

# CAPITULO 2

## SECADO

### INTRODUCCION

Operación que se estudia considerando las relaciones de equilibrio que se establecen cuando el material a secar se pone en contacto con el medio secante, y de las relaciones que expresan cuantitativamente la velocidad de transferencia del proceso.

Para algunos autores

El secado es un **fenómeno** caracterizado por la pérdida natural de humedad o agua de un alimento.

La deshidratación es una **operación** en la cual la pérdida de humedad se efectúa bajo condiciones específicas y controladas.

Para otros, es justamente lo contrario.

Aquí no se aplica tal distinción; ambos términos se usan de manera indistinta y con un significado análogo.

El secado es una de las operaciones más antiguas usadas para conservar alimentos que ha dado lugar a productos secos tradicionales como carnes, pescados, frutas, quesos.

En las últimas décadas "nuevos" productos llamados alimentos de

humedad intermedia han tenido un éxito notable como el café soluble y las formulaciones deshidratadas para la preparación de puré de papa.

El secado es una operación que interviene a nivel artesanal, agrícola e industrial.

El objetivo de esta unidad es saber cómo secamos y cuáles son los principios básicos que gobiernan la separación de agua de los alimentos húmedos.

Para ello la discusión se divide en varias secciones.

### Sección 2.1

Definición e importancia del secado como operación unitaria.

### Sección 2.2

Propiedades del alimento importantes para el secado.

Concepto de humedad de equilibrio y actividad de agua.

El secado como un proceso de separación por contacto en el equilibrio.

### Sección 2.3

Relaciones cuantitativas que rigen el secado.

### Sección 2.4

Características principales de los diferentes equipos de secado en la industria de alimentos.

### Sección 2.5

Análisis de la operación y algunos criterios de diseño de ciertos tipos específicos de secadores.

## 2.1 CONCEPTOS BASICOS

### 2.1.1 Definición de secado

El secado es una operación en la cual se elimina parcial o totalmente, por evaporación, el agua de un sólido o un líquido.

El producto final **es siempre** sólido lo cual diferencia el secado de la evaporación. En esta última, aunque hay eliminación de agua, se parte siempre de un líquido para obtener un concentrado líquido.

Aun cuando el objetivo principal no sea secar un alimento, el secado puede producirse cuando se efectúan otras operaciones de tratamiento o conservación.

Algunos ejemplos:

Cocción

Almacenamiento a temperatura ambiente

Conservación frigorífica

Congelación

Transporte neumático

Molienda

La mayoría de las "leyes" que rigen el secado son también válidas para otros procesos en los cuales se quiere eliminar por

evaporación una sustancia volátil de una mezcla.

Por ejemplo

Eliminación del disolvente de extracción de aceite de granos oleaginosos.

Sin embargo el término secado se emplea solamente cuando la sustancia volátil es agua.

En este último ejemplo lo que se desea es recuperar el disolvente antes de disponer de los desechos de la extracción.

### **2.1.2 Objetivos del secado**

Básicamente son:

- 1.- Conservación para prolongar vida de anaquel
- 2.- Reducción de peso y volumen para facilitar empaque y transporte
- 3.- Presentación de alternativas de consumo

Pueden producirse cambios no deseables que afectan tanto la calidad como la aceptación del producto.

### **2.1.3 Desventajas**

Se producen cambios y alteraciones no necesariamente deseables en:

La textura

El sabor

El color

La calidad nutritiva y la forma

Es una operación que consume mucha energía y eso aumenta el costo del producto terminado.

### **2.1.4 Materiales susceptibles de secarse**

El secado ocupa un lugar importante dentro de la cadena de transformación y conservación de productos agroalimentarios ya que se realiza sobre un gran número de alimentos.

#### **Productos agrícolas poco hidratados o húmedos**

Productos que pueden requerir, según las condiciones meteorológicas, un secado complementario para estabilizarlos o estandarizarlos antes de ser sometidos a un tratamiento industrial.

Maíz

Trigo

Otros cereales

Oleaginosas

#### **Productos agrícolas muy hidratados o húmedos**

Productos que deben secarse para estabilizarlos y facilitar su transporte.

Leche destinada al consumo humano y a la cría de becerros

Alfalfa

Planta de maíz destinada a alimentación animal

Legumbres para utilización industrial como:

Papa

Zanahoria

Cebolla

Espárrago

Jitomate

Hongos comestibles

Las especias o aromatizantes como:

Perejil

Ajo

Canela

Vainilla

Clavo para uso doméstico o industrial

Las frutas como:

Ciruela

Durazno

Uvas, etc.

Las carnes rojas y pescados para preparaciones deshidratadas y saladas o deshidratadas y ahumadas.

## **Productos de transformación industrial**

Productos que se secan para estabilizarlos o proporcionar diferentes presentaciones para el consumo.

Entre otros:

Extractos de té y café

Pastas alimenticias

Productos de salchichonería como jamones y salchichones secos

Quesos

Azúcar

Gluten

Caseína

Malta

## **Subproductos industriales**

Productos derivados de un proceso que se destinan generalmente al consumo animal.

Subproductos de la industria azucarera

Subproductos de la industria cervecera

Suero de leche subproducto de la industria de fabricación de queso

### **2.1.4 Formas de secado**

## Secado por ebullición

Cuando la presión de vapor del agua pura es igual a la presión barométrica local, el agua hierve y se evapora.

A una presión absoluta de 101.3 kPa el agua pura hierve a 100 °C.

Cuando se disuelven solutos en el agua, la presión de vapor de la solución resultante es inferior a la del agua pura y por lo tanto su punto de ebullición es superior al del agua pura para una misma presión barométrica.

La descripción cuantitativa de este fenómeno está dada por la Ley de Raoult

“La presión de vapor de un componente en una solución es igual a la fracción mol de aquél componente por su presión de vapor cuando está puro”

Para una solución de un soluto no volátil en agua

$$p_A = x_{H_2O} p_{H_2O}^* \quad (2.1)$$

$p_A$  = presión de vapor de la solución

$x_{H_2O}$  = fracción mol del disolvente, agua en este caso

$p_{H_2O}^*$  = presión de vapor del agua pura a la temperatura de la solución.

$$\text{Si } x_{H_2O} = 1 - x_b$$



La ecuación (2.1) se escribe

$$p_A = (1 - x_b) p_{H_2O}^*$$

$$(1 - x_b) = \frac{p_A}{p_{H_2O}^*}$$

$$(1 - x_b) = \frac{p_A}{p_{H_2O}^*}$$

$$x_b = 1 - \frac{p_A}{p_{H_2O}^*}$$

$$x_b = \frac{p_{H_2O}^* - p_A}{p_{H_2O}^*} \quad (2.2)$$

Esta ecuación muestra que

*La disminución relativa de la presión de vapor es igual a la fracción mol del soluto*

tal como se anticipó en el párrafo anterior.

La ebullición, esto es, la formación de burbujas de vapor de agua, es más difícil de observar en los sólidos y los materiales pastosos

que en los líquidos.

La cantidad de energía en forma de calor que se requiere para evaporar el agua está determinada por el calor latente de evaporación.

El aporte calórico puede efectuarse mediante los diferentes mecanismos de transferencia de calor:

**Conducción** entre una superficie caliente que está en contacto con el alimento

**Radiación** cuando existe generación interna de calor en el alimento debida a la exposición de éste a rayos infrarrojos, microondas o calentamiento dieléctrico

**Convección** entre el alimento y un medio de calentamiento como vapor de agua sobrecalentado o aceite caliente de fritura.

En todos los casos, es necesario llevar el alimento a la temperatura de ebullición del agua.

Esto no siempre es recomendable ya que no todos los alimentos pueden soportar altas temperaturas y éstas pueden ocasionar deterioro físico de los mismos.

**Secado por arrastre**

## En el exterior del alimento

Cuando un alimento húmedo se pone en contacto con una corriente de aire, o de cualquier otro gas, suficientemente caliente y seco, se establece *espontáneamente* entre ellos una diferencia de temperatura y una diferencia de presión parcial de agua.

Resultado: Transferencia simultánea de calor y masa entre el gas y el alimento.

La transferencia de calor ocurre desde el aire hacia el alimento ya que la temperatura del alimento es inferior a la del aire.

El mayor contenido de humedad en el alimento hace que la presión parcial de agua en él sea mayor que en el aire.

Resultado: Transferencia de masa desde el alimento hacia el aire.

El aire es a la vez fluido de calentamiento y medio de arrastre del agua evaporada del alimento.

## En el interior del alimento

Conforme el alimento pierde humedad se establecen en su interior diferencias de concentración.

Resultado: Transferencia de humedad hacia su superficie.  
Entonces existen dos mecanismos de transferencia de masa.

**Convección:** Entre la superficie del alimento y la corriente de aire.

**Difusión:** Desde el interior del alimento hacia su superficie.

En el secado por arrastre

La temperatura en la superficie del alimento es inferior a la temperatura de ebullición del agua a 101.3 kPa (100 °C).

Gran ventaja porque

No es necesario calentar el alimento a tales temperaturas secarlo.

Además en el secado por arrastre

La energía necesaria para la evaporación del agua es proporcionada por el aire caliente.

Por ello se dice que el secado por arrastre es

**Isoentálpico o adiabático.**

## **2.2 PROPIEDADES DEL ALIMENTO DE IMPORTANCIA PARA EL SECADO**

Ya sea que el secado se efectúe por ebullición o por arrastre

*La presión de vapor del agua contenida en el alimento es la que determina el intercambio de humedad entre éste y el aire.*

Lo mismo ocurre siempre en cualquier situación en la que exista intercambio de agua entre un producto y la atmósfera que lo rodea, como por ejemplo durante su almacenamiento.

### **2.2.1 Humedad, h**

Un alimento está constituido por muchos componentes.

Para propósitos de secado se considera que está formado solamente por agua y sólidos secos.

Los sólidos secos incluyen todos los componentes sólidos que componen el alimento (sólidos totales).

Entonces

$$\text{humedad} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de alimento}}$$

### **2.2.2 Formas de expresar la humedad**

La humedad puede expresarse en **base seca** y **base húmeda**.

### **Humedad base seca, $h_{bs}$**

$$h_{bs} = \left[ \frac{m_{H_2O}}{m_{ss}} \right] 100 \quad (2.3)$$

$m_{H_2O}$  = masa de agua

$m_{ss}$  = masa de sólido seco

### **Humedad base húmeda, $h_{bh}$**

$$h_{bh} = \left[ \frac{m_{H_2O}}{m_{ss} + m_{H_2O}} \right] 100 \quad (2.4)$$

$$m_{ss} + m_{H_2O} = m_{sh}$$

$m_{sh}$  = masa de sólido húmedo = masa total del alimento

### **Relación entre $h_{bs}$ y $h_{bh}$**

De (2.3) y (2.4) para una misma masa de agua

**$h_{bs}$  es siempre superior a  $h_{bh}$**

La relación entre ambas es

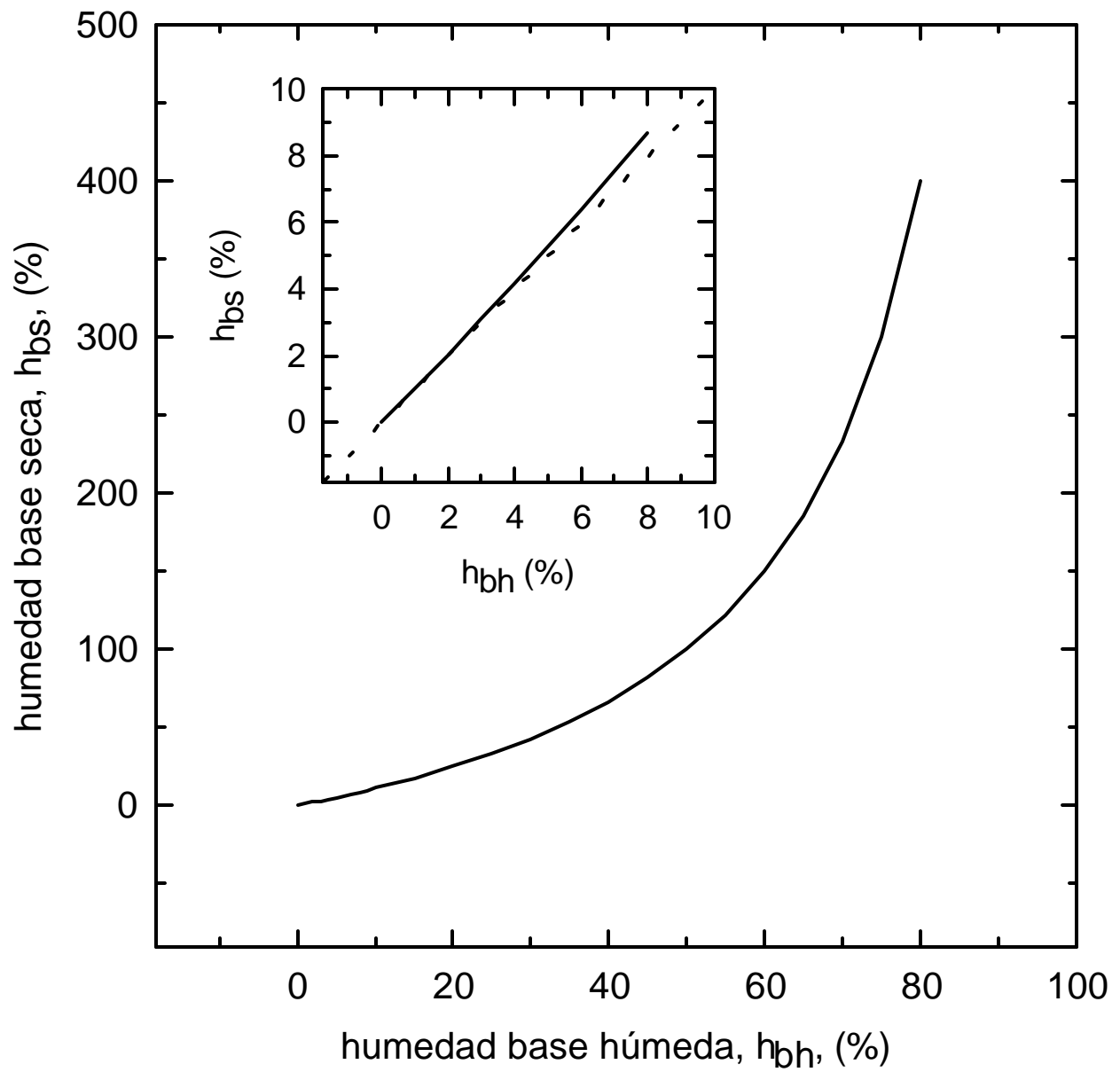
$$\frac{h_{bs}}{h_{bh}} = \left[ \frac{m_{H2O} + m_{ss}}{m_{ss}} \right] \quad (2.5)$$

$$\frac{h_{bs}}{h_{bh}} = \left[ \frac{h_{bs}}{100} + 1 \right] \quad (2.6)$$

$$h_{bs} = \frac{100 (h_{bh})}{100 - h_{bh}} \quad (2.7)$$

A partir de (2.7) se puede obtener la expresión para calcular  $h_{bh}$ .

**Atención: En estas ecuaciones las humedades están en porcentaje**



Relación entre la humedad base seca (%) y la humedad base húmeda (%)



### 2.2.3 Humedad de equilibrio, $h_e$

*La humedad de equilibrio es la humedad que existe cuando la presión de vapor del agua en el alimento está en equilibrio con la presión parcial del vapor de agua en el aire*

Si el aire se satura totalmente durante el secado, entonces el equilibrio se establece con la presión de vapor del agua en el aire ya que esta presión es igual a la presión parcial del vapor de agua bajo esas condiciones.

La humedad de equilibrio se expresa en base seca.

En unidades del SI

kg agua/kg sólido seco (kga/kgss)

### 2.2.4 Actividad de agua, $a_w$

*La actividad de agua en un alimento es el cociente entre la presión de vapor del agua contenida en él y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.*

$$a_w = \frac{p_{al}}{p_{H_2O}^*} \quad (2.8)$$

Otra forma de definir la actividad de agua es la siguiente.

Cuando un alimento se encuentra en equilibrio con una atmósfera de aire, esto es, cuando ha alcanzado su humedad de equilibrio

$$\begin{aligned} p_{al} &= p_{H_2O}^* \\ T_{al} &= T_{H_2O} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$p_{al}$  = presión de vapor de agua en el alimento

$p_{H_2O}^*$  = presión de vapor de agua pura

$T_{al}$  = temperatura del alimento

$T_{H_2O}$  = temperatura del aire

Cuando esto sucede podemos escribir (1.12) como

$$H_R = \frac{p_{al}}{p_{H_2O}^*} \quad (2.10)$$

Esta no es otra que la definición de  $a_w$  (ec. 2.8)

Por lo tanto

La actividad de agua es la humedad relativa de equilibrio de una atmósfera de aire que está en equilibrio con el alimento.

De esta forma el equilibrio entre el aire y el alimento se caracteriza simplemente por:

$$a_w = H_R \quad \text{y} \quad T_{al} = T_{H_2O} \quad (2.11)$$

Aunque una discusión detallada de la influencia de la actividad de agua sobre la conservación de la calidad de los alimentos está fuera del objetivo de este documento, conviene señalar que:

Los microorganismos no se desarrollan que excepcionalmente para  $a_w < 0.8$ . La resequedad, sin embargo, no los destruye.

La mayoría de las enzimas se inactivan cuando  $a_w < 0.8$

Las reacciones de Maillard, obscurecimiento no enzimático de azúcares en presencia de grupos aminados, presentan un máximo para  $a_w$  . 0.6 a 0.7

La oxidación de lípidos se estimula a muy bajas actividades de agua.

De una forma muy esquemática podemos decir que el punto de conservación óptimo de productos biológicos, sin aditivos ni refrigeración, se sitúa generalmente entre 0.25 y 0.35.

## 2.2.5 Relación entre $h_e$ y $a_w$ : Curvas de sorción

La ecuación (2.11) permite determinar la actividad de agua de un alimento a través de la determinación de la humedad relativa de una pequeña cantidad de aire en equilibrio con el alimento.

Así de esta forma es posible obtener valores que al graficarlos como  $h_e$  vs  $a_w$  tienen la forma mostrada en la Figura 2.1.

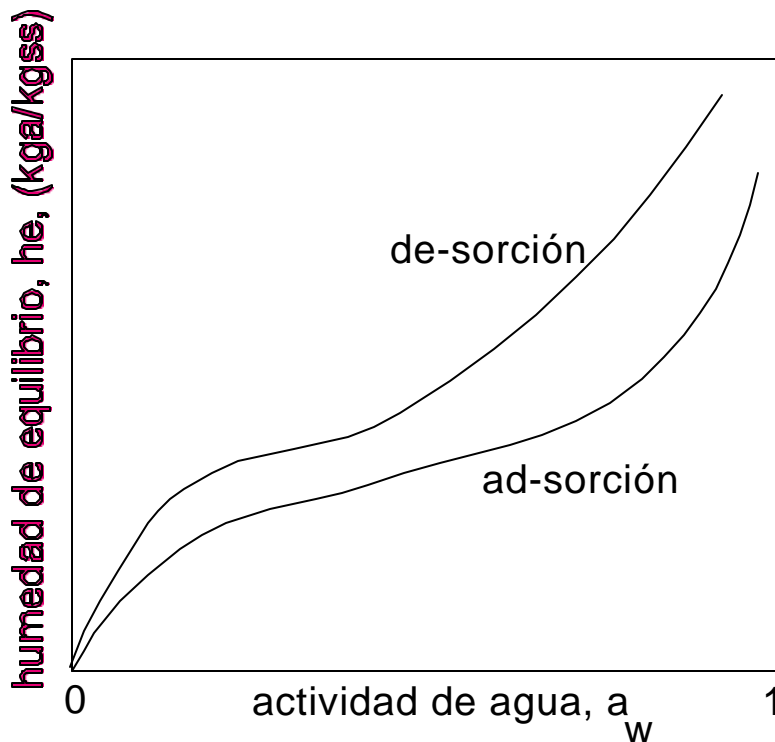


Figura 2.1 Curvas de adsorción y desorción

Las curvas en la Fig. 2.1 son llamadas **isotermas de adsorción y de desorción** del alimento ya que se obtienen a temperatura constante.

La forma específica de estas curvas depende del alimento.

Sin embargo en la mayoría de los casos la curva obtenida partiendo del producto húmedo, de-sorción, es diferente de aquella obtenida partiendo del producto seco, ad-sorción.

A este fenómeno se le denomina histéresis.

No obstante, la curva de de-sorción es la que importa en el secado.

### **2.2.6 Tipos de humedad de los alimentos**

El agua contenida en un alimento está unida a él en formas que son el resultado de interacciones físicas y químicas.

Para fines de la operación de secado podemos distinguir dos casos:

#### **Humedad libre**

Cuando  $a_w \approx 1$  se dice que el alimento contiene esencialmente **agua libre**.

Este es el caso de los productos biológicos muy húmedos, excepto

aqueellos muy ricos en materia soluble.

Durante el secado el agua se comporta como si estuviera pura.

## **Humedad ligada**

Cuando  $a_w < 1$  se dice que el producto contiene **agua ligada** y en ese caso  $p_{al}$  está dada por (2.8).

El secado de esta agua es más difícil ya que la presión de vapor que ella ejerce es más baja que la que ejercería si estuviera pura.

## **2.3 CURVAS DE SECADO**

Son curvas construidas a partir de datos experimentales que dan información sobre la velocidad de secado de un alimento bajo determinadas condiciones.

Se obtienen preferiblemente en un equipo que reproduzca lo más fielmente posible el equipo de proceso usando condiciones de aire que se asemejen a las que se usan en el mismo.

La información obtenida de estas curvas es útil para propósitos de

1. Estimar el tamaño del secador
2. Establecer las condiciones de operación
3. Calcular, estimar o aún predecir el tiempo de secado

### 2.3.1 Determinación experimental

La Fig. 2.2 muestra esquemáticamente la forma de obtener los datos experimentales para la construcción de las curvas de secado.

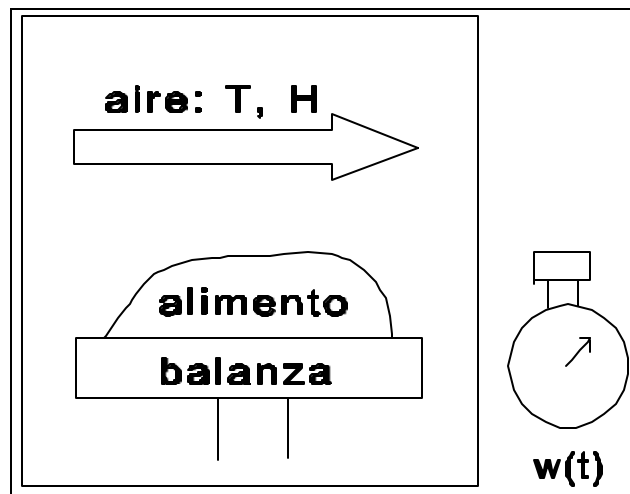


Figura 2.2 Obtención de datos experimentales para la construcción de curvas de secado.

El dispositivo experimental debe ser lo más semejante posible al equipo en donde se efectúa realmente el secado y las condiciones del aire deben ser constantes.

El experimento consiste en registrar el cambio de la masa del alimento con el tiempo.

Este cambio se debe a la pérdida de agua y está relacionado con la humedad del alimento y las propiedades del aire.

### 2.3.2 Tratamiento de los datos experimentales

Para construir las curvas de secado los datos tabulados tiempo y la masa del alimento húmedo obtenidos experimentalmente se transforman en datos de tiempo y humedad base seca.

Para ello se usa la ecuación siguiente

$$h_{bs}(t) = \frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (2.12)$$

$m(t)$  = masa del alimento húmedo para cada tiempo (kg sh)

$m_{ss}$  = masa del sólido seco (kg ss)

$h_{bs}(t)$  = humedad base seca al tiempo t (kg agua/ kg ss).

La ec. (2.12) permite calcular la humedad de equilibrio,  $h_e$ , la cual se utiliza para calcular la humedad libre,  $h_L$ .

La humedad libre se calcula con la ecuación siguiente

$$h_L(t) = h_{bs}(t) - h_e \quad (2.13)$$

$h_L(t)$  = humedad libre (kga/kgss) para cada tiempo

Una vez obtenida la humedad libre, ésta y el tiempo al representarlos gráficamente producen la **primera curva de secado** (Fig. 2.3)



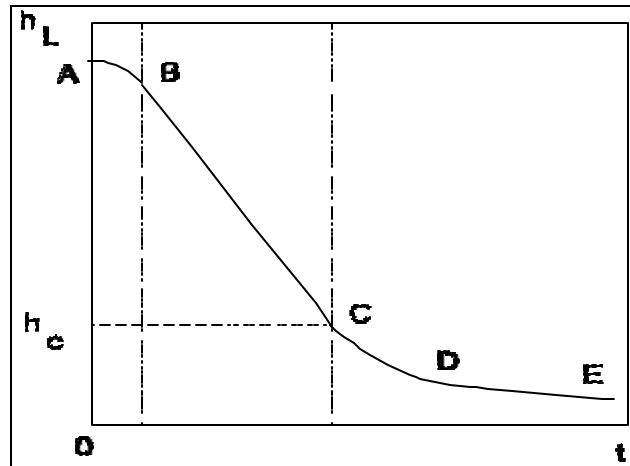


Figura 2.3 Primera curva de secado

Región AB: Período de calentamiento

La masa del alimento húmedo disminuye sólo un poco debido a la débil contribución del calor sensible a la evaporación de agua.

Región BC: Período de velocidad constante.

En él ocurre buena parte del secado y la pérdida de humedad es directamente proporcional al tiempo.

Región CD: Primer período de velocidad decreciente.

Región DE: Segundo período de velocidad decreciente.

En ambas regiones la humedad del alimento disminuye menos rápido que en la región BC para incrementos de tiempo iguales.

El punto C es el límite entre el período de velocidad constante y el de velocidad decreciente.

La humedad para la cual se aprecia este límite se denomina **humedad crítica,  $h_c$** .

Tanto la humedad libre como la humedad crítica están expresadas en base seca.

Para analizar el proceso de secado se grafica el flux de secado contra la humedad libre.

El “flux” de secado se calcula con la ecuación

$$R = - \frac{m_{ss}}{A} \frac{d h_L}{dt} \quad (2.14)$$

A = área de secado,  $m^2$

R = “flux” de secado,  $kg / h \cdot m^2$

Muchos autores llaman a R la velocidad de secado.

Esto no es estrictamente correcto porque la velocidad se expresa en  $kg/h$  y estas unidades se obtienen al efectuar el producto  $R \cdot A$ .

Por lo tanto si el flujo está referido al área de secado, entonces es más correcto llamar a R el “flux” de secado.

El signo negativo en (2.14) aparece porque el término  $dh_L / dt$  es inherentemente negativo y ya que no tiene sentido físico que  $R$  sea negativo es necesario multiplicar por  $-1$ .

Los valores de  $dh_L / dt$  se obtienen derivando la primera curva de secado.

Graficando entonces  $R$  contra  $h_L$  se obtiene la **segunda curva de secado**.

La Figura 2.4 muestra esquemáticamente la forma de esta curva.

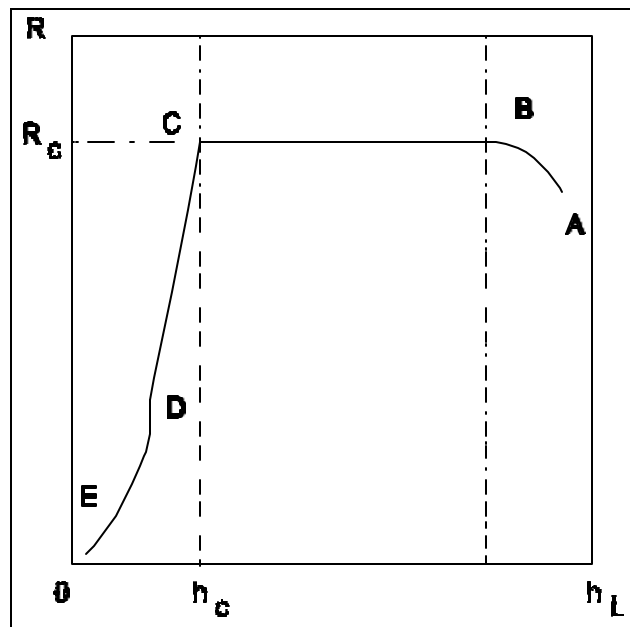


Figura 2.4 Segunda curva de secado.

A, B, C, D y E tienen el mismo significado que en la Figura 2.3.

La segunda curva permite apreciar de una manera más clara las características de los períodos de secado.

Período BC:

El flux es independiente de la humedad libre, mientras que de C a E hay dos períodos decrecientes.

Este último es el caso más general ya que dependiendo del alimento el período de velocidad decreciente puede ser único.

Existe la posibilidad de que en este período la relación entre  $R$  y  $h_L$  sea lineal. Entonces el análisis de esta parte de la curva se simplifica considerablemente.

### **2.3.3 Estimación del tiempo de secado**

A partir de las curvas de secado es posible estimar el tiempo de secado.

También es posible hacerlo teóricamente.

### 2.3.3.1 Predicción experimental

#### Período de velocidad constante

En este período el “flux” es constante,  $R_c$ , por lo tanto

$$R_c = - \frac{m_{ss}}{A} \frac{d h_L}{dt} \quad (2.15)$$

Para obtener el tiempo de secado en este período se integra (2.15).

Para ello los límites de integración son:

$$\begin{array}{lll} \text{En} & t = 0 & h = h_1 \\ \text{En} & t = t_c & h = h_2 \end{array}$$

Date cuenta que  $h_1 > h_2$  y que ambas son humedades libres cuyo valor está entre los límites B y C de la segunda curva de secado (Fig. 2.4)

Integrando resulta

$$\int_0^{t_c} dt = - \frac{m_{ss}}{A} \int_{h_1}^{h_2} \frac{d h_L}{R_c} \quad (2.16)$$

$$t_c = \frac{m_{ss}}{R_c A} (h_1 - h_2) \quad (2.17)$$

## Período de velocidad decreciente

En este caso el “flux” no es constante y se tiene que

$$R_d = - \frac{m_{ss}}{A} \frac{d h_L}{dt} \quad (2.18)$$

Las condiciones límite son ahora:

$$\begin{array}{ll} \text{En} & t = 0 & h = h_1 \\ \text{En} & t = t_d & h = h_2 \end{array}$$

Al igual que en el caso anterior  $h_1 > h_2$  y  $t = 0$  representa el inicio de este período.

Integrando resulta

$$\int_0^{t_d} dt = - \frac{m_{ss}}{A} \int_{h_1}^{h_2} \frac{d h_L}{R_d} \quad (2.19)$$

$$t_d = \frac{m_{ss}}{A} \int_{h_1}^{h_2} \frac{d h}{R_d} \quad (2.20)$$

Esta ecuación puede o no tener solución analítica.

Eso depende de que exista o no una ecuación que relacione  $R_d$  con  $h_L$  y que al sustituirla en (2.20) sea posible resolverla.

Si este no es el caso entonces la integral tiene que evaluarse numéricamente.

### **2.3.3.2 Predicción teórica**

#### **Período de velocidad constante**

Durante el período de velocidad constante la rapidez de eliminación de humedad del alimento está limitada sólo por la rapidez de evaporación de agua desde la superficie o desde el interior del mismo.

Esta rapidez de secado continuará mientras la migración de humedad desde el interior hacia la superficie en la cual ocurre la evaporación sea más rápida que la evaporación que ocurre en la superficie.

La rapidez de evaporación en la superficie depende de dos factores según lo ilustra la ecuación siguiente:

$$\frac{d h}{d t} = \frac{h_q A (T - T_w)}{I_w} = k_y A (H_w - H) \quad (2.21)$$

$h_q$  = coeficiente convectivo de transferencia de calor ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$H_w$  = humedad absoluta a la temperatura de bulbo húmedo.

De la ec. (2.21) resulta que

$$R_c = \frac{h_q (T - T_w)}{I_w} \quad (2.21 a)$$

De acuerdo con (2.21) la rapidez de evaporación puede estar limitada ya sea por

Una baja rapidez de transferencia de calor desde el aire hacia la superficie del alimento o por

Una baja transferencia de humedad desde la superficie del alimento hacia el aire.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor puede evaluarse a partir de correlaciones específicas.

En algunos casos puede no ser convectivo sino un coeficiente dependiente de la radiación y puede estimarse también a partir de



correlaciones.

El coeficiente de transferencia de masa,  $k_y$ , no puede medirse fácilmente durante el secado y una forma común de estimarlo es a partir del número de Lewis definido como

$$Le = \frac{h_q}{k_y c_s} \quad (2.22)$$

Este número se usa cuando las condiciones de flujo afectan de igual manera la transferencia de calor y masa.

Estas condiciones pueden existir durante el período de velocidad constante y entonces

$$Le \approx 1$$

En consecuencia

$$k_y \approx 0.8 h_q$$

ya que para el aire

$$c_s \approx 1.21 \text{ kJ / kg} \cdot \text{EC}$$

La ec. (2.21) puede modificarse para el caso en que el secado ocurre en una charola cubierta con el alimento húmedo.

Se supone que el volumen del alimento no cambia durante el período de velocidad constante.

Cuando el aire circula **paralelamente** a la superficie de secado

$$\frac{d h}{d t} = \frac{h_q (T - T_w)}{r_s l_w d} \quad (2.23)$$

$\tilde{n}_s$  = densidad del sólido seco (kg / m<sup>3</sup>)

d = espesor del alimento en la charola

Cuando el aire circula **perpendicularmente** a la superficie de secado

$$\frac{d h}{d t} = \frac{h_q a (T - T_w)}{r_s l_w} \quad (2.24)$$

a = área de transferencia de calor expresada (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) de lecho

Esta área puede estimarse a partir de las siguientes expresiones

Lecho empacado con esferas de diámetro  $d_e$ :

$$a = \frac{6 (1 - e)}{d_e} \quad (2.25)$$

$e$  = fracción de espacios vacíos o porosidad del lecho.

Lecho empacado con cilindros de diámetro  $d_c$  y longitud  $L$ :

$$a = \frac{4(1 - e)(L + 0.5 d_c)}{d_c L} \quad (2.26)$$

### **Período de velocidad decreciente**

Después de alcanzar la humedad crítica, el secado continua a una velocidad decreciente.

La velocidad de secado puede ser lineal con respecto a la disminución de humedad.

En algunos productos puede haber más de un período de velocidad decreciente.

En el período de velocidad constante la superficie del alimento está saturada con agua.

Conforme el agua se evapora ocurre migración de agua desde el interior del sólido

Cuando esta migración no es suficientemente rápida como para mantener la superficie saturada ocurre el período decreciente.

Cuando toda la superficie de secado alcanza un estado de

insaturación de humedad la migración interna de humedad se vuelve el factor que controla la velocidad de secado.

La migración de agua en el interior del alimento puede estar sujeta a varios mecanismos.

1. Movimiento por fuerzas capilares
2. Difusión de líquidos
3. Difusión de superficie
4. Difusión de vapor de agua

La transferencia de masa no estacionaria en el interior de un sólido está descrita por la segunda ley de Fick

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{j}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right] \quad (2.27)$$

C = concentración del componente que se transfiere

D = difusión del líquido en el sólido (m<sup>2</sup>/s)

- |       |                   |
|-------|-------------------|
| j = 0 | placa infinita    |
| j = 1 | cilindro infinito |
| j = 2 | esfera            |

Las condiciones iniciales y límite son

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad r = 0 \quad t \geq 0$$

$$C = C_e \quad r = R_1 \quad t > 0$$

$$C = C_0 \quad 0 \neq r \neq R_1 \quad t = 0$$

La primera condición especifica una concentración finita en el centro de la esfera.

La segunda significa que en la superficie la humedad es la de equilibrio y que la concentración inicial es uniforme a través de todo el material de acuerdo con la condición inicial.

Para una esfera,  $j = 2$ , la solución de (2.27) es

$$\frac{C - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{2R}{p r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \operatorname{sen} \left( \frac{n p r}{R} \right) \exp \left( \frac{-D n^2 p^2 t}{R^2} \right) \quad (2.28)$$

A partir de esta ecuación se obtiene la pérdida de humedad con el tiempo

Integrando (2.28) sobre el radio de la esfera,  $R$ ,

$$\frac{h_0 - h}{h_0 - h_e} = 1 - \frac{6}{p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left( \frac{-D n^2 p^2 t}{R^2} \right) \quad (2.29)$$

Para tiempos largos de secado el segundo y los términos superiores de la serie (2.29) se desprecian y por lo tanto

$$\frac{h_0 - h}{h_0 - h_e} = 1 - \frac{6}{\mathbf{p}^2} \exp\left(\frac{-D n^2 \mathbf{p}^2 t}{R^2}\right) \quad (2.30)$$

Resolviendo esta ecuación para el tiempo de secado resulta

$$t_d = \frac{R^2}{D^2 \mathbf{p}^2} \ln\left(\frac{6}{\mathbf{p}^2} \frac{h_0 - h_e}{h - h_e}\right) \quad (2.31)$$

La solución para la placa es

$$t_d = \frac{4 \mathbf{d}^2}{D \mathbf{p}^2} \ln\left(\frac{8}{\mathbf{p}^2} \frac{h_0 - h_e}{h - h_e}\right) \quad (2.32)$$

La solución para el cilindro de radio R

$$t_d = \frac{R^2}{5.78 D} \ln\left(0.692 \frac{h_0 - h_e}{h - h_e}\right) \quad (2.33)$$

Se sabe que el coeficiente de difusión depende de la humedad cuando esta es baja, normalmente inferior a 15 %, pero esto depende de cada alimento y no puede generalizarse.

Cabe hacer notar que no hay datos para la mayoría de alimentos

del coeficiente de difusión para vapor en sólidos.

Existen otras expresiones que permiten estimar el tiempo de secado en el período decreciente.

Por ejemplo

$$\frac{dh}{dt} = -K_1 (h - h_e) \quad (2.34)$$

$K_1$  es una función de la velocidad constante

$$K_1 = - \frac{\left( \frac{dh}{dt} \right)_c}{h - h_e} \quad (2.35)$$

Cuando la evaporación de humedad ocurre en una charola, la expresión para  $(dh / dt)_c$  está dada por (2.23) y por lo tanto

$$K_1 = \frac{h_q (T - T_w) (h - h_e)}{r_s I_w d (h - h_e)} \quad (2.36)$$

De esta forma para el período de velocidad decreciente

$$\left( \frac{dh}{dt} \right)_d = - \frac{h_q (T - T_w) (h - h_e)}{r_s I_w d (h - h_e)} \quad (2.37)$$

Integrando (2.37) se obtiene el tiempo de secado correspondiente.

Para el caso del secado en una charola con flujo de aire **paralelo** a la superficie de secado

$$t_d = \frac{r_s I_w d (h_c - h_e)}{h_q (T - T_w)} \ln \left( \frac{h_c - h_e}{h - h_e} \right) \quad (2.38)$$

Para flujo de aire **perpendicular** el tiempo está dado por

$$t_d = \frac{r_s I_w (h_c - h_e)}{h_q a (T - T_w)} \ln \left( \frac{h_c - h_e}{h - h_e} \right) \quad (2.39)$$

## 2.4 EQUIPOS DE SECADO

Ver figuras correspondientes



## 2.5 ANALISIS DE LOS EQUIPOS DE SECADO

### 2.5.1 Balance de materia y de energía en secadores continuos

Considerando la Figura 2.5

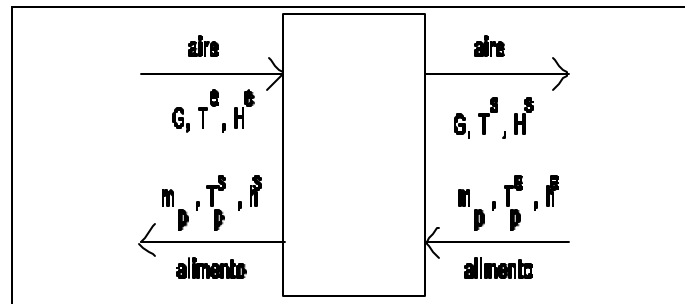


Figura 2.5 Balance de materiales y energía

Balance de materia:

$$G H^e + m_p h^e = G H^s + m_p h^s \quad (2.40)$$

$G$  = caudal de aire seco (kg / h)

$m_p$  = caudal de producto en base seca (kg / h)

$H$  = humedad absoluta del aire (kg / kg)

$h$  = humedad libre del producto (kg / kg)

$e$  = entrada

$s$  = salida

$$G (\text{entrada}) = G (\text{salida})$$

porque es el caudal de **aire seco**.

$$m_p (\text{entrada}) = m_p (\text{salida})$$

porque es el caudal de **sólido seco**.

Esta no es la única forma de plantear el balance de agua.

Otra forma es usando las fracciones de agua tanto en el aire como en el producto en lugar de sus respectivas humedades.

En este caso debe usarse las masas de aire húmedo y las masas de producto húmedo a la entrada y a la salida.

Balance de energía:

$$G H_y^e + m_p H_{sh}^e = G H_y^s + m_p H_{sh}^s + Q \quad (2.41)$$

$H_y$  = entalpía del aire (kJ/kg)

$H_{sh}$  = entalpía del sólido húmedo (kJ/kg)

$Q$  = pérdidas de calor

La entalpía del aire se calcula con la ec. (1.20) considerando

$$T_o = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \ddot{e}_o = 2501 \text{ kJ / kg}$$

La entalpía del sólido húmedo es

$$H_{sh} = C_{p_{ss}} (T_p - T_0) + h C_{p_{H_2O}} (T_p - T_0) \quad (2.42)$$

$C_{p_{ss}}$  = capacidad calorífica del sólido seco (kJ/kg·K)

$C_{p_{H_2O}}$  = capacidad calorífica del agua (kJ/kg·K)

$T_p$  = temperatura del alimento (K)

La ecuación se simplifica cuando la temperatura de referencia es cero.

## **2.5.2 Secado continuo a contracorriente**

### **2.5.2.1 Perfiles de temperatura y de humedad**

El secado continuo ofrece ciertas ventajas sobre el secado por lotes.

Tamaño de equipo menor y distribución de humedad en el alimento más uniforme.

En un secador continuo el sólido se mueve a lo largo del secador y está en contacto con una corriente de aire paralela o en contracorriente con respecto al movimiento del sólido.

Operación adiabática y en contracorriente:

El gas caliente a la entrada del secador hace contacto con el alimento seco que sale del secador.

## Operación adiabática y en flujo paralelo:

El gas caliente a la entrada del secador hace contacto con el alimento húmedo que entra al secador.

La Figura 2.6 es un esquema de los perfiles de temperatura y humedad absoluta del gas y del alimento en un secador continuo en contracorriente.

### Zona de precalentamiento (I)

El alimento se calienta hasta que su temperatura es igual a la temperatura de bulbo húmedo o de saturación adiabática del aire.

En este período hay muy poca evaporación de agua y cuando el secado ocurre a bajas temperaturas se puede ignorar esta zona.

### Zona de velocidad constante (II)

La humedad libre y aquélla en la superficie del alimento se evaporan.

La temperatura del alimento es constante e igual a la temperatura de saturación adiabática si el calor se transfiere por convección.

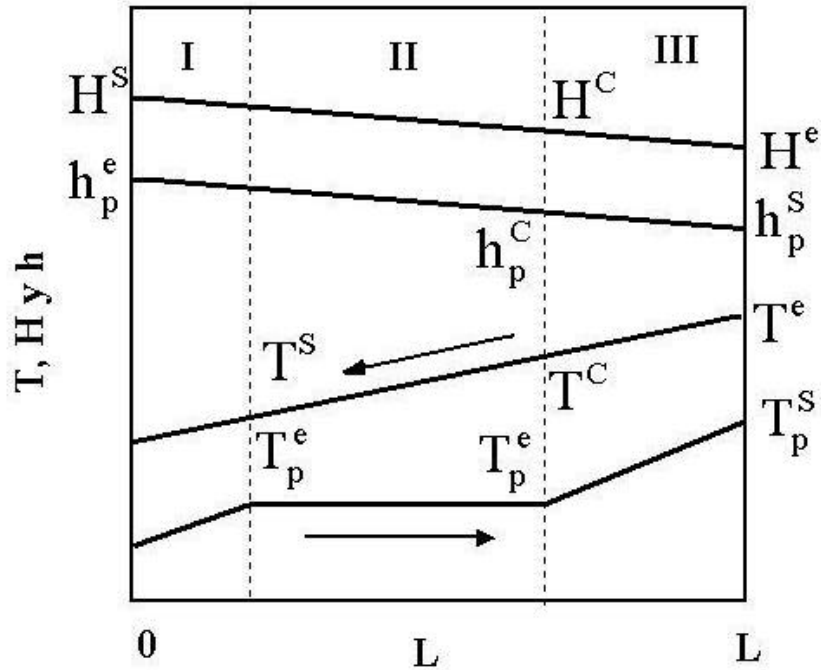


Figura 2.6 Perfiles de temperatura y humedad para el secado continuo en contracorriente

La humedad desciende hasta su valor crítico,  $h_c$ , al final de este período.

### Zona III

La humedad ligada y la humedad que no satura la superficie del alimento se evaporan hasta que éste alcanza su humedad final,  $h_2$ .

La humedad absoluta del gas que entra en la zona II aumenta hasta

$H^C$ .

Este valor es la humedad absoluta del aire cuando la humedad del alimento es la crítica.

La ec. (2.40) se usa para calcular  $H_c$  como sigue

$$m_p (h_c - h^s) = G (H_c - H^e) \quad (2.43)$$

$m_p$  está en kg / h

$G$  en kg / h

### 2.5.2.2 Tiempo de secado en el período de velocidad constante

La velocidad de secado en este período sería constante si las condiciones de humedad y de temperatura del aire no cambiaran.

La velocidad de secado está dada por una ecuación similar a la (2.21)

$$R_c = k_y M_{as} (H_w - H) = \frac{h_q (T - T_w)}{I_w} \quad (2.44)$$

El tiempo de secado está dado por (2.16) que es ahora

$$t_c = \frac{m_p}{A} \int_{h_c}^{h^e} \frac{d h_L}{R_C} \quad (2.45)$$

De (2.43) se tiene

$$\frac{\Delta h}{\Delta H} \approx \frac{dh}{dH} = \frac{G}{m_p} \quad (2.46)$$

Por lo tanto

$$dh = dH \left( \frac{G}{m_p} \right) \quad (2.46 a)$$

Sustituyendo (2.46 a) y (2.44) en (2.45)

$$t_c = \frac{G}{m_p} \left( \frac{m_p}{A} \right) \frac{1}{k_y M_{as}} \int_{H_C}^{H^s} \frac{d H}{H_W - H} \quad (2.47)$$

$A/m_p [=] m^2 / kg$

La ec (2.47) se integra gráficamente

Cuando  $T_w$  y  $H_w$  son constantes, es decir, el secado es adiabático, (2.47) se integra dando como resultado

$$t_c = \frac{G}{m_p} \left( \frac{m_p}{A} \right) \frac{1}{k_y M_{as}} \ln \left( \frac{H_w - H_c}{H_w - H^s} \right) \quad (2.48)$$

La humedad  $H_c$  se calcula a partir de (2.43)

$$H_c = H^e + \frac{m_p}{G} (h_c - h^s) \quad (2.49)$$

### 2.5.2.3 Tiempo de secado en el período decreciente

Suponiendo que en este período la relación entre el “flux” y la humedad libre es lineal, es posible demostrar que

$$R_d = R_c \frac{h}{h_c} \quad (2.49 a)$$

Por lo tanto



$$R_d = R_c \frac{h}{h_c} = k_y M_{as} (H_w - H) \frac{h}{h_c} \quad (2.50)$$

Sustituyendo (2.50) en (2.20)

$$t_d = \frac{m_p}{A} \frac{h_c}{k_y M_{as}} \int_{h^s}^{h_c} \frac{dh}{(H_w - H) h} \quad (2.51)$$

Substituyendo

$$dh = dH \left( \frac{G}{m_p} \right) \quad (2.46 a)$$

$$h = (H - H^e) + h^s$$

resulta

$$t_c = \frac{G}{m_p} \left( \frac{m_p}{A} \right) \frac{h_c}{k_y M_{as}} \int_{H^e}^{H_c} \frac{dH}{(H_w - H) \left[ \frac{(H - H^e) G}{m_p + h^s} \right]} \quad (2.52)$$

$$t_c = \frac{G}{m_p} \left( \frac{m_p}{A} \right) \frac{h_c}{k_y M_{as}} \frac{\ln \frac{h_c (H_w - H^e)}{h^s (H_w - H_c)}}{\frac{(H_w - H^e) G}{m_p + h^s}} \quad (2.53)$$

$H_c$  se calcula otra vez a partir de (2.43).

### 2.5.3 Secadores por aspersion (Spray Dryers)

En el secado por aspersion, la eliminaci3n de humedad de las gotas l3quidas para obtener un alimento seco s3lido ocurre por transferencia simult3nea de calor y masa.

La diferencia entre el secado por aspersion y otros m3todos de secado es que una gran cantidad de agua se evapora durante el per3odo de velocidad constante cuando la humedad del alimento es grande.

Durante este per3odo la evaporaci3n de agua del alimento ocurre de la misma manera que si se tratara de la evaporaci3n de una gota de agua pura.

La transferencia simultánea de calor y masa ocurre de la forma siguiente:

El calor para la evaporación del agua se transfiere por conducción y convección desde el aire caliente hasta la superficie de la gota.

El vapor de agua resultante de la evaporación se transfiere por difusión y convección desde la superficie de la gota hasta la corriente de aire.

La rapidez con la cual ocurre este proceso es función de varios factores

Temperatura y humedad del aire

Propiedades de transporte del aire

Diámetro y temperatura de la gota

Velocidad relativa y naturaleza de los sólidos en la gota líquida

### **Período de velocidad constante**

La eliminación inicial de humedad de la gota líquida durante el secado por aspersion ocurre a una velocidad constante, y por lo tanto la rapidez de evaporación de humedad se describe adecuadamente considerando que la gota es agua pura.

Con esta suposición los balances alrededor de la gota son

Balance de masa

$$\frac{dh}{dt} = k_y A (p_w - p_{H_2O}) = \frac{2 p D r_L d}{r_g} (p_w - p_{H_2O}) \quad (2.54)$$

Balance de energía

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h_q A (T - T_w)}{l_w} = \frac{2 p k_g d (T - T_w)}{l_w} \quad (2.55)$$

Estos balances describen la rapidez de evaporación de humedad y definen el tiempo de desaparición de una gota en el caso de un líquido puro.

Introduciendo la ley del gas ideal en (2.54)

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2 p D M d (p_w - p_{H_2O})}{RT} \quad (2.56)$$

M = masa molecular del vapor que difunde.

En (2.55) el coeficiente de transferencia de calor está dado por

$$h_q = \frac{2 k_f}{d} \quad (2.57)$$

$k_f$  = conductividad térmica de la película líquida que rodea la gota

$d$  = diámetro de la gota

La ec. (2.54) se integra para obtener el tiempo de secado en el período de velocidad constante considerando dos casos:

1. Diámetro final de la gota es cero

$$t_c = \frac{r_L l_w}{2 (T - T_w)} \int_{d_0}^0 \frac{d(d)}{h} = \frac{r_L l_w d_0^2}{8 k_g (T - T_w)} \quad (2.58)$$

El límite superior es cero ya que la gota desaparece por completo al tratarse de un líquido puro

2. Diámetro final de la gota finito

$$t_c = \frac{(r_1 d_1^2 - r_2 d_2^2) l_w}{8 k_g (T - T_w)} \quad (2.59)$$

$d_1$  = diámetro inicial de la gota

$d_2$  = diámetro inicial de la gota

Las ecs. (2.58 y (2.59) son válidas para números de Reynolds muy bajos o para gotas estacionarias.

Hay ecuaciones empíricas válidas

$$Re > 20$$

que incluyen la velocidad terminal de la gota

Una de ellas es

$$t_c = \frac{r_L l_w d_0^2}{8 k_g (T - T_w)} \left[ 1 - \frac{2 b_0}{d_0^2} \right] \int_{100}^{d_0} \frac{d^{2.08}}{(1 + b_0 d^{1.08})} d(d) \quad (2.60)$$

donde

$$b_0 = 0.3 \left[ 1.53 \frac{g r_a (r_L - r_a)^{0.71}}{m^2} \right]^{0.5} \left[ \frac{c_p m}{k_g} \right]^{1/3} \quad (2.61)$$

En (2.60) el límite inferior de integración es 100 lo que significa que las gotas deben tener un diámetro de al menos 100 micras para que su velocidad terminal sea significativa en el cálculo involucrado.

El factor  $\hat{\alpha}_0$  toma en cuenta el régimen de alto número de Reynolds.

## Período de velocidad decreciente

En algún momento del secado por aspersión la gota alcanza un tamaño constante y su temperatura aumenta de tal manera que la diferencia de temperatura entre el aire y la partícula disminuye.

Estas condiciones marcan el final del período de velocidad constante y el cálculo del tiempo de secado ya no puede basarse en los cambios del diámetro sino que se vuelve función del contenido de humedad de la partícula de diámetro constante.

El balance de calor sobre la partícula suspendida en el aire durante este período está dado por:

$$r_p V_p I_w \frac{dh}{dt} = h_q A (T - T_w) + r_p V_p c_p \frac{dT}{dt} \quad (2.62)$$

La ec. (2.62) se usa para describir el cambio de humedad de la partícula según la siguiente expresión

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h_q A (T - T_w)}{r_p V_p I_w} + \frac{c_p}{I_w} \frac{dT}{dt} \quad (2.63)$$

El segundo término del lado derecho de esta ecuación puede despreciarse sin introducir considerable error.

El término restante se integra para obtener el tiempo de secado en el período de velocidad decreciente

$$t_d = \frac{r_P d_C l_W (h_C - h_e)}{6 h_q \Delta T_{\text{prom}}} \quad (2.64)$$

$$\Delta T_{\text{prom}} = \frac{(T - T_W) + T_0}{2}$$

Es una diferencia de temperatura promedio entre la partícula y el aire.

### Tiempo total de secado

La expresión para el tiempo total de secado está dada por la suma de (2.58) y (2.64)

$$t = \frac{r_L l_W d_0^2}{8 k_g (T - T_W)} + \frac{r_P d_C l_W (h_C - h_e)}{6 h_q \Delta T_{\text{prom}}} \quad (2.65)$$



## NOMENCLATURA

a	área superficial de transferencia de calor en un lecho empacado. Superficie del alimento expuesta al aire en un secador rotatorio	$m^2/m^3$
$a_w$	actividad de agua	
A	área de transferencia o de secado,	$m^2$
c	concentración de agua en la ec. (2.27)	$kmol/m^3$
$c_o$	concentración inicial de agua la ec. (2.28)	$kmol/m^3$
$c_e$	concentración de agua en el equilibrio en la ec. (2.28)	$kmol/m^3$
$c_s$	calor húmedo del aire	$kJ/kg \cdot K$
$C_{p_{H_2O}}$	capacidad calorífica del agua	$kJ/kg \cdot K$
$C_{p_{al}}$	capacidad calorífica del alimento	$kJ/kg \cdot K$
$C_{p_{ss}}$	capacidad calorífica del sólido seco	$kJ/kg \cdot K$
d	espesor de la capa de sólidos en un lecho	m
$d_c$	diámetro de las partículas cilíndricas de un lecho	m
$d_e$	diámetro de las partículas esféricas de un lecho	m
D	coeficiente de difusión líquido-sólido	$m^2/s$
e	fracción de espacios vacíos (porosidad) de un lecho	
G	gasto másico de aire seco	kg/h
h	humedad del alimento en base seca o base húmeda	kg/kg
$h_{bs}$	humedad del alimento en base seca	kg/kg
$h_{ba}$	humedad del alimento en base húmeda	kg/kg
$h_c$	humedad libre crítica del alimento en base seca	kg/kg
$h_e$	humedad de equilibrio del alimento en base seca	kg/kg
$h_L$	humedad libre del alimento en base seca	kg/kg
$h_q$	coeficiente de transferencia de calor	$kW/m^2 \cdot K$
$h_o$	humedad inicial	kg/kg

$h^e$	humedad del alimento en base seca a la entrada del secador	kg/kg
$h^s$	humedad del alimento en base seca a la salida del secador	kg/kg
$H$	humedad absoluta del aire	kg/kg
$H_c$	humedad del aire en el secador cuando el alimento alcanza $h_c$	kg/kg
$H_p$	porcentaje de humedad	kg/kg
$H_R$	humedad relativa	
$H_s$	humedad de saturación	kg/kg
$H_y$	entalpía del aire húmedo	kJ/kg
$H_{sh}^e$	entalpía del sólido húmedo a la entrada del secador	kJ/kg
$H_{sh}^s$	entalpía del sólido húmedo a la salida del secador	kJ/kg
$H_y^e$	entalpía del aire húmedo a la entrada del secador	kJ/kg
$H_y^s$	entalpía del aire húmedo a la salida del secador	kJ/kg
$H^e$	humedad absoluta del aire a la entrada del secador	kg/kg
$H^s$	humedad absoluta del aire a la salida del secador	kg/kg
$j$	factor de forma en la ec. (2.27)	
$k_y$	coeficiente de transferencia de masa	kmol/m <sup>2</sup> ·s
$H_w$	humedad absoluta evaluada a la temperatura de bulbo húmedo del aire	kg/kg
$L$	longitud	m
$Le$	número de Lewis ( $= h_q/k_y \cdot c_s$ )	
$m(t)$	masa del alimento húmedo al tiempo $t$	kg
$m_{H_2O}$	masa de agua	kg
$m_{as}$	masa de aire seco	kg
$m_p$	gasto másico de alimento en base seca	kg/h
$m_{ss}$	masa de sólido seco	kg

$M_{H_2O}$	masa molecular del agua	kg/kmol
$M_{as}$	masa molecular promedio del aire seco	kg/kmol
$p_{H_2O}$	presión parcial del vapor de agua	kPa
$p_{H_2O}^*$	presión de vapor del agua pura	kPa
$p_{al}$	presión de vapor del agua en el alimento	kPa
$p_A$	presión parcial del componente A	kPa
$P$	presión total	kPa
$q$	flujo de calor	kJ/s
$Q$	pérdidas de calor	kJ/kg
$r$	coordenada radial	
$R$	constante de los gases	kPa·m <sup>3</sup> /kmol·K
$R$	“flux” de secado	kg/m <sup>2</sup> ·s
$R$	radio en la ec. (2.28)	m
$R_c$	“flux” de secado en el período de velocidad constante	kg/m <sup>2</sup> ·s
$R_d$	“flux” de secado en el período de velocidad decreciente	kg/m <sup>2</sup> ·s
$t$	tiempo	h
$t_c$	tiempo de secado en el período de velocidad constante	h
$t_d$	tiempo de secado en el período de velocidad decreciente	h
$T$	temperatura, temperatura de bulbo seco del aire	K
$T_a$	temperatura del aire que está en equilibrio con $T_{al}$	K
$T_{al}$	temperatura del alimento que está en equilibrio con $T_a$	K
$T_o$	temperatura de referencia	K
$T_p$	temperatura del alimento en el secador	K
$T_p^e$	temperatura del alimento a la entrada del secador	K
$T_p^s$	temperatura del alimento a la salida del secador	K
$T_r$	temperatura de rocío	K
$T_s$	temperatura de saturación	K

$T_w$	temperatura de bulbo húmedo	K
$V$	volumen	$m^3$
$V_{as}$	volumen de aire seco	$m^3$
$x_{H_2O}$	fracción mol de agua en la fase líquida	
$x_b$	fracción mol del componente b en la fase líquida	

### Letras griegas

$\delta$	espesor de la placa infinita	m
$\ddot{e}$	calor latente de evaporación de agua	kJ/kg
$\ddot{e}_o$	calor latente de evaporación de agua a $T_o$	kJ/kg
$\ddot{e}_s$	calor latente de evaporación de agua a $T_s$	kJ/kg
$\tilde{n}_s$	densidad del sólido seco	$kg/m^3$

## PROBLEMAS PROPUESTOS

2.1. Un alimento seco se pone en contacto durante 5 horas con una atmósfera que está a 15 °C y cuya humedad relativa es 30 %. Durante todo este período la masa del alimento no cambia. Entonces se determina su humedad y se encuentra que es 7.5 % en base húmeda. El mismo alimento se coloca ahora en una atmósfera que está a la misma temperatura que la primera, pero con una humedad relativa de 50 %. La masa del alimento se incrementa hasta que después de cierto tiempo permanece constante. En ese momento se determina que el incremento fue de 0.1 kg/kg alimento. Determina:

- a) La actividad de agua del alimento en ambas atmósferas.
  - b) La humedad del alimento en base seca en ambas atmósferas.
- a)  $a_w = 0.30$ ;  $a_w = 0.50$ ; b)  $h_{bs} = 8.1$  % (inicial), 21.2 % (final)**

2.2. Un alimento tiene una humedad ( $h$ ) inicial de 77 %, y una humedad crítica ( $h_c$ ) de 30 %. El alimento tiene una forma cúbica con aristas de 5 cm y su densidad inicial es 950 kg/m<sup>3</sup>. El “flux” de secado en el período constante es 0.1 kg/m<sup>2</sup>·s. Calcula el tiempo requerido para iniciar el período de velocidad decreciente.  **$t = 53.3$  s**

2.3. Dos lotes de un material se secan por separado en un secador de charolas usando las mismas condiciones de secado. Para ambos lotes la humedad crítica es 0.14 kg/kg sólido seco y en el período de velocidad decreciente la relación entre el “flux” y la humedad libre es completamente lineal y pasa por el origen.

a) Demuestra que a partir de la ecuación para el tiempo de secado en este período:

$$t_d = - \frac{m_{ss}}{A} \int_{h_{L1}}^{h_{L2}} \frac{dh_L}{R_d}$$

puede obtenerse la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{m_{ss} h_C}{AR_C} \ln (h_C - h_{L2})$$

donde  $h_{L2} = 0$

Si el tiempo total para secar el primer lote desde una humedad libre inicial de 0.28 kg/kg sólido seco hasta una humedad libre final de 0.08 kg/kg sólido seco es de 6 horas:

b) Calcula el tiempo total para secar el segundo lote desde una humedad libre inicial de 0.33 kg/kg sólido seco hasta una humedad libre final de 0.04 kg/kg sólido seco. **b) t = 10 h.**

2.4. Un lote de un sólido húmedo se secó en un secador de charolas a velocidad constante y con un espesor de material húmedo de 25.4 mm. Sólo la superficie superior estuvo expuesta al aire. La velocidad de secado por unidad de área fue  $R_c = 2.05 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ . La razón  $m_{ss}/A$  fue  $24.4 \text{ kg/m}^2$  y la humedad inicial del material

y su humedad crítica fueron 0.55 y 0.22 kg/kg sólido seco, respectivamente. Calcula el tiempo necesario para secar un lote de material desde una humedad de 0.45 hasta 0.30 usando las mismas condiciones de secado pero esta vez con un espesor de material de 50.8 mm y con secado por ambas superficies (inferior y superior). Sugerencia: calcula primero la razón  $m_{ss}/A$  para este nuevo caso. **t = 1.8 h.**

2.5. En un laboratorio se hace una prueba de secado de un sólido húmedo en una bandeja de dimensiones (0.6x0.4x0.06) m. Las condiciones del aire son  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_w = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una velocidad de 3 m/s. La masa de sólido seco es 250 g. Los resultados de la prueba se muestran en la tabla.

tiempo (min)	masa (g)	tiempo (min)	masa (g)
0	450	100	329
10	445	120	323
20	425	150	318
30	405	190	313
40	385	230	310
50	365	280	308
60	345	350	308
80	335		

- Construye las curvas de secado y determina la humedad crítica y el “flux” de secado en el período constante en unidades SI
- Calcula el tiempo total de secado en horas. **b) t = 4.9 h.**

2.6. Para probar la viabilidad de secado de un alimento se obtuvieron datos de secado en un secador de charolas con flujo de aire sólo sobre la superficie superior cuya área fue  $0.186 \text{ m}^2$ . La masa de sólido seco fue  $3.765 \text{ kg}$ . Después de un largo período se alcanzó el equilibrio y la masa de la muestra fue  $3.955 \text{ kg}$  agua + sólido. Por lo tanto,  $3.955 - 3.765$  o sea  $0.190 \text{ kg}$  de humedad estuvieron presentes en el equilibrio. Se obtuvieron los siguientes datos durante una corrida de secado:

Tiempo (h)	masa (kg)	tiempo (h)	masa (kg)
0	4.944	4.2	4.241
0.4	4.885	5.0	4.150
0.8	4.808	7.0	4.019
1.4	4.699	9.0	3.978
2.2	4.554	12.0	3.955
3.0	4.404		

- Construye una curva humedad libre ( $\text{kg/kg}$ ) vs tiempo (h)
- Calcula las velocidades de secado,  $R$ , ( $\text{kg/h}\cdot\text{m}^2$ ) y traza una gráfica  $R$  vs humedad libre y
- Calcular el tiempo total de secado desde  $0.20$  hasta  $0.04$ . Integra gráficamente en el período decreciente. Determina  $R_c$  y la humedad crítica. **c)  $t = 4.4 \text{ h}$ .**

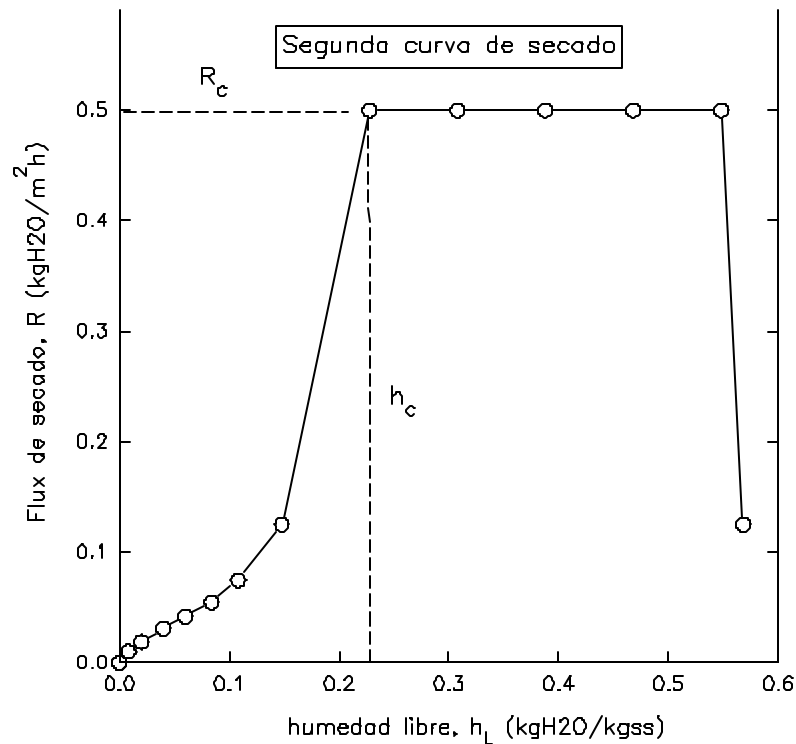
2.7. En un laboratorio se realizó una prueba de secado de un alimento húmedo en una bandeja de  $0.6 \text{ m}$  de largo,  $0.4 \text{ m}$  de ancho y  $0.06 \text{ m}$  de espesor. El aire se hizo circular paralelamente a la superficie superior de la bandeja a una velocidad de  $3 \text{ m/s}$  y su temperatura de bulbo seco y de bulbo



húmedo fue de 70 °C y de 35 °C, respectivamente. La masa de sólido seco fue 0.250 kg y la humedad de equilibrio,  $h_e$ , fue 0.232 kg/kg sólido seco. La relación entre el flux de secado y la humedad libre se muestra en la figura.

El flux de secado en el período constante,  $R_c$ , fue 0.500 kg/m<sup>2</sup>·h y la humedad libre crítica,  $h_c$ , fue 0.228 kg/kg sólido seco. El tiempo total de secado determinado a partir de los datos experimentales fue 4.9 h.

- a) Estima el flux de secado en el período constante y compáralo con el experimental. Estima el coeficiente de transferencia de calor con la correlación  $h_q = 0.0204G^{0.8}$ , con  $h_q$  en W/m<sup>2</sup>·K y  $G$  en kg/m<sup>2</sup>·h.  **$R_c = 1.8 \text{ kg} / \text{m}^2 \times \text{h}$**
- b) Usa el resultado anterior para estimar el tiempo total de secado a partir de las relaciones teóricas para el período constante y el decreciente. La humedad libre inicial es 54.8 % (bs) y la final es 0.8 %.  **$t = 3.9 \text{ h}$**
- c) Si el mismo alimento se seca desde 43 % hasta 19.5 % de humedad no libre (bh) con aire a las mismas temperaturas, pero con una velocidad 40 % mayor que la original, estima el tiempo total de secado (h) e indica en que proporción varía con respecto al determinado experimentalmente.  **$t = 3.5 \text{ h}$**



d) Repite el cálculo del inciso anterior considerando las mismas condiciones iniciales del aire a excepción de la temperatura de bulbo seco la cual es 10 °C mayor. **t = 3.5 h.**

En todos los casos considera que la variación de R con h<sub>L</sub> en el período decreciente está formada por dos secciones lineales. La primera, desde la humedad libre crítica y el flux crítico hasta una humedad libre de 14.8 % (bs) y un flux de 0.125 kg/m<sup>2</sup>·h y la segunda, desde estos últimos valores hasta una humedad libre de 0.8 % (bs) y un “flux” de 0.010 kg/m<sup>2</sup>·h. Supón que la humedad libre de equilibrio permanece constante.

2.8. Se efectuó en el laboratorio una prueba de secado de una pasta alimenticia. Se colocó una muestra sobre una charola de  $0.1 \text{ m}^2$  sellada por los bordes de tal forma que el secado sólo se efectuó sobre la superficie superior. Se hizo circular aire a  $1.5 \text{ m/s}$  con una temperatura de bulbo seco de  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  y una temperatura de bulbo húmedo de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ . La Tabla muestra los pesos registrados a diferentes tiempos. El peso del sólido seco fue de  $3.765 \text{ kg}$ . A las catorce horas la masa del alimento alcanzó un valor constante.

- Construye las curvas de secado.
- Determina el tiempo total (h) de secado.

tiempo (h)	masa (kg)	tiempo (h)	masa (kg)
0	4.820	4.6	4.057
0.1	4.807	5.0	4.015
0.2	4.785	5.4	3.979
0.4	4.749	5.8	3.946
0.8	4.674	6.0	3.933
1.0	4.638	6.5	3.905
1.4	4.565	7.0	3.885
1.8	4.491	7.5	3.871
2.2	4.416	8.0	3.859
2.6	4.341	9.0	3.842
3.0	4.269	10	3.832
3.4	4.206	11	3.825
3.8	4.150	12	3.821
4.2	4.130	14	3.819

2.9.- Un alimento se seca en un secador de bandejas empleando 12 horas para secar una carga completa de 1200 kg de sólido húmedo. La humedad inicial del alimento es 80 % (bh) y su humedad final es 9 % (bh). Experimentos previos en el laboratorio han mostrado que para las condiciones del aire usado el flux de secado en el período constante es  $2.8 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ , la humedad de equilibrio es 5 % (bh) y la humedad crítica es 40 % (bh). Además en el período decreciente, el “flux” varía linealmente con la humedad libre. El alimento se seca en bandejas cuadradas de 0.6 m con un espesor de 0.06 m y el secado se efectúa sólo por la superficie superior. La densidad del material al inicio del secado es  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Bajo esas condiciones, calcula:

- a) El número de bandejas necesario para manejar cada carga.
  - b) El espesor de llenado de cada bandeja.
- a) N = 98; b) h = 0.023 m.**

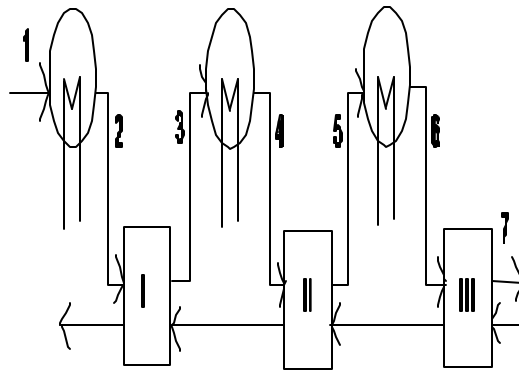
2.10.- Se coloca una capa de 0.5 pulgadas de harina de pescado en una charola de 610 mm por lado y se seca haciendo fluir aire paralelamente a la superficie superior e inferior de la charola. La velocidad del aire es de 0.76 m/s con una temperatura de bulbo seco de  $48.9 \text{ }^\circ\text{C}$  y una temperatura de bulbo húmedo de  $26.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . La densidad de la harina seca es  $1922 \text{ kg/m}^3$  y su humedad de equilibrio es despreciable. Bajo las condiciones de secado la humedad crítica es 9 % (bs). Suponiendo que el “flux” de secado en el período decreciente es lineal con respecto a la humedad libre. Calcula el tiempo necesario para secar el material desde 20 % hasta 2 % ambas en base seca. El

coeficiente de transferencia de calor puede estimarse con la siguiente ecuación:  $h_q = 0.128G^{0.8}$  donde  $h_q$  está en  $\text{btu}/\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$  y  $G$  está en  $\text{lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$ .  **$t = 44 \text{ min}$ .**

2.11. Para secar una pasta alimenticia desde una humedad de 38 % hasta 12 %, ambas en base húmeda, se emplea un secador de túnel que opera en contracorriente y que está compuesto por tres secciones de secado, una de precalentamiento y dos de recalentamiento de aire según se ilustra en la Figura. Para el secado se emplea aire atmosférico a  $20^\circ\text{C}$  con una temperatura de bulbo húmedo de  $15^\circ\text{C}$  el cual se precalienta hasta  $65^\circ\text{C}$  antes de alimentarlo a la primera sección del secador. Después de entrar en contacto con el alimento en esta sección, el aire sale con una humedad relativa de 90 %. Antes de entrar a la segunda sección el aire se recalienta hasta  $65^\circ\text{C}$  y sale de ella con una humedad relativa de 90 %, volviendo a recalentarse hasta  $65^\circ\text{C}$  antes de entrar a la tercera sección para descargar finalmente al exterior con una humedad relativa de 90 %. Si el flujo másico de alimento húmedo que entra al secador es de  $160000 \text{ kg}/\text{d}$ , y si las pérdidas de calor son despreciables, calcula:

- a) Las condiciones del aire (T y H) a lo largo del proceso.
- b) El flujo másico de aire seco ( $\text{kg}/\text{d}$ ) que entra al secador.
- c) El flujo volumétrico de aire húmedo ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) alimentado al secador.
- d) La potencia ( $\text{kW}$ ) consumida para precalentar el aire atmosférico.
- e) La potencia total ( $\text{kW}$ ) consumida para recalentar el aire a lo largo del túnel.

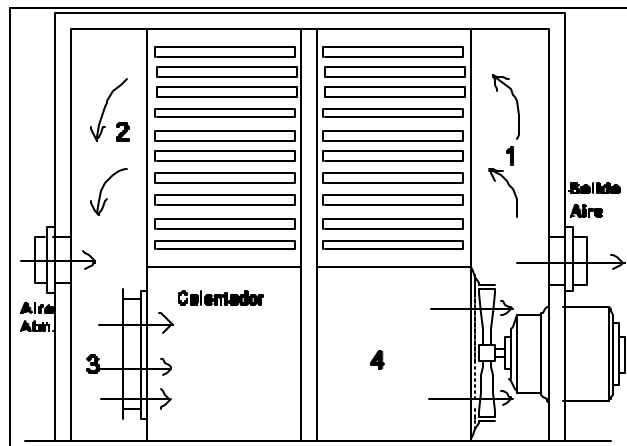
**b)  $G = 1\,249\,593\text{ kg / d}$ ; c)  $V = 1\,049\,658\text{ m}^3 / \text{d}$ ; d)  $Q_1 = 665\text{ kW}$ ; e)  $Q_2 + Q_3 = 979\text{ kW}$ .**



2.12. Un secador de bandejas como el que se muestra en la figura contiene 20 bandejas acomodadas en 2 columnas de 10 bandejas cada una. Las dimensiones de cada bandeja son  $(0.914 \times 0.763 \times 0.0381)$  m, y el aire fluye perpendicularmente sobre las bandejas de tal forma que el secado se efectúa sólo por su superficie superior. Los soportes que las sostienen están separados entre si 10.16 cm. En el punto 1, la temperatura de bulbo seco del aire es  $93.3\text{ }^\circ\text{C}$  ( $200\text{ }^\circ\text{F}$ ) y su humedad absoluta es  $0.05\text{ kgH}_2\text{O/kg as}$ . El aire atmosférico entra a  $26.7\text{ }^\circ\text{C}$  ( $80\text{ }^\circ\text{F}$ ) y una humedad absoluta de  $0.01\text{ kgH}_2\text{O/kg as}$ . En el punto 1 la velocidad del aire es  $3.05\text{ m/s}$ . El secado se lleva a cabo en el período de velocidad constante y el agua del material a secar se evapora a razón de  $27.24\text{ kg/h}$ . Determina:

- El área total de secado,  $\text{m}^2$
- El “flux” de secado en el período de velocidad constante,  $\text{kg/h}\cdot\text{m}^2$
- El área disponible para el flujo del aire,  $\text{m}^2$

- d) El flujo volumétrico de aire que circula entre las charolas,  $\text{m}^3/\text{s}$
- e) El flujo másico de aire seco que circula entre las charolas,  $\text{kg}/\text{s}$
- f) Las condiciones del aire en los diferentes puntos del secador
- g) El flujo másico de aire seco que entra y sale del secador,  $\text{kg}/\text{h}$
- h) El consumo de energía del calentador,  $\text{kW}$
- i) El porcentaje de aire recirculado.



- a)  $A = 14 \text{ m}^2$ ; b)  $R_c = 2 \text{ kg} / \text{m}^2 \times \text{h}$ ; c)  $A_f = 0.64 \text{ m}^2$ ; d)  $V = 2 \text{ m}^3 / \text{s}$ ; e)  $G = 1.74 \text{ kg} / \text{s}$ ; g)  $G = 688 \text{ kg} / \text{h}$ ; h)  $Q = 35 \text{ kW}$ ; i) **Rec. = 90 %.**

2.13. Se secan  $1000 \text{ kg}/\text{h}$  de harina de pescado cuya humedad inicial es 25% (bh) en un secador continuo que opera en contracorriente. El harina entra a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  y la capacidad calorífica del sólido seco es  $0.444 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ . Se usan  $5000 \text{ m}^3/\text{h}$  de aire a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  con una humedad absoluta de  $0.008 \text{ kg}/\text{kg}$ . El aire sale del secador a  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ . Calcula:

- a) La humedad final de la harina.

b) La temperatura de la harina a la salida del secador.

**a)  $h = 18.3 \%$ ; b)  $45.5 \text{ EC}$ .**

2.14. Se producen 1000 kg sólido seco por hora de un material con una humedad de 0.08 kg/kg sólido seco. Su capacidad calorífica es 2 kJ/kg  $\cdot$ °C y el material entra al secador a 55 °C con aire a 0.007 kg/kg aire seco, y sale del secador a 100 °C. El aire sale del secador con una humedad relativa de 15 %. Suponga que las entalpías de entrada y salida son iguales. Determina:

a) El flujo de aire (kg/h) a la entrada del secador

b) El contenido de humedad (kg/kg) del material a la entrada del secador.

**a)  $G = 23809 \text{ kg / h}$ ; b)  $h_e = 0.58 \text{ kg / kg}$ .**

2.15. En un secador de lecho fluido se secan zanahorias rebanadas. Las zanahorias entran al secador a 25 °C con una humedad de 60 % (bh). Para secarlas se usa aire ambiente, el cual está a 20 °C y 60 % de humedad relativa, que se calienta eléctricamente hasta 120 °C antes de entrar al secador. El producto sale del secador a la temperatura de bulbo húmedo del aire y éste sale del secador a una temperatura 10 °C superior a la temperatura de salida de las zanahorias. El calor específico de los sólidos secos es 2 kJ/kg $\cdot$ K. Calcular el flujo másico de producción de zanahorias secas si su humedad final es 10 % (bh) y si el flujo másico de aire que entra al secador es 700 kgas/h.  **$m_p = 15.1 \text{ kg/h}$ .**

2.16. Un flujo volumétrico de 1.5 m<sup>3</sup>/s de aire ambiente con una



temperatura de rocío de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa de  $60\%$  se calienta eléctricamente hasta una temperatura de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El aire caliente se alimenta a un secador de charolas que contiene  $200\text{ kg}$  de manzana rebanada cuya humedad inicial es  $80\%$  bh. El aire sale del secador con una temperatura de rocío de  $21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Determina:

- a) El costo ( $\$/\text{h}$ ) de calentamiento del aire si la tarifa de consumo de energía eléctrica es de  $\$ 0.05/\text{kW}\cdot\text{h}$ .
  - b) El flujo másico de agua ( $\text{kg}/\text{h}$ ) evaporada de las manzanas.
  - c) La humedad final (bh) de las manzanas después de  $1.5$  horas de operación.
- a)  $2.45\text{ } \$/\text{h}$ ; b)  $m_{\text{H}_2\text{O}} = 81.2\text{ kg} / \text{h}$ ; c)  $h = 19.1\%$ .**