

Secado

Problemas Resueltos

01/06/2005

Juan Sebastián Ramírez Navas

Comentarios a:

juansebastian_r@hotmail.com

Tabla de Contenidos	Pág
1. PROBLEMAS PROPUESTOS	4
1.1. (9.3.1) Humedad a partir de la presión de vapor.	4
1.2. (9.3.2) Porcentaje de humedad relativa.	6
1.3. (9.3.3) Uso de la gráfica de humedad.	8
1.4. (9.3.4) Propiedades del aire que entra a un secador.	10
1.5. (9.3.5) Temperatura de saturación adiabática.	12
1.6. (9.3.9) Deshumidificación de aire.	14
1.7. (9.6.1) Tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante.	15
1.8. (9.6.2) Predicción del efecto de las variables de proceso sobre la velocidad de secado.	17
1.9. (9.6.3) Predicciones en la región de secado de velocidad constante.	20
1.10. (9.6.4) Secado de una torta de filtración en la región de velocidad constante.	23
1.11. (9.7.2) Ensayos de secado de un producto alimenticio.	26
1.12. (9.7.3) Predicción de tiempo de secado.	30
1.13. (9.8.1) Secado de materiales biológicos en un secador de bandejas.	34
1.14. (9.8.2) Secado por radiación, conducción y convección.	38
1.15. (9.9.3) Coeficiente de difusión.	42
1.16. (9.10.1) Secado de un lecho de sólidos por circulación cruzada.	45
1.17. (9.10.2) Deducción de la ecuación para el secado por circulación cruzada.	50
1.18. (9.10.3) Secado por circulación cruzada en el periodo de velocidad constante.	55
2. ANEXOS	58
2.1. Anexo 1: Tablas de Vapor (Interpolaciones)	58
2.2. Anexo 2.2: Carta Psicrométrica	59

1. PROBLEMAS PROPUESTOS

1.1. (9.3.1) HUMEDAD A PARTIR DE LA PRESIÓN DE VAPOR.

El aire de una habitación esta a 37.8 °C (100 °F) y a presión total de 101.3 kPa abs., contiene vapor de agua presión total $P_A = 3.59$ kPa. Calcule: a) La humedad; b) La humedad de saturación y el porcentaje de humedad; c) Porcentaje de humedad relativa.

1.1.1. Datos

Temperatura (aire):	37.8 °C (100°F)
Presión total (aire):	101.325 kPa abs
Presión total (vap agua, P_A):	3.59 kPa

1.1.2. Cálculos

a) Cálculo de la **humedad**, H.

$$H = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{p_A}{P - p_A}$$

$$H = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{3.59}{101.33 - 3.59} = \frac{64.69}{2831.38} = 0.02285 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire seco}}$$

b) Cálculo de la **humedad de saturación**, H_s y el **porcentaje de humedad**, H_p .

De las tablas de vapor se obtiene que la presión de vapor de agua a 37.8°C es 6.67 kPa

$$H_s = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{p_{As}}{P - p_{As}}$$

$$H_s = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{6.67}{101.33 - 6.67} = 0.04383 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire}}$$

$$H_p = \frac{H}{H_s} * 100 = \frac{0.02285}{0.04383} * 100 = 52.13\%$$

c) Cálculo del **porcentaje de humedad relativa**, H_R .

$$H_R = \frac{P_A}{P_{AS}} * 100 = \frac{3.59}{6.67} * 100 = 53.82\%$$

1.1.3. Resultados

H:	0.02285 kg H ₂ O/kg aire seco	H_p:	52.13%
H_s:	0.04383 kg H ₂ O/kg aire	H_R:	53.82%

1.2. (9.3.2) PORCENTAJE DE HUMEDAD RELATIVA.

El aire de una habitación tiene humedad H de 0.021 kg H_2O /kg de aire seco a 32.2°C (90°F) y a 101.3 kPa abs de presión. Calcule: a) El porcentaje de humedad; b) El porcentaje de humedad relativa.

1.2.1. Datos

Temperatura (aire):	32.2 °C (90°F)
Presión total (aire):	101.325 kPa abs
Humedad (Aire)::	0.021 kg H_2O /kg de aire seco

1.2.2. Cálculos

a) Cálculo de la presión de vapor de agua, P_A

$$H = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{p_A}{P - p_A}$$

$$P_A = \frac{1.608 \cdot H \cdot P}{(1.608 \cdot H + 1)}$$

$$P_A = \frac{1.608 \cdot 0.021 \cdot 101.325}{(1.608 \cdot 0.021 + 1)} = 3.31 \text{ kPa abs}$$

b) Cálculo de la Humedad de saturación, H_S

De las tablas de vapor se obtiene que la presión de vapor de agua a 32.2°C es 4.83 kPa

$$H_S = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{p_{AS}}{P - p_{AS}}$$

$$H_S = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{4.83}{101.33 - 4.83} = 0.03113 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg aire}}$$

c) Cálculo del **porcentaje de humedad** H_p .

$$H_p = \frac{H}{H_s} * 100 = \frac{0.021}{0.03113} * 100 = 67.46\%$$

d) Cálculo del **porcentaje de humedad relativa**, H_R .

$$H_R = \frac{P_A}{P_{As}} * 100 = \frac{3.31}{4.83} * 100 = 68.53\%$$

1.2.3. Resultados

Porcentaje de humedad, H_p :	67.5%
Porcentaje de humedad relativa, H_R :	68.53%

1.3. (9.3.3) USO DE LA GRÁFICA DE HUMEDAD.

El aire entra a un secador a temperatura de $65.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($150\text{ }^{\circ}\text{F}$) y punto de rocío de $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($60\text{ }^{\circ}\text{F}$). Usando la gráfica de humedad, determine la humedad real, el porcentaje de humedad y el volumen húmedo de esta mezcla. Además, calcule también c_s usando unidades SI y del sistema inglés.

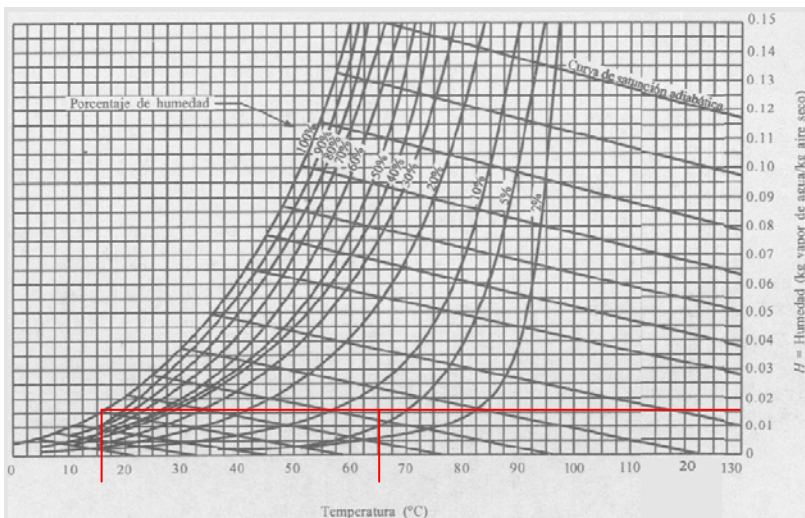
1.3.1. Datos

Temperatura (entrada):	$65.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (150°F)
Punto de rocío (aire):	15.6°C (60°F)

1.3.2. Cálculos

a) Cálculo de la humedad, H ,

De la carta psicrométrica se obtiene que la humedad es $H=0.015\text{ kg H}_2\text{O/kg}$ aire seco. Localizando en la gráfica este punto de H y $T = 65.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, el porcentaje de humedad H_p resulta ser 6.6%, procediendo con una interpolación vertical entre las líneas de 5 y 10%.



b) Cálculo del calor humedo, c_s ,

$$c_s = 1.005 + 1.88(H)$$

$$c_s = 1.005 + 1.88(0.015) = 1.0332 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco} \cdot \text{K}}$$

c) Cálculo del volumen humedo, v_H ,

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(H)) \cdot T [\text{K}]$$

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(0.015)) \cdot (65.6 + 273)$$

$$v_H = 0.9814 \frac{\text{m}^3 \text{ de aire + vapor de agua}}{\text{kg aire seco}}$$

1.3.3. Resultados

H:	0.015 kg H ₂ O/kg aire seco
c_s:	1.0332 kJ/kg aire seco·K; (0.246 btu/lb _m aire seco·°F)
H_p:	6.6%
v_H:	0.9814 m ³ (de aire + vapor de agua)/kg aire seco

1.4. (9.3.4) PROPIEDADES DEL AIRE QUE ENTRA A UN SECADOR.

Una mezcla de aire y vapor de agua que se alimenta a un proceso de secado, tiene una temperatura de bulbo seco de 57.2 °C (135 °F) y humedad de 0.030 kg H₂O/kg de aire seco. Usando la gráfica de humedad y las ecuaciones apropiadas, determine el porcentaje de humedad, la humedad de saturación a 57.2 °C del punto de rocío, de calor húmedo y de volumen húmedo.

1.4.1. Datos

Temperatura (b.s.):	57.2 °C (135°F)
Humedad (Aire):	0.030 kg H ₂ O/kg de aire seco

1.4.2. Cálculos

a) Cálculo del porcentaje de humedad, **H_p**,

Localizando en la gráfica este punto de H y T, el porcentaje de humedad **H_p** resulta ser 17.22%, procediendo con una interpolación vertical entre las líneas de 10 y 20%.

b) Cálculo de la humedad de saturación, **H_s**,

$$H_s = \frac{H}{H_p} * 100$$

$$H_s = \frac{0.03}{17.22} * 100 = 0.17419 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire}}$$

c) Cálculo del punto de rocío,

Si vamos por la recta de humedad hacia la izquierda hasta la curva de 100% de humedad y comprobamos la temperatura del punto de rocío observamos que esta da 26.5°C

d) Cálculo calor humedo, c_s ,

$$c_s = 1.005 + 1.88(H)$$

$$c_s = 1.005 + 1.88(0.03) = 1.059 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco} \cdot \text{K}}$$

e) Cálculo del volumen humedo, v_H ,

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(0.03)) \cdot (57.2 + 273)$$

$$v_H = 0.9796 \frac{\text{m}^3 \text{ de aire + vapor de agua}}{\text{kg aire seco}}$$

1.4.3. Resultados

H_p :	17.25%
$T(\text{pto rocio})$:	26,5°C
H_s :	0.17391
c_s :	1.059 kJ/kg aire seco·K
v_H :	0.9796 m ³ (de aire + vapor de agua)/kg aire seco

1.5. (9.3.5) TEMPERATURA DE SATURACION ADIABÁTICA.

Una corriente de aire a 82.2 °C (180 °F) con humedad $H = 0.0655$ kg H_2O /kg de aire seco, se pone en contacto con agua en un saturador adiabático. Sale del proceso con 80% de saturación.

- ¿Cuáles son los valores finales de H y T °C?
- ¿Cuáles serían los valores de H y T para el 100% de saturación?

Respuesta: a) $H = 0.079$ kg H_2O /kg de aire seco, $T = 52.8$ °C (127°F)

1.5.1. Datos

Temperatura (aire):	82.2 °C (180°F)
Agua	80% de saturación
Humedad (Aire)::	0.0655 kg H_2O /kg de aire seco

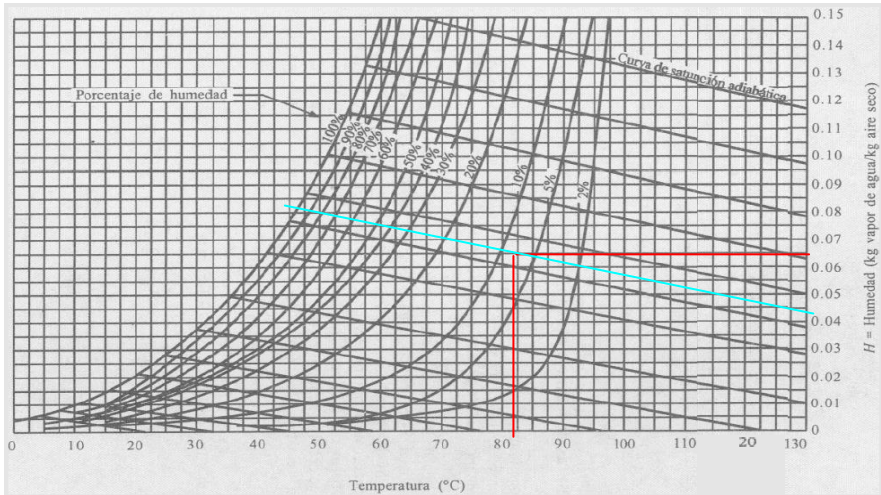
1.5.2. Cálculos

- Cálculo de H y T finales

En la gráfica de humedad se localiza el punto $H = 0.0655$ y $T = 82.2$ °C. Se recorre entonces la curva de saturación adiabática que pasa por este punto hacia arriba y hacia la izquierda hasta llegar a la línea de 80% a 52 °C y $H = 0.0790$ kg H_2O /kg de aire seco.

- Cálculo de H y T para el 100% de saturación

Se recorre la misma línea hasta llegar a 100% de saturación, donde $T = 46.5$ °C y $H=0.082$ kg H_2O /kg de aire seco.



1.5.3. Resultados

H:	0.079 kg H ₂ O/kg aire seco
T:	52°C
H:	0.082 kg H ₂ O/kg aire seco
T:	46.5°C

1.6. (9.3.9) DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE.

Se desea secar aire con temperatura de bulbo seco de 37.8 °C y temperatura de bulbo húmedo de 26.7 °C, enfriándolo primero a 15.6 °C para condensar el vapor de agua y después calentándolo a 23.9 °C.

- Calcule la humedad y el porcentaje de humedad iniciales.
- Calcule la humedad y el porcentaje de humedad finales.
[Sugerencia: Localice el punto inicial en la gráfica de humedad. Después, desplácese horizontalmente (enfriamiento) hasta la línea de 100% de saturación. Siga la línea hasta 15.6 °C. Después, desplácese horizontalmente hacia la derecha hasta 23.9 °C.]

1.6.1. Datos

Temperatura (b.s):	37.8 °C
Enfriamiento	15.6°C
Temperatura (b.h):	37.8 °C
calentamiento:	23.9°C

1.6.2. Cálculos

- Cálculo la humedad, **H** y el porcentaje de humedad **H_p** iniciales.

De la carta psicrométrica se obtiene que H es igual a 0.013 y que H_p es 39%.

- Cálculo la humedad, **H** y el porcentaje de humedad **H_p** finales.

De la carta psicrométrica se obtiene que H es igual a 0.015 y que H_p es 63%.

1.6.3. Resultados

H:	0.013 kg H ₂ O/kg aire seco	H_p:	39%
H:	0.015 kg H ₂ O/kg aire seco	H_p:	63%

1.7. (9.6.1) TIEMPO DE SECADO DURANTE EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Un lote de sólido húmedo se procesa en un secador de bandejas usando condiciones de secado constante y un espesor de material en la bandeja de 25.4 mm. Sólo se expone al secado la superficie superior. La velocidad de secado durante el periodo de velocidad constante es $R = 2.05 \text{ kg H}_2\text{O/h}\cdot\text{m}^2$ ($0.42 \text{ lb}_m\text{H}_2\text{O/h}\cdot\text{pie}^2$). La relación L_s/A usada es $24.4 \text{ kg sólido seco/m}^2$ superficie expuesta (5.0 lb_m sólido seco/ pie^2). La humedad libre inicial es $X_1 = 0.55$ y el contenido crítico de humedad $X_C = 0.22 \text{ kg de humedad libre/kg de sólido seco}$.

Calcule el tiempo para secar un lote de este material desde $X_1 = 0.45$ hasta $X_2 = 0.30$, usando las mismas condiciones de secado, pero un espesor de 50.8 mm con secado para las superficies superior e inferior. (Sugerencia: Calcule primero L_s/A para estas nuevas condiciones.).

1.7.1. Datos

Espesor (bandeja):	25.4 mm
Relación L_s/A :	$24.4 \text{ kg sólido seco/m}^2$
Velocidad de secado, R_c :	$2.05 \text{ kg H}_2\text{O/h}\cdot\text{m}^2$
Humedad libre inicial, X_1 :	0.55
Contenido crítico de humedad, X_C :	$0.22 \text{ kg de humedad libre/kg de sólido seco}$

1.7.2. Cálculos

a) Cálculo de la relación L_s/A .

$$\left(\frac{L_s}{A}\right)_2 = \frac{\left(\frac{L_s}{A}\right)_1 \cdot \text{espesor}_2}{\text{espesor}_1}$$

$$\left(\frac{L_s}{A}\right)_2 = \frac{24.4 \cdot 50.8}{25.4} = 48.8 \frac{\text{kg sólido seco}}{\text{m}^2}$$

- b) Cálculo del tiempo para secar las superficies superior e inferior, t.

Los valores de X_1 y X_2 suministrados en el enunciado del problema son mayores al valor de X_C , esto permite evidenciar que el tiempo calculado se encuentra en el periodo de velocidad constante.

$$t[h] = \frac{L_s}{A \cdot R_c} (X_1 - X_2)$$

$$t[h] = \frac{48.8}{2.05} (0.45 - 0.30) = 3.5707h$$

Siendo el tiempo de secado de cada una de las superficies 3.5707/2 dando $t = 1.785h$

1.7.3. Resultados

t:	1.785h
----	--------

1.8. (9.6.2) PREDICCIÓN DEL EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO SOBRE LA VELOCIDAD DE SECADO.

Al usar las condiciones del ejemplo 9.6-3 para el periodo de secado de velocidad constante, proceda a lo siguiente: a) Pronostique el efecto sobre R_c cuando la velocidad del aire es de sólo 3.05 m/s. b) Pronostique el efecto de la elevación de la temperatura del gas a 76.7 °C, cuando H permanece constante. c) Pronostique el efecto sobre el tiempo t de secado.

1.8.1. Datos

Dimensiones (bandeja):	0.457 x 0.457 m
Profundidad (bandeja):	25.4 mm
Velocidad del aire, v_1 :	6.1 m/s = 21960 m/h
Temperatura:	65.6°C
Humedad, H_1 :	0.01 kg H ₂ O/kg aire seco
Volumen humedo, v_H :	0.974 m ³ /kg aire seco
Densidad, ρ :	1.037kg/m ³
Velocidad másica, G_1 :	22770 kg/h·m ²
Velocidad de secado, RC1:	3.39 kg H ₂ O/h·m ²
Velocidad del aire, v_2 :	3.05 m/s = 10980 m/h
Temperatura:	76.7°C

1.8.2. Cálculos

a) Cálculo de G_2 :

$$G_2 = \rho \cdot v_2$$

$$G_2 = 1.037 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 10980 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right]$$

$$G_2 = 11386.26 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

b) Cálculo de la **velocidad de secado**, R_{C2} :

$$\frac{R_{C1}}{R_{C2}} = \frac{\frac{h_1}{\lambda_w}}{\frac{h_2}{\lambda_w}} = \frac{\frac{0.0204 \cdot G_1^{0.8}}{\lambda_w}}{\frac{0.0204 \cdot G_2^{0.8}}{\lambda_w}} = \frac{G_1^{0.8}}{G_2^{0.8}}$$

$$R_{C2} = \frac{R_{C1} \cdot G_2^{0.8}}{G_1^{0.8}}$$

$$R_{C2} = \frac{3.39 \cdot (11386.26)^{0.8}}{(22770)^{0.8}} = 1.9472 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

c) Cálculo de las nuevas condiciones de secado:

Del diagrama Psicrométrico (anexo 2) se obtiene que la nueva temperatura de bulbo húmedo manteniendo la humedad constante es de 31.1°C

d) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor, h :

$$h = 0.0204 \cdot G^{0.8}$$

$$h = 0.0204 \cdot (22770)^{0.8} = 62.4483 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

e) Cálculo del calor latente, λ_w :

De las tablas de vapor (anexo 1) se tiene que h_g y h_f son respectivamente: 2557.67 y 130.28 kJ/kg

$$\lambda_w = h_g - h_f$$

$$\lambda_w = 2557.6764 - 130.2895 = 2427.3870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

f) Cálculo de la **velocidad de secado** a las nuevas temperaturas, R_c :

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} (3600)$$

$$R_c = \frac{62.4483 \cdot (76.7 - 31.1)}{2427.3870E3} (3600) = 4.2233 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

g) Pronostique el efecto sobre el **tiempo t de secado** entre los contenidos de humedad X_1 y X_2 , cuando el espesor de material seco es de 38.1 mm en lugar de 25.4 mm, y el secado se verifica todavía en el periodo de velocidad constante

Al incrementar el espesor en el periodo de velocidad constante se incrementa también el tiempo de secado. Esto se evidencia al analizar la ecuación de cálculo de tiempo de secado en el periodo de velocidad constante:

$$t = \frac{L_s}{A \cdot R_c} (X_1 - X_2)$$

En la que se observa que al incrementar el espesor estamos incrementado L_s y esto genera un incremento en el tiempo.

1.8.3. Resultados

a) Velocidad de secado, R_c :	1.9472 kg/h·m ²
b) Velocidad de secado, R_c :	4.2233 kg/h·m ²
c) se incrementa el tiempo de secado	

1.9. (9.6.3) PREDICCIONES EN LA REGIÓN DE SECADO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Un material sólido insoluble y granular con humedad, se está secando en el periodo de velocidad constante en una bandeja de 0.61 m x 0.61 m, con una profundidad del lecho de 25.4 mm. Los lados y el fondo de la bandeja están aislados. El aire fluye en paralelo por la superficie superior a una velocidad de 3.05 m/s, y tiene temperatura de bulbo seco de 60 °C y temperatura de bulbo húmedo de 29.4 °C (85 °F). La bandeja contiene 11.34 kg de sólido seco con un contenido de humedad libre de 0.35 kg H₂O/kg de sólido seco, y se desea secar el material en el periodo de velocidad constante hasta lograr 0.22 kg H₂O/kg de sólido seco. a) Pronostique la velocidad de secado y el tiempo necesario en horas. b) Pronostique el tiempo necesario cuando la profundidad del lecho de material se aumenta a 44.5 mm.

1.9.1. Datos

Área bandeja:	0.61 m x 0.61 m
Profundidad de lecho:	25.4 mm
Velocidad del aire:	3.05 m/s = 10980 m/h
Temperatura (b.s.):	60 °C
Temperatura (b.h.):	29.4 °C (85°F)
Sólido seco:	11.34 kg
Contenido de humedad libre, X ₁ :	0.35 kg H ₂ O/kg de sólido seco
Humedad final, X ₂ :	0.22 kg H ₂ O/kg de sólido seco

1.9.2. Cálculos

De la carta psicrométrica (anexo 2) se obtiene que a las temperaturas de bulbo húmedo y seco la humedad es igual a 0.0135 kg H₂O/kg aire seco.

a) Cálculo del volumen húmedo, v_H,

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(H)) \cdot T$$

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(0.0135)) \cdot (302.55) = 0.8748 \frac{\text{m}^3}{\text{kg a. s.}}$$

b) Cálculo de la densidad, ρ ,

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{v_H}$$

$$\rho = \frac{1 + 0.0135}{0.8748} = 1.1585 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

h) Cálculo de G_2 :

$$G = \rho \cdot v = 1.1585 \cdot 10980 = 12720.28 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

i) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor, h :

$$h = 0.0204 \cdot G^{0.8}$$

$$h = 0.0204 \cdot (12720.28)^{0.8} = 39.1947 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

j) Cálculo del calor latente, λ_w :

De las tablas de vapor (anexo 1) se tiene que h_g y h_f son respectivamente: 2554.68 y 123.17 kJ/kg

$$\lambda_w = h_g - h_f = 2554.6822 - 123.1741 = 2431.5081 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

k) Cálculo de la **velocidad de secado**, R_c :

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w(1000)} (3600)$$

$$R_c = \frac{39.1947(60 - 29.4)}{2431.5081(1000)} (3600) = 1.7760 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

l) Cálculo del **tiempo de secado**, t:

$$t = \frac{L_s}{A \cdot R_c} (X_1 - X_2) = \frac{11.34}{0.61^2 \cdot 1.7760} (0.35 - 0.22) = 2.2311 \text{ h}$$

m) Cálculo del **tiempo de secado** cuando la profundidad del lecho de material se aumenta, t:

$$t_2 = \frac{t_1 \cdot \text{espesor}_2}{\text{espesor}_1} = \frac{2.2311 \cdot 44.5}{25.4} = 3.9088 \text{ h}$$

1.9.3. Resultados

R_c:	0.015 kg/h·m ²
t:	2.2311 h
t:	3.9088 h

1.10. (9.6.4) SECADO DE UNA TORTA DE FILTRACIÓN EN LA REGIÓN DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Una torta de filtración se coloca en una bandeja de 1 pie x 1 pie y con una profundidad de 1 pulg se seca por la superficie superior con aire a temperatura de bulbo húmedo de 80 °F y temperatura de bulbo seco de 120 °F, que fluye en paralelo a la superficie a una velocidad de 2.5 pie/s. La densidad de la torta seca es de 120 lb_m/pie³ y el contenido crítico de humedad libre es de 0.09 lb H₂O/lb de sólido seco. ¿Cuánto tiempo se necesitará para secar el material desde un contenido de humedad libre de 0.20 lb H₂O/lb de material seco, hasta el contenido crítico de humedad?.

1.10.1. Datos

Área bandeja:	1 pie x 1 pie	0.3048 m
Profundidad de lecho:	1 pulg	0.0254 m
Velocidad del aire:	2.5 pies/s	2743.2 m/h
Temperatura (b.s.):	120 °F	48.89 °C
Temperatura (b.h.):	80 °F	26.67 °C
Densidad torta seca, ρ:	120 lb _m /pie ³	1922.22 kg/m ³
CH crítica, X _C =X ₂ :	0.09 lb H ₂ O/lb de sólido seco	0.09 kg H ₂ O/kg de sólido seco
CH libre, X ₁ :	0.20 lb H ₂ O/lb de sólido seco	0.20 kg H ₂ O/kg de sólido seco

1.10.2. Cálculos

De la carta psicrométrica se obtiene que a las temperaturas de bulbo húmedo y seco la humedad es igual a 0.0115 kg H₂O/kg aire seco.

a) Cálculo del volumen húmedo, v_H,

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(H)) \cdot T [K]$$

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(0.0115)) \cdot (26.67 + 273.15)$$

$$v_H = 0.8642 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}}$$

b) Cálculo de la densidad, ρ ,

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{v_H} = \frac{1 + 0.0115}{0.8642} = 1.1704 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

n) Cálculo de G_2 :

$$G = \rho \cdot v = 1.1704 \cdot 2743.2 = 3210.64 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

o) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor, h :

$$h = 0.0204 \cdot G^{0.8} = 0.0204 \cdot (3210.64)^{0.8} = 13.0288 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

p) Cálculo del calor latente, λ_w :

De las tablas de vapor (anexo 1) se tiene que h_g y h_f son respectivamente: 2549.87 y 111.74 kJ/kg

$$\lambda_w = h_g - h_f = 2549.8739 - 111.7477 = 2438.1262 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

q) Cálculo de la **velocidad de secado**, R_c :

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w(1000)}(3600)$$

$$R_c = \frac{13.0288(48.89 - 26.67)}{2438.1262(1000)}(3600) = 0.4275 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

r) Cálculo del **tiempo de secado**, t :

Se hace necesario el valor de la masa de sólido seco usado, L_s , se lo obtiene a partir de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{L_s}{V} \therefore L_s = \rho \cdot V = \rho \cdot \phi \cdot A$$

Donde ϕ es el espesor.

Quedando la ecuación del cálculo del tiempo de secado:

$$t = \frac{L_s}{A \cdot R_c} (X_1 - X_2) = \frac{\rho \cdot \phi \cdot A}{A \cdot R_c} (X_1 - X_2)$$
$$t = \frac{1922.22 \cdot 0.0254}{0.4275} (0.20 - 0.09) = 12.6\text{h}$$

1.10.3. Resultados

t:	12.6h
----	-------

1.11. (9.7.2) ENSAYOS DE SECADO DE UN PRODUCTO ALIMENTICIO.

Para determinar la factibilidad de secar cierto producto alimenticio, se obtuvieron datos de secado con un secador de bandejas y flujo de aire sobre la superficie superior expuesta, con área de 0.186 m^2 . El peso de la muestra totalmente seca fue de 3.765 kg de sólido seco. La muestra húmeda en equilibrio pesó $3.955 \text{ kg H}_2\text{O} + \text{sólido}$. Por consiguiente, contenía $3.955 - 3.765$, o 0.190 , kg de humedad de equilibrio. En el ensayo de secado se obtuvieron los siguientes pesos de las muestras en función del tiempo.

- Calcule el contenido de humedad libre $X \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ de sólido seco para cada punto y construye la curva de X en función del tiempo. (Sugerencia: Para 0 h , hay $4.944 - 0.190 - 3.765 = 0.989 \text{ kg}$ de humedad libre en 3.765 kg de sólido seco. Por consiguiente, $X = 0.989/3.765$.)
- Mida las pendientes, calcule las velocidades de secado R en $\text{kg H}_2\text{O/h}\cdot\text{m}^2$, y grafique R en función de X .
- Empleando esta curva de velocidad de secado, pronostique el tiempo total necesario para secar la muestra desde $X = 0.20$ hasta $X = 0.04$. Use un método de integración gráfica para el periodo de velocidad decreciente. ¿Cuál es la velocidad de secado R_c en el periodo de velocidad constante y el valor de X_c ?

1.11.1. Datos

Área, A :	0.186 m^2
Peso total de la muestra seca, L_s :	3.765 kg de sólido seco
Muestra húmeda en equilibrio	$3.955 \text{ kg H}_2\text{O} + \text{sólido}$
Humedad de equilibrio	0.190 kg

1.11.2. Cálculos

a) Cálculo de la **humedad libre**, X:

Tabla 1.5.1 Datos de Ensayos de secado de un producto alimenticio

Tiempo (h)	Peso (kg)	kg de humedad libre en 3.765 kg de sólido seco	X (kg H ₂ O/kg de sólido seco)	dX/dt	R kg/h·m ²
0,0	4,9440	0,9890	0,2627		0,00
0,4	4,8850	0,9300	0,2470	-0,039	0,79
0,8	4,8080	0,8530	0,2266	-0,051	1,03
1,4	4,6990	0,7440	0,1976	-0,048	0,98
2,2	4,5540	0,5990	0,1591	-0,048	0,97
3,0	4,4040	0,4490	0,1193	-0,050	1,01
4,2	4,2410	0,2860	0,0760	-0,036	0,73
5,0	4,1500	0,1950	0,0518	-0,030	0,61
7,0	4,0190	0,0640	0,0170	-0,017	0,35
9,0	3,9780	0,0230	0,0061	-0,005	0,11
12,0	3,9550	0,0000	0,0000	-0,002	0,04

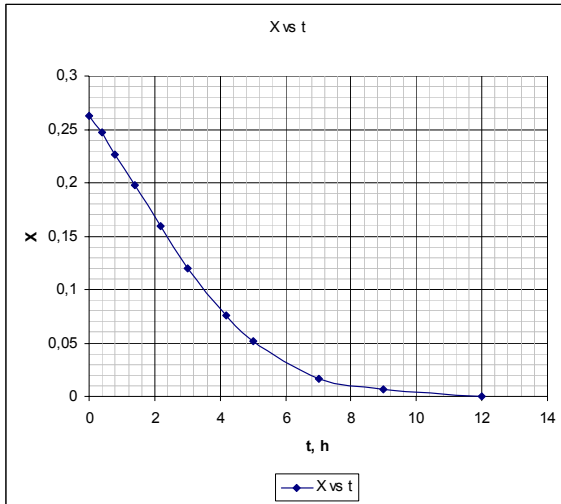
b) Cálculo de la **velocidad de secado**, R_C, en el periodo de velocidad constante:

Mediante la figura 1.5.1 b se puede concluir que el periodo de velocidad constante que esta entre el punto C y el B, lo que corresponde a los valores de R comprendidos entre 1,03 y 1,01, promediando todas estas velocidades se obtiene:

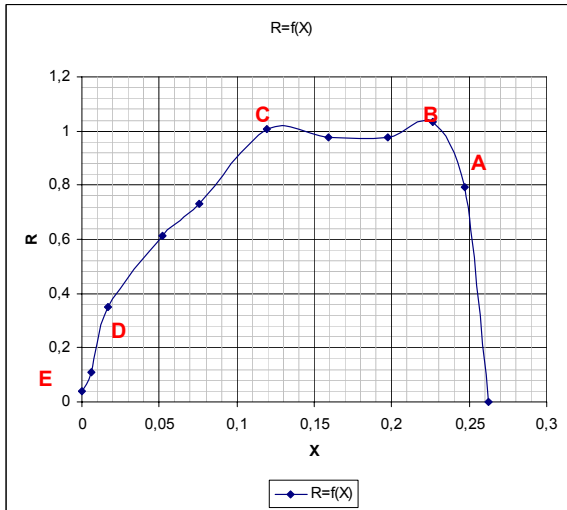
$$R = \frac{1.03 + 0.98 + 0.97 + 1.01}{4} = 0.9985 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

c) Cálculo de la **humedad crítica**, X_C:

El valor de X_C se ubica, de acuerdo a la figura 1.5.1 b en el punto C, equivalente a 0.1193 kg H₂O/kg de sólido seco



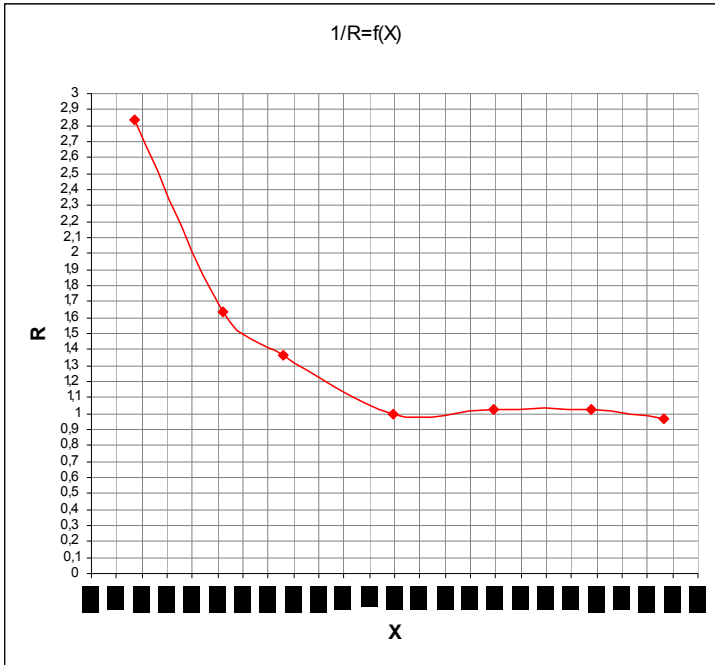
a)



b)

Fig1.5.1 a) X vs t . b) $R = f(X)$

- d) Cálculo del **tiempo total** necesario para secar la muestra desde $X= 0.20$ hasta $X= 0.04$:



$$\text{Área} = A_1 + A_2 = (0.08 * 1.5) + (0.08 * 1) = 2\text{m}^2$$

$$t = \frac{L_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{R} = 20.2419(0.2) = 4.0484\text{h}$$

1.11.3. Resultados

R:	0.9985 kg/h·m ²
X_c:	0.1193 kg H ₂ O/kg sólido seco
t:	4.0484 h

1.12. (9.7.3) PREDICCIÓN DE TIEMPO DE SECADO.

Un material se procesa en un secador de bandejas de tipo lote en condiciones de secado constante. Cuando el contenido inicial de humedad libre era 0.28 kg de humedad libre/kg de sólido seco, se requirieron 6.0 h para secar el material hasta un contenido de humedad libre de 0.08 kg humedad libre/kg de sólido seco. El contenido crítico de humedad libre es de 0.14. Suponiendo una velocidad de secado en la región de velocidad decreciente, donde la velocidad es una línea recta desde el punto crítico hasta el origen, pronostique el tiempo necesario para secar una muestra desde un contenido de humedad libre de 0.33 hasta 0.04 kg de humedad libre/kg de sólido seco. (Sugerencia: Use primero las ecuaciones analíticas para los periodos de velocidad constante y de velocidad decreciente lineal con el tiempo total conocido de 6.0 h. Después emplee las mismas ecuaciones para las nuevas condiciones.)

1.12.1. Datos

Contenido inicial de humedad libre, X_1 :	0.28 kg de humedad libre/kg de sólido seco
Tiempo de secado necesario, t:	6 h
Contenido de humedad libre, X_2 :	0.08 kg humedad libre/kg de sólido seco
Contenido crítico de humedad libre, X_C :	0.14 kg humedad libre/kg de sólido seco
Contenido inicial de humedad libre, X_A :	0.33 kg de humedad libre/kg de sólido seco
Contenido de humedad libre, X_B :	0.04 kg humedad libre/kg de sólido seco

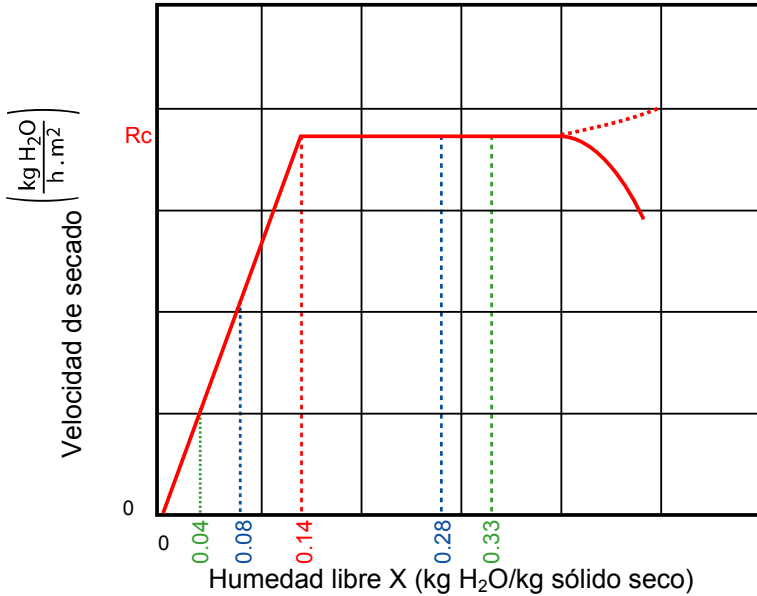


Fig 1.12 HUMEDAD LIBRE VS VELOCIDAD DE SECADO

1.12.2. Cálculos

- a) Cálculo de la relación del **tiempo de secado** para el periodo de velocidad constante, t:

En la figura 1.12 se observa que desde valores de X de 0.14 pasando por 0.28 y 0.33 la velocidad de secado es constante (además de A y L_S), lo que permite realizar el siguiente análisis:

$$\frac{R_C \cdot A}{L_S} = \frac{(X_i - X_C)}{t_{p,vel\ cte1}} = \frac{(X_A - X_C)}{t_{p,vel\ cteA}} = \frac{(X_i - X_C)}{t_{p,vel\ cte i}} \quad (\text{Ec. 1.12-1})$$

Donde, i representa cualquier punto dentro del periodo de velocidad constante. Por lo tanto:

$$\frac{t_{p.\text{vel cteA}}}{t_{p.\text{vel cte1}}} = \frac{(X_A - X_C)}{(X_1 - X_C)} = \frac{(0.33 - 0.14)}{(0.28 - 0.14)} = 1.3571$$

- b) Cálculo de la relación del **tiempo de secado** para el periodo de velocidad decreciente, t:

$$\frac{R_C \cdot A}{L_S \cdot X_C} = \frac{1}{t_{p.\text{vel dec2}}} \ln\left(\frac{X_C}{X_2}\right) = \frac{1}{t_{p.\text{vel decB}}} \ln\left(\frac{X_C}{X_B}\right) = \frac{1}{t_{p.\text{vel deci}}} \ln\left(\frac{X_C}{X_i}\right)$$

De forma similar se puede comprobar que A, R_C, X_C y L_S son valores constantes, entonces:

$$\frac{t_{p.\text{vel decB}}}{t_{p.\text{vel dec2}}} = \frac{\ln\left(\frac{X_C}{X_B}\right)}{\ln\left(\frac{X_C}{X_2}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0.14}{0.04}\right)}{\ln\left(\frac{0.14}{0.08}\right)} = 2.2386$$

- c) Cálculo de la relación del **tiempo de total de secado** para las condiciones iniciales, t:

$$\frac{R_C \cdot A}{L_S} = \frac{(X_1 - X_C)}{t_{p.\text{vel cte1}}} = \frac{X_C}{t_{p.\text{vel dec2}}} \ln\left(\frac{X_C}{X_2}\right)$$

$$\frac{t_{p.\text{vel dec2}}}{t_{p.\text{vel cte1}}} = \frac{X_C}{(X_1 - X_C)} \ln\left(\frac{X_C}{X_2}\right)$$

$$\frac{t_{p.\text{vel dec2}}}{t_{p.\text{vel cte1}}} = \frac{0.14}{(0.28 - 0.14)} \ln\left(\frac{0.14}{0.08}\right) = 0.5596$$

- d) Cálculo del **tiempo de secado** para los datos iniciales, t:

$$t = t_{p.\text{vel cte1}} + t_{p.\text{vel dec2}} = 6\text{h}$$

$$t_{p,\text{vel cte1}} + 0.5596 \cdot t_{p,\text{vel cte1}} = 6\text{h}$$

$$t_{p,\text{vel cte1}} (1 + 0.5596) = 6$$

$$t_{p,\text{vel cte1}} = \frac{6}{1.5596} = 3.8471\text{h}$$

$$t_{p,\text{vel dec2}} = 6 - t_{p,\text{vel cte1}} = 6 - 3.8471 = 2.1529\text{h}$$

e) Cálculo del **tiempo de secado** para los datos finales, t:

El tiempo total de secado para las nuevas condiciones será:

$$t = t_{p,\text{vel cte A}} + t_{p,\text{vel dec B}} = 1,3571 \cdot t_{p,\text{vel cte1}} + 2,2386 \cdot t_{p,\text{vel dec2}}$$

$$t = 1,3571 \cdot 3,8471 + 2,2386 \cdot 2,1529 = 5,2208 + 4,8195$$

$$t = 10,0403\text{h} \Rightarrow$$

$$t_{p,\text{vel cte A}} = 5,2208\text{h} \quad \therefore$$

$$t_{p,\text{vel dec B}} = 4,8195\text{h}$$

1.12.3. Resultados

$t_{p,\text{vel cte 1}}$:	3,8471h
$t_{p,\text{vel dec 2}}$:	2.1529h
$t_{p,\text{vel cte A}}$:	5,2208h
$t_{p,\text{vel dec B}}$:	4,8195h
t:	10,0403h

1.13. (9.8.1) SECADO DE MATERIALES BIOLÓGICOS EN UN SECADOR DE BANDEJAS.

Un material biológico granular que contiene agua, se seca en una bandeja de 0.350 x 0.305 m y 38.1mm de profundidad. El material ocupa 38.1 mm de profundidad en la bandeja, la cual está aislada en los laterales y en el fondo. La transferencia de calor se verifica por convección desde una corriente de aire que fluye paralela a la superficie superior, a velocidad de 3.05 m/s, con temperatura de 65.6 °C y humedad $H = 0.010 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ de aire seco. La superficie recibe radiación que proviene de tuberías calentadas con vapor cuya temperatura superficial es $T_R = 93.3 \text{ °C}$. La emisividad del sólido es $\epsilon = 0.95$. Se desea mantener la temperatura de la superficie del sólido por debajo de 32.2 °C, de tal manera que haya un mínimo de descomposición. Calcule la temperatura de la superficie y la velocidad de secado para el periodo de velocidad constante. Respuesta: $T_S = 31.3 \text{ °C}$, $R_C = 2.583 \text{ kg H}_2\text{O/h}\cdot\text{m}^2$.

1.13.1. Datos

Área bandeja:	$0.35 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} = 0.1225$
Profundidad de lecho:	38.1 mm
Velocidad del aire:	$3.05 \text{ m/s} = 10980 \text{ m/h}$
Temperatura del aire:	$65.6 \text{ °C} = 338.75 \text{ K}$
Humedad del aire, H:	$0.010 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$
Emisividad del sólido, ϵ :	0.95
Temperatura de superficie de sólido, T_S :	$32.2\text{°C} = 305.35 \text{ K}$
Temperatura por radiación, T_R :	$93.3\text{°C} = 366.45 \text{ K}$

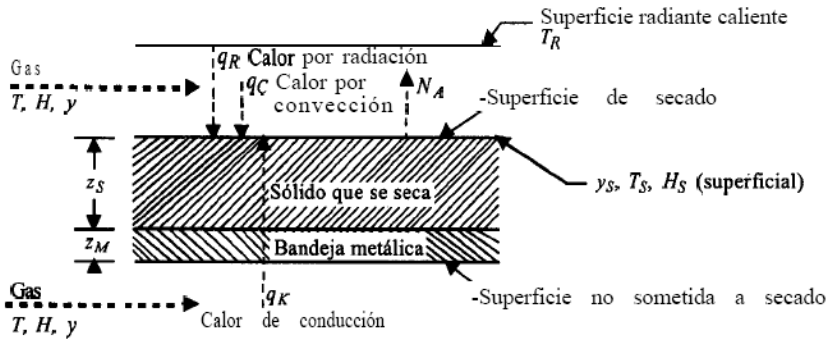


Fig. 1.13.1 Transferencia de calor y de masa en el secado de un sólido en la superficie superior

1.13.2. Cálculos

a) Cálculo de G:

$$G = \rho \cdot v = 1.037 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 10980 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right] = 11386.26 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

b) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección, \$h_c\$:

$$h_c = 0.0204 \cdot G^{0.8} = 0.0204 \cdot (11386.26)^{0.8} = 35.8703 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

c) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación, \$h_R\$:

$$h_R = \varepsilon (5.676) \frac{\left(\frac{T_R}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4}{T_R - T_S}$$

$$h_R = 0.95 (5.676) \frac{\left(\frac{366.45}{100} \right)^4 - \left(\frac{305.35}{100} \right)^4}{366.45 - 305.35} = 8.2420 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

d) Cálculo por iteración de la T_s :

$$q = q_c + q_k + q_r = h_c (T - T_s)A + \cancel{q_k} + h_r (T_r - T_s)A$$

$$q = A(h_c (T - T_s) + h_r (T_r - T_s)) \quad (\text{Ec. 1.13-1})$$

Reemplazando (1) en la ecuación 9.6.7 de Geankoplis

$$R_c = \frac{q}{\lambda_s \cdot A} = \frac{\cancel{A}(h_c (T - T_s) + h_r (T_r - T_s))}{\lambda_s \cdot \cancel{A}}$$

$$R_c = K_y \cdot M_B (H_s - H) \quad (\text{Ec. 1.13-2})$$

Dividiendo para h_c y factorizando:

$$(T - T_s) + \frac{h_r}{h_c} (T_r - T_s) = \frac{\lambda_s \cdot K_y \cdot M_B}{h_c} (H_s - H)$$

$$(T - T_s) + \frac{h_r}{h_c} (T_r - T_s) = \frac{\lambda_s}{C_s} (H_s - H) \quad (\text{Ec. 1.13-3})$$

Despejando T_s :

$$T_s = \frac{h_c \left(T + \frac{h_r}{h_c} T_r - \frac{\lambda_s}{C_s} (H_s - H) \right)}{h_r + h_c} \quad (\text{Ec. 1.13-4})$$

Con la ecuación obtenida se realiza el proceso iterativo:

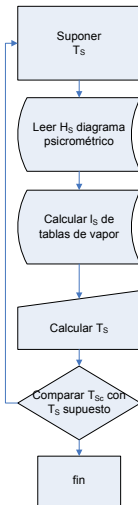
$$H_S = 0,031 \text{ kg H}_2\text{O/kg S.S.}$$

$$\lambda_S = 2424,7204 \text{ kJ/kg}$$

$$c_s = 1.005 + 1.88(0.01) = 1.024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco} \cdot \text{K}}$$

$$T_s = \frac{35.8703 \left(65.6 + \frac{8.2420}{35.8703} 93.3 - \frac{2424.7204}{1.024} (0.031 - 0.01) \right)}{8.2420 + 35.8703}$$

$$T_s = 30.3327^\circ\text{C}$$



$T_s, ^\circ\text{C}$	$\lambda_s, \text{kJ/kg}$	$H, \text{kg H}_2\text{O/kg S.S.}$	$T_s, ^\circ\text{C}$
32,2	2424,7204	0,031	30,3327
31	2427,6294	0,036	20,6434
31,5	2426,4173	0,037	18,7413

e) Cálculo por iteración de la R_C :

$$R_C = \frac{(h_C (T - T_s) + h_R (T_R - T_s))}{\lambda_s}$$

$$R_C = \frac{(35.8703(65.6 - 30.3327) + 8.2420(93.3 - 30.3327))}{2424.7204 \text{E}3} (3600)$$

$$R_C = 2.6487 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

1.13.3. Resultados

T_s	30,3327 °C
R_C	2,6487 kg/hm ²

1.14. (9.8.2) SECADO POR RADIACIÓN, CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN.

Un material granular con humedad se seca en una capa de 25.4 mm de profundidad en un secador de bandejas de tipo lote. La bandeja tiene un fondo metálico cuya conductividad térmica es $k_M = 43.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y un espesor de 1.59 mm. La conductividad térmica del sólido es $k_S = 1.125 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. El aire fluye paralelamente a la superficie expuesta y al fondo metálico a velocidad de 3.05 m/s, temperatura de 60 °C y humedad de $H = 0.010 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ de sólido seco. La superficie superior del sólido, cuya emisividad es 0.94, recibe también calor por radiación directa desde tuberías de vapor que tienen temperatura superficial de 104.4 °C. Estime la temperatura de la superficie y la velocidad de secado para el periodo de velocidad constante.

1.14.1. Datos

Profundidad de lecho:	25.4 mm
Velocidad del aire:	3.05 m/s = 10980 m/h
Temperatura del aire:	60 °C = 333.15 K
Humedad del aire, H:	0.010 kg H ₂ O/kg
Emisividad del sólido, ϵ :	0.94
Temperatura por radiación, T_R :	104.4°C = 377.55 K
Conductividad térmica bandeja, k_M :	43.3 W/m·K
Espesor bandeja, Z_M :	1.59 mm
Conductividad térmica sólido, k_S :	1.125 W/m·K

1.14.2. Cálculos

a) Cálculo de la densidad, ρ ,

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{v_H}$$

$$\rho = \frac{1 + 0.010}{0.9595} = 1.0526 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

b) Cálculo de G:

$$G = \rho \cdot v = 1.053 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 10980 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right] = 11557.8947 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

c) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección, h_c :

$$h_c = 0.0204 \cdot G^{0.8}$$

$$h_c = 0.0204 \cdot (11557.90)^{0.8} = 36.3022 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

f) Cálculo de C_s :

$$c_s = 1.005 + 1.88(\text{H})$$

$$c_s = 1.005 + 1.88(0.01) = 1.024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco} \cdot \text{K}}$$

g) Cálculo de U_K :

El cálculo se lo hace a partir de la ecuación 9.8-5 de Geankoplis

$$U_K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{z_M}{k_M} + \frac{z_s}{k_s}}$$

$$U_K = \frac{1}{\frac{1}{36.3022} + \frac{0.00159}{43.3} + \frac{0.0254}{1.125}} = 19.9358 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

h) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación, h_R :

Para calcular el valor de T_s se asume un $T_{S(\text{asumido})}$ con el que se realiza el proceso iterativo, hasta tener el valor con menor error. Para este caso se comenzará con un valor igual al del ejercicio anterior de 32.2°C. (305.35K)

$$h_R = \varepsilon(5.676) \frac{\left(\frac{T_R}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_S}{100}\right)^4}{T_R - T_S}$$

$$h_R = 0.94(5.676) \frac{\left(\frac{377.55}{100}\right)^4 - \left(\frac{305.35}{100}\right)^4}{377.55 - 305.35} = 8.5909 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

i) Cálculo de T_S :

Despejando de la ecuación 9.8-9 de Geankoplis T_S se obtiene

$$\frac{(H_S - H)\lambda_s}{C_s} = \left(1 + \frac{U_K}{h_c}\right)(T - T_S) + \frac{h_R}{h_c}(T_R - T_S)$$

$$T_S = \frac{h_c \left(\left(1 + \frac{U_K}{h_c}\right) T + \frac{h_R}{h_c} T_R - \frac{(H_S - H)\lambda_s}{C_s} \right)}{h_c + U_K + h_R} \quad (\text{Ec. 1.14-1})$$

$$T_S = \frac{36.30 \left(\left(1 + \frac{19.94}{36.30}\right) 60 + \frac{8.59}{36.30} 104.4 - \frac{(0.031 - 0.01) 2424.72}{1.024} \right)}{36.30 + 19.94 + 8.59}$$

$$T_S = 38.0403^\circ\text{C}$$

Debido a que el valor obtenido se aleja mucho del valor asumido se realiza la iteración para valores mayores y menores al asumido originalmente.

Teniendo como resultado:

$h_R, \text{W/m}^2\text{K}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$\lambda_s, \text{kJ/kg}$	$H, \text{kg H}_2\text{O/kg S.S.}$	$T_s, ^\circ\text{C}$
8,5909	32,2	2424,7204	0,031	38,0334
8,6363	33,5	2421,5689	0,040	26,2040
8,5666	31,5	2426,4173	0,037	30,0232
8,5492	31,0	2427,6294	0,036	31,3140

j) Cálculo de R_C :

$$R_C = \frac{(h_c(T - T_s) + h_R(T_R - T_s))}{\lambda_s}$$

$$R_C = \frac{(36.3022(60 - 31.3140) + 8.2420(104.4 - 31.3140))}{2427.6294\text{E}3} (3600)$$

$$R_C = 2.4708 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

1.14.3. Resultados

T_s	31,3140 °C
R_C	2,4708 kg/hm ²

1.15. (9.9.3) COEFICIENTE DE DIFUSIÓN.

A continuación se tabulan los datos del secado experimental de un material biológico no poroso típico, en condiciones de secado constante en la región de velocidad decreciente.

X/X _c	t(h)	X/X _c	t(h)
1.00	0	0.17	11.4
0.65	2.50	0.10	14.0
0.32	7.00	0.06	16.0

El secado se lleva a cabo por un solo lado de la superficie del material, que tiene un espesor de 10.1 mm. Los datos siguen la ecuación de difusión. Determine la difusividad promedio en el intervalo de X/X_c = 1.0-0.10.

1.15.1. Datos

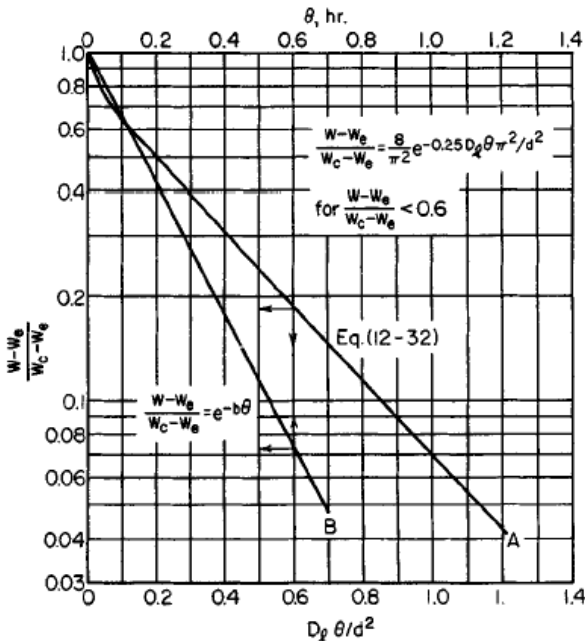


Fig. 1.15.1 Gráfica de las ecuaciones del periodo de velocidad decreciente: A) ecuación (9.9-4) para el desplazamiento de humedad por difusión, B) ecuación (9.9-10) para el desplazamiento de humedad por flujo capilar.

Fuente R. Perry 1995

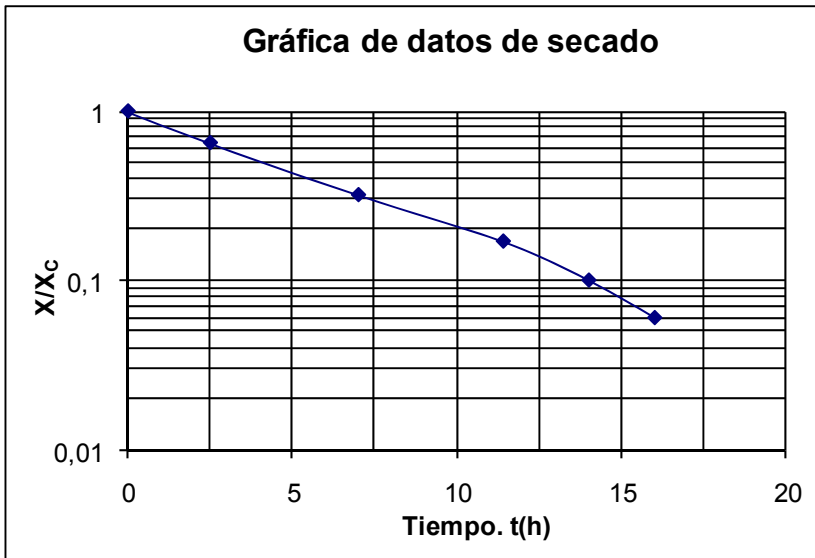


Fig. 1.15.2 Gráfica de los datos de secado.

1.15.2. Cálculos

a) Cálculo de D_L :

$$D_L = \left(\frac{D_L \cdot t}{x_i^2} \right)_{\text{teór}} \frac{x_i^2}{t}$$

$$D_L = (0,12)_{\text{teór}} \frac{0,0101^2}{t}$$

$$D_L = 4,1931\text{E-}06 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Con los datos del ejercicio se calcula cada D_L y se obtiene un valor promedio

X/X_c	$t(h)$	$\left(\frac{D_L \cdot t}{X_i^2}\right)_{teór}$	D_L
1	0		
0,65	2,5		
0,60	2,92	0,12	4,19314E-06
0,50	3,97	0,2	5,13717E-06
0,40	5,44	0,29	5,44282E-06
0,32	7,00	0,38	5,53769E-06
0,30	7,48	0,41	5,58941E-06
0,25	8,78	0,48	5,57432E-06
0,20	10,30	0,56	5,5442E-06
0,17	11,40	0,61	5,45843E-06
0,10	14,00	0,7	5,1005E-06
0,06	16,00	1,05	6,69441E-06
			5,42721E-06

1.15.3. Resultados

$$D_L = 5,42721E-06 \text{ m}^2/\text{s}$$

1.16. (9.10.1) SECADO DE UN LECHO DE SÓLIDOS POR CIRCULACIÓN CRUZADA.

Para el secado de un lecho empacado con cilindros húmedos, usando circulación cruzada del aire de secado. Una pasta granular se extruye para formar cilindros con diámetro de 6,35 mm y longitud de 25,4 mm. El contenido inicial total de humedad es $X_{t1} = 1.0$ kg H₂O/kg de sólido seco y la humedad de equilibrio es $X^* = 0.01$. La densidad del sólido seco es 1602 kg/m³ (100 lb./pie³). Los cilindros se empacan sobre un tamiz con profundidad de $x_1 = 50.8$ mm. La densidad de empaque del sólido seco en el lecho es $\rho_s = 641$ kg/m³. El aire de entrada tiene humedad $H_1 = 0.04$ kg H₂O/kg de aire seco y temperatura $T_1 = 121.1^\circ\text{C}$. La velocidad superficial del aire es 0.381 m/s y atraviesa la totalidad del lecho. El contenido crítico de humedad total es $X_{tc} = 0.50$. Calcule el tiempo total para secar los sólidos hasta $X_t = 0.10$ kg H₂O/kg de sólido seco.

1.16.1. Datos

Diámetro, D_C	0.00635 mm
Longitud, h	0.0254 mm
Contenido inicial total de humedad, X_{t1}	1.0 kg H ₂ O/kg de sólido seco
Humedad de equilibrio, X^*	0.01
Densidad del sólido seco	1602 kg/m ³
Profundidad de x_1	0.0508 mm
Idad de empaque del sólido seco en el lecho, ρ_s	641 kg/m ³
Aire de entrada tiene humedad H_1	0.04 kg H ₂ O/kg de aire seco
Temperatura T_1	121.1°C
Velocidad superficial del aire	0.381 m/s
Contenido crítico de humedad total es X_{tc}	0.50
Contenido final de humedad total X_t	0.10 kg H ₂ O/kg de sólido seco

1.16.2. Cálculos

a) Determinación de T_w y H_w :

$$X_1 = X_{t1} - X^* = 1 - 0.01 = 0.99 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sólido seco}}$$

$$X_c = X_{tc} - X^* = 0.50 - 0.01 = 0.49 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sólido seco}}$$

$$X = X_t - X^* = 0.10 - 0.01 = 0.09 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sólido seco}}$$

Para el gas, $T_1 = 121.1^\circ\text{C}$ y $H_1 = 0.04 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ de aire seco. La temperatura de bulbo húmedo (extrapolando en la gráfica de humedad hasta 121.1°C) es $T_w = 47.2^\circ\text{C}$ y $H_w = 0.074$. La temperatura del sólido corresponde a T_w cuando se desprecian la radiación y la conducción.

b) Cálculo del volumen húmedo, v_H ,

$$v_H = (2.83\text{E-}3 + 4.56\text{E-}3(H)) \cdot T[\text{K}]$$

$$v_H = (2.83\text{E-}3 + 4.56\text{E-}3(0.04)) \cdot (121.1 + 273.15)$$

$$v_H = 1.1876 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}}$$

c) Cálculo de la densidad, ρ ,

La densidad del aire de entrada a 121.1°C y 1 atm es:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{v_H} = \frac{1 + 0.04}{1.1876} = 0.8757 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

d) Cálculo de G_2 :

$$G = \rho \cdot v \left(\frac{1.0}{1.0 + 0.04} \right)$$

$$G = (0.381)(0.8757)(3600) \left(\frac{1.0}{1.04} \right)$$

$$G = 1154.9136 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

Puesto que el valor de entrada $H_t = 0.040$ y el valor de salida será inferior a 0.074, puede emplearse un valor promedio aproximado de H de 0.05 para calcular la velocidad de masa promedio total. El valor promedio aproximado de G , es

$$G = 1154.9136 + 1154.9136(0.05)$$

$$G = 1212.6593 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2} = 0.3369 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

e) Cálculo de la fracción de espacios vacíos, ε : (lecho empacado)

Para 1 m^3 del lecho que contiene sólidos más espacios vacíos. Hay un total de 641 kg de sólido seco presente. La densidad del sólido seco es $1602 \text{ kg sólido seco/m}^3$ de sólido. El volumen de los sólidos en 1 m^3 del lecho es entonces $641/1602$, o 0.40 m^3 de sólido. Por consiguiente,

$$\varepsilon = 1 - 0.40 = 0.60.$$

La longitud del cilindro de sólido es $h = 0.0254 \text{ m}$. El diámetro es $D_c = 0.00635 \text{ m}$. Sustituyendo en la ecuación (9.10-16),

f) Cálculo del factor geométrico, a : (lecho empacado)

$$a = \frac{4(1 - \varepsilon)(h + 0.50 \cdot D_c)}{D_c \cdot h}$$

$$a = \frac{4(1 - 0.6)(0.0254 + 0.50 \cdot 0.00635)}{0.00635 \cdot 0.0254}$$

$$a = 283.5 \frac{\text{m}^2 \text{ área superficial}}{\text{m}^3 \text{ volumen de lecho}}$$

g) Cálculo del diámetro de la partícula esférica, D_p :

$$D_p = (D_c \cdot h + 0.5 \cdot D_c^2)^{1/2}$$

$$D_p = (0.00635 \cdot 0.0254 + 0.5 \cdot 0.00635^2)^{1/2} = 0.01347\text{m}$$

h) Cálculo del número de Reynolds, N_{Re} :

Suponiendo un valor aproximado de temperatura promedio del aire de 93.3°C, la viscosidad del aire es $\mu = 2.15E-5 \text{ kg/m}\cdot\text{s} = 0.0774 \text{ kg/ m}\cdot\text{h}$.

$$N_{Re} = \frac{D_p G_t}{\mu} = \frac{0.01347 \cdot 1212.6593}{0.0774} = 211.0403 < 350$$

i) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor, h :

$$h = 0.2147 \frac{G_t^{0.49}}{D_p^{0.51}} = 0.2147 \frac{(1212.6593)^{0.49}}{(0.01347)^{0.51}} = 62.6450 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

j) Cálculo del calor humedad promedio, c_s :

Al usar las tablas de vapor para $T_w = 47.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_w = 2389 \text{ kJ/kg}$, o $2.389E6 \text{ J/kg}$. El calor húmedo promedio es

$$c_s = 1.005 + 1.88(H) = 1.005 + 1.88(0.05)$$

$$c_s = 1.099 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco} \cdot \text{K}} = 1099 \frac{\text{J}}{\text{kg}_{a.s.} \cdot \text{K}}$$

k) Cálculo del **tiempo de secado** durante el periodo de velocidad constante, t :

$$t = \frac{\rho_s \cdot \lambda_w \cdot x_1 \cdot (X_1 - X_C)}{G \cdot c_s \cdot (T_1 - T_w) \left(1 - e^{-\frac{h \cdot a \cdot x_1}{G \cdot c_s}} \right)}$$

$$t = \frac{(641)(2.389E6)(0.0508)(0.99 - 0.49)}{(0.3369)(1009)(121.1 - 47.2) \left(1 - e^{-\frac{(90.9)(238.5)(0.0508)}{(0.3369)(1009)}} \right)}$$

$$t = 1473.9374s = 0.4094h$$

- l) Cálculo del **tiempo de secado** durante el periodo de velocidad decreciente, t:

$$t = \frac{\rho_s \cdot \lambda_w \cdot x_1 \cdot X_C \cdot \ln\left(\frac{X_C}{X}\right)}{G \cdot c_s \cdot (T_1 - T_w) \left(1 - e^{-\frac{h \cdot a \cdot x_1}{G \cdot c_s}} \right)}$$

$$t = \frac{(641)(2.389E6)(0.0508)(0.49) \ln\left(\frac{0.49}{0.09}\right)}{(0.3369)(1009)(121.1 - 47.2) \left(1 - e^{-\frac{(90.9)(238.5)(0.0508)}{(0.3369)(1009)}} \right)}$$

$$t = 2666.1081s = 0.7459h$$

- m) Cálculo del **tiempo total de secado**, t:

$$t = 0.4094 + 0.7459 = 1.15h$$

1.16.3. Resultados

Tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante:	0.4094 h
Tiempo de secado durante el periodo de velocidad decreciente:	0.7459 h
Tiempo total:	1.1500 h

1.17. (9.10.2) DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN PARA EL SECADO POR CIRCULACIÓN CRUZADA.

Se pueden deducir diferentes formas de las ecuaciones (9.10-11) y (9.10-12), basadas en las expresiones de humedad y de transferencia de masa, en lugar de temperatura y de transferencia de calor. Esto se puede llevar a cabo escribiendo una ecuación de balance de masa similar a la ecuación (9.10-2), en lugar del balance de calor, y una ecuación de transferencia de masa similar a la (9.10-3).

a) Deduzca la ecuación final para el tiempo de secado en el periodo de velocidad constante, usando las ecuaciones de humedad y de transferencia de masa.

b) Repita para el periodo de velocidad decreciente.

1.17.1. Datos

$$t = \frac{\rho_s \cdot \lambda_w \cdot x_1 \cdot (X_1 - X_C)}{G \cdot c_s \cdot (T_1 - T_w) \left(1 - e^{-\frac{h \cdot a \cdot x_1}{G \cdot c_s}} \right)} \quad 9.10-11$$

$$dq = -(G \cdot c_s \cdot A) dT \quad 9.10-2$$

$$t = \frac{\rho_s \cdot \lambda_w \cdot x_1 \cdot X_C \cdot \ln\left(\frac{X_C}{X}\right)}{G \cdot c_s \cdot (T_1 - T_w) \left(1 - e^{-\frac{h \cdot a \cdot x_1}{G \cdot c_s}} \right)} \quad 9.10-12$$

$$dq = (h \cdot a \cdot A) (T - T_w) dz \quad 9.10-3$$

1.17.2. Deducción

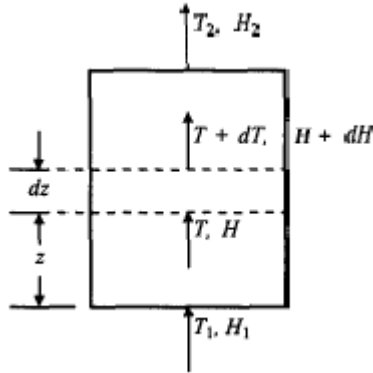


FIGURA 9.10-1. Balances de calor y de material en un secador de circulación cruzada en un lecho empacado.

Se considera un lecho de área de sección transversal uniforme A , por el cual penetra un flujo de aire G , con la humedad de H_1 . Con un balance de material del aire en cualquier momento, dicho gas sale del lecho con humedad H_2 . Donde el agua transferida es igual al cambio de agua en el aire

$$dN_A = G \cdot A \cdot dH \quad (1)$$

Llevando acabo un balance de materia sobre una sección corta del lecho de dz m, el agua transferida es igual a:

$$dN_A = K_y \cdot A \cdot (H - H_w) \cdot M_B \cdot a \cdot dz \quad (2)$$

Igualando la ec (1) y (2) se establece que:

$$G \cdot A \cdot \frac{dH}{(H - H_w)} = K_y \cdot A \cdot M_B \cdot a \cdot dz$$

Estableciendo límites e integrando

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{(H - H_w)} = \frac{K_y \cdot M_B \cdot a}{G} \int_0^z dz$$

$$\ln \frac{H_1 - H_w}{H_2 - H_w} = \frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G} \quad (3a)$$

Eliminando el logaritmo:

$$\frac{H_1 - H_w}{H_2 - H_w} = e^{\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}} \quad \therefore H_2 = \frac{H_1 - H_w}{e^{\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}}} + H_w \quad (3b)$$

La diferencia de humedad media logarítmica es:

$$(H - H_w)_{LM} = \frac{H_1 - H_2}{\ln \frac{H_1 - H_w}{H_2 - H_w}} \quad (4)$$

Introduciendo (3a) en (4):

$$\frac{H_1 - H_2}{(H - H_w)_{LM}} = \frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G} \quad (5)$$

Despejando $(H_w - H)_{LM}$ e introduciendo la ecuación (3b):

$$(H_w - H)_{LM} = \frac{(H_w - H_1) - \frac{(H_w - H_1)}{e^{\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}}}}{\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}}$$

$$(H_w - H)_{LM} = \frac{(H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}} \right)}{\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}} \quad (6)$$

La ecuación (9.6-11) se dedujo para el periodo de velocidad constante de un secado con aire que fluye paralelo a la superficie,

$$t = \frac{L_s (X_1 - X_c)}{A \cdot K_y \cdot M_B (H_w - H)} = \frac{\rho_s (X_1 - X_c)}{a \cdot K_y \cdot M_B (H_w - H)} \quad (7)$$

Introduciendo la ecuación (6) en (7) y generalizando $z = x$, se obtiene para el periodo de velocidad constante de secado

$$t = \frac{\rho_s (X_1 - X_c)}{\bar{a} \cdot K_y \cdot M_B \left(\frac{(H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}} \right)}{\frac{K_y \cdot M_B \cdot \bar{a} \cdot z}{G}} \right)}$$

$$t = \frac{\rho_x \cdot x_1 \cdot (X_1 - X_c)}{G \cdot (H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{k_y \cdot M_B \cdot a \cdot x_1}{G_s}} \right)}$$

Operando de forma similar para el periodo de velocidad decreciente:

$$t = \frac{\rho_s \cdot X_c \cdot \ln \left(\frac{X_c}{X} \right)}{a \cdot K_y \cdot M_B (H_w - H)} \quad (7)$$

Se obtiene que:

$$t = \frac{\rho_s \cdot X_c \cdot \ln \left(\frac{X_c}{X} \right)}{\bar{a} \cdot K_y \cdot M_B \left(\frac{(H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{K_y \cdot M_B \cdot a \cdot z}{G}} \right)}{\frac{K_y \cdot M_B \cdot \bar{a} \cdot z}{G}} \right)}$$

$$t = \frac{\rho_s \cdot X_c \cdot \ln\left(\frac{X_c}{X}\right)}{G \cdot (H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{k_y \cdot M_B \cdot a \cdot x_1}{G_s}}\right)}$$

1.17.3. Resultados

Tiempo para el P V Constante:	$t = \frac{\rho_x \cdot x_1 \cdot (X_1 - X_c)}{G \cdot (H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{k_y \cdot M_B \cdot a \cdot x_1}{G_s}}\right)}$
Tiempo para el P V Decreciente:	$t = \frac{\rho_s \cdot X_c \cdot \ln\left(\frac{X_c}{X}\right)}{G \cdot (H_w - H_1) \left(1 - e^{-\frac{k_y \cdot M_B \cdot a \cdot x_1}{G_s}}\right)}$

1.18. (9.10.3) SECADO POR CIRCULACIÓN CRUZADA EN EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Se están secando esferas cilíndricas de un catalizador húmedo cuyo diámetro es de 12.7 mm, en un secador de circulación cruzada. Las esferas están empacadas en un lecho de 63.5 mm de espesor colocado sobre un tamiz. El sólido se seca por medio de aire que entra a velocidad superficial de 0.914m/s a 82.2°C y con humedad $H = 0.01$ kg H₂O/kg de aire seco. La densidad del sólido seco resulta ser 1522 kg/m³ y la fracción de espacios vacíos en el lecho es 0.35. El contenido inicial de humedad libre es 0.90 kg H₂O/kg de sólido, y el material debe secarse hasta un contenido de humedad libre de 0.45, superior al contenido crítico de humedad libre. Calcule el **tiempo de secado** en este periodo de velocidad constante.

1.18.1. Datos

Diámetro, D_p	0.0127 m
Espesor lecho, h , x_1 :	0.0635 m
Velocidad superficial aire, v :	0.914m/s
Temperatura aire:	82.2°C
Humedad	0.01 kg H ₂ O/kg de aire seco
Densidad del sólido seco	1522 kg/m ³
Fracción de espacios vacíos en el lecho, ϵ :	0.35
Contenido inicial de humedad libre:	0.90 kg H ₂ O/kg de sólido
Contenido de humedad libre final	0.45

1.18.2. Cálculos

a) Determinación de T_w y λ_w :

Con los datos de temperatura y humedad se encuentra, en la carta psicrométrica, que $T_w = 32^\circ\text{C}$ y de las tablas de vapor se encuentra que $\lambda_w = 2425,2052$ kJ/kg.

b) Cálculo del volumen humedo, v_H ,

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(H)) \cdot T [K]$$

$$v_H = (2.83E-3 + 4.56E-3(0.01)) \cdot (82.2 + 273.15)$$

$$v_H = 1.0218 \frac{m^3}{kg \text{ aire seco}}$$

c) Cálculo de la densidad, ρ ,

La densidad del aire de entrada a 82.2°C y 1 atm es:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{v_H} = \frac{1 + 0.01}{1.0218} = 0.9884 \frac{kg}{m^3}$$

d) Cálculo de G_2 :

$$G = \rho \cdot v = (0.9884)(0.914)(3600) = 3252.23 \frac{kg}{h \cdot m^2}$$

e) Cálculo del calor humedad promedio, c_s :

$$c_s = 1.005 + 1.88(H) = 1.005 + 1.88(0.01)$$

$$c_s = 1.0238 \frac{kJ}{kg \text{ aire seco} \cdot K} = 1024 \frac{J}{kg_{a.s.} \cdot K}$$

f) Cálculo del número de Reynolds, N_{Re} :

Suponiendo un valor aproximado de temperatura promedio del aire de 82.2°C, la viscosidad del aire es $\mu = 2.9E-5 \text{ kg/m} \cdot \text{s} = 0.1044 \text{ kg/m} \cdot \text{h}$.

$$N_{Re} = \frac{D_p G_t}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{0.0127 \cdot 3252.23}{0.1044} = 395.6258 > 350$$

g) Cálculo del coeficiente de transferencia de calor, h:

$$h = 0.151 \frac{G_t^{0.59}}{D_p^{0.41}}$$

$$h = 0.151 \frac{(3252.23)^{0.59}}{(0.0127)^{0.41}} = 106.8081 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

h) Cálculo del factor geométrico, a: (lecho empacado)

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{D_p}$$

$$a = \frac{6(1 - 0.35)}{0.0127} = 307.0866 \frac{m^2 \text{ área superficial}}{m^3 \text{ volumen de lecho}}$$

i) Cálculo del **tiempo de secado** durante el periodo de velocidad constante, t:

$$t = \frac{\rho_s \cdot \lambda_w \cdot x_1 \cdot (X_1 - X_C)}{G \cdot c_s \cdot (T_1 - T_w) \left(1 - e^{-\frac{h \cdot a \cdot x_1}{G \cdot c_s}} \right)}$$

$$t = \frac{(1522)(2425.2052)(0.0635)(0.90 - 0.45)}{\left(\frac{3252.23}{3600} \right) (1024) (82.2 - 32) \left(1 - e^{-\frac{(106.81)(307.09)(0.0635)}{\left(\frac{3252.23}{3600} \right) (1024)}} \right)}$$

$$t = 2.5366s = 7.0462E - 4h$$

1.18.3. Resultados

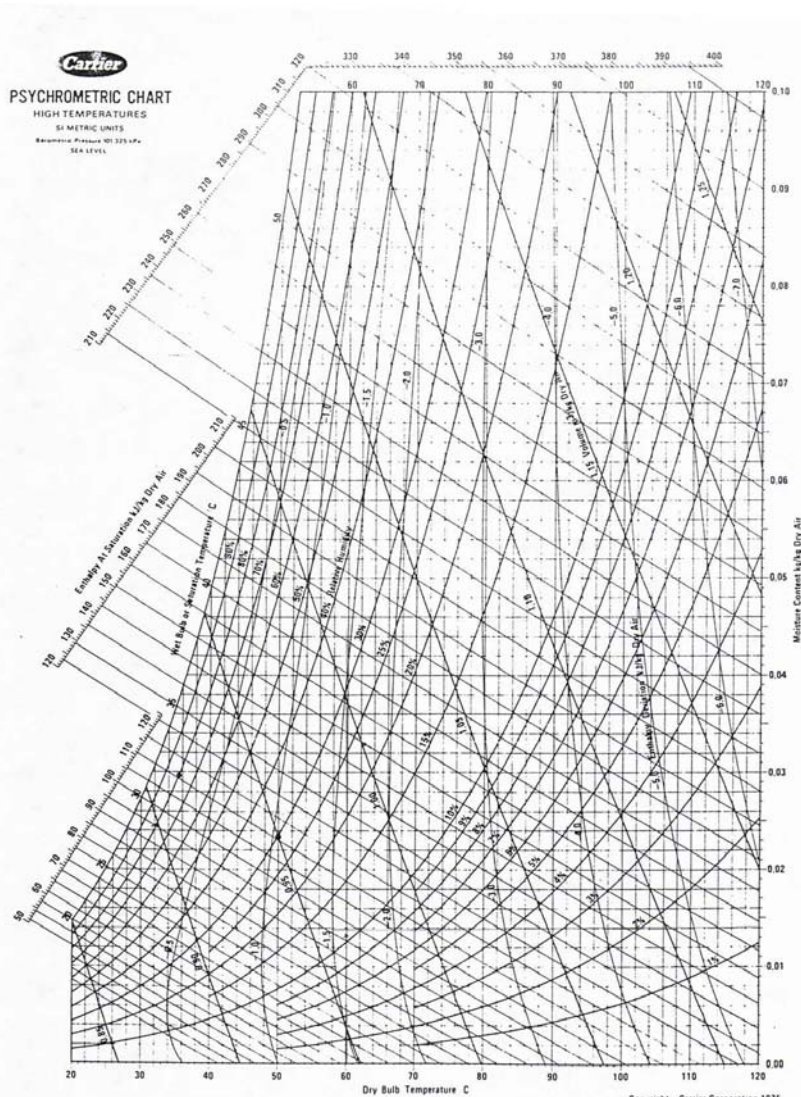
Tiempo de secado durante el periodo de velocidad constante:	7.0462E-4 h
---	-------------

2. ANEXOS

2.1. ANEXO 1: TABLAS DE VAPOR (INTERPOLACIONES)

Temp. °C	Pres sat. kPa	Entalpia kJ/kg		
		Líquido sat h_f	Evap h_{fg}	Vapor sat h_g
T	P_{sat}			
25,0	3,169	104,8900	2442,0000	2547,2000
26,6		111,7477	2438,1262	2549,8739
29,4		123,1741	2431.5081	2554,6822
30,0	4,246	125,7900	2431,5000	2556,3000
31,1		130,2894	2427,3900	2557,6764
32		134,0564	2425,2052	2559,2616
32,2		134,8935	2424,7204	2559,61386
33,6		140,7532	2421,3265	2562,0797
40,0	7,384	167,5700	2406,7000	2574,300

2.2. ANEXO 2.2: CARTA PSICROMÉTRICA



Copyright Carrier Corporation 1975
Cat. No. 794-005 Printed in U.S.A.

AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK—1981