

DESHIDRATACIÓN

13.1 EL AGUA EN LOS ALIMENTOS

El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua, en los alimentos ricos en ella, o la ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y por tanto su aceptabilidad. Por otra parte, la presencia de agua, a ciertas concentraciones, en los alimentos facilita su deterioro por acción de los microorganismos y las enzimas, o a través de reacciones químicas o enzimáticas. Por lo tanto, retirando agua de los alimentos o haciéndola menos disponible, se puede extender la vida útil de los mismos.

13.1.1 CONTENIDO EN AGUA

El contenido en agua de un producto se puede expresar en término de *peso húmedo* (WWB), es decir, masa de agua por unidad de masa del producto húmedo, o en términos de *peso seco* (DWB), es decir masa de agua por unidad de masa del extracto seco. El último es el método más frecuentemente utilizado en los cálculos de secado.

13.1.2 ACTIVIDAD DE AGUA

Al considerar la influencia del contenido en agua en la estabilidad de los alimentos, no es el contenido total en agua lo importante, sino la cantidad de agua disponible para el crecimiento microbiano y la actividad química. Existe una abundante bibliografía que pone de manifiesto que una parte del contenido en agua de los alimentos se halla fuertemente ligado a puntos específicos de los componentes sólidos y que otra cantidad adicional se halla menos firmemente ligada, pero que tampoco es fácilmente disponible como disolvente para diversos solutos. En el estudio de la disponibilidad del agua en los alimentos, se mide una propiedad fundamental, conocida como actividad de agua. Esta propiedad viene definida por la expresión:

$$a_w = \frac{P_v}{P_w} \quad (13.1)$$

donde p_v es presión de vapor de agua ejercida por la disolución, o el sólido húmedo, y p_w es la presión de vapor del agua pura, a la misma temperatura. Esta expresión describe también la humedad relativa de una mezcla de aire-vapor de agua (ecuación III.4 en el Apéndice III). Así pues, si una disolución, o un sólido húmedo, se encuentran en equilibrio con la atmósfera de su entorno, la actividad de agua de la disolución, o del sólido soluble, es numéricamente igual a la humedad relativa de la atmósfera; a esta última se la conoce como humedad relativa en equilibrio con la disolución o el sólido húmedo. La representación gráfica del contenido en agua en función de la actividad de agua se conoce como *isoterma de sorción*. En la bibliografía, se pueden encontrar muchas gráficas de este tipo.¹ Las isotermas se pueden preparar por adsorción, es decir, colocando un producto seco en contacto con una atmósfera de humedad relativa creciente, o por desorción, es decir, colocando el producto húmedo en contacto con atmósferas de humedad relativa decreciente. Así, se obtie-

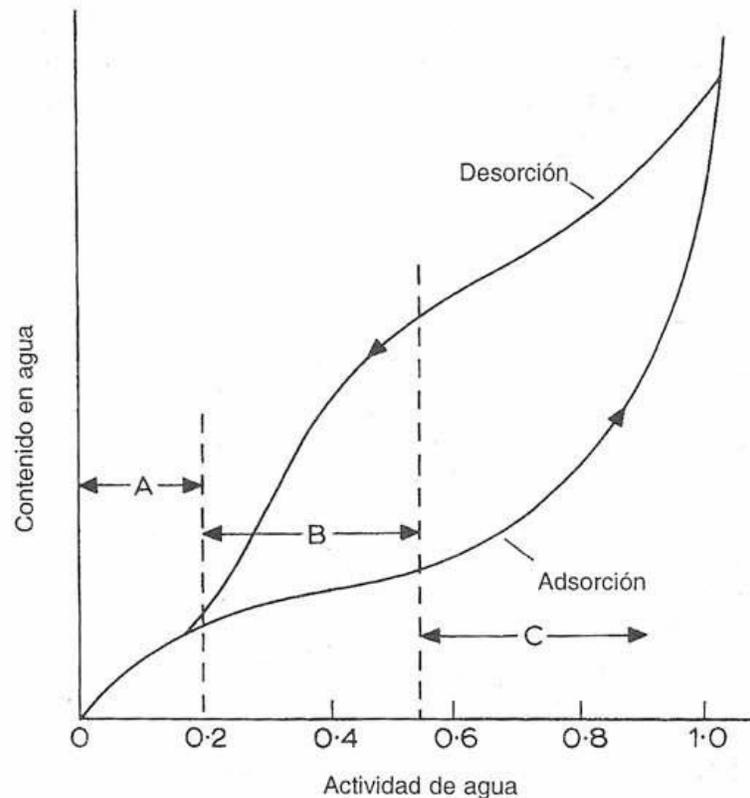


FIG. 13.1 Isotermas de adsorción y desorción.

nen dos curvas diferentes para un mismo producto (Fig.13.1). Este efecto histeresis es típico de muchos alimentos. Las isotermas de los alimentos se dividen frecuentemente en tres regiones, denominadas A, B y C, en la Figura 13.1. En la región A, las moléculas de agua están fuertemente ligadas a puntos específicos del sólido. Esos puntos pueden ser grupos hidroxilo de los polisacáridos, grupos amino y carbonilo de las proteínas y otros, a los que el agua se une por enlaces de hidrógeno, enlaces ion-dipolo u otras interacciones fuertes. Esta agua ligada se considera no disponible como disolvente y, por tanto, no contribuye a la actividad microbiana o química. Es frecuente referirse a ella como el valor monocapa o monomolecular y se corresponde con actividades de agua en el intervalo 0-0,35. Los valores de la monocapa citados en la bibliografía suelen encontrarse en el rango 0,05-0,11 (DWB).

Por encima de la región A, el agua puede todavía estar ligada al sólido, pero menos fuertemente que en la región A. Ha sido habitual considerar a la región B como una región de multicapas y a la región C como una, en la que la disminución de la presión de vapor de agua se debe a razones estructurales y efectos de disolución. Sin embargo, la distinción es dudosa, dado que estos efectos se pueden dar a lo largo de toda la isoterma. Por tanto, por encima de la región A, el descenso de la presión de vapor de agua de los sólidos húmedos se debe a enlaces débiles, a la influencia de las fuerzas capilares en la estructura del sólido y a la presencia de sólidos solubles en disolución. Todos estos efectos se dan a riquezas de agua bajas, $<1,0$ DWB. La mayor parte de los alimentos exhiben presiones de vapor de agua próximas a las del agua pura cuando el

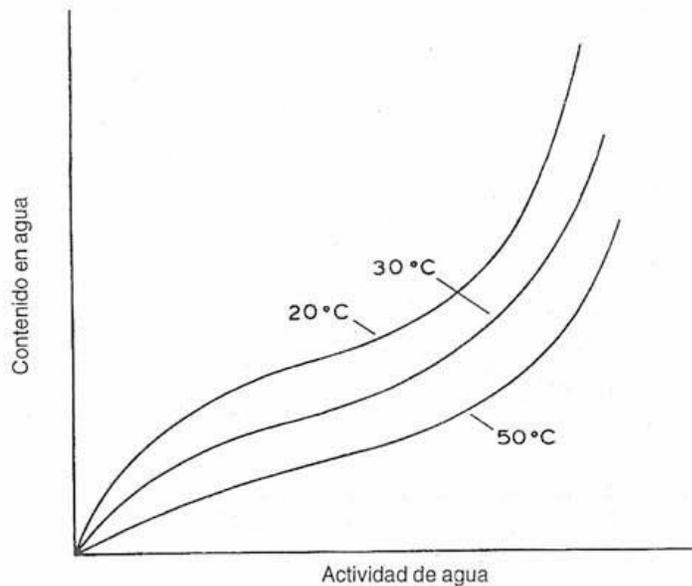


FIG. 13.2 Efecto de la temperatura sobre las isoterma de sorción.

contenido en agua es superior a 1,0 (DWB). La temperatura afecta al comportamiento de sorción de los alimentos. La cantidad de agua adsorbida, a cualquier valor de a_w , disminuye al aumentar la temperatura.

Se han realizado numerosos intentos de representar las isothermas de sorción por medio de expresiones matemáticas. La primera y más frecuentemente usada es la expresión conocida como isoterma BET.² Tiene la siguiente forma:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)W} = \frac{1}{W_m C} + \frac{a_w(C-1)}{W_m C} \quad (13.2)$$

donde W = contenido total en agua (DWB); W_m = contenido en agua de la monocapa (DWB); C = una constante. Es válida en el rango de a_w 0,05-0,45. En la bibliografía, se pueden encontrar más de otras treinta expresiones y muchas de ellas han sido revisadas por Chiriffe e Iglesias.³ En los últimos años, parece haber alcanzado cierta popularidad la ecuación GAB, que es una extensión del modelo BET y que fue utilizada y recomendada por el grupo del proyecto Europeo COST 90 sobre propiedades físicas de los alimentos.⁴ Esta expresión es aplicable hasta una a_w de 0,9, en muchos casos.

El conocimiento de las características de sorción de un alimento facilita la predicción de su vida útil. En muchos casos, la riqueza en agua que permite una estabilidad máxima se corresponde con el valor de la monocapa (Fig. 13.3). Este dato permite también predecir los tiempos de secado y la energía neces-

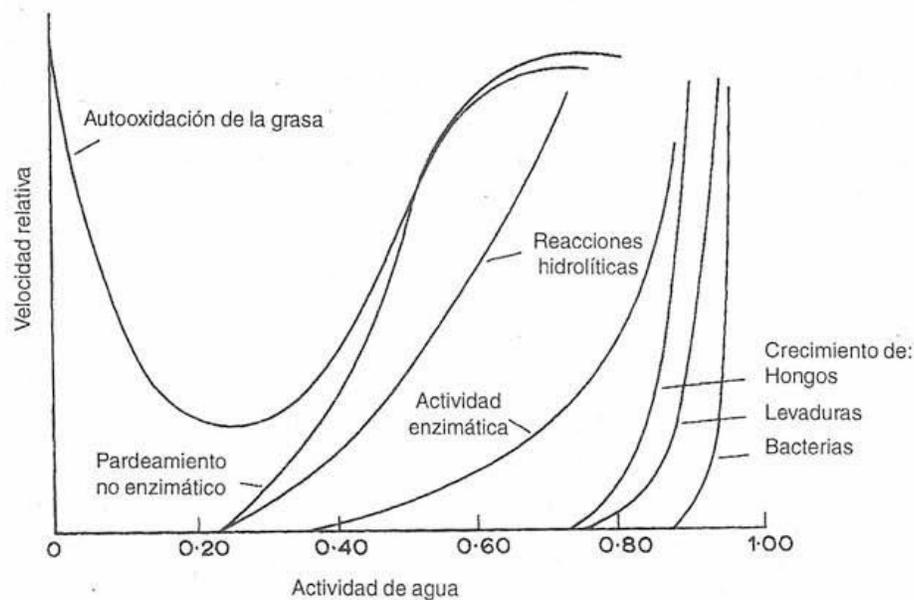


FIG 13.3 Influencia de la actividad de agua en la estabilidad de los alimentos (Adaptado de Labuza⁵).

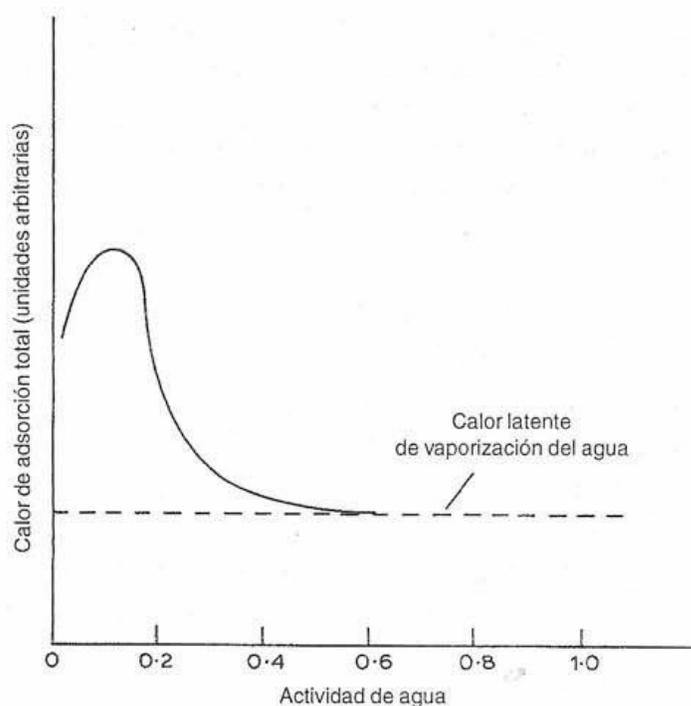


FIG. 13.4 Dependencia del calor de adsorción total (calor latente más calor de adsorción) respecto de la actividad de agua. (Adaptado de Karel⁶).

ria para un proceso de este tipo. En el diseño de los sistemas de secado por aire caliente, no se puede disminuir la riqueza en agua del producto por debajo de la que tiene cuando se halla en equilibrio con el aire utilizado para el secado (a una temperatura específica y con una determinada humedad). Para secar hasta contenidos en agua muy bajos, es decir, correspondientes a la región de la monocapa, hay que suministrar más energía que el calor latente de vaporización, para superar las fuerzas implicadas en la unión del agua a los puntos específicos, antes citados (Fig 13.4).⁷⁻⁹

13.2 INTRODUCCIÓN A LA DESHIDRATACIÓN

La deshidratación es un método frecuentemente utilizado para reducir la actividad de agua y, consiguientemente, prolongar la vida útil de los alimentos. Además de facilitar la conservación del producto, reduce el peso y, de ordinario, el volumen por unidad de «valor alimenticio».

En este capítulo se emplearán indistintamente los términos «deshidratación», «desección» y «secado» de alimentos, para referirse a la operación unitaria en la que se elimina, por evaporación o sublimación, casi toda el agua presente en los alimentos, mediante la aplicación de calor bajo condiciones

controladas. De acuerdo con esta definición, no se incluyen otros métodos de eliminación del agua, como la filtración y la separación por membranas (Capítulo 6), la centrifugación (Capítulo 7), la extracción sólido-líquido y el estrujamiento (Capítulo 8). El secado al sol también se excluye, debido a que no se controlan las condiciones del mismo. Por definición, también se omite en este capítulo la evaporación, o concentración de alimentos líquidos, tratadas en otra parte del texto (Capítulo 12), debido a que la riqueza en agua del producto final es normalmente mucho mayor que en el secado.

Los métodos empleados en el secado de los alimentos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- (i) *Secado por aire caliente*: El alimento se pone en contacto con una corriente de aire caliente. El calor se aporta al producto principalmente por convección.
- (ii) *Secado por contacto directo con una superficie caliente*: El calor se aporta al producto principalmente por conducción.
- (iii) *Secado mediante el aporte de energía por una fuente radiante, de microondas o dieléctrica*.
- (iv) *Liofilización*: El agua de los alimentos se congela y se sublima, generalmente aportando calor a una presión muy baja.

13.3 SECADO POR AIRE CALIENTE

13.3.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Al secar un sólido húmedo con aire caliente, el aire aporta el calor sensible y el calor latente de vaporización del agua y actúa también como gas portador, para eliminar el vapor de agua que se forma en la vecindad de la superficie de evaporación.

Considérese la situación en la que un sólido inerte, humedecido con agua pura, se seca en una corriente de aire caliente, que fluye paralelamente a la superficie de secado. Supóngase que la temperatura y la humedad del aire sobre la superficie de desecación se mantienen constantes, durante todo el ciclo de secado, y que todo el calor necesario se le aporta al producto por convección. Si se registra el cambio del contenido en agua del producto durante todo el proceso de desecación, los datos se pueden representar como en la Figura 13.5. El estudio de estas gráficas muestra que el ciclo de secado puede descomponerse en varias fases o etapas.

Etapas A-B. En esta etapa, período de «estabilización», las condiciones reinantes en la superficie del sólido se equilibran con las del aire de secado. Con frecuencia, esta fase constituye una proporción despreciable del ciclo total de secado pero, en algunos casos, puede ser significativa.

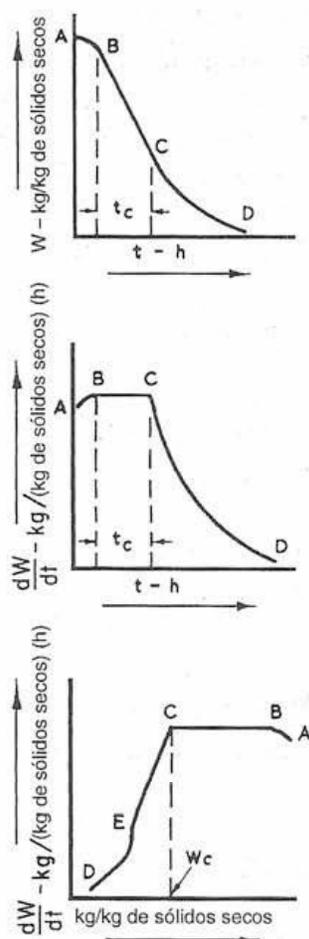


FIG. 13.5 Curvas de secado de un sólido húmedo en aire caliente, a temperatura y humedad constantes.

Etapa B–C. Esta etapa del secado se denomina *período de velocidad constante* y, durante el mismo, la superficie del sólido se mantiene saturada de agua líquida, debido a que la migración del agua, desde el interior del sólido a la superficie, transcurre a la misma velocidad que la de evaporación en la superficie. El secado implica el desplazamiento del vapor de agua desde la superficie saturada, a través de una delgada capa de aire estático, hasta la corriente principal de aire. Durante esta fase, la velocidad de secado depende de la de transmisión de calor a la superficie. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transmisión de calor, de forma que la temperatura de la superficie de secado se mantiene constante. La superficie del sólido puede compararse a la camisa de un termómetro de bulbo húmedo (véase el Apéndice III) y, bajo las condiciones en que se encuentre, la temperatura constante de la superficie será la misma que la temperatura de bulbo húmedo del

aire que interviene en el secado. La «fuerza impulsora» del movimiento del vapor a través de la delgada capa de aire estático es el gradiente de presión de vapor de agua entre la superficie en desecación y la corriente principal del aire de secado. La velocidad de transferencia de masa puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_c = -K_g A(p_s - p_a) \quad (13.3)$$

en la que $-(dw/dt)_c$ = velocidad de desecación; K_g = coeficiente de transferencia de masa; A = área de la superficie de secado; p_s = presión del vapor de agua en la superficie (es decir, la presión de vapor del agua, a la temperatura de la superficie) y p_a = presión parcial del vapor del agua en el aire.

La ecuación (13.3) también puede escribirse de la siguiente forma:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_c = -K_g^1 A(H_s - H_a) \quad (13.4)$$

ecuación en la que K_g^1 = coeficiente de transferencia de masa; H_s = humedad en la superficie (es decir, humedad de saturación del aire a la temperatura de la superficie) y H_a = humedad del aire.

La velocidad de transmisión de calor a la superficie de secado puede expresarse, por tanto, como sigue:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_c = -h_c A(\theta_a - \theta_s) \quad (13.5)$$

ecuación en la que $(dQ/dt)_c$ = velocidad de transmisión de calor; h_c = coeficiente de transmisión de calor para el calentamiento por convección, A = área de transmisión de calor (es decir, área de la superficie de secado); θ_a = temperatura de bulbo seco del aire; θ_s = temperatura de la superficie de secado.

En el caso que nos ocupa, es decir, cuando todo el calentamiento tiene lugar por convección, θ_s = temperatura de bulbo húmedo del aire.

Puesto que la velocidad de transmisión de calor al cuerpo y la velocidad de transferencia de masa desde el mismo se hallan en equilibrio, ambas velocidades pueden relacionarse así:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_c L = -\left(\frac{dQ}{dt}\right)_c \quad (13.6)$$

donde, L = calor latente de evaporación a θ_s .

Combinando las ecuaciones (13.5) y (13.6), se puede obtener:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_c = -\frac{h_c A}{L}(\theta_a - \theta_s) \quad (13.7)$$

Si la velocidad de secado se expresa en términos de velocidad del cambio en el contenido en agua W (en términos de peso seco), la ecuación (13.7) puede reescribirse así:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_c = -\frac{h_c A^1}{L}(\theta_a - \theta_s) \quad (13.8)$$

en la que $-(dW/dt)_c$ = velocidad de secado; A^1 = superficie de secado efectiva por unidad de masa de extracto seco.

Si se trata de una bandeja cargada con una capa de producto húmedo de una profundidad d , en la que la evaporación sólo tiene lugar por la superficie superior, y suponiendo que durante el secado no hay retracción (pérdida de volumen) del producto:

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_c = -\frac{h_c}{p_s L d}(\theta_a - \theta_s) \quad (13.9)$$

ecuación en la que p_s = densidad a granel del producto seco. El tiempo de secado a velocidad constante puede calcularse integrando la ecuación (13.9) de la siguiente manera:

$$t_c = \frac{(W_0 - W_c) p_s L d}{h_c (\theta_a - \theta_s)} \quad (13.10)$$

donde t_c = tiempo de secado a velocidad constante; W_0 = riqueza inicial en agua del sólido; W_c = riqueza en agua al término del período de secado a velocidad constante.

Los factores que controlan la velocidad durante el período de velocidad constante son, por tanto: (1) el área de la superficie de secado, (2) la diferencia en temperatura, o contenido en agua, entre el aire y la superficie de desecación y (3) los coeficientes de transmisión de calor o masa.

Perry¹⁰ señala que, para la determinación de las velocidades de secado, es más fiable el uso de los coeficientes de transmisión de calor que el de los coeficientes de transferencia de masa y sugiere que, en muchos casos, el coeficiente de transmisión de calor se pueden expresar en los siguientes términos:

$$h_c = \frac{aG^n}{D_c^m} \quad (13.11)$$

donde G = velocidad másica del aire; D_c = dimensión característica del sistema; a , n y m son constantes empíricas.

En consecuencia, las velocidades de secado, durante el período de velocidad constante, se ven afectadas por la velocidad del aire y las dimensiones del sistema.

En lugar de h_c , se utilizan otras expresiones, cuando el flujo de aire no es paralelo a la superficie de secado y cuando se opera con flujo a través.¹⁰

Cuando el calor se aporta al producto por radiación y/o conducción, además de por convección, en la ecuación (13.9), h_c se sustituye por un coeficiente global de transmisión de calor, que tiene en cuenta los diferentes modos de transmisión. En estas circunstancias, la temperatura de la superficie permanece constante durante el período de secado a velocidad constante, pero a un valor superior al de la temperatura de bulbo húmedo del aire e inferior al punto de ebullición del agua.

Etapa C - D (Fig. 13.5). Al avanzar la desecación, se alcanza un punto en el que la velocidad de migración del agua, desde el interior del producto hasta la superficie, se reduce en un grado tal que la superficie comienza a secarse. En este punto, C , la velocidad de secado comienza a descender, iniciándose el *período de velocidad decreciente*. El contenido en agua del producto cuando se alcanza ese punto se denomina *humedad crítica* (W_c). A partir del punto C , la temperatura de la superficie comienza a elevarse, elevación que prosigue a lo largo del secado, hasta aproximarse a la temperatura de bulbo seco del aire, cuando el producto se acerca al estado de sequedad. Frecuentemente, el período de velocidad decreciente consta de dos partes, conocidas como primer y segundo período de velocidad decreciente, $C-E$ y $E-D$, respectivamente. En el primer período de velocidad decreciente, se está secando la superficie y la velocidad de secado disminuye. Al alcanzarse el punto E , el plano de evaporación se desplaza hacia el interior del sólido y la velocidad de secado decae aún más. En los períodos de velocidad decreciente, la velocidad de secado se ve determinada fundamentalmente por la velocidad a que se desplaza el agua en el sólido, reduciéndose los efectos de los factores externos, en especial el de la velocidad del aire, sobre todo en la última etapa. Normalmente, los períodos de velocidad decreciente dan cuenta de la mayor parte del tiempo total de secado.

En la bibliografía científica, se ha prestado mucha atención a la naturaleza del mecanismo de desplazamiento del agua en el interior del sólido.¹⁰⁻¹² Parecen existir cuatro mecanismos básicos de desplazamiento: el flujo a través de los intersticios, en virtud de las fuerzas capilares; la difusión del líquido, impulsada por los gradientes de concentración; la difusión del vapor, debida a los gradientes de presión parcial y la difusión en las capas líquidas adsorbidas a las interfases del sólido. Los mecanismos de capilaridad y difusión del líquido son los que han merecido mayor atención. Generalmente, el primero tiene mayor

importancia en el caso de productos granulares groseros y el último en los sólidos monofásicos con estructura coloidal o geliforme. En muchos casos, ambos mecanismos participan en una misma operación de secado; en las primeras fases, el agua se desplaza por capilaridad y, cuando el contenido en agua es bajo, por difusión.

Perry¹⁰ sugiere que, en los sistemas en que opera el mecanismo de flujo capilar, la velocidad de secado puede, frecuentemente, expresarse con razonable exactitud mediante una ecuación del siguiente tipo:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_f = -K(W - W_e) \quad (13.12)$$

donde $-(dW/dt)_f$ = velocidad de secado transcurrido el tiempo t , desde el comienzo del período de velocidad decreciente; W = contenido en agua del producto al tiempo t y W_e = contenido en agua del producto cuando se halla en equilibrio con el aire que se está usando para el secado; representa el contenido mínimo de agua alcanzable, teóricamente, con un aire de temperatura (θ_a) y humedad (H_a); K es una constante, relacionada del siguiente modo con el período de secado a velocidad constante:

$$K = \frac{-\left(\frac{dW}{dt}\right)_c}{W_c - W_e} \quad (13.13)$$

Combinando las ecuaciones (13.9), (13.12) y (13.13), se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_f = \frac{-h_c(\theta_a - \theta_s)}{\rho_s L d} \frac{(W - W_e)}{(W_c - W_e)} \quad (13.14)$$

Si la ecuación anterior se integra entre los límites $t = 0, W = W_c; t = t$ y $W = W$, se obtiene el tiempo de secado durante el período de velocidad decreciente:

$$t = \frac{\rho_s L d (W_c - W_e)}{h_c (\theta_a - \theta_s)} \ln \frac{(W_c - W_e)}{(W - W_e)} \quad (13.15)$$

Para sólidos cortados en rodajas, en los que la desecación tenga lugar solamente por una de las dos caras y en los que el movimiento interno del agua esté controlado por la difusión del líquido, Perry¹⁰ sugiere el siguiente tipo de expresión:

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp \left[-Dt \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] + \frac{1}{9} \exp \left[-9Dt \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] + \dots \right\} \quad (13.16)$$

en la que W = contenido promedio de agua, al tiempo t , de una lámina infinita, de grosor d ; W_c = riqueza inicial en agua, suponiendo que es uniforme en toda la pieza y D = difusividad del líquido.

Para valores de t grandes, la ecuación (13.16) se puede reducir a:

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} \approx \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp \left[-Dt \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] \right\}$$

o bien

$$t = -\frac{4d^2}{\pi^2 D} \left(\ln \frac{W - W_e}{W_c - W_e} - \ln \frac{8}{\pi^2} \right) \quad (13.17)$$

La ecuación (13.17) es válida para valores de $(W - W_e) / (W_c - W_e) < 0,06$.

Diferenciando la ecuación (13.17), se obtiene una ecuación de velocidad de forma similar a la (13.14):

$$\left(\frac{dW}{dt} \right)_f = -\frac{D\pi^2}{4d^2} (W - W_e) \quad (13.18)$$

Las ecuaciones de velocidad (13.9), (13.14) y (13.18) son válidas cuando el secado ocurre sólo por una cara. Cuando tiene lugar por las dos, entonces d = la mitad del espesor de la lámina.

Para determinar si existe, o no, una relación simple durante el período de velocidad decreciente, puede representarse $(W - W_e) / (W_c - W_e)$ en función de t , en papel semilogarítmico. Si se obtiene una línea recta, es válida la ecuación (13.14) y la pendiente de la recta está relacionada con la velocidad de secado durante el período de velocidad constante como indica en la ecuación (13.13). Si la gráfica se hace asintótica a una línea recta al aumentar t , se puede aplicar la ecuación (13.18) y calcular D a partir de la pendiente de la asíntota. El efecto del espesor d sobre la velocidad de secado se puede determinar experimentalmente y utilizarla para distinguir ambos mecanismos.^{10,12}

Existen algunos datos sobre la humedad crítica de productos no alimenticios¹⁰, pero muy pocos relativos a los alimentos.¹³ La humedad crítica depende generalmente de la velocidad de secado, de las dimensiones del producto y de los mecanismos de desplazamiento del agua. Normalmente aumenta al aumentar la velocidad de secado y el espesor del producto.

13.3.2 SECADO DE LOS ALIMENTOS

Las consideraciones teóricas de la Sección 13.3.1. solamente son válidas para los sistemas simples allí definidos. Los alimentos son mucho más complejos y heterogéneos que esos sistemas. Entre los componentes de los alimentos, figuran proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas, enzimas y sales inorgánicas y muchos de estos componentes están fuertemente hidratados. El agua presente en los alimentos no se encuentra en estado puro, sino que puede estar formando parte de disoluciones de sólidos, de geles y de emulsiones o ligada, de diversos modos, a los constituyentes sólidos. Además, tanto los tejidos vegetales como los animales son de naturaleza celular, hecho que también afecta a su conducta durante la desecación.^{6,11}

Movimiento de solutos. Una característica singular e importante del secado de los alimentos es el movimiento de sólidos solubles durante la desecación. El agua líquida que fluye hacia la superficie durante el secado contiene diversos productos en disolución. El desplazamiento de algunos compuestos solubles se ve dificultado por las paredes celulares, que actúan como membranas semipermeables. A la migración de sólidos en los alimentos, contribuye también la retracción del producto, que crea presiones en el interior de las piezas. El resultado neto puede ser el acúmulo de componentes solubles en la superficie, al evaporarse el agua.

Van Arsdel y otros¹¹ señalan que la migración de sólidos solubles también puede ocurrir en el sentido opuesto, hacia el interior de las piezas. A medida que la superficie se seca, se va estableciendo un gradiente de concentración entre la superficie y el centro húmedo de la pieza, que puede provocar la difusión de solutos hacia el centro. Que predomine uno u otro de ambos fenómenos depende de las características del producto y de las condiciones del secado. Se ha demostrado que ambos mecanismos se dan durante el secado de los alimentos.

Retracción. Durante el secado de los tejidos animales y vegetales, por cualquier método, con la posible excepción de la liofilización, se produce cierto grado de retracción del producto. Los productos coloidales también se retraen cuando se secan. Durante las primeras fases del secado, a bajas velocidades, la cuantía de la retracción está simplemente relacionada con la cantidad de agua eliminada. Hacia el final del mismo, la retracción es cada vez menor, de modo que el tamaño y la forma finales (o definitivas) del producto se alcanzan antes de terminarse el secado.

Tanto la densidad a granel, como la porosidad, de las piezas de hortalizas desecadas dependen, en gran medida, de las condiciones de secado. Si las velocidades iniciales de secado son altas, las capas externas de las piezas se tornan rígidas y su volumen final se fija antes. Al continuar el secado, los tejidos se rompen internamente, generando una estructura abierta. En estas condicio-

nes, el producto tiene poca densidad a granel y es fácilmente rehidratable. Si las velocidades iniciales de desecación son bajas, la retracción de las piezas rinde un producto de mayor densidad. La retracción de los alimentos durante el secado puede influir en las velocidades de secado, debido a los cambios en el área de la superficie de desecación y a la creación de gradientes de presión en el interior del producto.^{11,12,14} Algunos trabajos realizados indican que la retracción no afecta a la conducta durante el secado.¹⁵

Formación de costra. Se ha observado que durante el secado de algunas frutas, carnes y pescados, se suele formar una película impermeable y dura en la superficie, lo que normalmente frena el secado, a este fenómeno se le suele denominar encostrado o formación de costra. Aunque se desconozca el mecanismo exacto, es probable que esté influido por múltiples factores, entre los que figuran la migración de sólidos solubles a la superficie y las elevadas temperaturas que se alcanzan en ella, hacia el final del secado, que inducen complejos cambios físicos y químicos en la capa superficial.^{11,16}

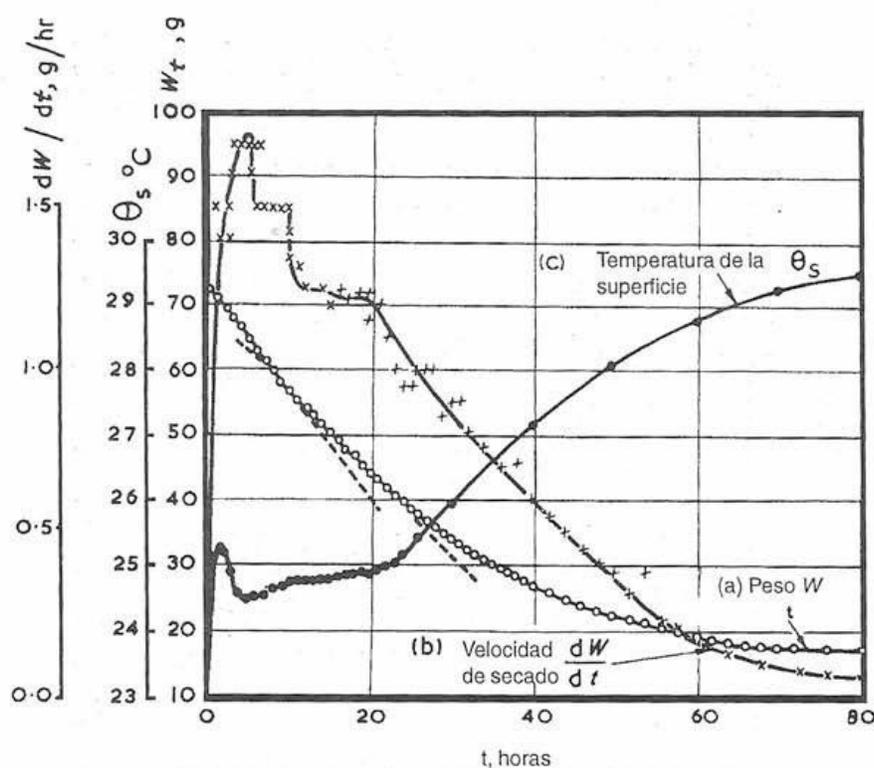


FIG. 13.6 Conducta inicial durante el secado de un filete de $10 \times 5 \times 1,5$ cm expuesto a una corriente de aire a una velocidad de 30 cm s^{-1} , paralela a los lados, de 10 cm. Temperatura de bulbo seco = 30°C , temperatura de bulbo húmedo = 18°C . Curva A: peso en función del tiempo, Curva B: velocidad de secado en función del tiempo; Curva C: temperatura en el centro de la superficie en función del tiempo. (De Jason,¹⁴ por cortesía de la Society of Chemical Industry).

13.3.2.1 Estudios sobre los mecanismos del secado

Los que a continuación se exponen son algunos ejemplos de estudios efectuados sobre la conducta de los alimentos durante el secado. Estos ejemplos muestran la complejidad del secado de los alimentos, en comparación con la del sistema modelo simple a que se refiere la Sección 13.3.1.

Jason¹⁴ ha estudiado el secado del músculo de pescado bajo condiciones cuidadosamente controladas. En la Figura 13.6 se muestra un ejemplo típico de la conducta de un filete de bacalao desecado en aire caliente, con flujo paralelo a su dimensión más larga. Jason llegó a la conclusión de que existen, al menos, dos períodos, durante las fases iniciales de desecación, en los que las velocidades de desecación se mantienen relativamente constantes. El primer período termina cuando se seca la superficie próxima al borde de desecación más rápido y el segundo período cuando se seca el resto de la superficie. Tam-

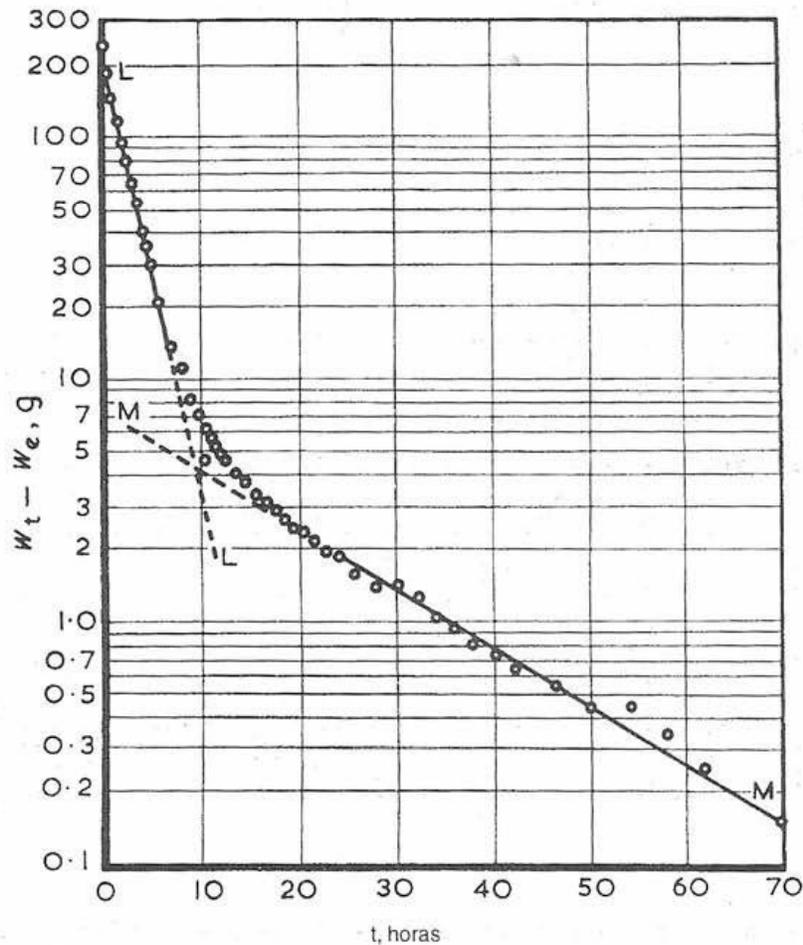


FIG. 13.7 Cantidad de agua libre remanente en un filete de $10 \times 5 \times 0,60$ cm en función del tiempo. Temperatura del bulbo seco = 35°C , temperatura de bulbo húmedo = $20,3^\circ\text{C}$, velocidad del aire = 366 cm s^{-1} . (De Jason,¹⁴ por cortesía de la Society of Chemical Industry).

bién concluye que, en las primeras fases del secado, el músculo de bacalao se comporta como si la superficie estuviera saturada de agua. La curva de la Figura 13.7 muestra los resultados obtenidos por Jason, relativos al período de velocidad decreciente. En ella se representa, a escala logarítmica, en función del tiempo, la diferencia entre el peso de equilibrio (W_e) y el peso (W_t), al tiempo t desde el comienzo del secado. Puede verse que los resultados se ajustan a dos rectas LL y MM, en la mayor parte de la curva. El curso del secado, durante la primera de estas fases de velocidad decreciente, puede explicarse mediante una ecuación de difusión basada en la Ley de Fick. Los resultados indican que el coeficiente de difusión es constante y que su valor es independiente de la retracción del músculo. Una explicación similar es válida en la segunda fase, pero la constante de difusión adquiere un valor inferior al que tiene en la primera fase.

Gorling¹⁵ presentó, como en la Figura 13.8, los resultados obtenidos secando por una sola cara una rodaja de patata. Representó el cociente X_m/X_0 , (donde X_0 es el contenido inicial en agua y X_m el contenido medio, en cualquier momento dado) frente al producto de la velocidad de secado y el espesor de la muestra (para tener en cuenta la retracción). Tres etapas resultan evidentes, en el secado. Basándose en los resultados de pruebas sistemáticas, Gorling llegó a la conclusión de que, en los productos vegetales, el agua migra a la superficie, durante la primera etapa, sólo por un mecanismo capilar y que la velocidad de secado no es constante, debido a la retracción.

Saravacos y Charm¹³ han estudiado el secado de frutas y hortalizas dispuestas en capas simples. En la mayor parte de los productos, se observaron períodos de velocidad constante seguidos por otros de velocidad decreciente de forma sigmoide. La Figura 13.9 muestra una gráfica típica de secado. Estudia-

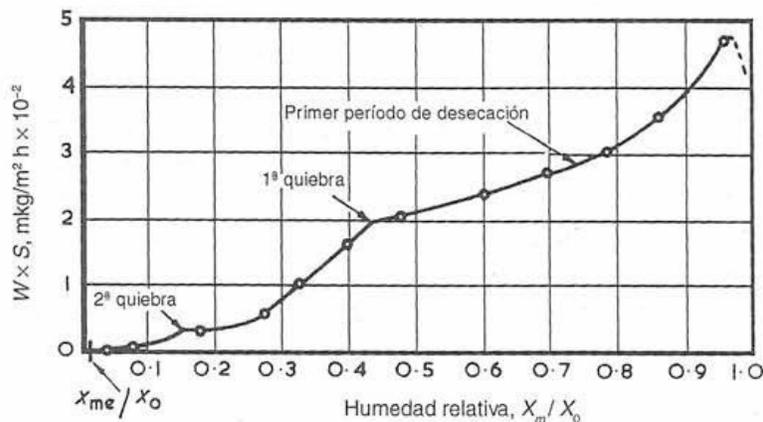


FIG. 13.8 Gráfica completa de la velocidad de secado, en la deshidratación por una cara de rodajas de patata en una corriente de aire a 60°C. (De Gorling,¹⁵ por cortesía de la Society of Chemical Industry).

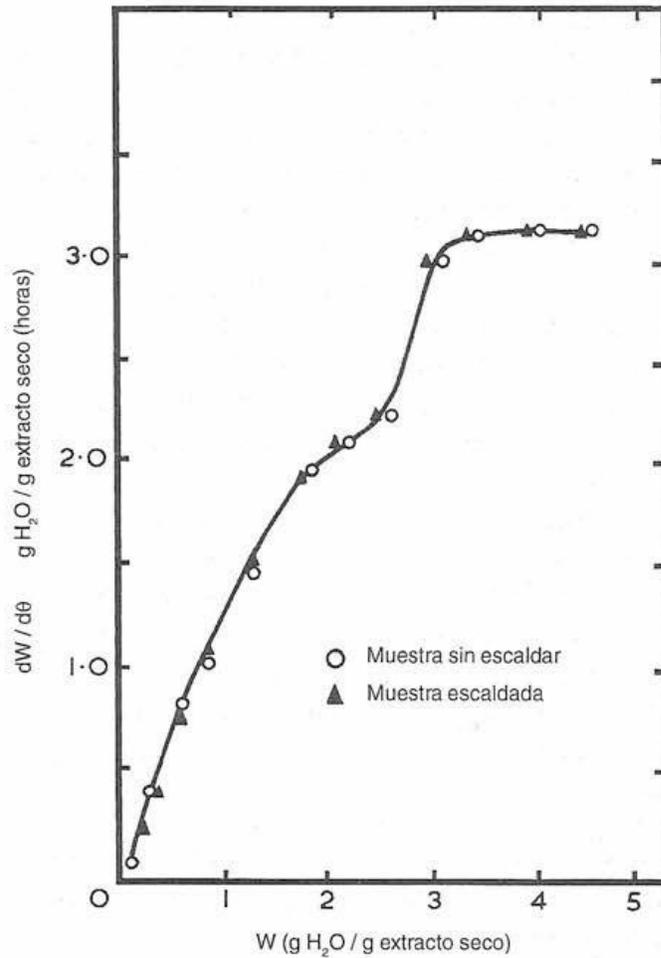


FIG. 13.9 Efecto del escaldado sobre la velocidad de secado de una rodaja de patata. Condiciones de secado: rodaja de patata de $1,25 \times 1,25 \times 0,32$ cm, velocidad del aire = 217 cm s^{-1} , temperatura de bulbo seco = 66°C , temperatura de bulbo húmedo = $33,3^\circ\text{C}$. (De Saravacos y Charm.¹³).

ron detalladamente la desecación de la patata y, cuando sometieron los datos a tratamientos del tipo descrito en la Sección 13.3.1, es decir, cuando representaron $(W - W_c)/(W_c - W_e)$ en papel semilogarítmico frente al tiempo, obtuvieron una línea recta, como la que se muestra en la Figura 13.10. El tiempo de secado a velocidad decreciente era proporcional al cuadrado del espesor de la muestra. La conclusión obtenida de este trabajo es que el agua migra por un mecanismo tipo difusión. No se encontraron pruebas de que existiera un mecanismo capilar.

La aplicación de expresiones teóricas simples, como las de la Sección 12.3.1, al secado de los alimentos, adolece de serias limitaciones, debido a la complejidad de estos materiales. Son numerosos los indicios de que, en el secado de muchos productos, la difusividad, D , no es constante, sino que cambia con el

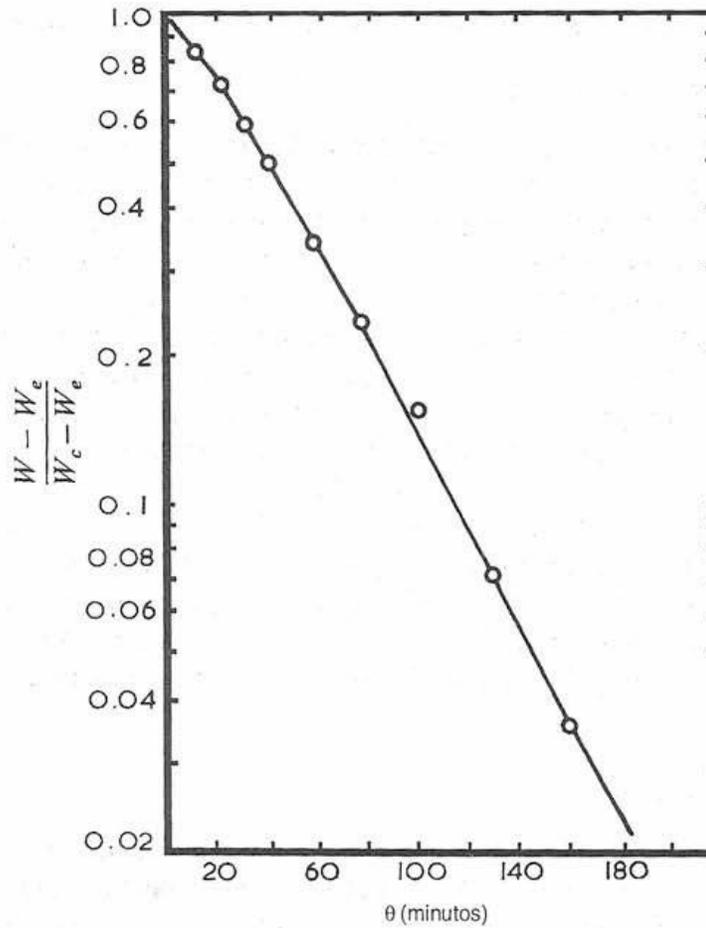


FIG. 13.10. Etapa de velocidad decreciente de un corte de patata escaldada. Condiciones de secado: velocidad del aire = 217 cm s^{-1} , temperatura de bulbo seco = 66°C , temperatura de bulbo húmedo = $33,3^\circ\text{C}$. (De Saravacos y Charm.¹³)

contenido en agua. Se han propuesto numerosas expresiones matemáticas más sofisticadas para describir el comportamiento del secado durante el período de velocidad decreciente. Brennan¹⁷ estudia algunas. Sin embargo, la falta de datos sobre las características del secado de alimentos específicos por ejemplo, humedad crítica y en equilibrio, difusividad y propiedades térmicas limita, en la práctica, la aplicación de esas relaciones. Cuando los datos se ajustan a relaciones simples, pueden calcularse con ellos los tiempos de secado. También pueden utilizarse, para determinar los tiempos de secado, los datos acumulados, publicados por investigadores en este campo y/o los obtenidos en experiencias a escala piloto.¹¹

13.3.3 EQUIPOS PARA LA DESECACIÓN POR AIRE CALIENTE

13.3.3.1 Secadero de armario

Básicamente consiste en una cabina aislada, provista de un ventilador, para hacer circular el aire a través de elementos calefactores colocados en su interior. El aire caliente es dirigido por pantallas ajustables, bien horizontalmente entre las bandejas cargadas de alimentos, o bien verticalmente a través de bandejas perforadas y las piezas de alimento. El secadero dispone de mecanismos reguladores, para controlar la velocidad de admisión de aire fresco y la cantidad deseada de aire circulante. Los calentadores del aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados con vapor o, en los modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica. En los sistemas de flujo transversal, se utilizan velocidades del aire de $2\text{-}5\text{ m s}^{-1}$ y, en los de flujo ascendente, velocidades de $0,5\text{-}1,25\text{ m}^3\text{ (s}^{-1}\text{) (m}^2\text{ de área de bandeja)}$. Los secaderos de armario resultan relativamente baratos, muy flexibles y de bajo costo de mantenimiento. Se utilizan unidades individuales o grupos de unidades, principalmente para secar frutas y hortalizas. Su capacidad oscila entre 1 y 20 toneladas día⁻¹ ($1.000\text{-}20.000\text{ kg día}^{-1}$). También son útiles para el trabajo a escala piloto.

13.3.3.2 Secaderos de túnel

Se utilizan para secar frutas y hortalizas de forma semicontinua, en instalaciones de gran capacidad de producción. Consisten en túneles, que puede tener hasta unos 24 m de longitud, con una sección transversal, rectangular o cuadrada, de unos 2 m por 2 m. El producto húmedo se extiende, en capas uniformes, sobre bandejas de listones de madera o malla metálica. Las bandejas se apilan en carretillas o vagonetas, dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de secado. Las carretillas cargadas se introducen, de una en una, a intervalos adecuados, en el túnel. A medida que se introduce una carretilla por el «extremo húmedo» del túnel, se retira otra de producto seco, por el «extremo seco». El aire se mueve mediante ventiladores, que lo hacen pasar a través de calentadores, y fluye luego horizontalmente, entre las bandejas, aunque también se produce cierto flujo a través de las mismas. Normalmente se emplean velocidades del aire del orden de $2,5\text{ a }6,0\text{ m s}^{-1}$.

Los secaderos de túnel suelen clasificarse basándose en la dirección relativa del movimiento del producto y del aire. En algunos casos emplean *sistemas concurrentes* de flujo producto/aire, como se muestra en la Figura 13.11. Las principales características de este tipo de túneles son: elevadas velocidades de evaporación iniciales a temperaturas del producto relativamente bajas, y velocidades de secado reducidas cerca del extremo seco.

En otro tipo de túneles, se emplea un *sistema en contracorriente* del flujo producto/aire, como muestra la Figura 13.12.

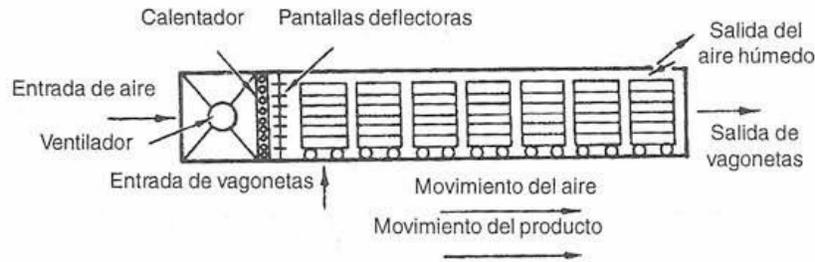


FIG. 13.11 Secadero de túnel concurrente.

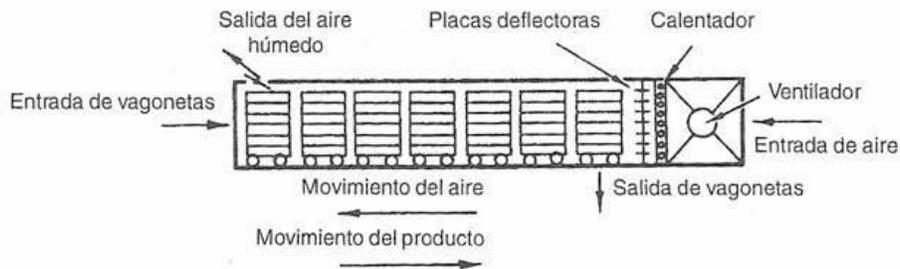


FIG. 13.12 Secadero de túnel contracorriente.

Las características distintivas de esta clase de túnel son: una velocidad inicial de secado relativamente baja y unas condiciones (humedad baja y temperatura elevada) muy favorables para el secado, en el «extremo seco» del túnel. Estas condiciones pueden terminar dañando el producto.

Al objeto de poder controlar con mayor flexibilidad las condiciones de secado durante las diversas etapas del ciclo, pueden utilizarse dos o más túneles en serie. La combinación más empleada consta de un túnel primario concurrente, seguido por un túnel secundario en contracorriente. La ventaja de este sistema es que se aprovechan las altas velocidades iniciales de secado del túnel concurrente y las condiciones apropiadas para un secado intenso del túnel contracorriente, permitiendo un acabado más rápido y un menor contenido final en agua.

También se encuentran en uso túneles simples capaces de realizar el secado en dos etapas en una sola unidad. En estos túneles de *salida de aire central*, se instala un solo ventilador, que arrastra aire caliente hacia el interior del sistema por ambos extremos del túnel. El aire, después de contactar con el alimento, es parcialmente expulsado por el centro del túnel y parcialmente recirculado (Fig. 13.13). En la sección concurrente se utilizan temperaturas del aire y velocidades de flujo relativamente altas, mientras que, en la sección a contracorriente, se utiliza aire fresco y seco, pero más frío.

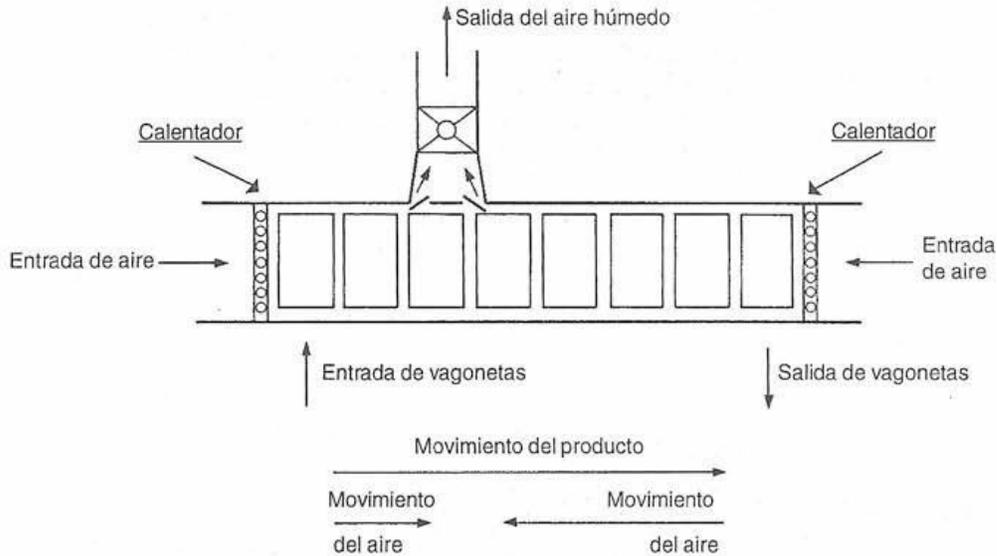


FIG. 13.13 Secadero de túnel con salida del aire por el centro.

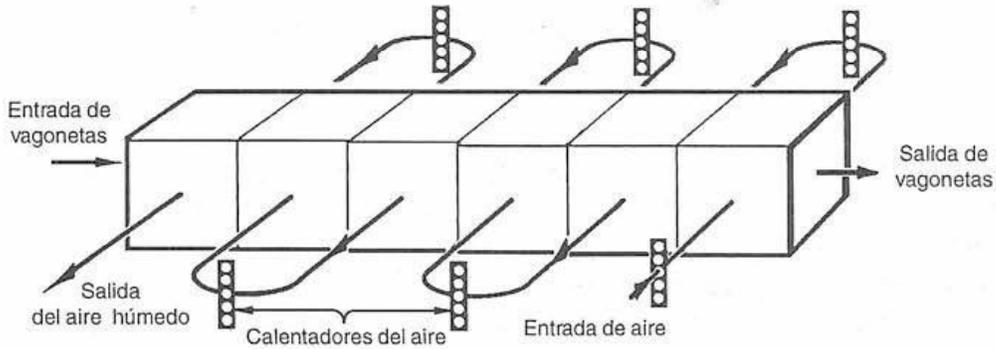


FIG. 13.14 Secadero de túnel de flujo transversal.

Aún existe otro tipo de secadero de túnel, que emplea un *sistema de flujo transversal* en el movimiento aire/producto. En la Figura 13.14 se ilustra el principio de esta unidad. Permite un buen control de las condiciones de secado y del contenido en agua del producto acabado.

Desde el punto de vista de la economía en la utilización del calor y del control de la humedad del aire, puede parecer ventajosa la recirculación de parte del aire de los túneles de secado. Sin embargo, Van Arsdel y otros¹¹ señalan que cada operación de secado tiene que evaluarse por su coste global, ya que la recirculación inevitablemente determina una reducción en la capacidad de procesado de producto húmedo. En determinadas circunstancias, se puede

recircular hasta el 75% del aire pero, en algunas situaciones, resulta más económico no recircular aire o recircular muy poco. Muchos secaderos de túnel comerciales modernos se construyen en forma de líneas simples, con flujo de aire vertical.

13.3.3.3 Secadero de cinta transportadora

El principio en que se basa este tipo de secadero es similar al de los túneles, pero el producto húmedo es arrastrado a través del sistema sobre una cinta transportadora y no en vagonetas. Puede utilizarse cualquiera de los sistemas de movimiento producto/aire a que se ha hecho referencia en la Sección 13.3.3.2, si bien el sistema usado más comúnmente en la práctica es el *flujo a través*, o vertical, en el que el aire atraviesa la cinta transportadora y la capa de producto. Con frecuencia, en las primeras secciones, es decir, en el «extremo húmedo» del túnel, se emplea aire de flujo ascendente y en el «extremo seco» aire de flujo descendente, al objeto de evitar el levantamiento del producto seco de baja densidad. Algunos modelos disponen de dos o más cintas transportadoras, que funcionan en serie. Estos secaderos sólo se usan con partículas sólidas que formen un lecho poroso. Los tiempos de secado son muy cortos. Para reducir los costos, se puede retirar el producto con un contenido en agua relativamente alto y acabar de secarlo en un secadero menos costoso.¹⁷⁻²⁰

13.3.3.4 Secaderos de arcón (de acabado o finalizadores)

En su forma más simple, este tipo de secadero consiste en una caja, con un falso fondo o una base de malla metálica. Un ventilador impulsa el aire sobre un calentador y le obliga a ascender a través del producto, a una velocidad relativamente baja, no superior a $0,5 \text{ m}^3 (\text{s}^{-1})(\text{m}^{-2})$. Los arcones estacionarios de gran capacidad llevan incorporados sus propios ventiladores y calentadores; también se utilizan arcones portátiles, provistos de ruedas, que pueden acoplarse a la boca de la tobera de un sistema estacionario de suministro de aire. La velocidad de secado es muy baja, pero los costos también.

Se usan para el «acabado» de productos vegetales, que se han secado hasta reducir su contenido en agua al 15% en otro tipo de secaderos y que permanecen en éstos hasta rebajarlo a valores en torno al 3%.

13.3.3.5 Secadero de lecho fluidizado

En este tipo de secadero, el aire caliente es forzado a través de un lecho de sólidos, de forma que estos se mantengan suspendidos en el aire. El aire caliente actúa como medio de fluidización y de secado. El tratamiento detallado de los principios de la fluidización de sólidos se describe en el Apéndice I, y en algunos trabajos reseñados en la bibliografía.^{12,21}

Los secaderos de lecho fluidizado pueden operar de forma discontinua o continua. En la Figura 13.15, se muestra una unidad simple de funcionamiento

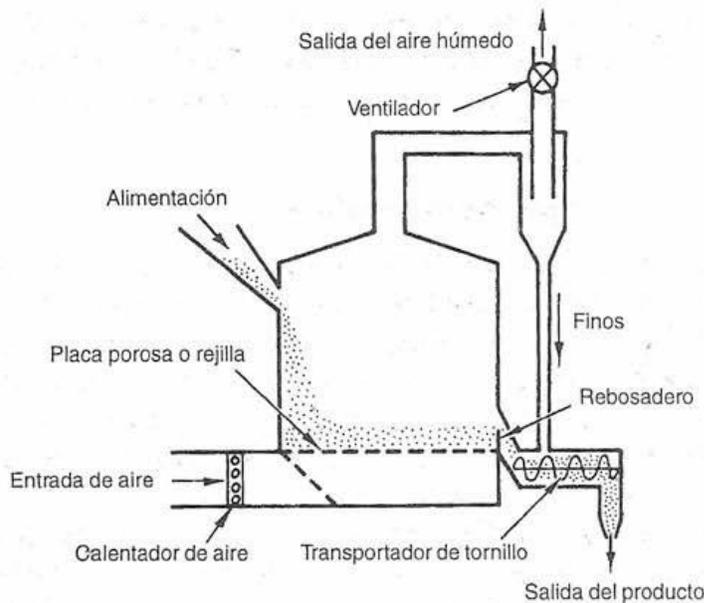


FIG. 13.15 Secadero de lecho fluidizado continuo.

continuo. La rejilla que soporta al lecho puede ser una simple placa perforada, pero también se emplean diseños muy complejos. Algunas unidades poseen bases vibratorias, para facilitar el desplazamiento del producto. En el conducto de salida del aire, se incorporan separadores de polvo, normalmente ciclones, para recoger los sólidos finos. Estos secaderos pueden operar a presión superior o inferior a la atmósfera, según se precise, situando adecuadamente los ventiladores. Sólo se pueden usar con partículas que puedan ser fluidizadas. La velocidad de secado es relativamente alta.

Recientemente ha aparecido un tipo novedoso de secadero de lecho fluidizado, conocido como *lecho fluidizado toroidal*. El aire caliente entra a gran velocidad en la base de la cámara de tratamiento, a través de mecanismos que imprimen a las partículas un movimiento rotatorio. Una de las características de este diseño es que consigue una velocidad de transmisión de calor (y por tanto de secado) muy alta.¹⁷

El secado en lecho fluidizado se ha aplicado industrialmente o a escala experimental, con éxito variable, a diversos productos, como guisantes, judías, zanahorias, cebollas, gránulos de patata, cubos de carne, harina, cacao, café, sal y azúcar. También se utilizan lechos para aglomerar y revestir polvos secos.^{17,21}

13.3.3.6 Secadero neumático

En este tipo de secadero, el producto húmedo se mantiene en suspensión en una corriente de aire caliente, que lo transporta a través del sistema de secado.

Es como una desecación en lecho fluidizado, empleando velocidades de aire más altas. En el Capítulo 19 se exponen los principios del transporte neumático.

En un secadero simple de este tipo, la corriente de alimentación se funde con una fuerte corriente de aire caliente y los sólidos son transportados por la corriente de aire, a través de conductos de longitud suficiente para lograr un tiempo de residencia adecuado. El aire sale del sistema a través de un separador sólidos/gas, normalmente de tipo ciclón, recogiendo el producto seco.

Los conductos de desecación pueden estar dispuestos verticalmente, como en los «Air Lift Driers» o secaderos de elevación por aire, o bien horizontalmente. En los sistemas de paso único, las temperaturas del aire tienen que ser relativamente altas, para evitar conducciones excesivamente largas. Introduciendo en el sistema cámaras de expansión, pueden controlarse mejor las temperaturas del aire en las diferentes fases. Otra posibilidad consiste en disponer, en serie, dos o más secaderos y suministrar aire fresco a cada uno de ellos.

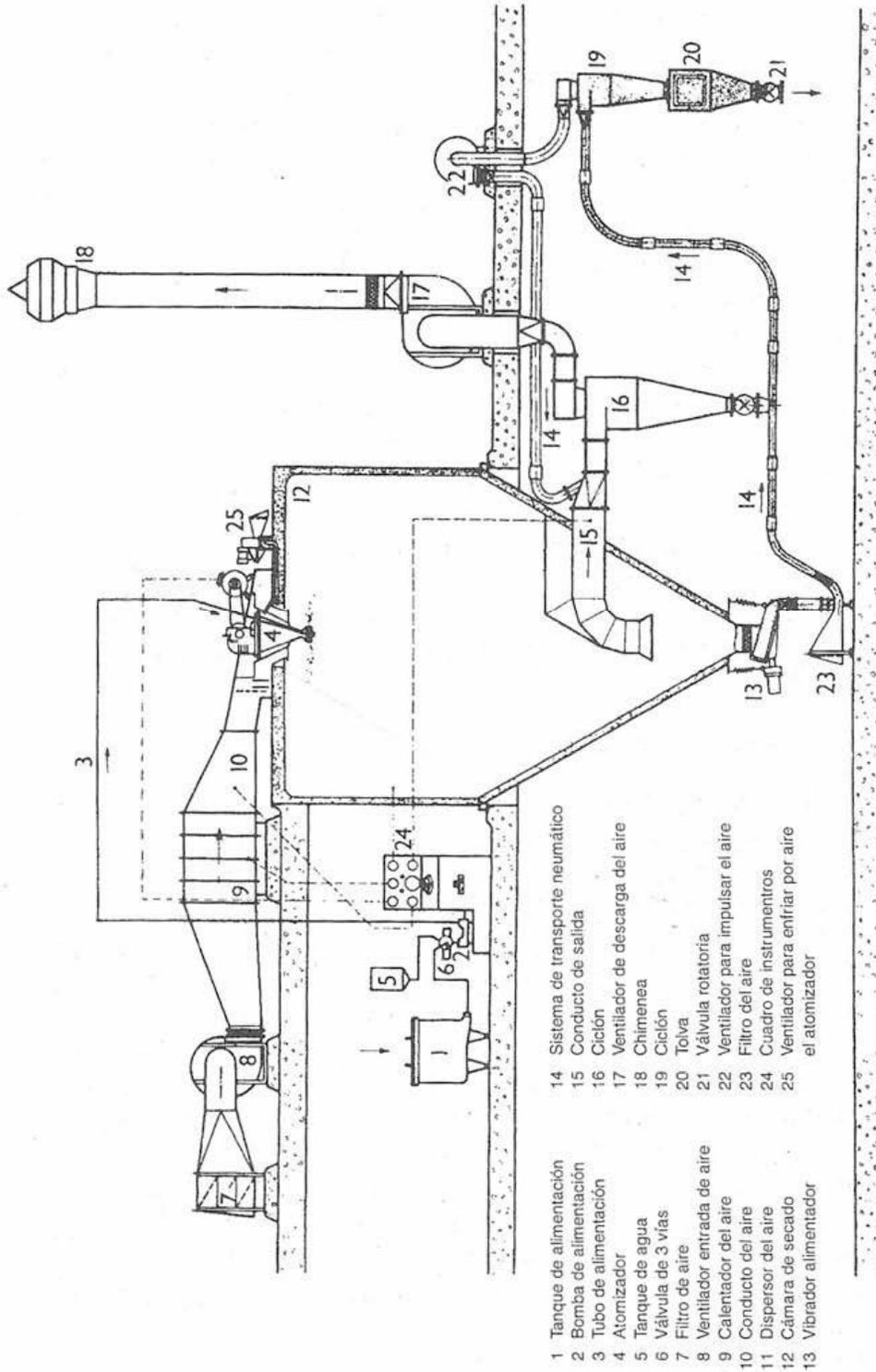
Existe un secadero neumático anular, en el que el producto puede permanecer circulando de forma continua durante varios minutos, mientras se renueva constantemente el aire de secado. La alimentación con producto fresco, y la descarga de producto seco, se verifican de forma continua. En este tipo de unidades, el tiempo de secado puede variarse, dentro de un amplio margen.

Los secaderos neumáticos sólo pueden operar con partículas pequeñas: granos de cereales, harina, gránulos de patatas y cubos de carne. Pueden usarse también como secaderos secundarios, para leche y oviproducidos secados por atomización.^{17,22}

13.3.3.7 Secadero atomizador

Este tipo de secadero se usa profusamente, en la industria alimentaria, para secar disoluciones y papillas. El producto ingresa nebulizado en una cámara de secado, en la que entra en íntimo contacto con una corriente de aire caliente, lo que permite una desecación muy rápida y la obtención de un polvo seco. Las principales características de este tipo de secado son unos tiempos de secado muy cortos, del orden de 1-20 s, y temperaturas del producto relativamente bajas. Las gotitas del producto nebulizado suelen tener diámetros del orden de 10-200 μm y, por tanto, ofrecen al aire un área superficial por unidad de volumen muy grande, lo que resulta en un secado muy rápido. La mayor parte del secado tiene lugar en condiciones que favorecen el proceso a velocidad constante; por ello, la temperatura de los sólidos apenas se eleva por encima de la de bulbo húmedo del aire, hasta el final del proceso. Si las condiciones de operación son correctas, y el equipo está bien diseñado, el tiempo de residencia de las partículas en la cámara de secado se pueden controlar, de forma que sea mínimo el contacto entre las partículas ya secas y el aire caliente, para no sobrecalentar el producto.

La teoría de la evaporación de las gotículas durante la desecación por atomización está bien desarrollada.²³⁻²⁵



- | | | | |
|----|----------------------------|----|--|
| 1 | Tanque de alimentación | 14 | Sistema de transporte neumático |
| 2 | Bomba de alimentación | 15 | Conducto de salida |
| 3 | Tubo de alimentación | 16 | Ciclón |
| 4 | Atomizador | 17 | Ventilador de descarga del aire |
| 5 | Tanque de agua | 18 | Chimenea |
| 6 | Válvula de 3 vías | 19 | Ciclón |
| 7 | Filtro de aire | 20 | Tolva |
| 8 | Ventilador entrada de aire | 21 | Válvula rotatoria |
| 9 | Calentador del aire | 22 | Ventilador para impulsar el aire |
| 10 | Conducto del aire | 23 | Filtro del aire |
| 11 | Dispersor del aire | 24 | Cuadro de instrumentos |
| 12 | Cámara de secado | 25 | Ventilador para enfriar por aire el atomizador |
| 13 | Vibrador alimentador | | |

FIG. 13.16 Sistema típico de secado por atomización. (Cortesía de Niro Atomizer Ltd, Denmark.)

Los componentes esenciales del secadero atomizador son:

- (i) El sistema de calentamiento y circulación del aire.
- (ii) El atomizador.
- (iii) La cámara de secado.
- (iv) El sistema de recuperación del producto.

En la Figura 13.16 se muestra el esquema de un secadero atomizador típico.

(i) *Sistema de calentamiento y circulación del aire.* Comúnmente se emplean calentadores de vapor, solos o como suplemento del calentamiento indirecto por quemadores de gas natural o combustibles líquidos. Durante los últimos años, ha aumentado el uso del calentamiento directo con gas natural. Los calentadores eléctricos raramente se usan, salvo en equipos a escala de planta piloto.

Para mover el aire a través del sistema, suelen emplearse ventiladores centrífugos o soplantes. En algunos secaderos atomizadores, se instala solamente un ventilador, a la salida del aire; en otros, se instalan ventiladores tanto a la entrada como a la salida del aire. Muchas cámaras de secado operan, por ello, a presión ligeramente negativa. En los conductos de entrada y salida suelen instalarse reguladores para controlar la velocidad del flujo del aire. También se instalan filtros a la entrada del aire, para su limpieza.

(ii) *Atomizadores.* En el secado por atomización es de la mayor importancia que el producto líquido forme una niebla con gotículas de tamaño uniforme y de las dimensiones deseadas y que se distribuya por todo el aire caliente. El término que se emplea normalmente para describir la formación de esta niebla es el de nebulización o atomización. En estos secaderos suelen emplearse tres tipos de atomizadores: *atomizadores de presión*, *atomizadores centrífugos* y *atomizadores de dos fluidos*.

En el *atomizador de boquilla a presión*, el producto líquido se bombea, a presión relativamente alta, normalmente del orden de $3,6-48,4 \text{ MN m}^{-2}$, a través de un orificio pequeño. La energía del líquido a alta presión se emplea en la nebulización. Un núcleo acanalado situado por delante del orificio imparte un movimiento de giro al líquido, produciendo un cono de nebulización. Los secaderos atomizadores empleados en la industria alimentaria suelen generar una niebla en forma de cono hueco. En la Figura 13.17 se muestra el esquema de un atomizador de presión típico; existen otros diseños diferentes. Si los atomizadores de presión son alimentados a la presión uniforme recomendada para el diseño de que se trate, se pueden obtener nieblas finas y uniformes. Entre los inconvenientes de este tipo de atomizador, cabe citar la posibilidad de que el orificio se obture con partículas sólidas y la de que aumente su diámetro, sobre todo si la corriente de alimentación contiene sólidos abrasivos.

El *atomizador centrífugo* suele consistir en un disco, o cámara, que gira al extremo de un eje. El líquido de alimentación entra por las proximidades del

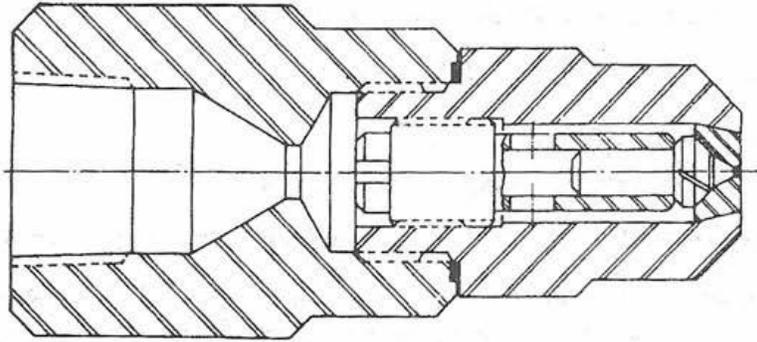


FIG. 13.17 Atomizador por presión (Cortesía de Niro Atomizer Ltd, Denmark).

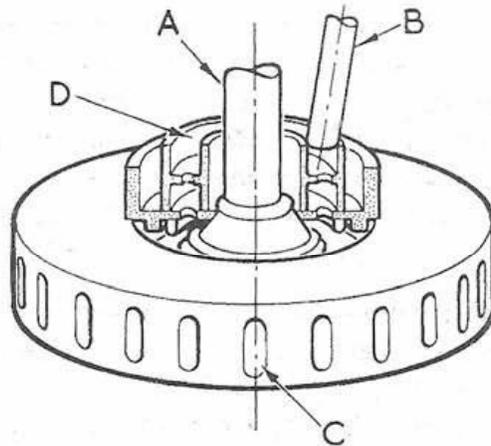


FIG. 13.18 Cabeza atomizadora centrífuga. A = eje de giro, B = tubo de alimentación, C = canal radial, D = dispensador. (Cortesía de Niro Atomizer Ltd, Denmark).

eje de rotación del atomizador y es acelerado hasta la velocidad lineal de la periferia de la cabeza, desde donde se proyecta, formando una niebla, al interior de la cámara de secado. La cabeza rotatoria puede adoptar diversas formas. En la Figura 13.18, se muestra un diseño típico. Existen cabezas atomizadoras de diversos tamaños, desde discos de 5,08 cm, que giran a 50.000 r.p.m., a ruedas de 76,2 cm, que giran a 3.450 r.p.m. Cuando operan correctamente, los atomizadores centrífugos pueden producir también nieblas formadas por gotículas finas y uniformes. No sufren obturaciones o abrasiones debidas a la presencia de sólidos en la corriente de alimentación y pueden trabajar con productos viscosos, a presiones de bombeo relativamente bajas. Existen también diseños especialmente resistentes al desgaste y otros que producen partículas relativamente grandes (0,5-1,0 mm de diámetro), útiles para fines específicos.²⁶

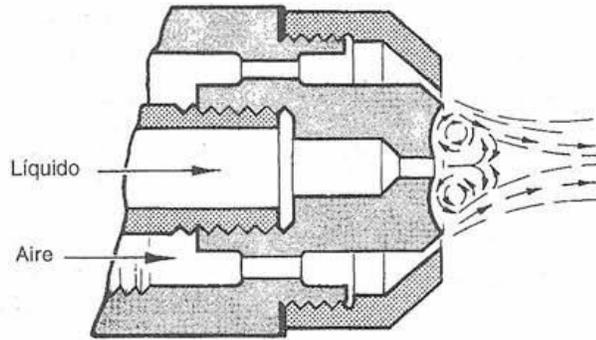


FIG. 13.19 Funcionamiento de un atomizador de dos fluidos. (Cortesía de Niro Atomizer Ltd, Denmark).

El *atomizador de boquilla de dos fluidos* atomiza la corriente de alimentación merced a la energía de un chorro de gas a alta velocidad. En la Figura 13.19, se ilustra el principio en que se basa el funcionamiento de este tipo de atomizador. La presión de la corriente de alimentación es menor que la requerida por los atomizadores de boquilla a presión. Al igual que éstos, puede sufrir obstrucciones y ensanchamiento del orificio. Generalmente, son de capacidad relativamente baja y, con frecuencia, producen gotículas de tamaño muy variable. Debido principalmente al último de estos inconvenientes, se emplean poco en el secado de alimentos.

(iii) *Cámaras de secado*. La cámara de secado es la zona del secadero atomizador en la que entran en contacto el aire caliente y las gotículas de líquido. En la Figura 13.20, se muestran algunos de los múltiples diseños de cámaras existentes.

Para seleccionar un secadero para un determinado uso, lo mejor es la experimentación en planta piloto, o los ensayos en plantas a escala industrial. En el secado de alimentos, rara vez se utilizan secaderos atomizadores de funcionamiento en contracorriente, debido al riesgo de que el calor dañe a los productos sensibles.

(iv) *Sistemas de recuperación del producto*. En algunos secaderos por atomización, el producto seco cae al fondo de la cámara, de donde se descarga mediante rastrillos, tornillos sinfín y válvulas rotatorias. Cuando el producto seco es termoplástico y/o higroscópico, se pueden necesitar diseños especiales de las cámaras, que a veces implican dotarlas de paredes enfriadas, escobas neumáticas y otros dispositivos que faciliten la descarga del producto.²⁵

En otros secaderos, todo el producto desecado abandona la cámara arrastrado por la corriente de aire. En todos los secaderos, se precisa purificar el aire que se descarga y recuperar el producto que arrastra. A este fin, se em-

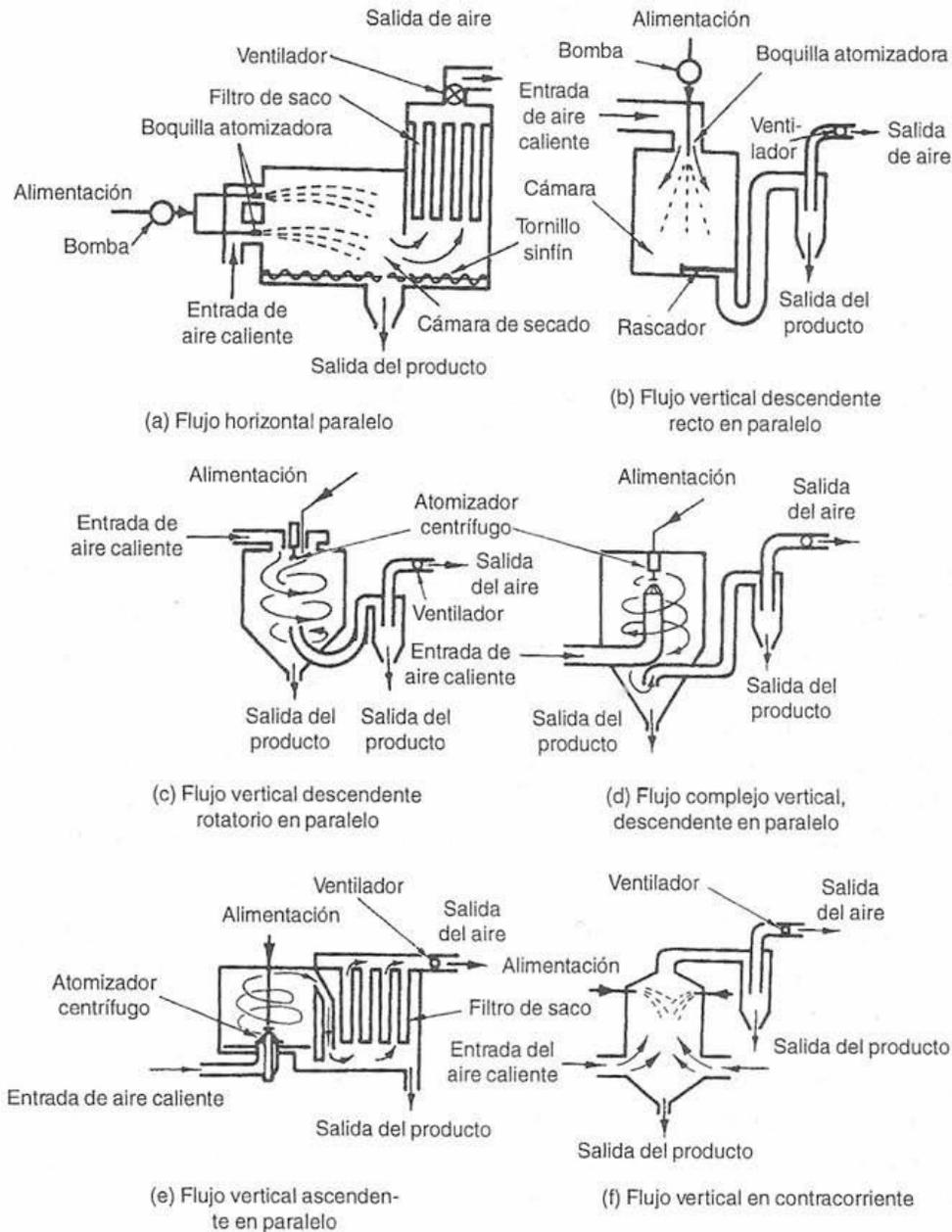


FIG. 13.20 Representación esquemática de diversos sistemas de secado por atomización.

plean comúnmente cuatro métodos, los *separadores de ciclón seco*, los *depuradores húmedos*, los *filtros de tela* y los *precipitadores electrostáticos*.

El principio en que se basa el *separador de ciclón* es el mismo que el del separador de arrastre centrífugo (Sección 12.7.3, Figura 12.7). Los ciclones grandes, por ejemplo, de 3 m de diámetro, se suelen usar solos, o en parejas (montados en serie). En su lugar, pueden emplearse bancos de ciclones más

pequeños, montados en paralelo. Para separar productos ligeros de pequeño tamaño de partícula, por ejemplo, de diámetro inferior a 50 μm , son más eficaces los últimos. La recuperación que puede alcanzarse con los ciclones es, generalmente, del 90-97%. Los ciclones son de fácil operación y mantenimiento.

El principio en que se basa el *purificador húmedo* consiste en hacer pasar el aire extraído de la cámara de secado por un recipiente en el que se lava con un líquido, que suele ser el propio líquido que constituye la corriente de alimentación del atomizador. En algunas fábricas, este sistema no sólo se emplea para lavar y purificar el aire, sino también para precalentar o preconcentrar el líquido de alimentación, con lo que mejora la eficacia general del sistema. Entre los principales inconvenientes de los purificadores húmedos, se encuentran la dificultad de controlar el crecimiento microbiano y la posibilidad de que la recirculación del producto conduzca a su deterioro por el calor. La recuperación, por este método, suele ser del orden del 95-98%.

Otra técnica empleada para la limpieza del aire y la recuperación del producto consiste en hacer pasar la corriente de descarga del aire a través de *filtros de tela*. Estos filtros pueden ser tubulares o planos y necesitan ser sacudidos mecánicamente a intervalos, para que se desprenda el producto retenido. Los filtros de tela pueden ocluirse cuando se interrumpe su operación, si no se controlan cuidadosamente la temperatura y humedad de su entorno. La recuperación que permiten es similar a la de los purificadores húmedos.

En los *precipitadores electrostáticos*, el aire cargado de polvo fluye a un campo eléctrico establecido entre electrodos de descarga y placas conectadas a tierra. Las placas se montan en serie y los electrodos se colocan suspendidos entre ellas. Los iones de aire que descargan los electrodos se combinan con las partículas de polvo, que adquieren una carga negativa y se desplazan hacia las placas conectadas a tierra; al contacto con ellos, pierden su carga. Se desprenden de las placas por la acción de un mecanismo que las golpea repetidamente. El polvo cae a una tolva. Estos precipitadores son eficaces con partículas de muy diversos tamaños y dan índices de recuperación de hasta el 99%. No se usan mucho en la industria alimentaria.

En algunos secaderos, se emplea en la recuperación del producto una combinación de métodos, por ejemplo, ciclones seguidos de filtros de tela.

No es infrecuente que los líquidos se sequen en varias etapas, por ejemplo, primero en un atomizador y luego en uno o varios secaderos secundarios; con frecuencia, secaderos de lecho fluidizado vibratorio. Parece que esto permite controlar mejor la calidad del producto y que, con ello, se logra mejorar la eficacia térmica que se obtiene utilizando sólo el secadero atomizador. Existe un diseño de secadero atomizador que lleva incorporado un lecho fluidizado, de manera que, en una misma unidad, se puedan llevar a cabo dos etapas de secado.^{17,25,27} También existen sistemas que permiten el secado por atomización en condiciones asépticas (se usan principalmente en la industria farma-

céutica), así como secadores de ciclo cerrado, usados principalmente en la industria química.^{25,26,28}

Los secaderos atomizadores se emplean mucho en la industria alimentaria. Como ejemplo de productos secados por atomización, pueden citarse la leche (desnatada y entera), el suero, las mezclas para fabricar helados, el queso, los alimentos infantiles basados en la leche, los blanqueadores del café y el té, los huevos (claras, yemas y claras y yemas juntas), los zumos de frutas y verduras, las proteínas para uso alimentario, los extractos de carne y de levaduras y los productos derivados del trigo y otros cereales.^{19,20,25,27}

13.4 SECADO POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE

13.4.1 PRINCIPIOS GENERALES

Se puede eliminar el agua de un producto poniéndolo en contacto con una superficie caliente. En estos sistemas, el calor sensible y el calor latente de vaporización se aportan por conducción. El curso del secado es, en estos sistemas, similar al de la desecación por aire caliente, en cuanto que tiene lugar en dos fases. Durante la etapa inicial, a velocidad constante, la temperatura del producto se aproxima a la de su punto de ebullición a la presión de trabajo. Las velocidades de secado, durante este período, son mayores que las que se consiguen en el secado con aire a la misma temperatura que la superficie caliente. Cuando la velocidad a que el líquido se desplaza hacia la superficie de evaporación es menor que la velocidad a que esta transcurre, se inicia el período de velocidad decreciente y la temperatura del producto se eleva, acercándose a la de la superficie caliente. Si el secado se realiza a presión atmosférica, durante la fase inicial la temperatura del producto supera los 100°C. Al objeto de lograr tiempos de secado razonables, y contenidos de agua bajos, la temperatura de la superficie caliente tiene que ser bastante superior a 100°C, por lo que la temperatura del producto se eleva excesivamente hacia el final del secado, lo que puede perjudicar a la calidad de los alimentos termosensibles. Para reducir este riesgo, es frecuente efectuar el secado por contacto a presión reducida, para que puedan emplearse temperaturas más bajas en la superficie y en el producto.

Suponiendo que el secado tiene lugar por una sola cara, y que es despreciable la disminución de volumen por contracción, la velocidad de secado global, en un ciclo completo, puede expresarse así:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(W_o - W_f)M}{t} = \frac{K_c A(\theta_w - \theta_e)}{L} \quad (13.19)$$

donde dw/dt = velocidad de pérdida de peso; W_o = contenido en agua inicial (DWB); W_f = contenido en agua final (DWB); M = masa del extracto seco; t = temperatura de secado; A = área de la superficie de secado; θ_w = temperatura de la superficie calentada; θ_e = temperatura de la superficie de evaporación; K_c = coeficiente global de transmisión de calor (teniendo en cuenta la reducción de $(\theta_w - \theta_e)$, a medida que transcurre el secado).

13.4.2 EQUIPO PARA EL SECADO POR CONTACTO DIRECTO

13.4.2.1 Secadero de tambor, de rodillos o de película

Este tipo de secaderos consta esencialmente de uno o más cilindros metálicos, huecos, que giran sobre ejes horizontales y son internamente calentados con vapor, agua u otro medio líquido calefactor. Sobre la superficie del tambor, se aplica una película del producto líquido a secar, de espesor uniforme. El líquido se va secando durante el giro del tambor y el producto desecado se desprende de la superficie del tambor mediante una cuchilla fija, que se suele situar a una distancia de $1/2$ ó $3/4$ de revolución del punto de aplicación del alimento líquido. Los secaderos de tambor se clasifican normalmente en tres tipos: de *tambor único*, de *tambor doble* y de *tambores gemelos*, cuyas características se indican en la Figura 13.21. Los tambores tienen que ser cuidadosamente fabricados para que su forma sea perfectamente cilíndrica. Las cuchillas rascadoras tienen que estar muy afiladas y deben contactar uniformemente con la superficie del tambor, en toda su longitud, para lo que tienen tornillos de ajuste.

Para que el funcionamiento sea correcto, es esencial, que la película de líquido de alimentación que se aplica a la superficie del tambor sea del espesor más uniforme posible. Los tambores únicos se alimentan de diverso modo; unas veces, utilizando depósitos auxiliares de alimentación, en los que se impregna de líquido la superficie del tambor, ligeramente sumergida; otras, utilizando dispositivos giratorios que rocían de líquido la superficie del tambor y cuchillas o rodillos para extenderlo formando una película uniforme; finalmente, otras, mediante rodillos de alimentación no calentados. En los secaderos de tambor doble, el alimento se deposita entre ambos cilindros.

Para el secado de productos sensibles al calor, pueden emplearse tambores encerrados en cámaras herméticas de vacío, que permiten secar a presiones inferiores a la atmosférica. La Figura 13.21 también muestra este tipo de secadero. Como medio de calentamiento, suele emplearse vapor de agua o agua caliente. El producto se descarga en colectores y desde el exterior de la cámara se realizan los ajustes de los alimentadores, las cuchillas rascadoras, etc. El costo de instalación de estos secaderos es relativamente elevado y, por ello, normalmente sólo se utilizan para secar productos muy sensibles al calor.

Los factores que afectan a la velocidad de secado y al contenido en agua final de un producto determinado, secado en un secadero de tambor, son: la

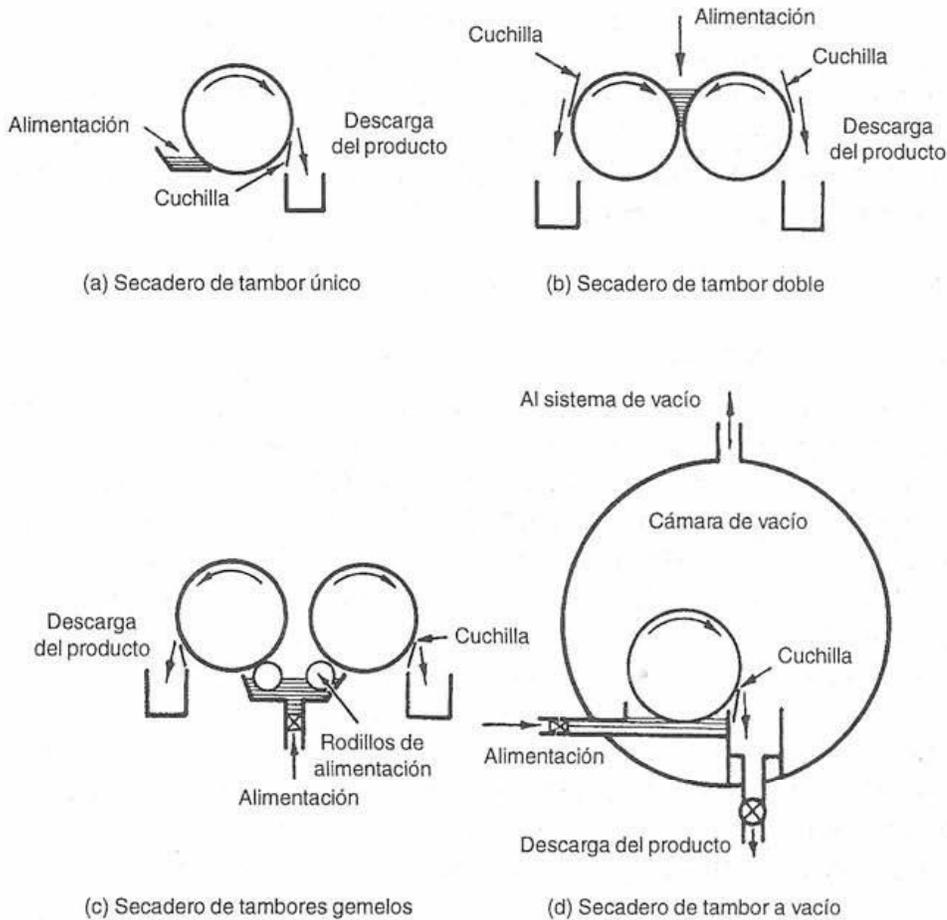


FIG. 13.21 Representación esquemática de diversos tipos de secaderos de tambor.

velocidad de rotación del cilindro (de la que depende el tiempo de residencia o contacto), la presión del vapor o la temperatura del medio de calentamiento y el grosor de la película. El último de los parámetros citados depende del mecanismo de alimentación utilizado, del contenido en sólidos del líquido a secar y de las propiedades reológicas y la tensión superficial del mismo.

Las ventajas del secado en tambores son sus altas velocidades de secado y una gran economía en el uso del calor. La principal limitación que tiene este método es que sólo puede aplicarse a alimentos líquidos, o en forma de papilla, capaces de resistir temperaturas relativamente altas durante tiempos cortos (2-30 s). Los secaderos de tambor se han empleado para secar leche, sopas, alimentos infantiles, purés de patata y cereales para el desayuno.^{17,19,20,29,30}

13.4.2.2 Secadero de armario a vacío

Se emplea para secar alimentos termosensibles, líquidos o sólidos, mediante la aplicación de calor por conducción. Está constituido por una cámara her-

métrica, de vacío, robusta, con una o más puertas de acceso y una salida para los vapores y los gases. El interior de la cámara está provisto de placas huecas horizontales y paralelas, por las que circula el medio de calentamiento. El alimento se extiende en capas uniformes y delgadas, sobre bandejas metálicas, que se colocan encima de las placas huecas. Seguidamente, se hace el vacío en la cámara, por el conducto de salida del vapor, para que el secado tenga lugar a presiones del orden de 1-70 torr ($0,134-9,43 \text{ kN m}^{-2}$). Las placas y las bandejas deben ser tan planas como sea posible, para asegurar un buen contacto térmico. Las velocidades iniciales de secado son altas pero, a medida que el producto se deseca y se retrae, el contacto con la bandeja va siendo progresivamente menos eficaz y disminuye la velocidad de transmisión de calor. La temperatura de las placas tiene que ser muy cuidadosamente controlada, para evitar el sobrecalentamiento de las porciones secas del producto que contactan con las bandejas. El costo de inversión en los secaderos de placas a vacío y su equipo auxiliar es alto; por ello, sólo se usan, normalmente, para secar alimentos muy sensibles al calor, como concentrados de zumos de frutas.

13.4.2.3 Secadero a vacío de cinta sinfín

Este secadero se utiliza principalmente para secar líquidos y papillas. El principio por el que este secadero opera se ilustra en la Figura 13.22. Consta de una cinta transportadora continua, de acero inoxidable, que se desplaza sobre un tambor de calentamiento y otro de enfriamiento, situados en el interior de una cámara de vacío. El líquido de alimentación se aplica por la parte inferior de la cinta transportadora y el calor se aporta, tanto por el tambor de calentamiento, como por calentadores radiantes. El producto seco se enfría al pasar la cinta sobre el tambor enfriado y se desprende con una cuchilla rascadora. Las cintas de algunos secaderos de tambor están constituidas por placas de acero

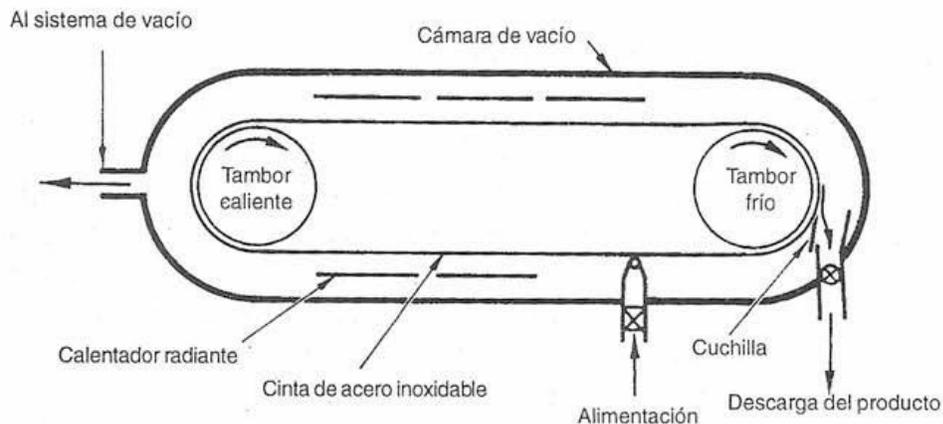


FIG. 13.22 Esquema de un secadero a vacío de cinta sinfín.

inoxidable. Pueden utilizar otras fuentes de calor, como serpentines o placas calentados por vapor. Se usan para secar concentrados de zumos de frutas, concentrados de extractos de café, bebidas malteadas y yema y clara de huevo.^{11,12,17,30}

13.5 SECADO POR APLICACIÓN DE ENERGÍA DE UNA FUENTE RADIANTE, DE MICROONDAS O DIELECTRICA

13.5.1 CALENTAMIENTO RADIANTE

Ha sido poco utilizado para el secado de los alimentos. Las características del calentamiento radiante y los métodos de generación de esta radiación fueron expuestos en el Capítulo 10, Sección 10.4.3.1. Las ecuaciones básicas que rigen la transmisión de calor por radiación figuran en el Apéndice II.

El calor radiante coparticipa en el aporte del calor sensible y del calor latente de vaporización, tanto en el secado por aire caliente, como en el que tiene lugar por contacto directo. Si tomamos como ejemplo el secadero de armario, el alimento recibe calor radiante de las paredes de la cámara, de las bandejas y de otras partes metálicas de la cabina.

La aplicación del calor radiante, como fuente principal de calor para secar los alimentos, se ve limitada por su reducida capacidad de penetración, salvo a determinadas longitudes de onda. La naturaleza heterogénea de los alimentos, tanto en lo que se refiere a su superficie, como a sus características de absorción, puede dar lugar a un calentamiento no uniforme y, en consecuencia, a que tampoco lo sea el secado. Para evitar el sobrecalentamiento, se necesita controlar cuidadosamente las fuentes de alta temperatura. Por otra parte, los calentadores radiantes no adolecen de los inconvenientes propios de la mayor parte de las fuentes de conducción, como las deficiencias del contacto y la lenta respuesta a los cambios de temperatura.¹⁷

13.5.1.1 Secadero continuo de infrarrojos

Este secadero se ha usado algo en el secado de alimentos. En los secaderos de este tipo, el producto alimenticio es transportado sobre una cinta continua, o soporte vibratorio, bajo fuentes de radiación infrarroja, durante los tiempos de secado necesarios. Las fuentes usadas para calentar alimentos termosensibles suelen ser lámparas de onda corta; con los productos menos sensibles, pueden usarse generadores de barra de onda larga. Entre las aplicaciones indicadas por los fabricantes se hallan el secado de trozos de pan, almidones, natillas, mezclas para elaborar tartas, té, almendras y especias.

El secadero a vacío de banda sinfín, descrito en la Sección 13.4.2.3, también emplea el calentamiento radiante.

13.5.2 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS Y DIELECTRICO

Hasta ahora, apenas se ha usado industrialmente en el secado de alimentos. En el Capítulo 10, Secciones 10.4.3.2 y 10.4.3.3, se exponen las características de este tipo de calentamiento y de los generadores. En el estado actual de desarrollo, este tipo de calentamiento parece resultar antieconómico para eliminar grandes masas de agua y, sin embargo, algunas de las operaciones en que se emplean son esencialmente procesos de secado. Como ejemplos, pueden citarse el secado de barras de pan pobres en almidón, en hornos dieléctricos de 35 MHz, así como el acabado de galletas. Hasta la fecha, el calentamiento dieléctrico parece tener más aplicaciones industriales que las microondas, debido principalmente a la relativa simplicidad del equipo existente. Los sistemas de microondas pueden parecer potencialmente mejores, debido a que se disipa más energía en forma de calor en los alimentos y a la mayor potencia de los generadores. En algunos trabajos recientes sobre la aplicación del calentamiento con microondas al secado en vacío, se han obtenido resultados prometedores.^{17,31,32}

Se ha publicado la existencia de una planta completamente automatizada para el tratamiento y la deshidratación parcial de cereales, por microondas.

13.6 LIOFILIZACIÓN

13.6.1 PRINCIPIOS GENERALES

En este método de secado, el producto se deshidrata congelándolo primero y sublimando después el hielo. La sublimación logra un gradiente de presión de vapor entre el entorno inmediato al producto y el frente de hielo del interior del mismo. El secado tiene lugar en tres fases. Inicialmente, mediante la congelación, se separa el agua de los componentes hidratados del producto, por la formación de cristales de hielo o mezclas eutécticas. La subsiguiente sublimación de estos cristales elimina el agua del seno del producto. Cuando se ha sublimado todo el hielo, los sólidos remanentes todavía retienen una pequeña cantidad de agua absorbida en el interior de la estructura de sus componentes. Este agua residual se puede eliminar por evaporación en el propio equipo de liofilización, cosa que normalmente se hace elevando la temperatura del producto, o bien «acabando» el secado en otro tipo de secadero.

La eliminación de la mayor parte del agua por sublimación rinde un producto ligero, de estructura porosa, que conserva el tamaño y la forma del producto original. Muchos de los inconvenientes propios de otros métodos de secado, expuestos en la Sección 13.3.2 son superados o reducidos al mínimo, en la liofilización. En la liofilización, la retracción es prácticamente despreciable, el movimiento de solutos limitado y el daño por el calor mínimo. Los alimentos liofilizados se reconstituyen rápidamente y, en gran medida, tam-

bién es alta la retención de los compuestos volátiles responsables del flavor. Por otra parte, la estructura celular puede quedar dañada durante la congelación, perjudicando la textura del producto reconstituido; el producto seco es muy quebradizo y susceptible a los daños mecánicos.

En los sistemas de liofilización más convencionales, el gradiente de presión de vapor necesario para la sublimación se alcanza manteniendo baja la presión total de la cámara de secado, a valores del orden de 0,1-2,0 torr (13,5-270,0 N m⁻²). El liofilizador dispone además de un sistema de condensación, para eliminar el vapor de agua formado, y de otro de calentamiento, para aportar al producto congelado el calor latente de sublimación necesario. En la Figura 13.23, se muestra un equipo de este tipo. Los dos factores que más afectan a la velocidad de secado son la velocidad de movimiento del vapor de agua desde la superficie del hielo, a través de la capa porosa de producto seco, y la velocidad de transmisión de calor hacia el frente de hielo.

El movimiento del vapor de agua a través de la capa porosa de producto seco ha sido estudiado por diferentes autores.^{6,11,34-37} Karel⁶ usa una ecuación general para representar la velocidad de flujo del vapor a través de la capa sólida:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{Ab(p_i - p_D)}{l} \quad (13.20)$$

en la que dw/dt = velocidad de flujo másico del vapor a través de la capa seca, A = área de secado, perpendicular a la dirección del flujo del vapor, b = permeabilidad de la capa seca, p_i = presión de vapor del hielo, a la temperatura de que se trate, p_D = presión parcial del vapor de agua en la superficie de la capa seca y l = espesor de la capa seca.

Para conseguir la máxima velocidad de secado, la temperatura del hielo debe ser la más alta de las que no perjudiquen a la calidad del producto. A menos que se aporte al hielo el calor de sublimación a una velocidad suficiente, su temperatura descenderá y, por tanto, también la velocidad de secado. En aquellos sistemas en los que el calor se transfiere al hielo sólo a través de la capa seca, y en los que la desecación tiene solo lugar a partir de la superficie calentada (como sucedería, teóricamente, si en la Figura 13.23 se interrumpiese el aporte de calor por la placa inferior), la velocidad de aporte de calor, dQ/dt , viene dada por la ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{k_D A (\theta_D - \theta_i)}{l} \quad (13.21)$$

en la que k_D = conductividad térmica de la capa seca; θ_D = temperatura de la superficie seca y θ_i = temperatura de la superficie de hielo.

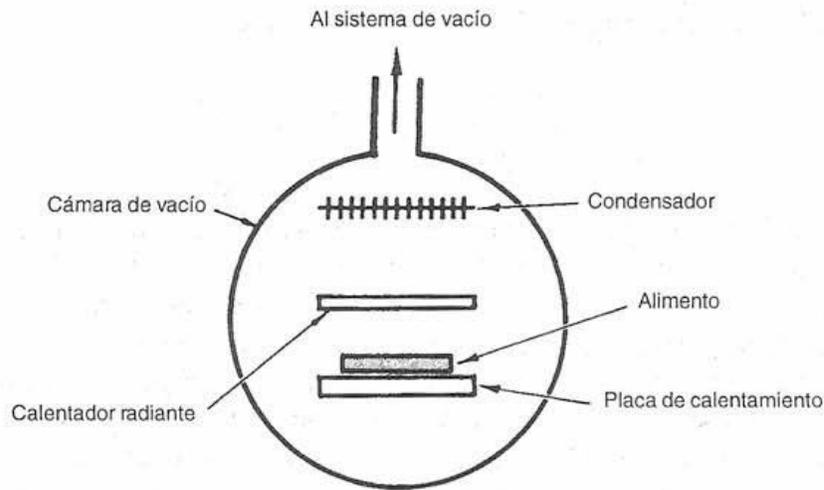


FIG. 13.23 Elementos básicos de un sistema de liofilización.

El balance de energía, combinando las ecuaciones (13.20) y (13.21) es:

$$\frac{k_D A (\theta_D - \theta_i)}{l} = - \frac{L_s A b (p_i - p_D)}{l} \quad (13.22)$$

donde L_s = calor latente de sublimación a θ_i .

Nótese que l se anula y, por tanto, la relación es independiente de la extensión del secado. Si la temperatura de la superficie seca y la presión de la cámara se fijan, se fijará también la temperatura de la superficie de hielo (ya que θ_i y p_i están termodinámicamente relacionadas).

Supóngase que un sólido aplanado se liofiliza por una o de las caras mayores; que el contenido en agua de la capa seca formada es W_e , en términos de peso seco, y que el frente de hielo retrocede formando un plano uniforme. La velocidad de secado, dw/dt , puede, en este caso, describirse mediante la ecuación:

$$\frac{dw}{dt} = A \rho_m (W_0 - W_e) \frac{dl}{dt} \quad (13.23)$$

en la que ρ_m = densidad del sólido desecado y W_0 = contenido inicial en agua del producto, en términos de peso seco.

A partir de las ecuaciones (13.22) y (13.23), puede deducirse la relación:

$$\frac{dw}{dt} = - \frac{A k_D (\theta_D - \theta_i)}{L_s l} = \frac{A b (p_i - p_D)}{l} = A \rho_m (W_0 - W_e) \frac{dl}{dt} \quad (13.24)$$

Integrando entre los límites: $t = 0$, $l = 0$, $t = t_i$ y $l = l_i$:

$$t_i = \frac{\rho_m(W_0 - W_e) l_i^2}{b(p_i - p_D) 2} = \frac{L_s \rho_m(W_0 - W_e) l_i^2}{k_D(\theta_D - \theta_i) 2} \quad (13.25)$$

donde t_i = tiempo total de secado a W_e y l_i = espesor total de la pieza, para el secado por una cara, y a la mitad del espesor de la pieza, para el secado por ambas caras. Nótese que t_i es proporcional a l_i^2 y que, por tanto, el secado se prolonga en las piezas gruesas. Tanto la permeabilidad, como la conductividad térmica, de la capa seca son dependientes de la presión y de la naturaleza de los gases presentes en los poros. Karel⁶ cita algunos valores de estas propiedades para la carne, el pescado, el café y las manzanas; también ofrece expresiones que relacionan la temperatura de la placa calefactora y la de la superficie seca, y discute la situación cuando el calor se transmite por conducción, a través de la capa de hielo, hacia la superficie que se sublima.

16.6.2 EQUIPO PARA LA LIOFILIZACIÓN

13.6.2.1 Etapa de congelación

En condiciones ideales, para una liofilización correcta, debería congelarse todo el líquido presente en el alimento. Sin embargo, en la práctica, esto no es posible y, siempre que la cantidad de líquido no congelado sea pequeña, la calidad del producto no se ve seriamente afectada.³⁸

La velocidad de congelación óptima para la liofilización depende, en gran parte, de la naturaleza del producto. La velocidad de congelación afecta al tamaño de los cristales de hielo y, por tanto, al tamaño de poro del producto seco, siendo de esperar, en consecuencia, que influya sobre la velocidad de desecación y las características del producto, sobre todo en su rehidratabilidad. Las velocidades óptimas de congelación tienen que determinarse experimentalmente. La congelación puede realizarse por cualquiera de los métodos expuestos en el Capítulo 14.

13.6.2.2 Liofilizadores discontinuos

Los componentes esenciales de un liofilizador discontinuo son una cámara de vacío, un sistema de producción de vacío y otro de calentamiento. Las cámaras de liofilización son esencialmente similares a los secaderos a vacío, de placas, descritos en la Sección 13.4.2.2. Las partes que contactan directamente con los alimentos suelen ser de acero inoxidable; las restantes superficies internas están adecuadamente revestidas.

El *sistema de vacío* tiene que ser capaz de evacuar inicialmente la cámara en un corto período de tiempo, para evitar la fusión del producto congelado. En la práctica, esto viene a significar que la presión de la cámara debe reducir-

se a un valor entre 5 y 1 torr (675 y 135 N m^{-2}) en menos de 10 minutos. Seguidamente, la presión de la cámara tiene que reducirse al valor deseado para el secado, normalmente a menos de 1 torr (135 N m^{-2}) y mantenerse en él durante toda la liofilización. El sistema de vacío tiene que extraer el vapor de agua producido durante la sublimación, los gases liberados del alimento y el aire que penetre en la cámara, a través de las fugas. Normalmente, para la evacuación inicial se emplea un tipo de bomba muy potente («bomba para el vacío preliminar»), y luego otras de menor capacidad, para mantener el vacío durante la desecación.

Para producir y mantener el vacío de la cámara, suelen usarse industrialmente condensadores refrigerados, provistos de un sistema de bombeo mecánico. La mayor parte del vapor de agua se condensa en forma de hielo (escarcha), sobre placas o serpentines refrigerados, utilizándose las bombas para eliminar los gases no condensables y el vapor residual. La colocación de dos o más condensadores en cámaras separadas (trampas), conectadas a la cámara de secado a través de compuertas o válvulas deslizables, facilita el desescarchado durante la operación del liofilizador. En lugar de sistemas condensador-bomba, pueden emplearse eyectores de vapor de múltiples etapas, pero son menos eficaces a presiones bajas de la cámara.

El calor puede aportarse al producto congelado por conducción o radiación. Las instalaciones más modernas utilizan ambos mecanismos. Las bandejas con el alimento congelado se sitúan entre las placas calientes, a una distancia fija, mayor que el grosor de la placa cargada con el alimento. El calor se transmite al alimento por conducción, desde abajo, y por radiación, desde la placa situada encima, hasta la superficie del alimento. Un buen diseño de placas y bandejas facilita una transmisión rápida. Para este fin, también se ha estudiado el calentamiento por microondas, con resultados prometedores.¹⁷

Un liofilizador discontinuo típico tiene una capacidad de unos 410 kg y un ciclo de secado de 7-8 horas, en la mayor parte de los casos.

13.6.2.3 Unidades de múltiples cámaras

Se usan mucho para liofilizar alimentos a gran escala: su capacidad de producción es del orden de $5.080 \text{ kg día}^{-1}$. Una unidad típica consta de cuatro cámaras, dotadas de sus propias placas calentadoras, pero conectadas a dos distribuidores de vacío; uno de ellos para la evacuación inicial y el otro para mantener la presión adecuada durante la desecación. Las cámaras se cargan secuencialmente, a intervalos adecuados, que dependen del alimento; normalmente cada 2-3 horas. El sistema de vacío se controla de forma que se mantenga constante la presión adecuada en todas las cámaras.

13.6.2.4 Liofilizador de túnel

Existen túneles de liofilización para producciones mayores. Constan de un túnel cilíndrico, de unos 1,8-2,4 m de diámetro, provisto de placas calefactoras

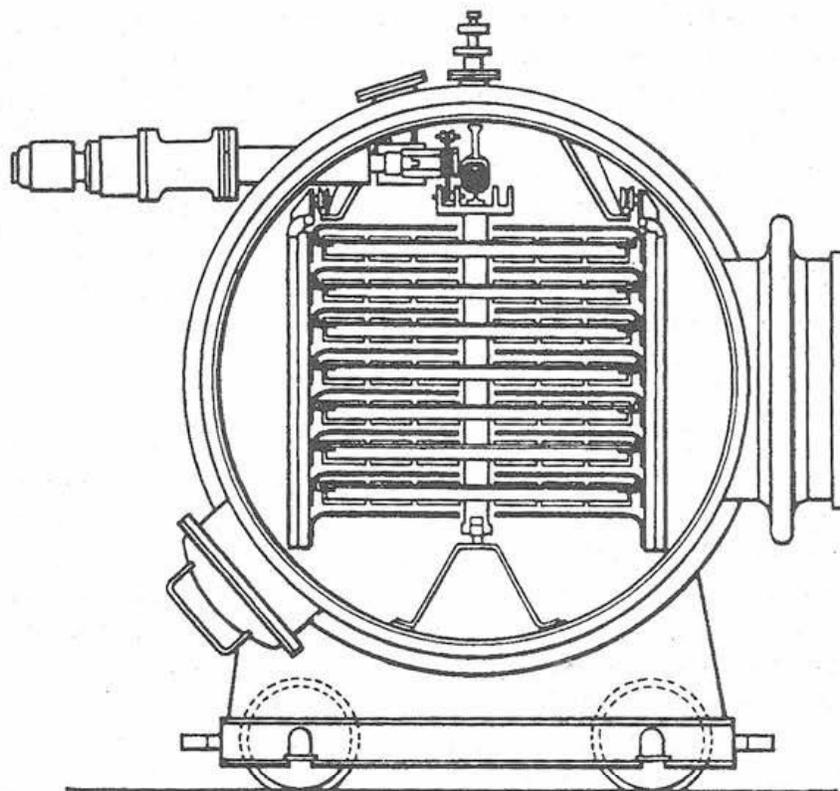


FIG. 13.24 Sección transversal típica de un túnel de liofilización. (Reproducido de *Freeze-drying of Foodstuffs*³⁸, cortesía de Columbine Press (Publishers) Ltd.).

situadas a distancias fijas. Las bandejas, con el alimento, son transportadas sobre una vagoneta que rueda sobre raíles colocados en el suelo o que va suspendida de un raíl elevado, de forma que las bandejas pasen intercaladas entre las placas calefactoras (Fig. 13.24). En algunas unidades, se pueden bajar las bandejas hasta contactar directamente con las placas calefactoras. La longitud del túnel depende, en gran parte, de la capacidad de producción deseada y, generalmente, consta de diversas secciones estándar. El túnel, en su conjunto, se halla equipado de antecámaras herméticas de carga y descarga, situadas en los extremos del mismo. Las cargas se introducen en el túnel, a intervalos adecuados, por la antecámara de entrada (de carga). La antecámara se evacúa rápidamente después de cada carga. Cuando la carga pasa de la antecámara de entrada al túnel propiamente dicho, una compuerta que se desliza a presión cierra la antecámara, en la que puede ya romperse el vacío para admitir la carga siguiente. El producto liofilizado se descarga, de forma similar, por la otra antecámara, en la que el vacío se puede romper admitiendo un gas inerte.

Para que la operación sea eficaz, los sistemas de vacío y de calentamiento tienen que estar diseñados de acuerdo con la carga de las diferentes secciones

del túnel. Tanto la carga calórica como la carga de vapor disminuyen a medida que avanza el secado. En la bibliografía, se han descrito otros diseños de liofilizadores continuos, en los que las partículas de sólidos son transportadas a lo largo de la cámara de vacío, impulsados por tornillos sinfín, cintas o plataformas vibratorias. También se ha descrito un atomizador-liofilizador.

Debido al alto costo de instalación y mantenimiento y a las rígidas exigencias del envasado, la liofilización resulta un método de conservación muy caro. Entre las aplicaciones industriales de la liofilización figuran la deshidratación de extractos de café y té, carne y pescados (gambas, langostinos) y de algunos derivados de frutas y hortalizas.^{6,11,17,34-36,39}

13.7 REHIDRATABILIDAD DE LOS ALIMENTOS DESECADOS

La rehidratabilidad, o aptitud para la reconstitución, son términos que se refieren a la velocidad y el grado en que los alimentos desecados captan y absorben agua y readquieren propiedades parecidas a las del producto original, cuando se ponen en contacto con un exceso de agua.

13.7.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RECONSTITUCIÓN

La rehidratabilidad de los alimentos que han sido troceados antes del secado, como las hortalizas cortadas en rodajas o en cubos y los trozos de carne, depende, en gran parte, de la estructura de las piezas secas y del grado en que los componentes que retienen el agua, principalmente las proteínas y el almidón, se hayan visto afectados por el secado. Por ejemplo, la velocidad con que se reconstituyen las hortalizas deshidratadas por aire puede depender de la velocidad inicial de secado (véase la Sección 13.2.3.2). Los alimentos liofilizados suelen reconstituirse rápidamente, debido a su estructura porosa, que es una de las características de los productos así deshidratados (véase la Sección 13.3.4). Por otra parte, el excesivo daño térmico durante el secado, o el causado por la congelación, en el caso de los alimentos liofilizados, puede reducir la capacidad de retención de agua del producto reconstituido, lo que se traduce en un aspecto y una textura deficientes.

En el caso de los productos secos en polvo, las características globales de la reconstitución dependen de diversas propiedades, entre las que cabe citar:

Humectabilidad. Este término se refiere a la capacidad de las partículas de polvo para adsorber agua sobre su superficie, iniciando, de esta forma, la reconstitución. Esta propiedad depende, en gran medida, del tamaño de partícula. Las partículas pequeñas, que ofrecen una gran relación área/masa, no se humedecen individualmente, sino que forman grumos dentro de una capa superficial mojada común. Esta capa reduce la velocidad con que el agua penetra hacia el interior de las partículas del grumo. Incrementando el tamaño de

partículas y/o aglomerándolas, puede reducirse la tendencia a la formación de grumos. La naturaleza de la superficie de las partículas puede influir también en su humectabilidad. Por ejemplo, la presencia de grasa libre en la superficie reduce la humectabilidad. La humectabilidad de los polvos secos que contienen grasa puede mejorarse, a veces, mediante el uso selectivo de agentes con actividad de superficie, como las lecitinas.

Sumergibilidad. Hace referencia a la capacidad de las partículas de polvo de hundirse rápidamente en el agua. Depende principalmente del tamaño y de la densidad de las partículas. Las partículas mayores y más densas se sumergen con mayor rapidez que las finas y más ligeras. Las partículas que contienen mucho aire atrapado pueden ser relativamente grandes y ofrecer, sin embargo, una difícil sumergibilidad, debido a su baja densidad.

Dispersabilidad. Este término se refiere a la facilidad con que el polvo se puede distribuir en forma de partículas individuales sobre la superficie y en el seno del agua de reconstitución. La formación de grumos reduce la dispersabilidad, propiedad que mejora cuando la sumergibilidad es alta.

Solubilidad. Hace referencia a la velocidad y al grado en que los componentes de las partículas de polvo se disuelven en el agua. Depende principalmente de la composición química del polvo y de su estado físico; por ejemplo, del grado y tipo de cristalinidad.

Para que un polvo exhiba buenas características de reconstitución, es decir, para que sea un polvo de los llamados «instantáneos», se requiere un equilibrio apropiado entre las diversas propiedades antes expuestas. En muchos casos, la modificación de una o dos de esas propiedades puede afectar considerablemente al comportamiento del polvo durante su reconstitución. Además de su influencia sobre la reconstitución de los productos en polvo, algunas propiedades, como el tamaño y la densidad de partícula y la densidad a granel, pueden afectar al aspecto y al comportamiento de los productos durante su manipulación.

13.7.2 PROCEDIMIENTOS PARA MEJORAR LA RECONSTITUCIÓN

13.7.2.1 Ajuste de las condiciones de secado

Las modificaciones del líquido de alimentación (contenido en sólidos, viscosidad, temperatura), de las condiciones de la atomización (tipo de atomizador; presión, o velocidad) y de las propiedades del aire utilizado para el secado (temperaturas de entrada y salida) pueden modificar el tamaño de partícula, su densidad y la densidad a granel del producto. Ajustando las condiciones de secado puede, en ocasiones, mejorarse la reconstitución del producto seco. También puede contribuir a ello la introducción de etapas adicionales en el proceso, como, por ejemplo, la inclusión de fases de recristalización en el secado del suero lácteo por atomización.

13.7.2.2 Reciclado de finos

Las partículas finas producidas en los secaderos atomizadores pueden ser recicladas a la zona húmeda de la cámara de desecación, en la proximidad del atomizador. Las partículas desecadas que salen de la cámara se enfrían sobre un enfriador vibratorio de lecho fluidizado. Las partículas finas enfriadas se reciclan, junto con las arrastradas por el aire que sale de la cámara de desecación, y forman aglomerados con el producto nebulizado. De esta forma, se eliminan los finos y se mejoran la humectabilidad y la dispersabilidad.

13.7.2.3 Instantaneizador

El producto sale de la cámara de secado con un contenido de humedad relativamente alto, del 6-8% (WWB). En este estado, las partículas pueden ser termoplásticas y pegajosas y formar aglomerados. Los aglomerados que salen de la cámara, con un diámetro de 300-400 μm , se secan aún más y se enfrían, en una unidad de lecho fluidizado vibratorio de dos fases. Los finos también se reciclan a la cámara de secado.

13.7.2.4 Rehumidificación

Probablemente sea este el método más eficaz y más usado para mejorar la reconstitución de los productos secos, en polvo. Los productos en polvo obtenidos por atomización en una planta convencional se tratan con vapor o con

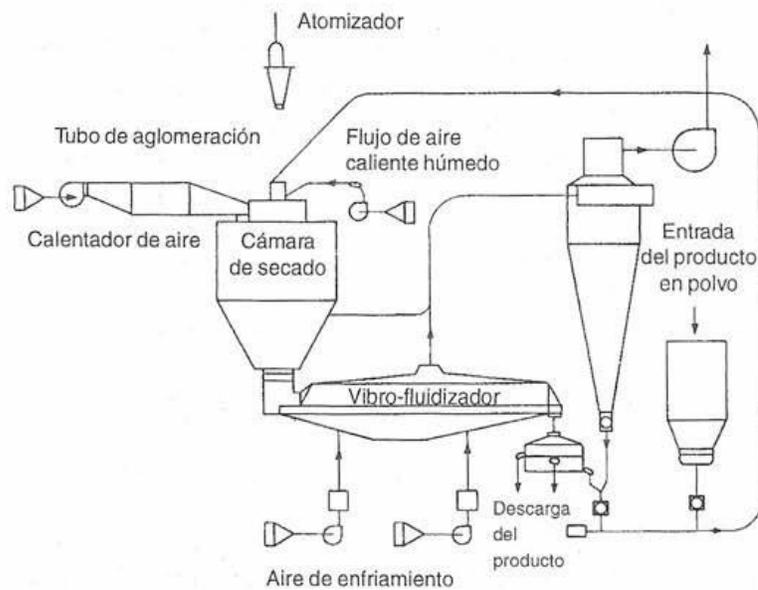


FIG. 13.25 Instantaneizador Rewet. (Reproducido de *Spray Drying Handbook*,²⁵ por cortesía del autor).

aire húmedo caliente, de forma que se condense vapor de agua sobre la superficie de las partículas. Luego, se promueve el contacto entre las partículas, proporcionando frecuentemente al polvo humedecido un movimiento en remolino. Así, se forman los aglomerados. Los aglomerados se secan en una cámara y se enfrían en un lecho fluidizado vibratorio. Las partículas finas del lecho y de la cámara se reciclan a la zona de aglomeración. Este procedimiento se conoce como aglomeración superficial. Otro procedimiento, denominado aglomeración de gotículas, consiste en poner en contacto el polvo con una fina niebla de agua, o de una disolución de alguno, o de todos, los componentes del polvo. La niebla puede producirse con una boquilla nebulizadora de chorro o con un atomizador centrífugo (véase Fig. 13.25). Los aglomerados resultantes se secan y se enfrían como en la aglomeración superficial.

La aglomeración aumenta el aire intersticial atrapado entre las partículas. Durante la reconstitución, este aire es sustituido rápidamente por agua, con lo que se acelera la humectabilidad y dispersabilidad de las partículas.^{25,40,41}

BIBLIOGRAFÍA

1. Iglesias, H.A. and Chiriffe, J., *Handbook of Food Isotherms*. Academic Press, New York, 1982.
2. Brunauer, S., Emmett, P. H. and Teller, E., Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.*, **60** (1938) 309-19.
3. Chiriffe, F. and Iglesias, H. A., Equations for fitting sorption isotherms of foods. *J. Food Technol.*, **13** (1978) 159-74.
4. Jowitt, R., Escher, F., Hallstrom, B., Meffert, H. W., Spiess, W. E. L. and Vos, G., *Physical Properties of Foods*. Applied Science Publishers, London, 1983.
5. Labuza, T. P., The properties of water in relationship to water binding in foods. A review. *J. Food Process. Preserve.*, **1** (1977) 167-90.
6. Karel, M., Fundamentals of dehydration processes. In *Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods*, ed. A. Spicer. Applied Science Publishers, London, 1974, pp. 45-94.
7. Rockland, L. B. and Stewart, G. F. (ed), *Water Activity: Influences on Food Quality*. Academic Press, New York, 1981.
8. Duckworth, R. G. (ed.), *Water Relations in Foods*. Academic Press, New York, 1975.
9. Troller, J. A. and Christian, J. H. B., *Water Activity and Food* Academic Press, New York, 1978.
10. Green, D. W. (ed.), *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th edn. McGraw-Hill, New York, 1984.
11. Van Arsdel, W. B., Copley, M. J. and Morgan, A. I., Jr, (ed.), *Food Dehydration. Vol. 1: Drying Methods and Phenomena*. 2nd edn. AVI, Westport, Conn., USA, 1973.
12. Charm, S. E., *The Fundamentals of Food Engineering*, 3rd edn. AVI, Westport, Conn., USA, 1978.

13. Saravacos, G. D. and Charm, S. E., A study of the mechanisms of fruit and vegetable dehydration. *Food Technol., Champaign*, **16**(1) (1962) 78-81.
14. Jason, A. C., A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle. In *Conf. on the Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs, Aberdeen, March 1958*. SCI, London, 1958, pp. 103-34.
15. Gorling, P., Physical phenomena during the drying of foodstuffs. In *Conf. on the Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs, Aberdeen, March 1958*. SCI, London, 1958, pp. 42-53.
16. Crank, J., Some mathematical diffusion studies relevant to dehydration. In *Conf. on the Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs, Aberdeen, March 1958*. SCI, London, 1958, pp. 37-41.
17. Brennan, J. G., Dehydration of foods. In *Water and Food Quality*, ed. T. Hardman. Elsevier Applied Science Publishers, London, 1989.
18. Sturgeon, L. F., Conveyor driers. In *Handbook of Industrial Drying*, ed., A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 501-13.
19. Van Arsdel, W. B., Copley, M. J. and Morgan, Jr, A. I. (ed.), *Food Dehydration. Vol. II. Practices and Applications*, 2nd edn. AVI, Westport, Conn., USA, 1973.
20. Sokhansanj, S. and Jayas, D. S., Drying of foodstuffs. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 517-54.
21. Hovmand, S., Fluidized bed drying. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 165-225.
22. Kisakurek, B., Flashdrying. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 475-99.
23. Kerkhof, P. J. A. M. and Schoeber, W. J. A. H., Theoretical modelling of the drying behaviour of droplets in spray driers. In *Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods*, ed. A. Spicer. Applied Science Publishers, London, 1974, pp. 349-97.
24. Filkova, I. and Mujumdar, A. S., Industrial spray drying systems. In *Handbook of Industrial Drying*, ed., A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 243-93.
25. Masters, K., *Spray Drying Handbook*, 4th edn. George Godwin, London, 1985.
26. Kjaergaard, O. G., Effects of the latest developments on design and practice of spray drying. In *Advances in Reconcentration and Dehydration of Foods*, ed. A. Spicer. Applied Science Publishers, London, 1974, pp. 321-48.
27. Pisecky, J., Evaporation and spray drying in the dairy industry. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S., Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 571-603.
28. Brennan, J. G., Developments in food dehydration. *Process Chem. Engng.*, **31**(9) (1978) 11-12, 14, 16-17, 20, 24.
29. Moore, J. G., Drum dryers. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 227-42.
30. Williams-Gardner, A., *Industrial Drying*. George Godwin, London, 1976.
31. Meisel, N., Microwave heating in vacuum drying. In *Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods*, ed. A. Spicer. Applied Science Publishers, London, 1974.
32. Schiffmann, R. F., Microwave and dielectric drying. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 327-56.

33. Anón., Continuous drying microwaves. *Food Processing*, **54**(12) (1985) 13.
34. Mellor, J. D., Cyclic-pressure freeze-drying. In *Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods*, ed. A. Spicer. Applied Science Publishers, London, 1974, pp. 503-9.
35. Mellor, J. D., *Fundamentals of Freeze-Drying*. Academic Press, New York, 1978.
36. Judson King, C., *Freeze-Drying of Foods*. Butterworths, London, 1971.
37. Lorentzen, J., New directions in freeze drying. In *Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods*, ed. A. Spicer. Applied Science Publishers, London, 1974, pp. 413-33.
38. Cotson, S. and Smith, D. B. (ed.), *Freeze-Drying of Foodstuffs—A Symposium*. Columbine Press, Manchester, England, 1963.
39. Liapis, A. I., Freeze drying. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A. S. Mujumdar. Marcel Dekker, New York, 1987, pp. 295-326.
40. Jensen, J. D., Methods of instantizing powders for the preparation of food and drinks. *Manufacturing Confect.*, **53**(10) (1973) 47-56.
41. Jensen, J. D., Agglomerating, instantizing and spray drying. *Food Technol., Champaign*, **29**(6) (1975) 60-71.