}{h A (T - T_w)_M} \quad [18.43]$$

- o $t_C = \frac{\rho_s (Y_l - Y_c)}{a K_y M_B (X_w - X)}$ [18.44]

en la que K_y es el coeficiente de transferencia de materia, M_B la masa molecular, y X_w la humedad del aire a la temperatura T_w .

- Período de velocidad decreciente:

$$t_D = \frac{\rho_s \lambda_w Y_C \ln \left(\frac{Y_c}{Y_F} \right)}{h a (T - T_w)_M} \quad [18.45]$$

$$o \quad t_D = \frac{\rho_s Y_C \ln\left(\frac{Y_c}{Y_F}\right)}{a K_y M_B (X_W - X)} \quad [18.46]$$

La diferencia de temperaturas a través del lecho se puede tomar como la media logarítmica [ec. 18.29], que al sustituir en las ecuaciones 18.43 y 18.45 se obtiene:

- Período de velocidad constante:

$$t_C = \frac{x \rho_s \lambda_w (Y_l - Y_c)}{G \hat{C}_S (T_1 - T_W) \left[1 - \exp\left(\frac{-h a x}{G \hat{C}_S}\right) \right]} \quad [18.47]$$

- Período de velocidad decreciente:

$$t_D = \frac{x \rho_s \lambda_w Y_C \ln\left(\frac{Y_c}{Y_F}\right)}{G \hat{C}_S (T_1 - T_W) \left[1 - \exp\left(\frac{-h a x}{G \hat{C}_S}\right) \right]} \quad [18.48]$$

donde x es el espesor del lecho.

El coeficiente de transmisión de calor para la circulación del aire de secado se puede evaluar mediante las ecuaciones (Geankoplis, 1983):

$$h = 0,151 \frac{(G_t)^{0,59}}{(D_p)^{0,41}} \quad \frac{D_p G_t}{\eta} > 350 \text{ para SI} \quad [18.49]$$

$$h = 0,214 \frac{(G_t)^{0,49}}{(D_p)^{0,51}} \quad \frac{D_p G_t}{\eta} < 350 \text{ para SI} \quad [18.50]$$

El diámetro equivalente (D_p) para una partícula cilíndrica es:

$$D_p = (D_C l + 0,5 D_C^2)^{1/2} \quad [18.51]$$

18.5.2.3. Secaderos continuos

Para un secadero en el que el alimento sólido y el aire circulan en contracorriente, la ecuación que permite el cálculo del tiempo de secado en el período de velocidad constante es (Geankoplis, 1983):

$$t_C = \left(\frac{G}{w_S}\right) \left(\frac{w_S}{A}\right) \frac{1}{K_y M_B} \ln\left(\frac{X_W - X_c}{X_W - X_1}\right) \quad [18.52]$$

en la que A/w_S es la superficie expuesta al secado. Esta ecuación se puede expresar como:

$$t_C = \left(\frac{G}{w_S} \right) \left(\frac{w_S}{A} \right) \frac{1}{K_y M_B} \left(\frac{X_1 - X_C}{\Delta X_{ML}} \right) \quad [18.53]$$

en la que ΔX_{ML} es la diferencia media logarítmica de la humedad:

$$\Delta X_{ML} = \frac{(X_1 - X_W) - (X_C - X_W)}{\ln \left(\frac{X_1 - X_W}{X_C - X_W} \right)} \quad [18.54]$$

en la que la humedad crítica es (Geankoplis, 1983):

$$X_C = X_2 + \frac{w_S}{G} (Y_C - Y_2) \quad [18.55]$$

Para el período de velocidad decreciente, el tiempo de secado se obtiene a partir de la ecuación:

$$t_D = \left(\frac{G}{w_S} \right) \left(\frac{w_S}{A} \right) \frac{Y_C}{Y_2 + (X_W - X_2) \left(\frac{G}{w_S} \right) K_y M_B} \ln \left[\frac{Y_C (X_W - X_C)}{Y_2 (X_W - X_1)} \right] \quad [18.56]$$

En el caso de flujo en equicorriente, como el mostrado en la figura 18.14, el aire caliente a la entrada se pone en contacto con el alimento húmedo, con lo que el balance másico se expresa como:

$$G X_1 + w_S Y_1 = G X_2 + w_S Y_2 \quad [18.57]$$

o

$$G (X_2 - X_1) = w_S (Y_1 - Y_2) \quad [18.58]$$

Que en términos de valores críticos se expresa:

$$G (X_C - X_1) = w_S (Y_1 - Y_C) \quad [18.59]$$

$$X_C = X_1 + \frac{w_S}{G} (Y_1 - Y_C) \quad [18.60]$$



Figura 18.14. Operación de secado en equicorriente.

18.6. Secado por atomización

Este tipo de secado se utiliza para alimentos disueltos en agua, e incluye la formación de gotas que por secado posterior darán lugar a las partículas de alimento seco. Inicialmente, el alimento fluido es transformado en gotas, que se secan por atomización en un medio continuo de aire caliente. El modo más común utilizado en este tipo de secado es un ciclo abierto, tal como se muestra en la figura 18.15. El aire de secado es calentado utilizando un medio seco, además, es limpiado con ciclones antes de ser lanzado a la atmósfera. En este tipo de operación el aire que abandona el sistema todavía puede contener calor. Un segundo tipo es la utilización de un circuito cerrado con un medio de calefacción (aire, CO_2 , etc.). El aire se utiliza en el proceso de secado, después se limpia, se seca y se reutiliza de nuevo en un proceso continuo. La eficiencia de este tipo de secado es superior a la de los sistemas abiertos. En los sistemas de circuito cerrado únicamente sale del sistema el producto seco, mientras que en los de circuito abierto también se lanza al exterior aire caliente, que en algunas ocasiones puede contener micropartículas.

Este tipo de secado incluye la atomización del alimento en un medio de secado en el que se elimina la humedad por evaporación. El secado se realiza hasta que se llega al nivel de humedad fijado para el producto. Este secado se controla por las condiciones de flujo y temperatura, tanto del producto como del aire de entrada. El secado por atomización se utilizó por primera vez en el secado de leche hacia 1900, y más tarde se aplicó en huevos y café.

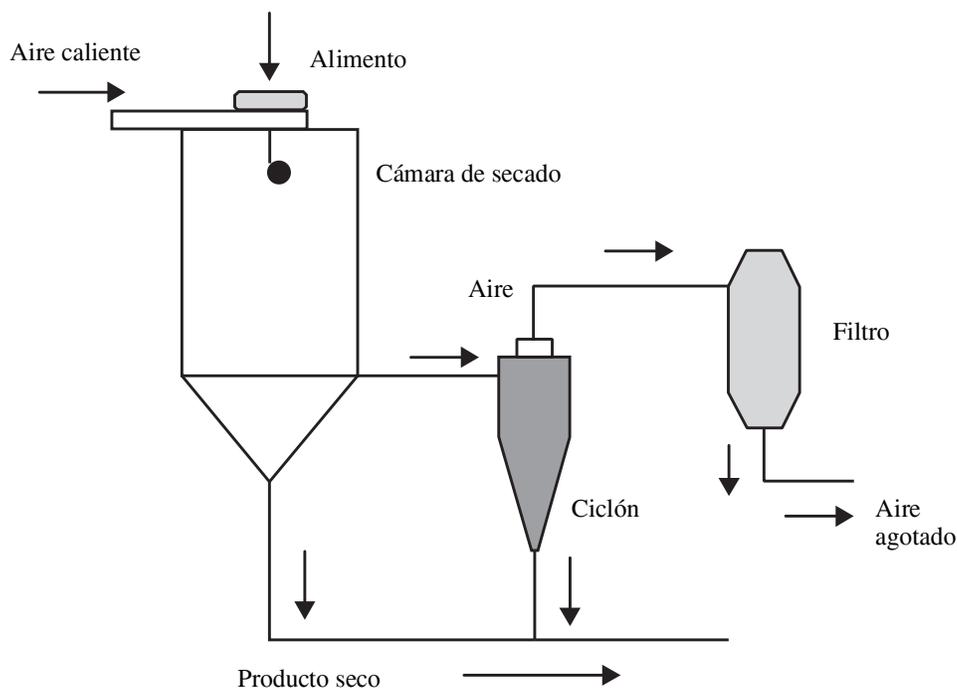


Figura 18.15. Ciclo abierto, secado por atomización en equicorriente (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

La característica más importante del secado por atomización es la formación de gotas y el contacto de éstas con el aire. La atomización del alimento se produce por la rotura de la corriente del alimento en pequeñas gotas, existiendo diferentes tipos de atomizadores (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

18.6.1. Inyectores de presión

Para la formación de las gotas se utilizan inyectores de presión, en los que variando la presión es posible controlar el flujo del alimento y las características de la atomización. El tamaño medio de las gotas formadas es proporcional al flujo del alimento y a su viscosidad. En la figura 18.16 se muestra un tipo de inyector de presión.

El principio fundamental de este tipo de inyectores es la conversión de la energía de presión en energía cinética. Las capas del líquido se rompen bajo la influencia de las propiedades físicas del líquido y por los efectos de fricción con el aire. La potencia requerida para un inyector de presión es proporcional a la velocidad de alimentación y la presión del inyector (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996):

$$P_k = 0,27 \frac{\Delta P}{\rho} \quad [18.61]$$

en la que ΔP es la caída total de presión y ρ es la densidad del alimento. La conversión de la energía de presión en cinética en un inyector de presión centrífugo, resulta en un movimiento rotatorio del líquido y puede ser expresado (Marshall, 1954):

$$E_h = 19,2 w \Delta P \quad [18.62]$$

en la que w es el caudal másico y E_h es la energía o potencia. El flujo de líquido del orificio de un inyector de presión centrífugo se puede expresar como:

$$2 (\pi r_1^2 V_{entrada}) = 2 (\pi b r_2 U_r) \quad [18.63]$$

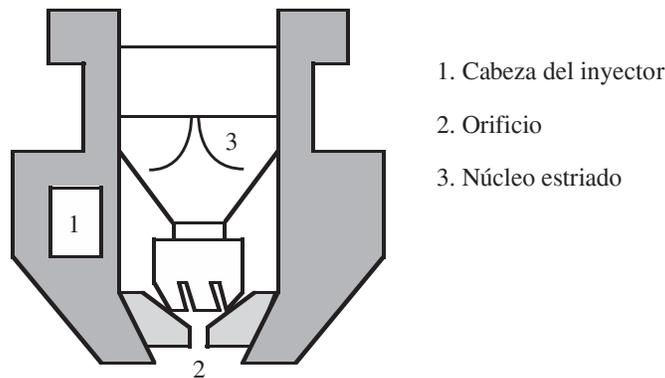


Figura 18.16. Inyector de presión estriado (adaptado de Masters, 1991).

$$V_{entrada} = \frac{w_1}{2 \pi r_1^2 \rho} \quad [18.64]$$

o

$$\frac{U_r}{V_{entrada}} = \frac{r_1^2}{r_2 b} \quad [18.65]$$

en la que b es el espesor de la película de líquido en el orificio, r_1 es el radio del canal de entrada, r_2 es el radio del orificio, $V_{entrada}$ es la velocidad del líquido a la entrada, U_r es la componente vertical de la velocidad de atomización, y w_1 es el caudal másico del líquido.

La velocidad del líquido que sale del inyector se expresa como:

$$V_{salida} = \sqrt{U_h^2 + U_v^2} \quad [18.66]$$

que expresado en términos de la caída de presión a través del inyector es:

$$V_{salida} = C_v (2 g h)^n = C_v \left(2 g \frac{\Delta P}{\rho} \right)^n \quad [18.67]$$

en la que U_h y U_v son las componentes horizontal y vertical de la velocidad, $n = 0,5$ para flujo turbulento, C_v es un coeficiente de velocidad, g es la fuerza gravitacional, n es una constante, y h es la presión de cabeza. El funcionamiento de un inyector de presión es afectado por la presión, densidad del líquido y viscosidad. Masters (1991) propuso una correlación entre los cambios de flujo a través del inyector con los cambios de presión y densidad, según la expresión:

$$\frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,5} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{0,5} \quad [18.68]$$

El efecto de la viscosidad en el flujo no está definido de modo claro, aunque podría determinarse de forma experimental. El efecto de las variables de proceso, tales como la capacidad del inyector, ángulo de atomización, presión, viscosidad, tensión superficial, y diámetro del orificio en el tamaño de la gota se dan en la tabla 18.2.

Los secaderos industriales que contienen multiinyectores se instalan para permitir el manejo de altas velocidades de alimentación, y que provean iguales condiciones en cada inyector para una mejor uniformidad del atomizado. Las configuraciones de los inyectores deben presentar las siguientes condiciones: fácil acceso para sacar los inyectores, uniformidad de distribución, posibilidad de aislamiento, y visibilidad de cada inyector. Algunas de las posibles configuraciones se muestran en la figura 18.17.

18.6.2. Atomizadores rotatorios

Los atomizadores rotatorios difieren de los inyectores de presión en que el líquido consigue su velocidad sin alta presión. Asimismo, la velocidad de alimentación puede ser controlada con discos, mientras que en el caso de inyectores, tanto

Tabla 18.2. Efecto de algunas variables de proceso en el tamaño de las gotas

Variable	Efecto
Capacidad del inyector	
Velocidad de alimentación por debajo de la diseñada	Atomización incompleta
Velocidad de alimentación bajo mínimos	Decrece el tamaño de las gotas
Velocidad alimentación especificada	Aumenta el tamaño de las gotas
Ángulo de rociado grande	Gotas pequeñas
Aumento de presión	Decrece el tamaño de las gotas
Viscosidad	
Aumento	Atomización grosera
Muy alta	Operación imposible
Tensión superficial alta	Dificulta atomización
Tamaño orificio	Tamaño gota = $k D^2$ D diámetro orificio; k es una constante

Fuente: Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado (1996).

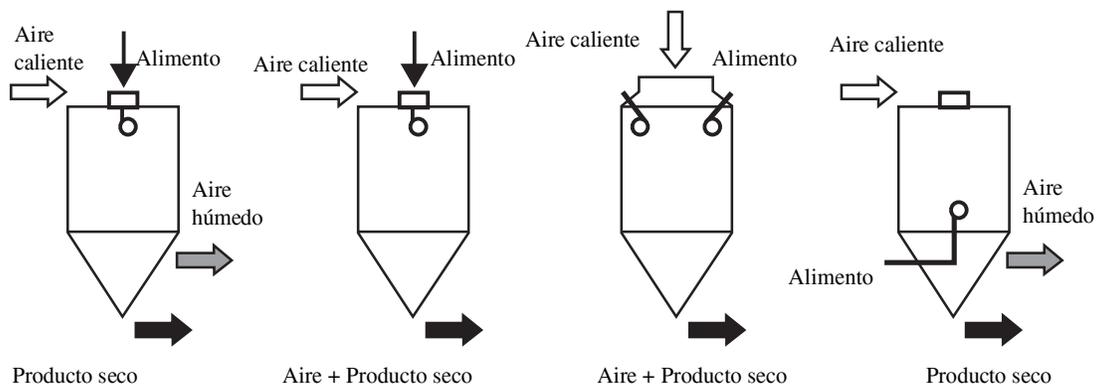


Figura 18.17. Configuración de inyectores de presión en secaderos industriales (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

la caída de presión como el diámetro del orificio cambian simultáneamente. En la figura 18.18 se muestran las propiedades físicas del alimento para el mecanismo de atomización, para el caso de discos. La formación y liberación de las gotas del borde del disco, considerando una baja velocidad de alimentación y del disco, se muestra en la figura 18.18a. La atomización consiste en una gota y dos satélites. Un aumento de la velocidad del disco y del alimento provoca un cambio en el mecanismo de formación de las gotas (figura 18.18b). Una disposición del líquido en láminas (figura 18.18c) se presenta cuando los ligamentos del líquido se juntan unos con otros, y se extiende más allá del borde del disco.

En los discos con paletas (figura 18.19a) la desintegración del líquido tiene lugar en el borde del disco, debido al efecto de fricción entre el aire y la superficie del líquido. El líquido emerge como una delgada película desde la paleta. El ta-



Figura 18.18. Atomización con discos sin paletas (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

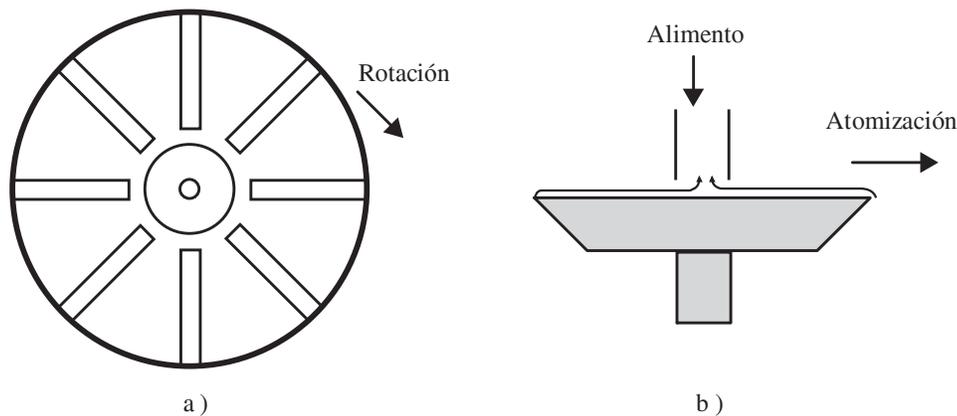


Figura 18.19. Atomizadores rotatorios: a) Disco con paletas. b) Disco plano con borde afilado (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

maño óptimo de la gota para una alimentación dada depende de las siguientes condiciones: rotación sin vibración, fuerza centrífuga, suave y completa humidificación de la superficie de la paleta, y una distribución y alimentación uniforme.

La aceleración a lo largo de la paleta cesa cuando el líquido alcanza el borde del disco, con lo que la velocidad del líquido se puede expresar (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996):

$$U_r = 0,0024 \left(\frac{\rho \pi^2 N^2 D w^2}{\eta h^2 n^2} \right)^{0,33} \quad [18.69]$$

$$U_t = \pi D N \quad [18.70]$$

$$U_{res} = \sqrt{U_r^2 + U_t^2} \quad [18.71]$$

$$\alpha = \tan^{-1} (U_r/U_t) \quad [18.72]$$

en la que U_r es la componente radial de velocidad, U_t es la componente tangencial, U_{res} es la resultante del cese de velocidad, α es el ángulo del líquido liberado, D es el diámetro del disco, N es la velocidad de rotación del atomizador, n es el número de paletas, h es la altura de las paletas, y η es la viscosidad. El efecto de las varia-

bles de proceso, tales como la velocidad del disco, velocidad de alimentación, viscosidad del líquido, tensión superficial, y densidad del líquido en el tamaño de la gota para un atomizador rotatorio se dan en la tabla 18.3.

Tabla 18.3. Efecto de la variables de proceso en el tamaño de la gota para un atomizador rotatorio

Variable	Efecto	
Velocidad del disco Alimentación constante	$\frac{D_1}{D_2} = \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^p$	D = diámetro del disco N = velocidad disco, rpm $p = 0,55 - 0,80$
Velocidad alimentación Velocidad del disco constante	$\frac{D_1}{D_2} = \left[\frac{q_1}{q_2} \right]^m$	q = velocidad de alimentación $m = 0,1 - 0,12$
Viscosidad del líquido	$\frac{D_1}{D_2} = \left[\frac{\eta_1}{\eta_2} \right]^r$	η = viscosidad $r = 0,2$
Tensión superficial	$\frac{D_1}{D_2} = \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right]^s$	σ = tensión superficial $s = 0,1 - 0,5$
Viscosidad del líquido	$\frac{D_1}{D_2} = \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} \right]^t$	ρ = densidad $t = 0,5$

Fuente: Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado (1996).

El tamaño de distribución de la atomización, en un atomizador rotatorio se puede expresar como:

$$D_{medio} = \frac{K w^a}{N^b d^{0,6} (n h)^d} \quad [18.73]$$

en la que los valores de K , a , b y d son función de la velocidad del disco y velocidad de carga de la paleta. En la tabla 18.4 se recogen los valores de estas constantes.

Tabla 18.4. Valores de las constantes de la ecuación 18.73

Velocidad del disco (m/s)	Velocidad de carga de la paleta (kg/h·m)	a	b	d	$K \cdot 10^4$
Normal 85-115	Baja 250	0,24	0,82	0,24	1,4
Normal-alta 85-180	Normal 250-1.500	0,2	0,8	0,2	1,6
Muy alta 180-300	Normal-alta 1.000-3.000	0,12	0,77	0,12	1,25
Normal-alta 85-140	Muy alta 3.000-60.000	0,12	0,8	0,12	1,2

Fuente: Masters, 1991.

Los atomizadores rotatorios generalmente se instalan en el centro del techo en secaderos de atomización, para que haya suficiente tiempo de contacto entre la gota y el aire caliente y permita la evaporación del líquido (Shaw, 1994).

La relación entre el tamaño de gota húmeda y el tamaño de la partícula seca se expresa según la ecuación:

$$D_{HÚMEDA} = \beta \cdot D_{SECA} \quad [18.74]$$

en la que $D_{HÚMEDA}$ es el tamaño de la gota en la atomización, D_{SECA} el tamaño de la partícula seca y β es el factor de cambio de forma. Este factor es función del tipo de producto y temperatura y es útil en el cambio de escala de un secadero (Masters, 1991).

18.6.3. Atomizadores neumáticos. Dos fluidos

La atomización de líquido utilizando una alta velocidad de gas es conocida como atomización neumática. El mecanismo involucra una alta velocidad del gas que permite crear fuerzas de fricción elevadas, lo que causa la rotura del líquido en gotas. La formación de gotas tiene lugar en dos etapas: primero el líquido se rompe en filamentos y largas gotas; después los filamentos de líquido y las gotas grandes se rompen dando gotas pequeñas. Este proceso de formación de gotas se ve afectado por las propiedades del líquido (tensión superficial, densidad, y viscosidad), así como por las del flujo de gas (velocidad y densidad).

La atomización neumática utiliza como medio gaseoso primario aire y vapor. En el caso de ciclos cerrados se suelen utilizar gases inertes. Para lograr condiciones de fricción óptimas se requieren elevadas velocidades entre el aire y el líquido. Estas condiciones se obtienen por expansión de la fase gaseosa a velocidades del sonido y supersónicas, antes del contacto con el líquido o por flujo gaseoso directo sobre una película delgada de líquido en el inyector. Los inyectores neumáticos incluyen un mezclado interno y un mezclado interno/externo combinado. El requerimiento de potencia para una expansión isentrópica se expresa como:

$$P = 0,402 w_A T \left\{ 0,5 M_a^2 + 2,5 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{0,286} \right] \right\} \quad [18.75]$$

en la que w_A es el flujo másico de aire, T la temperatura absoluta, M_a es el módulo de Mach, P_1 y P_2 son las presiones inicial y final, respectivamente. El tamaño medio de atomizado que se obtiene en un atomizador neumático se puede expresar como:

$$D = \frac{A}{(V^2 \rho_a)^\alpha} + B \left(\frac{w_{aire}}{w_{liq}} \right)^{-\beta} \quad [18.76]$$

en la que V es la velocidad relativa entre el aire y el líquido, α y β son función del inyector, A y B son constantes, w_{aire} es el flujo másico de aire, y w_{liq} es el flujo másico de líquido. En la tabla 18.5 se recogen los efectos de las variables de proceso en las gotas para atomizadores neumáticos.

Tabla 18.5. Efecto de las variables de proceso en las gotas para atomizadores neumáticos

Variable	Efecto
Razón másica aire/líquido	
Aumento razón	Disminución tamaño de gota
$w_{aire}/w_{liq} < 0,1$	Atomización deteriorativa
$w_{aire}/w_{liq} \geq 10$	Límite superior para razón efectiva
	Aumento para crear partículas de menor tamaño
Velocidad relativa	
Aumento velocidad aire	Disminución tamaño de gota
Viscosidad	
Aumento viscosidad fluido	Aumento tamaño de gota
Aumento viscosidad aire	Disminución tamaño de gota

Fuente: Masters, 1991.

18.6.4. Interacción entre las gotas y el aire de secado

La distancia que recorre una gota hasta que se ve afectada por completo por el aire depende del tamaño de la misma, forma y densidad. Los atomizadores ordinarios son más independientes del flujo de aire, mientras que en los atomizadores finos debe considerarse el flujo del aire (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996). El movimiento de la atomización se puede clasificar de acuerdo al diseño del secadero como equicorriente, contracorriente o flujo mezclado (figura 18.20).

El movimiento de atomización se puede explicar para una simple gota. Las fuerzas que actúan sobre una gota son:

$$\frac{\pi}{6} D^3 \rho_w \frac{dV}{dt} = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho_w - \rho_a) g - 0,5 C_d \rho_a V_r^2 A \quad [18.77]$$

en la que D es el diámetro de la gota, C_d es el coeficiente de arrastre, V_r es la velocidad relativa de la gota con respecto al aire, A es el área de la gota, ρ_w es la densi-

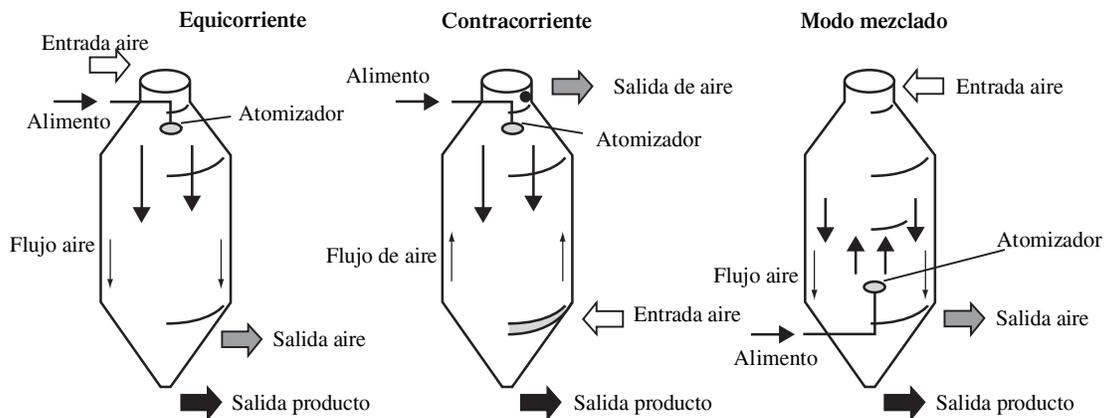


Figura 18.20. Clasificación de secaderos según el movimiento de atomización (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

dad de la gota, y ρ_a es la densidad del aire. El movimiento de la atomización bajo diferentes condiciones de flujo ha sido discutido por Masters (1991).

Los perfiles de temperatura en el interior de los secaderos es un aspecto importante, y son función del tipo de flujo (Masters, 1991; Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

18.6.5. Balances de calor y materia

En el secado de alimentos por atomización, el líquido que debe ser eliminado casi siempre es agua, aunque la eliminación de disolventes orgánicos en operaciones de ciclo cerrado es también usual. Si se tiene un sistema como el mostrado en la figura 18.21, los balances de calor y materia que se realizan conducirán a las siguientes ecuaciones.

Un balance másico aplicado a todo el sistema conduce a la ecuación:

$$w_S (Y_{S1} - Y_{S2}) = G_a (X_{a2} - X_{a1}) \quad [18.78]$$

en la que w_S es el flujo de sólido seco, Y_{S1} el contenido de humedad del sólido que entra al secadero, Y_{S2} la humedad del sólido que abandona el secadero, G_a el flujo

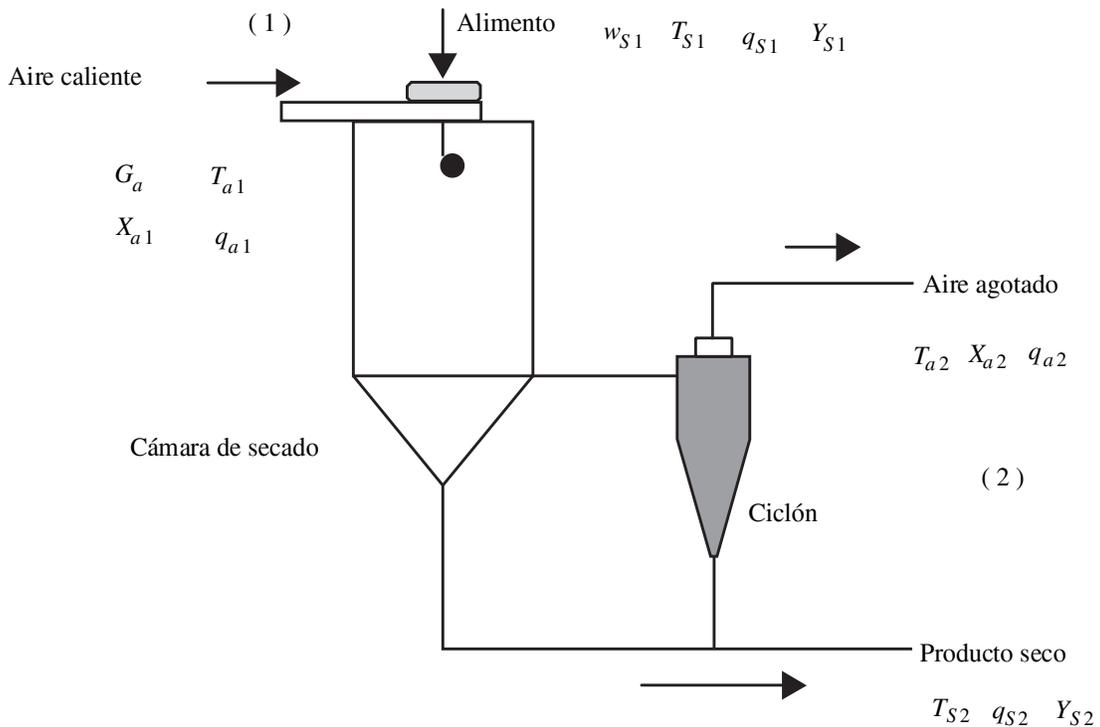


Figura 18.21. Datos del secadero para balances de calor y materias (w_S , velocidad sólidos secos; T_S , temperatura de sólidos; q_S , entalpía de sólidos; Y_S , contenido de humedad de sólidos; G_a , velocidad del aire seco; T_a , temperatura del aire; X_a , humedad del aire; q_a , entalpía).

de aire seco, X_{a1} la humedad del aire que entra al secadero, y X_{a2} el contenido de humedad del aire que sale del secadero.

Un balance entálpico conduce a la ecuación:

$$w_S q_{S1} + G_a q_{a1} = w_S q_{S2} + G_a q_{a2} + q_L \quad [18.79]$$

en la que q_{S1} y q_{S2} son las entalpías del sólido a la entrada y salida del secadero respectivamente, mientras que q_{a1} y q_{a2} son las entalpías del aire a la entrada y salida del secadero, y q_L las pérdidas de calor.

El rendimiento de un secado por atomización se mide en términos de eficiencia térmica, la cual está relacionada con la entrada de calor requerida para producir una unidad en peso del producto seco con las especificaciones deseadas. La eficiencia térmica global (ϕ_{global}) se define como la fracción del calor total suministrado a la usada en el secadero en el proceso de evaporación:

$$\phi_{\text{global}} = 100 \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_0)} \quad [18.80]$$

siendo T_1 la temperatura del aire caliente a la entrada, T_2 la correspondiente a la salida y T_0 la temperatura del aire atmosférico. La eficiencia de evaporación ($\phi_{\text{evaporación}}$) se define como la razón de la capacidad actual de evaporación a la capacidad obtenida en un caso ideal de agotamiento de aire a la temperatura de saturación:

$$\phi_{\text{evaporación}} = 100 \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_{\text{sat}})} \quad [18.81]$$

18.7. Liofilización

La liofilización se desarrolló para superar las pérdidas de los compuestos responsables de los aromas en alimentos, los cuales se perdían en las operaciones convencionales de secado (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996). El proceso de liofilización consiste esencialmente en dos etapas: 1) el producto se congela, y 2) el producto se seca por sublimación directa del hielo bajo una presión reducida. Este tipo de secado se introdujo inicialmente a gran escala en la década de 1940 para la producción de plasma seco y productos de sangre. Después, antibióticos y materiales biológicos se prepararon a escala industrial por liofilización. En la figura 18.22 se muestra un esquema básico de un sistema de liofilización.

La liofilización se ha mostrado como un método efectivo para ampliar la vida media de los alimentos, y tiene dos características importantes:

- 1) *Ausencia de aire durante el procesado.* La ausencia de aire y la baja temperatura previene el deterioro debido a la oxidación o las modificaciones del producto.

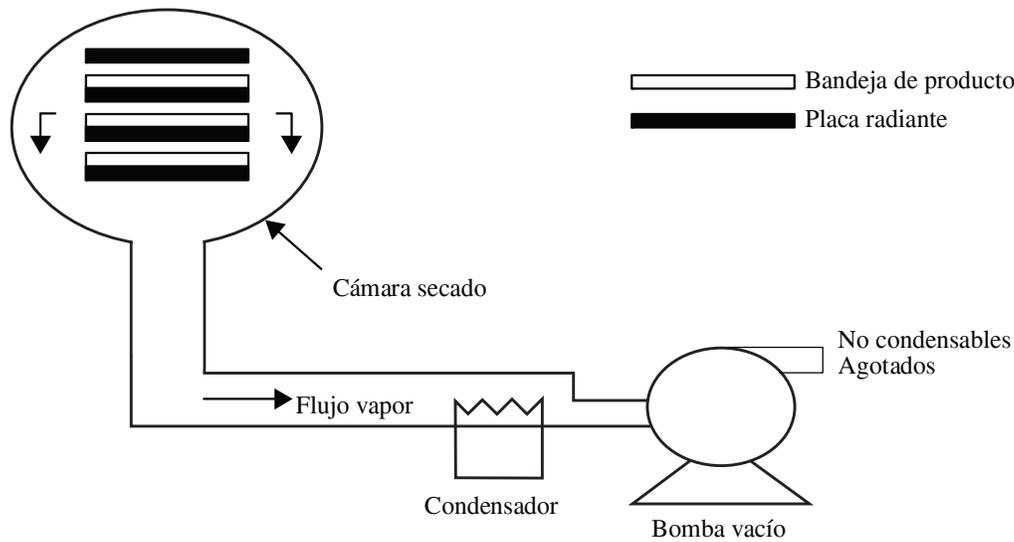


Figura 18.22. Sistema básico de liofilización (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

- 2) *Secado a una temperatura inferior a la ambiente.* Los productos que se descomponen o sufren cambios en su estructura, textura, apariencia, y/o aromas, como consecuencia de temperaturas altas, pueden secarse bajo vacío con un daño mínimo.

Los productos liofilizados que han sido adecuadamente empaquetados pueden ser almacenados durante tiempos ilimitados, reteniendo la mayoría de propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales de su estado fresco; además, se reducen las pérdidas de calidad debidas a las reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático. Sin embargo, la oxidación de lípidos, inducida por los bajos niveles de humedad conseguidos durante el secado, es superior en los productos liofilizados. Esta oxidación lipídica puede controlarse con envasados en paquetes impermeables al paso del oxígeno. El pardeamiento no enzimático apenas ocurre durante el secado, ya que la reducción de la humedad del producto en el proceso es casi instantánea. El uso de bajas temperaturas también reduce la desnaturalización de proteínas en este tipo de secado (Okos *et al.*, 1992).

Los productos liofilizados pueden volver a su forma y estructura original por adición de agua. La estructura esponjosa del producto liofilizado permite una rápida rehidratación del mismo. Las características del producto rehidratado son análogas a las que poseía el producto fresco. La porosidad de los productos liofilizados permite una rehidratación mucho más completa y rápida que la de alimentos secados con aire. Sin embargo, una de las mayores desventajas de la liofilización es el costo energético y el largo período de secado. Algunos de los productos comerciales obtenidos por liofilización son extractos de café y té, verduras, frutas, carnes y pescado. Estos productos poseen de un 10% a 15% del peso original, y no requieren refrigeración; incluso se puede llegar a obtener productos con humedad inferior al 2%.

Tal como se ha indicado anteriormente, el proceso de liofilización consta de dos etapas: congelación y secado. La congelación debe ser muy rápida con el objeto de obtener un producto con cristales de hielo pequeños y en un estado amorfo. La etapa de secado se realiza a presiones bajas para permitir la sublimación del hielo. En la figura 18.23 se presenta un diagrama de fases del agua, mientras que en la figura 18.24 se presentan las etapas del secado por liofilización.

En la liofilización se deben considerar tres importantes variables de diseño: 1) el vacío en el interior de la cámara de secado; 2) el flujo de energía radiante aplicado al alimento, y 3) la temperatura del condensador. La velocidad inicial de secado es alta, ya que la resistencia a los flujos de masa y energía es pequeña. Sin embargo, se acumula una pequeña capa alrededor del producto congelado que hace

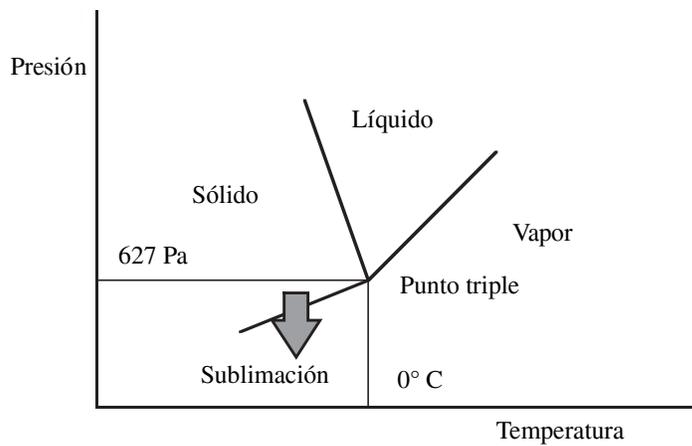


Figura 18.23. Diagrama de fases del agua (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

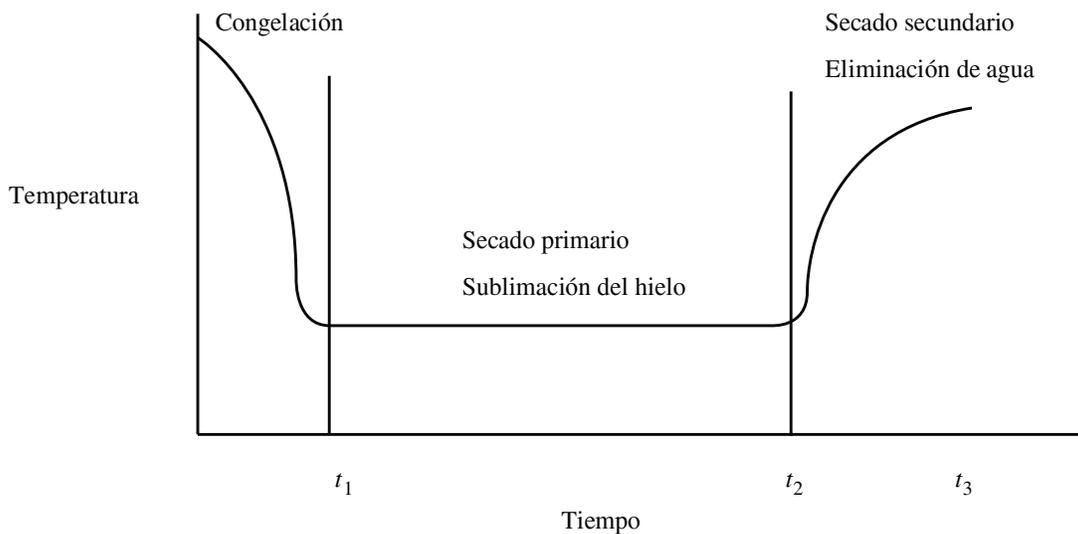


Figura 18.24. Etapas de la liofilización (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

decaer la velocidad de secado a medida que este avanza. Esta capa sirve de aislante y afecta la transmisión de calor hacia el frente de hielo. Además, la transferencia de materia desde el frente de hielo se reduce a medida que el espesor de la capa seca aumenta. Ello es debido a la reducción de la difusión desde la interfase de sublimación hacia la superficie del producto.

18.7.1. Etapa de congelación

La temperatura y tiempo de congelación de productos alimentarios es función de los solutos en solución que contienen. La temperatura de congelación para el agua pura permanece constante en el punto de congelación hasta que el agua se ha congelado. Para los alimentos, la temperatura de congelación es más baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando, y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada. Al final de la congelación la masa entera del producto se ha convertido en rígida, formando un eutéctico, que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento. Se requiere llegar al estado eutéctico para asegurar la eliminación de agua sólo por sublimación, y no por combinación de sublimación y evaporación.

La permeabilidad de la superficie congelada, puede verse afectada por la migración de componentes solubles durante la etapa de congelación. Sin embargo, la eliminación de la fina capa de la superficie del producto congelado, o la congelación bajo condiciones que inhiban la separación de la fase de concentrado, dan lugar a mejores velocidades de secado (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

18.7.2. Etapas primaria y secundaria de secado

Durante el proceso de liofilización se pueden distinguir dos etapas de secado, la primera de ellas es la sublimación del hielo bajo vacío. El hielo sublima cuando se suministra la energía correspondiente al calor latente. Debido a la baja presión de la cámara de secado, el vapor de agua generado en la interfase de sublimación es eliminado a través de los poros del producto. El condensador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto. La fuerza impulsora de la sublimación es la diferencia de presión entre la presión del vapor de agua en la interfase del hielo, y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado. La energía para la sublimación del hielo es suministrada por radiación o conducción a través del producto congelado, o por irradiación con microondas de las moléculas de agua.

La etapa secundaria de secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto, y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando. En este momento la velocidad de calentamiento debe disminuir para mantener la temperatura del producto por debajo de los 30-50 °C, lo que evita el colapso del material. Si la parte sólida del material está demasiado caliente la estructura se colapsa, lo que se traduce en una disminución de la velocidad de sublimación de hielo en el producto (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

18.7.3. Transferencia simultánea de calor y materia

Los fenómenos de transferencia de materia y calor durante la liofilización se pueden resumir en términos de difusión de vapor de agua del frente de sublimación, y la radiación y conducción de calor de la placa radiante. En el desarrollo de esta sección se va a suponer un modelo de estado estacionario, que facilita los cálculos.

La energía requerida para mantener la sublimación se supone que es igual al flujo radiante o conductivo, debido al gradiente de temperaturas entre el producto congelado y la fuente de calor en la cámara de secado. El agua sublima por debajo del punto triple bajo presiones de 627 Pa o menores. La interfase de sublimación está localizada por encima del frente de hielo, y la eliminación de agua tiene lugar cerca o en la interfase de sublimación. En la figura 18.25 se muestran los flujos de calor y materia en el secado de láminas congeladas.

El flujo de calor debido a la convección y conducción en la superficie de sublimación, para la figura 18.25a; se puede expresar (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996):

$$q = h (T_e - T_s) = k \frac{(T_s - T_f)}{(L_2 - L_1)} \quad [18.82]$$

en la que q es la densidad de flujo de calor, h es el coeficiente externo de transferencia de calor por convección, T_e es la temperatura externa de vaporización del gas, T_s es la temperatura de la superficie del sólido seco, T_f es la temperatura de sublimación del frente de hielo, k es la conductividad térmica del sólido seco, y $(L_2 - L_1)$ es el espesor de la capa seca. En la tabla 18.6 se dan valores de conductividad térmica y temperaturas de sublimación para algunos productos liofilizados.

Tabla 18.6. Conductividad térmica y temperatura de sublimación de productos liofilizados

Producto	k (W/m K)	Producto	T_{sub} (°C)
Extracto café - 25%	0,033	Café	-23
Gelatina	0,016	Gamba	-18
Leche	0,022	Huevo entero	-17
Manzana	0,016-0,035	Manzana	-7
Melocotón	0,016	Pollo	-21
Pavo	0,014	Salmón	-29
Setas	0,010	Ternera	-14
Ternera	0,035-0,038	Zanahoria	-25

Fuente: Schwartzberg (1982).

La densidad de flujo de vapor de agua desde el frente de sublimación viene dada por (Okos *et al.*, 1992):

$$N_a = \frac{D' (P_{fw} - P_{sw})}{RT (L_2 - L_1)} = K_g (P_{sw} - P_{ew}) \quad [18.83]$$

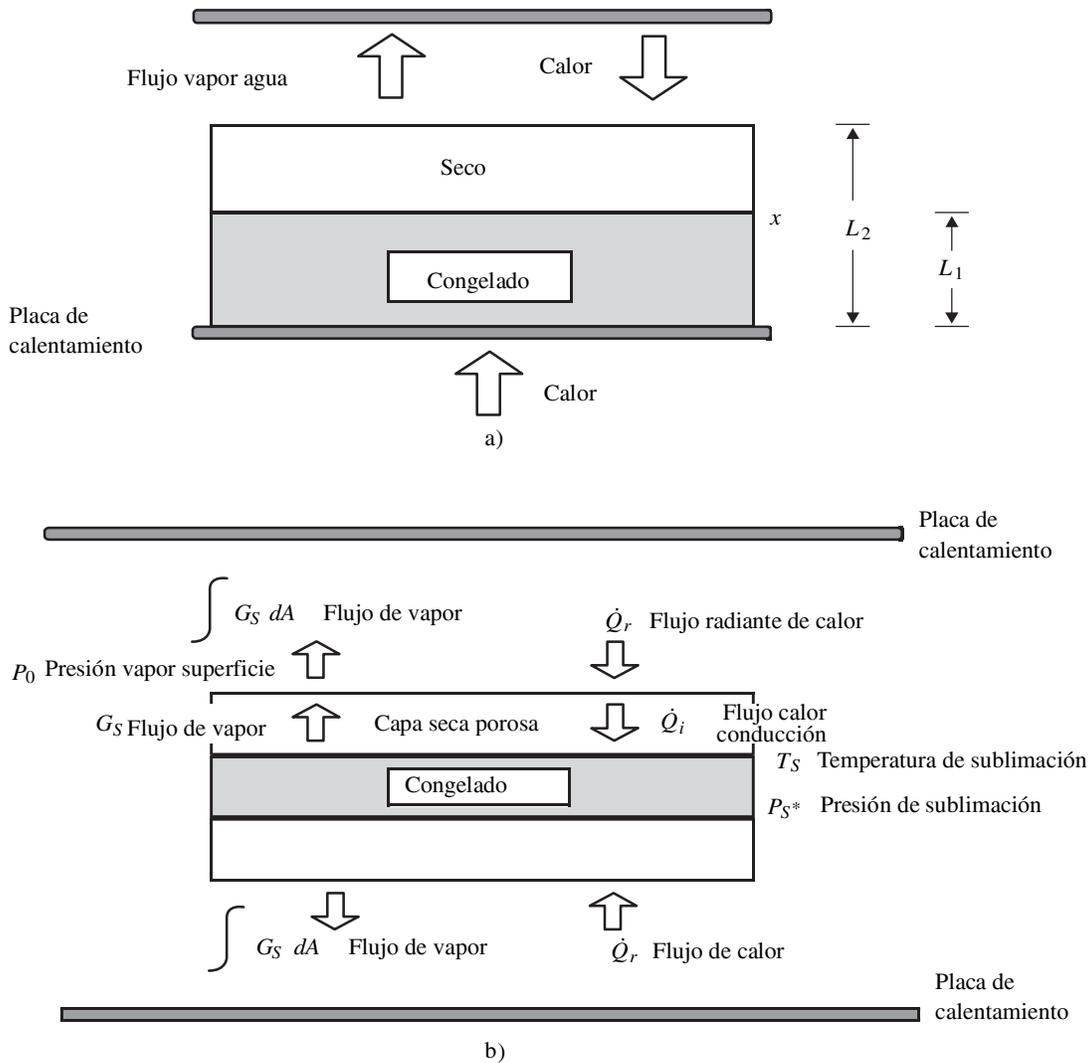


Figura 18.25. Flujos de calor y materia durante la liofilización: a) Secado por una cara. b) Disposición simétrica. Secado por las dos caras (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

en la que N_a es la densidad de flujo del vapor de agua, D' la difusividad efectiva media del vapor de agua en la capa seca, R la constante de gases, T es la temperatura media en la capa seca, P_{fw} es la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con el frente de sublimación de hielo, P_{sw} la presión parcial del vapor de agua en la superficie, P_{ew} la presión parcial de vapor de agua en el seno de la fase externa de gas, y K_g es el coeficiente de transferencia externo de materia.

Las ecuaciones 18.82 y 18.83 se pueden combinar, expresando q y N_a en términos de las condiciones de operación externas de la forma (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996):

$$q = \frac{(T_e - T_f)}{\left[\frac{1}{h} + \frac{(L_2 - L_1)}{k} \right]} \quad [18.84]$$

$$y \quad N_a = \frac{(P_{fw} - P_{ew})}{\left[\frac{1}{K_g} + \frac{RT(L_2 - L_1)}{D'} \right]} \quad [18.85]$$

Las constantes h y K_g dependen de las velocidades del gas y del secadero, mientras que k y D' dependen de la naturaleza del material secado. T_e y P_{ew} están dados por las condiciones de operación. Estas dos últimas ecuaciones se pueden relacionar a través del calor latente de sublimación (ΔH_S) como sigue:

$$q = \Delta H_S N_a \quad [18.86]$$

Combinando las ecuaciones 18.82, 18.85 y 18.86 se obtiene:

$$\frac{k(T_S - T_f)}{(L_2 - L_1)} = \frac{\Delta H_S (P_{fw} - P_{ew})}{\left[\frac{1}{K_g} + \frac{RT(L_2 - L_1)}{D'} \right]} \quad [18.87]$$

o

$$h(T_e - T_S) = \frac{\Delta H_S (P_{fw} - P_{ew})}{\left[\frac{1}{K_g} + \frac{RT(L_2 - L_1)}{D'} \right]} \quad [18.88]$$

Un aumento de T_e o T_S provoca un aumento en la velocidad de secado, tal como puede observarse de las ecuaciones 18.87 y 18.88. La temperatura T_S está limitada por la sensibilidad al calor del material y T_f debe ser menor que la temperatura de colapso del material. La sensibilidad está definida en términos de reacciones de degradación, mientras que la temperatura de colapso viene definida en términos de deformación de la estructura porosa de la capa seca.

La velocidad de secado se puede expresar como:

$$N_a = \left(\frac{L}{2 M_a V_S} \right) \left(\frac{-dx}{dt} \right) \quad [18.89]$$

en la que L es el espesor total del sólido, x es el espesor de la capa seca, t es el tiempo, M_a es la masa molecular del agua, V_S es el volumen del sólido ocupado por unidad de masa de agua (por kg de agua), expresado como $V_S = 1/(Y_0 \rho_S)$, siendo Y_0 el contenido inicial de humedad y ρ_S es la densidad del sólido seco. Una deducción análoga fue considerada por Schwartzberg (1982) para describir el proceso de liofilización, en el que consideraba la transferencia de materia y calor a través de las dos caras del producto (figura 18.25b). El flujo de vapor de agua en el sistema se puede expresar como:

$$G_S = \frac{K_P (P_S^* - P_0)}{x} \quad [18.90]$$

$$G_S = \frac{K_P (P_S^* - P_C^*)}{x} \quad [18.91]$$

$$G_S = \rho \frac{(Y_0 - Y_f)}{(1 + Y_0)} \frac{dx}{dt} \quad [18.92]$$

en la que P_S^* es la presión de vapor de agua en la interfase de sublimación, P_0 la presión parcial de agua en la superficie, P_C^* es la presión en el condensador que debe ser igual a P_0 , a menos que los no condensables sean introducidos en el secadero, K_P es la permeabilidad de la capa seca, ρ la densidad de la capa helada de la lámina, Y_0 la humedad inicial del alimento (masa agua/masa sólido seco), Y_f el contenido final de humedad, x el espesor de la capa seca y t es el tiempo de secado. La primera parte de la ecuación 18.92 representa el cambio en el contenido en agua por unidad de volumen del producto congelado. El cambio de espesor de la capa seca es función del tiempo, manteniéndose constante el área superficial. En la tabla 18.7 se dan valores de permeabilidad para algunos alimentos liofilizados.

Tabla 18.7. Permeabilidad de alimentos liofilizados

Producto	Permeabilidad (10^{-9} ·kg/m·s·µmHg)
Café 20% sólidos	4,0-8,6
Café 30% sólidos	3,0
Leche entera	2,7-5,3
Manzana	3,3-6,0
Patata	1,3
Pescado	8,7
Plátano	1,1
Ternera	0,7-4,4
Tomate 22 °Brix	2,1
Zanahoria	2,0-5,6

Fuente: Schwartzberg (1982).

El tiempo de secado se obtiene por integración de la ecuación 18.92, dando:

$$t_S = \rho \frac{(Y_0 - Y_f)}{2 K_P (1 + Y_0)} \frac{a^2}{(P_S^* - P_0)} \quad [18.93]$$

siendo a el espesor de la mitad de la lámina.

El calor necesario para la sublimación se supone igual a la energía radiante, pudiéndose expresar como:

$$\dot{Q}_r = \dot{Q}_i = G_S \hat{H}_S \quad [18.94]$$

en la que \dot{Q}_i es el flujo interno de calor en el interior de la lámina y \hat{H}_S es el calor latente medio del vapor (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996). El flujo de calor interno se puede expresar como:

$$\dot{Q}_i = \frac{K_t (T_0 - T_S)}{z} \quad [18.95]$$

en la que K_t es la conductividad térmica de la capa seca, T_0 la temperatura de la superficie de la lámina, T_S la temperatura de sublimación. Sustituyendo la ecuación 18.92 por G_S en la ecuación 18.95 se obtiene:

$$\frac{K_t (T_0 - T_S)}{z} = \rho \frac{(Y_0 - Y_f)}{(1 + Y_0)} \hat{H}_S \frac{dx}{dt} \quad [18.96]$$

Suponiendo que T_0 , T_S y K_t permanecen constantes:

$$t_S = \rho \frac{(Y_0 - Y_f)}{(1 + Y_0)} \hat{H}_S \frac{a^2}{K_t (T_0 - T_S)} \quad [18.97]$$

Combinando las relaciones de transferencia de masa y de calor para el tiempo de secado, t_S , se obtiene una relación que es función de las propiedades de la capa seca y de las condiciones de operación durante la liofilización:

$$(P_S^* - P_0) = \left(\frac{-K_t}{K_p \hat{H}_S} \right) (T_S - T_0) \quad [18.98]$$

Esta ecuación es la de una recta si P_S^* y T_S se consideran las variables, T_0 y P_0 están fijadas y K_t y K_p son independientes de P_S^* y T_S (Schwartzberg, 1982). Los valores de P^* pueden calcularse de la ecuación de sublimación como sigue:

$$\ln P^* = 30,9526 - \frac{6.153,1}{T} \quad [18.99]$$

en la que T es la temperatura absoluta. Las ecuaciones 18.98 y 18.99 pueden utilizarse conjuntamente para definir las condiciones finales de operación durante el proceso de liofilización.

Otra variable muy importante es la temperatura de la superficie, T_0 , cuyo valor está controlado por la velocidad de transferencia de calor desde la placa de calentamiento, cuya temperatura es T_P :

$$\dot{Q}_r = F_{op} \sigma (T_P^4 - T_0^4) \quad [18.100]$$

en la que σ es la constante de Stefan-Boltzmann y F_{op} es el factor de forma o visión, definido como:

$$F_{op} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_0} + \frac{1}{\epsilon_P} - 1 \right)} \quad [18.101]$$

siendo ϵ_0 la emisividad de la superficie del producto y ϵ_p la de la placa radiante. Suponiendo que $\epsilon_0 \approx 1$, se obtiene que $F_{op} \approx \epsilon_0$, y al combinar las ecuaciones 18.95, 18.97 y 18.100 se obtiene:

$$T_p^4 = T_0^4 + \frac{K_t (T_0 - T_s)}{\left[\frac{2 K_t (T_0 - T_s) (1 + Y_0)}{\hat{H}_s \rho (Y_0 - Y_f)} t + x^2 \right]^{0.5}} \quad [18.102]$$

18.8. Otros tipos de secado

18.8.1. Deshidratación osmótica

La concentración de alimentos mediante la inmersión de los mismos en una solución hipertónica se conoce como deshidratación osmótica. La ósmosis consiste en el movimiento molecular de ciertos componentes de una solución a través de una membrana semipermeable, hacia otra solución de menor concentración.

Las pérdidas de agua por parte del alimento en el proceso de secado osmótico, se pueden dividir en dos períodos (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996): 1) un período de alrededor de dos horas con una alta velocidad de eliminación de agua y 2) un período, de dos a seis horas, con una velocidad decreciente de eliminación de agua. La temperatura y concentración de la solución osmótica afectan la velocidad de pérdida de agua del producto. Comparada con el secado por aire o con la liofilización, la deshidratación osmótica es más rápida, ya que la eliminación de agua ocurre sin cambio de fase.

La diferencia de potencial químico a través de la membrana semipermeable entre el producto y la solución osmótica, es la fuerza impulsora para la transferencia de materia. El potencial químico μ_i está relacionado con la actividad de agua según la expresión:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_w \quad [18.103]$$

en la que μ_i^0 es el potencial químico de referencia, R la constante de gases y T la temperatura absoluta. La transferencia de materia se realiza hasta que las actividades de agua de la solución osmótica y del alimento se igualan. El mecanismo mayoritario por el que se realiza la transferencia de materia es la difusión debida al gradiente de concentración existente entre el alimento y la solución osmótica. La velocidad de difusión del agua puede estimarse mediante la ley de Fick modificada (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996), y depende del tipo de geometría del producto a secar.

La temperatura es una de las variables que más afecta el proceso de deshidratación osmótica, ya que un aumento de la misma intensifica la eliminación de agua y la penetración de la sustancia osmótica en el tejido. En el alimento, el contenido de agua y de solutos es función del tiempo; así, en la figura 18.26 se muestra esta variación para la deshidratación de fruta, en la que se observa una disminución de agua y un aumento de los azúcares con el tiempo.

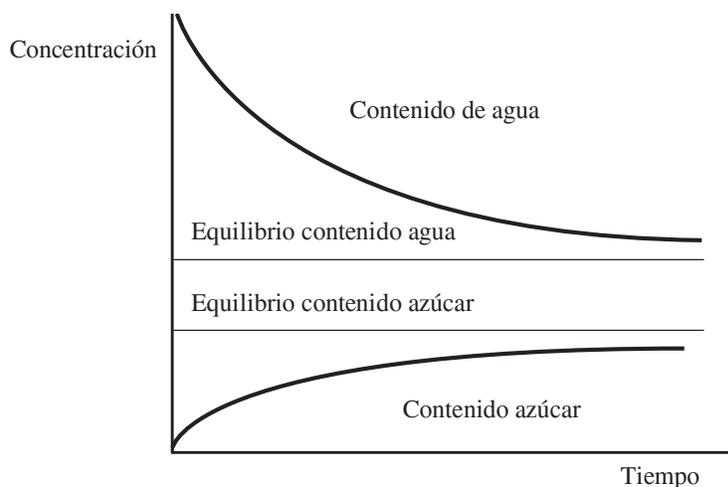


Figura 18.26. Contenido de agua y azúcar durante la deshidratación osmótica (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

También es muy importante la elección del soluto de la solución osmótica, debiéndose tener presente tres factores muy importantes: 1) las características sensoriales del producto; 2) el coste del soluto, y 3) la masa molecular del mismo. Generalmente, los solutos más usados en los procesos de deshidratación osmótica son cloruro sódico, sacarosa, lactosa, jarabe de fructosa y glicerol. En la tabla 18.8 se muestran los usos y ventajas de algunos solutos osmóticos.

Tabla 8.8. Usos y ventajas de algunos solutos osmóticos

Nombre	Usos	Ventajas
Cloruro sódico	Carnes y verduras Soluciones superior 10%	Alta capacidad de depresión de a_w
Sacarosa	Frutas	Reduce pardeamientos y aumenta retención de volátiles
Lactosa	Frutas	Sustitución parcial de sacarosa
Glicerol	Frutas y verduras	Mejora la textura
Combinación	Frutas, verduras y carnes	Características sensoriales ajustadas, combina la alta capacidad de depresión de a_w de las sales con alta capacidad de eliminación de agua del azúcar

Fuente: Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996.

18.8.2. Secado solar

La práctica del secado de alimentos cosechados mediante diseminación en finas capas expuestas al sol se denomina secado solar abierto o secado solar natural. Esta técnica es utilizada en el procesamiento de uva, higos, ciruelas, granos de café, cacao, pimientos, pimienta y arroz, entre otros. Este tipo de secado presenta ciertas limitaciones, como son:

- Falta de control sobre el proceso de secado, que puede dar lugar a un excesivo secado del alimento, pérdida de granos en germinación y cambios nutricionales.
- Falta de uniformidad del secado.
- Contaminación por hongos, bacterias, roedores, pájaros o insectos.

Debido a ello, se han desarrollado secaderos solares, todos basados en la utilización de la energía proveniente del Sol y la utilización del aire caliente generado para el secado del alimento. De tal modo, existen secaderos solares de convección natural, en los que no se requiere ningún tipo de energía mecánica o eléctrica. Aunque también existen los secaderos de convección forzada, que requieren del uso de ventiladores o soplantes para bombear el aire caliente.

18.8.3. Secaderos de tambor

Estos secaderos consisten en cilindros de metal huecos, que rotan sobre un eje horizontal y son calentados interiormente con vapor, agua caliente u otro medio de calentamiento. Los secaderos de tambor se utilizan en el secado de pastas y en soluciones. Las escamas o copos de patatas se obtienen utilizando estos secaderos. En la figura 18.27 se muestran varios tipos de estos secaderos.

La velocidad global de secado de la película de alimento colocada en la superficie del tambor, se puede expresar como (Heldman y Singh, 1981):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{U A \Delta T_{ml}}{\lambda} \quad [18.104]$$

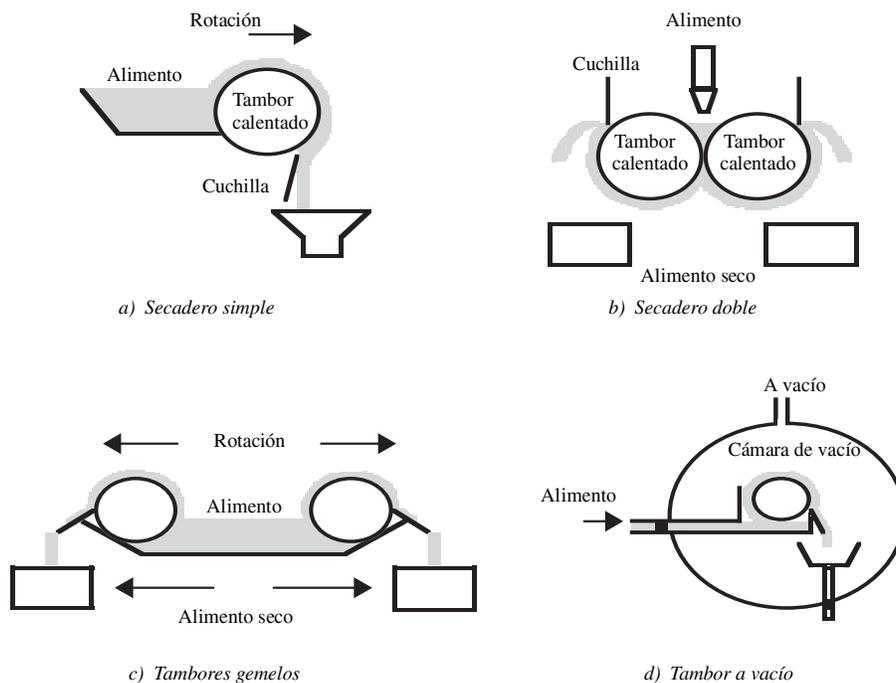


Figura 18.27. Secadero de tambor (adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

en la que ΔT_{ml} es la diferencia de temperatura media logarítmica entre la superficie del tambor y el producto, U el coeficiente global de transmisión de calor, A el área de la superficie de secado, λ el calor latente a la temperatura de evaporación de la superficie que se seca, y X es la humedad.

18.8.4. Secado por microondas

Las microondas son ondas de alta frecuencia. Las ventajas de calentamiento por microondas sobre el calentamiento por convección o conducción son:

- Sólo absorbe energía el producto que va a ser calentado.
- No existen pérdidas por calentamiento del medio circundante (aire y paredes).
- Profundidad de penetración de la fuente de calor que da un calentamiento más efectivo y uniforme.

En la industria alimentaria, las microondas se utilizan en: secado de patatas chips, escaldado de verduras, descongelación rápida de pescado congelado, precocinado de pollo y tocino, eliminación de mohos en frutos secos y productos lácteos.

18.8.5. Secaderos de lecho fluidizado

Las partículas que forman un lecho pueden ser fluidizadas si la caída de presión a través del lecho se iguala al peso del lecho, llegándose a la expansión y suspensión en el aire de las partículas. Los sistemas se comportan como un fluido cuando el módulo de Froude es menor que la unidad (Karel, 1975b), en los que generalmente la velocidad del aire está en el intervalo de 0,05 a 0,075 m/s.

En los lechos fluidizados, las partículas no presentan puntos de contacto entre ellas, lo que facilita que el secado de las mismas sea más uniforme.

PROBLEMAS

Problema 18.1

Se desea secar un sólido que contiene 0,075 kg de agua/kg de sólido seco, hasta una humedad de 0,005 kg de agua/kg sólido seco. Para ello, se alimentan 645 kg/h del sólido a un secadero completamente aislado térmicamente, en el que circula en contracorriente aire, que se introduce a 100 °C con una humedad de 0,010 kg de agua/kg aire seco y sale del secadero a 45 °C. Si los sólidos se introducen a 25 °C y salen del secadero a 70 °C, calcular el flujo de aire necesario para llevar a cabo esta operación de secado. El calor específico de los sólidos es 1,465 kJ/kg·K.

El tipo de secadero utilizado es continuo sin recirculación, siendo el esquema del mismo el dado en la figura 18.2. Si el secadero está aislado térmicamente se puede suponer que no hay ni entradas ni pérdidas de calor con el exterior, es decir:

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_S = 0$$

El caudal de sólido seco que se introduce en el secadero es:

$$w_S = 645 / (1 + 0,075) = 600 \text{ kg sólido seco/h}$$

Las entalpías de las corrientes de aire se obtienen a partir de la ecuación 18.5:

$$\hat{i}_E = (1 + 1,92 \cdot 0,010) (100 - 0) + (2.490) \cdot (0,01) = 126,82 \text{ kJ/kg aire seco}$$

$$\hat{i}_S = (1 + 1,92 X_S) (45 - 0) + 2.490 X_S = 4 + 2.576,4 X_S \text{ kJ/kg aire seco}$$

Las entalpías de los sólidos se obtienen de la ecuación 18.6:

$$\hat{h}_E = 1,465 (25 - 0) + 0,075 \cdot (4,185) (25 - 0) = 44,47 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

$$\hat{h}_S = 1,465 (70 - 0) + 0,05 \cdot (4,185) (70 - 0) = 104,02 \text{ kJ/kg sólido seco}$$

Al sustituir todos estos datos en la ecuación 18.4:

$$w'_A 126,82 + (600) (44,47) = w'_A (45 + 2.576,4 X_S) + (600) (104,2)$$

Del balance de materias (ecuación 18.3) se obtiene:

$$600 (0,075 - 0,005) = w'_A (X_S - 0,01)$$

Al resolver estas dos últimas ecuaciones se obtiene que la humedad del aire que abandona el secadero es $X_S = 0,0264$ kg de agua/kg aire seco, mientras que el caudal de aire seco que se debe introducir en el secadero es: $w'_A = 2.567$ kg aire seco/h.

Problema 18.2

Una bandeja de 60 × 60 cm y 3 cm de profundidad contiene un producto granular húmedo que se desea secar con una corriente de aire. La corriente de aire es

caliente y aporta el calor necesario para el secado mediante un mecanismo de convección. El aire a 65 °C fluye a una velocidad de 5 m/s, siendo su humedad de 0,02 kg de agua/kg de aire seco. Si se considera que los lados y fondo de la bandeja están completamente aislados, determinar la velocidad constante de secado.

A partir del diagrama psicrométrico, para aire a 65 °C y humedad absoluta de 0,02 kg de agua/kg de aire seco se obtienen las siguientes propiedades:

$$\text{Temperatura } T_w = 32,5 \text{ °C} \quad X_w = 0,034 \text{ kg de agua/kg de aire seco}$$

El volumen húmedo se obtiene a partir de la ecuación 6.8:

$$V_H = \left(\frac{1}{28,9} + \frac{0,02}{18} \right) \frac{(0,082)(273 + 65)}{1} = 0,9898 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

con lo que la densidad del aire húmedo será:

$$\rho = \frac{1 + 0,02}{0,9898} = 1,031 \text{ kg/m}^3$$

La densidad de flujo másica es:

$$G = \rho v = (1,031)(6)(3.600) = 22.269,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

El coeficiente de transmisión de calor por convección se puede calcular a partir de la ecuación 18.20:

$$h = 0,0204 (22.269,6)^{0,8} = 61,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$$

Para $T_w = 32,5 \text{ °C}$ el calor latente es $\lambda_w = 2.423,4 \text{ kJ/kg}$.

La velocidad de secado se puede calcular a partir de la ecuación 18.17:

$$R = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} = \frac{(61,35)(3.600)(65 - 32,5)}{(2.423,4)(1.000)} = 2,96 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

Como la superficie que se está secando posee un área de 0,36 m², la velocidad total de evaporación será: 1,066 kg agua/h.

Problema 18.3

Un sólido poroso con un contenido crítico de humedad de 0,22 kg de agua/kg sólido seco se somete a un proceso de secado para rebajar su humedad desde 0,22 a 0,15 kg de agua/kg sólido en 4 horas. El espesor de los sólidos es de 6 cm y el secado únicamente tiene lugar en una de las caras del sólido. Calcular el tiempo de secado necesario para un sólido con unas características similares, pero cuyo espesor es de 8 cm, y el secado tiene lugar de forma simultánea en las dos caras expuestas al aire.

Inicialmente debe calcularse el valor de la difusividad efectiva a través del sólido. Para un sólido de esta geometría se puede utilizar la solución de la ecuación de Fick dada por la expresión 18.24a. Se supone que $Y_S = 0$, y que toda el agua que alcanza la superficie se evapora de forma inmediata.

$$\Gamma = \frac{Y}{Y_0} = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-h_n^2 \pi^2 D_{efect} t}{4 L^2}\right)}$$

en la que $h_n = 1$, $Y = 0,15$; $Y_0 = Y_C = 0,22$; $L = 0,06$ m; y $t = 14.400$ s. Al sustituir estos datos en la ecuación anterior se puede llegar a obtener la difusividad efectiva:

$$D_{efect} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

Para la segunda parte del problema, como el tipo de producto es el mismo, se puede utilizar el valor de la difusividad que se ha obtenido, y la misma expresión dada anteriormente. Sin embargo, debe tenerse presente que el secado es por las dos caras de la lámina, con lo que el espesor deberá ser la mitad del valor de la misma, es decir, $L = 0,04$ m. Al operar con el nuevo espesor y el valor de la difusividad efectiva obtenido anteriormente se obtiene un tiempo de secado de 6.419 s, o 1,78 h.

Problema 18.4

Un producto alimentario se obtiene en forma de partículas esféricas de 15 mm de diámetro, con un contenido en humedad de 1,5 kg de agua/kg sólido seco. El contenido de humedad de equilibrio es 0,01 kg agua/kg sólido seco. Para rebajar la humedad de este producto hasta 0,2 kg agua/kg sólido seco, se coloca en un secadero sobre una malla porosa, formando un lecho de 5 cm de profundidad. La densidad aparente del lecho es 560 kg/m³, mientras que los sólidos secos poseen una densidad de 1.400 kg/m³. A través del lecho de partículas se hace circular aire a una velocidad de 0,8 m/s. El aire a la entrada está a 120 °C y posee una humedad de 0,05 kg agua/kg aire seco. Si la humedad crítica es 0,5 kg agua/kg sólidos seco, calcular el tiempo total de secado.

Contenido de humedad libre:

- Inicial: $Y_1 = 1,5 - 0,01 = 1,59$ kg agua/kg sólido seco
- Final: $Y = 0,02 - 0,01 = 0,01$ kg agua/kg sólido seco
- Crítica: $Y_C = 0,5 - 0,01 = 0,49$ kg agua/kg sólido seco

Condiciones del aire a la entrada (a partir de la carta psicrométrica):

$$\begin{array}{lll} T_1 = 120 \text{ °C} & X_1 = 0,05 \text{ kg agua/kg aire seco} & \\ T_w = 49 \text{ °C} & X_w = 0,083 \text{ kg agua/kg aire seco} & \lambda_w = 2.382 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

Volumen de aire húmedo (ecuación 6.8):

$$V_H = \left(\frac{1}{28,9} + \frac{X}{18} \right) \frac{RT}{P} = \left(\frac{1}{28,9} + \frac{0,05}{18} \right) \frac{(0,082) (273 + 120)}{1} =$$

$$= 1,205 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

Densidad del aire húmedo que entra:

$$\rho = \frac{(1 + 0,05)}{1,205} \frac{\text{kg/kg aire seco}}{\text{m}^3/\text{kg aire seco}} = 0,872 \frac{\text{kg aire seco} + \text{kg agua}}{\text{m}^3}$$

La densidad de flujo es:

$$G = v \rho = \left(0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left(0,872 \frac{\text{kg aire seco} + \text{agua}}{\text{m}^3} \frac{1 \text{ kg aire seco}}{1,05 \text{ kg aire seco} + \text{agua}} \right)$$

$$G = 0,6644 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} = 2,393 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

El aire que circula a través del lecho va ganando agua y a la salida este contenido es superior al de la entrada. Se estima un valor medio de la humedad, que puede ser 0,07 kg agua/kg aire seco, por lo que la densidad de flujo másica media para el aire será:

$$G_t = G (1 + 0,07) = 2,559 \frac{\text{kg aire seco} + \text{agua}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

Asimismo, el calor húmedo se calcula con esta humedad media supuesta:

$$\hat{s} = 1 + (1,92) (0,07) = 1,1344 \text{ kJ}/(\text{kg aire seco} \cdot ^\circ\text{C})$$

Debe calcularse la fracción de huecos, a partir de las densidades de las partículas y de la aparente del lecho:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} = 1 - \frac{560}{1.400} = 1 - 0,4 = 0,6$$

La superficie específica del lecho se calcula mediante la ecuación 18.40:

$$a = 6 \frac{(1 - 0,6)}{0,015} = 160 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

Para estimar la viscosidad del aire se supone una temperatura media de 93 °C, lo que supone un valor $\eta = 2,15 \cdot 10^{-5}$ Pa.

El módulo de Reynolds será:

$$(\text{Re}) = \frac{G_t D_p}{\eta} = \frac{\left(\frac{2.559}{3.600} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right) (0,015 \text{ m})}{2,15 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 496$$

El coeficiente de transmisión de calor por convección se calcula a partir de la ecuación 18.49:

$$h = 0,151 \frac{(2.559)^{0,59}}{(0,015)^{0,41}} = 86,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

El tiempo de secado se obtiene a partir de las ecuaciones 18.47 y 18.48:

- Período constante: $t_C = 1,44$ horas
- Período decreciente: $t_D = 0,66$ horas

Con lo que el tiempo total de secado será: $t = 2,1$ horas.

Problema 18.5

Una lámina de carne de ternera de 2 cm de espesor se seca mediante un proceso de liofilización. Inicialmente el producto contiene una humedad del 75%, y se desea secarlo hasta que posea únicamente un 5% de humedad. La densidad inicial de la ternera es $1.050 \text{ kg}/\text{m}^3$. Si la presión de sublimación se mantiene a $260 \mu\text{mHg}$ y en el condensador se mantiene una presión de $100 \mu\text{mHg}$, calcular el tiempo de secado. Suponer que $K_p = 0,75 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \mu\text{mHg})$.

Según los datos del problema:

$$\begin{aligned} a &= 0,01 \text{ m} & P_0 &= P_0^* \\ Y_0 &= 0,75/0,25 = 3 & Y_f &= 0,05/0,95 = 0,0526 \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación 18.93:

$$t_S = \rho \frac{(Y_0 - Y_f)}{2 K_p (1 + Y_0)} \frac{a^2}{(P_S^* - P_0)} = 1.050 \frac{(3 - 0,0526)}{2 (0,75 \cdot 10^{-9}) (1 + 3)} \frac{(0,01)^2}{(260 - 100)}$$

Por lo que el tiempo de secado será:

$$t_S = 322.372 \text{ s} = 89,55 \text{ horas.}$$