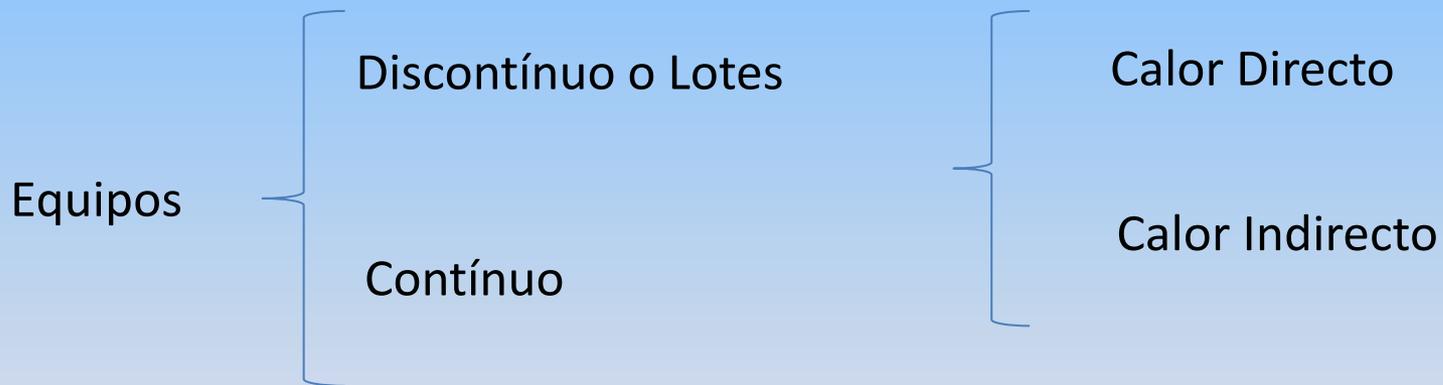


Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- **Secado**

Eliminación de la humedad de sólidos y/o líquidos por evaporación en una corriente gaseosa.



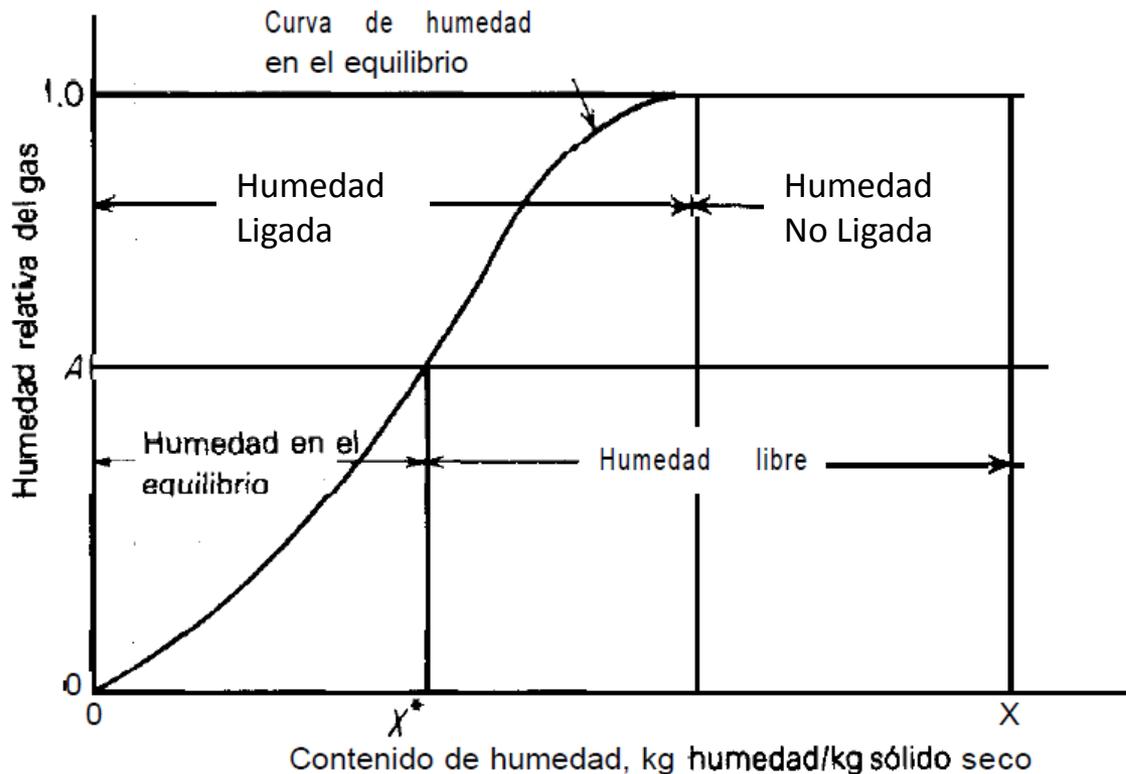
Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Secado

Definiciones

Humedad Base Seca: $X = \text{kg agua} / \text{kg sólido seco}$

Humedad Base Húmeda: $x = \text{kg de agua} / \text{kg de sólido húmedo} = \frac{\text{kg. H}_2\text{O}}{\text{Kg. Sól. Seco} + \text{kg Agua}} = X / (1 + X)$



Humedad No Ligada: Humedad que ejerce una presión de vapor de equilibrio igual a la del líquido puro (a T cte.)

Humedad Ligada: Humedad que ejerce una presión de vapor de equilibrio menor a la del líquido puro (a T cte.)

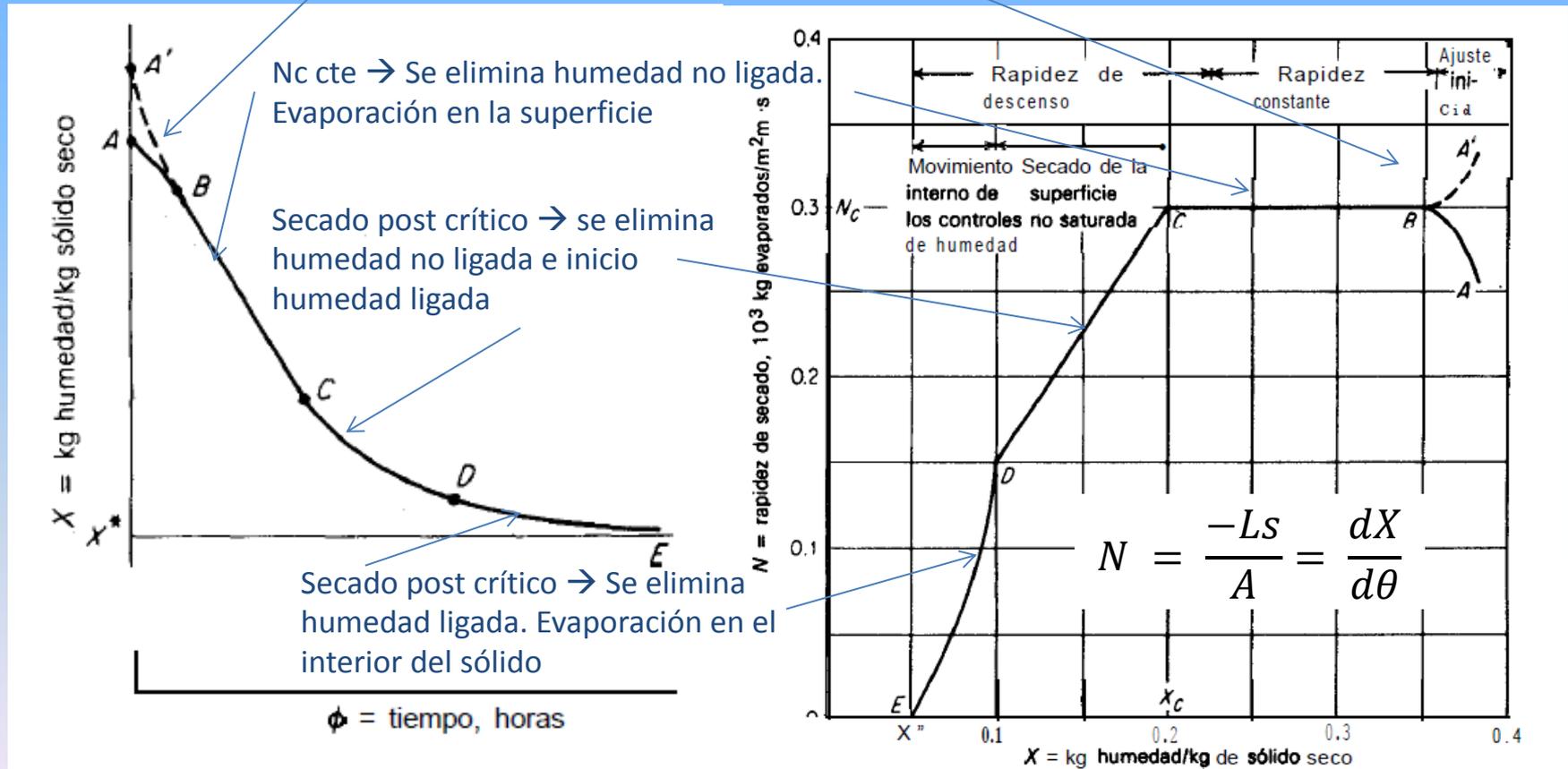
Humedad Libre: Humedad en exceso de la humedad de equilibrio: $(X - X^*)$. Solo puedo eliminar la humedad libre

Humedad de equilibrio: Humedad de un sólido que está en equilibrio con un gas de una dada presión parcial de vapor (o de una dada humedad relativa).

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Secado Discontinuo (por lotes)

Ajuste inicial → Se desprecia



Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- **Secado Discontinuo (cont.)**

Velocidad de Secado $N = \frac{-Ls}{A} * \frac{dX}{d\theta}$

*N = velocidad de secado = kg de agua evaporada / m² * h*

Ls = masa de sólido seco

A = área expuesta al secado o sección transversal del lecho

Xc = humedad crítica => finaliza N cte.

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Secado Discontinuo (cont.)

$$\text{Tiempo de Secado } \theta = \int d\theta = \int_{X_2}^{X_1} \frac{Ls}{A} \frac{dX}{N} = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{N}$$

- Período de Velocidad Constante (B – C)

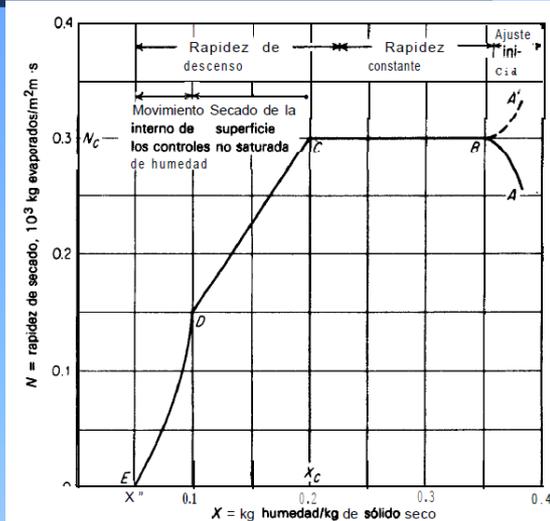
$$X_1 \rightarrow X_2 \geq X_c \text{ entonces } N = N_c \quad N_c = k_y (Y' * - Y')$$

$$\rightarrow \theta_c = \frac{Ls}{A} \frac{(X_1 - X_2)}{N_c}$$

- Período de Velocidad Decreciente (C – E)

$$X_1 \text{ y } X_2 < X_c \text{ entonces } \theta_d = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{N}$$

N depende del mecanismo de humedad dentro del sólido.



Integración gráfica

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Secado Discontinuo (cont.)

- Período de Velocidad Decreciente (C – E)

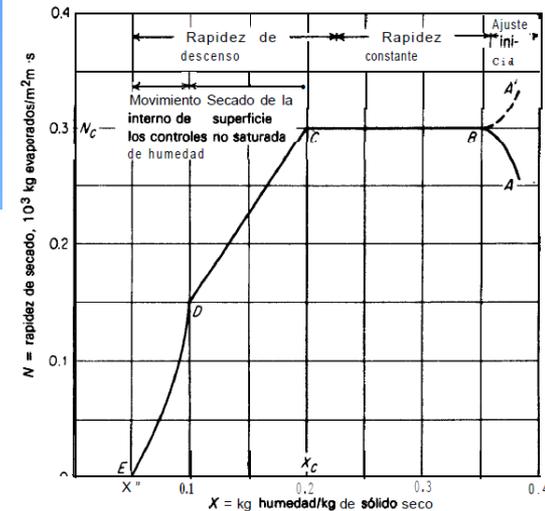
Si la migración de humedad en el sólido se da fundamentalmente por **capilaridad**

Se supone que la velocidad varía linealmente con la humedad: $N = mX + b$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= m * X_1 + b \\ N_2 &= m * X_2 + b \end{aligned} \right\} \theta_d = \frac{Ls}{A} \frac{(X_1 - X_2)}{N_m}$$

$$\text{donde } Nm = \frac{N_1 - N_2}{\ln N_1 / N_2}$$

N depende del mecanismo de humedad dentro del sólido.



Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- **Secado Discontinuo (cont.)**

- Circulación tangencial del aire

Si el calor necesario para realizar la evaporación del agua es aportado exclusivamente por el aire, por convección desde el gas:

$$Nc = k_Y (Y'_w - Y')$$

$$\lambda Nc = h (t - tw)$$

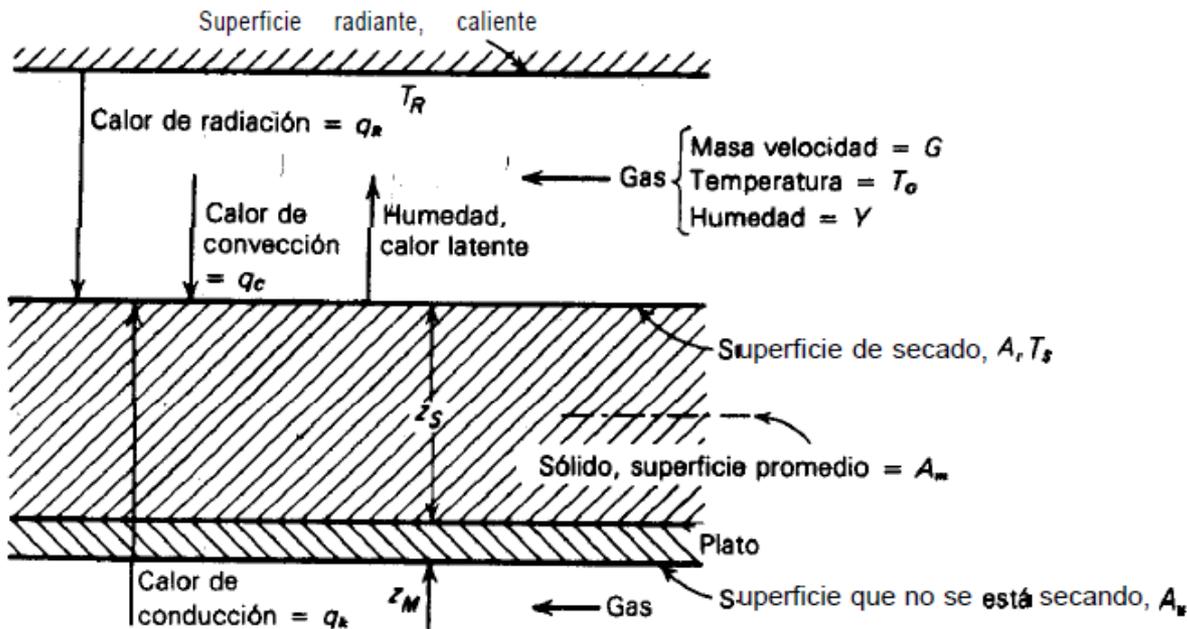
$$Nc = \frac{h}{\lambda} (t - tw) = k_Y (Y'_w - Y') \text{ Línea psicrométrica}$$

Solo para $Nc = cte$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- **Secado Discontinuo** – Circulación tangencial (cont.)

- Si hay varios mecanismos paralelos de transferencia de calor, la temperatura del sólido será distinta de la temperatura de bulbo húmedo $t_s \neq t_w$.



$$q = q_c + q_R + q_k$$

$$N_c \lambda_s = q$$



Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Circulación tangencial (cont.)

$$q = q_c + q_R + q_k$$

$$N_c \lambda_s = q$$

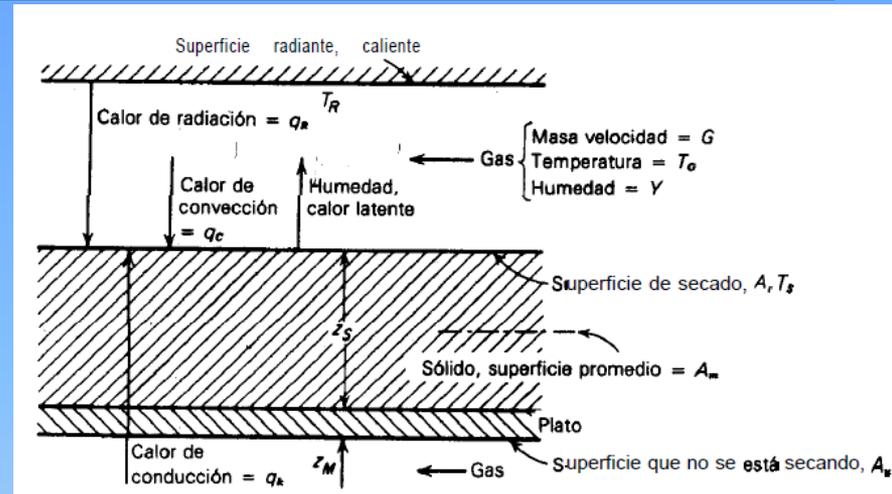
$$q_c = h_c(T_G - T_s)$$

$$q_R = \sim(5.729 \times 10^{-8})(T_R^4 - T_s^4) = h_R(T_R - T_s)$$

$$h_R = \frac{\sim(5.729 \times 10^{-8})(T_R^4 - T_s^4)}{T_R - T_s}$$

$$q_k = U_k(T_G - T_s)$$

$$U_k = \frac{1}{(1/h_c)(A/A_u) + (z_M/k_M)(A/A_u) + (z_S/k_S)(A/A_m)}$$



T_G = temperatura del gas

T_S = temperatura del sólido

T_R = temperatura de la superficie radiante

h_c = coeficiente de convección de la bandeja

A = área de secado

A_u = área de no secado (bandeja)

A_m = área media del sólido

k_m = conductividad de la bandeja

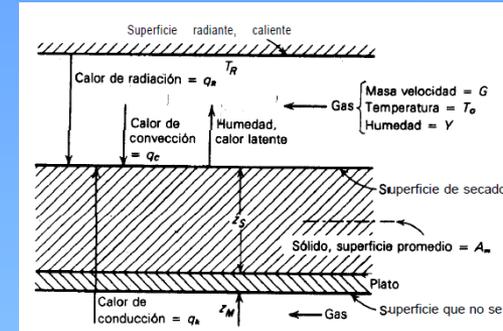
k_s = conductividad del sólido

Z_S = altura de sólido que se está secando

Z_M = altura de sólido que no se está secando

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Circulación tangencial (cont.)



$$N_c = \frac{q}{\lambda_s} = \frac{(h_c + U_k)(T_G - T_s) + h_R(T_R - T_s)}{\lambda_s} = k_Y(Y_s - Y)$$

2 ec. c/ 2 incógnitas $Y's$ y T_s

Carta psicrométrica $Y's = f(T_s)$

Correlaciones para h: Valores experimentales. G (kg/seg m^2)

$$h = 14,3 G^{0,8} \text{ (correlación para arena, secado en bandejas)}$$

$$h = 24,2 G^{0,37} \text{ (correlación para aire incidiendo perpendicularmente)}$$

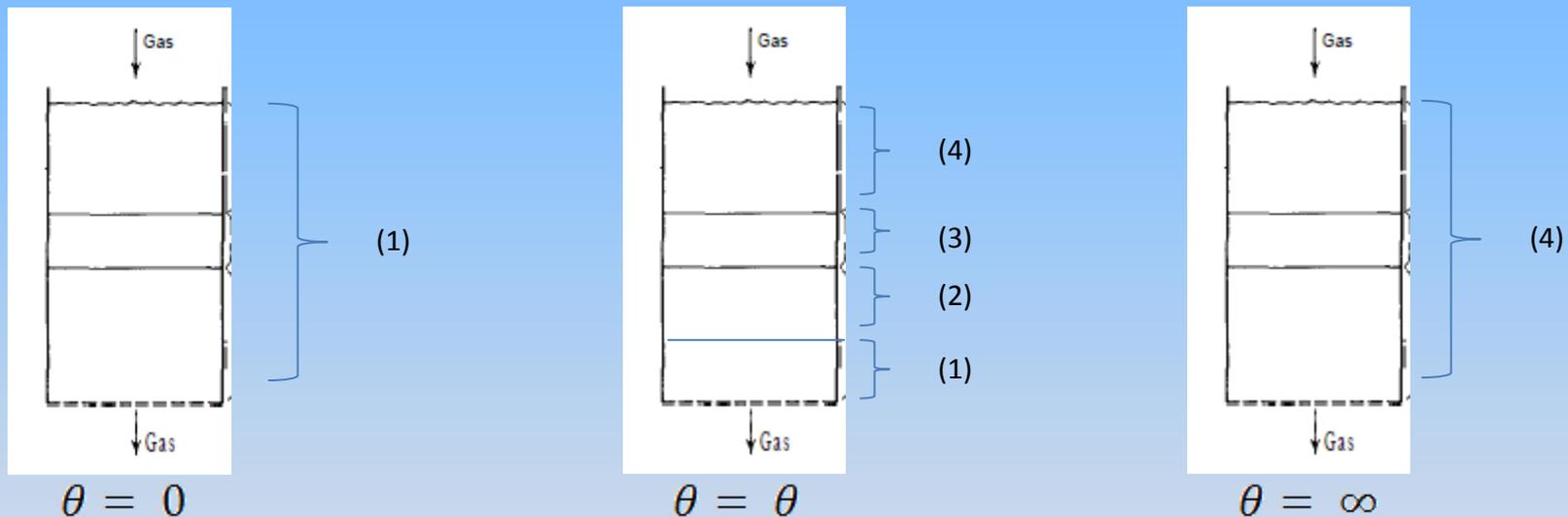
$$h = \beta G^{0,37} \text{ (correlación para aire incidiendo paralelamente)}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Circulación Transversal

El calor de evaporación proviene fundamentalmente del gas que se enfría (línea psicrométrica.)

La humedad en el lecho es función de la posición y del tiempo.



- 1.- Humedad inalterada $X = X_{\text{inicial}}$
- 2.- $X > X_c$ aún queda humedad no ligada
- 3.- $X^* < X < X_c$ zona donde aún tenemos humedad No ligada
- 4.- $X = X^*$. Zona seca donde no queda humedad libre.

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Circulación Transversal (cont.)

Secado de Humedad No Ligada

$$N_{m\acute{a}x} = G_S(Y_{sa} - Y_1)$$

En general no sale saturado

$$N = G_S(Y_2 - Y_1)$$

Para un dz de lecho

$$dN = G_S dY = k_Y dS (Y_{sa} - Y)$$

$$dS = a dz,$$

$$\int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y_{sa} - Y} = \int_0^{z_S} \frac{k_Y a dz}{G_S}$$



$$\ln \frac{Y_{sa} - Y_1}{Y_{sa} - Y_2} = N_{tG} = \frac{k_Y a z_S}{G_S}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Circulación Transversal (cont.)

Combinando $N_{m\acute{a}x} = G_S(Y_{sa} - Y_1)$ con $N = G_S(Y_2 - Y_1)$

$$\frac{N}{N_{max}} = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(Y_{sa} - Y_1)} = \frac{(Y_2 + Y_{sa} - Y_{sa} - Y_1)}{(Y_{sa} - Y_1)} = 1 - \frac{(Y_{sa} - Y_2)}{(Y_{sa} - Y_1)}$$

$$\longrightarrow \frac{N}{N_{max}} = (1 - e^{-Ntg})$$

donde

$$N_{tG} = \frac{k_y a z_s}{G_S}$$

$$N = N_{max} * (1 - e^{-Ntg})$$

$$d\theta = \frac{-Ls}{A} \int \frac{dX}{N_{max} * (1 - e^{-Ntg})}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Circulación Transversal (cont.)

Correlaciones para calcular N_{tG}

Considerando $0,07 \text{ mm} < d_p < 2,03 \text{ mm}$ y $Z_s > 11,4 \text{ mm}$ 

$$N_{tG} = \frac{0.273}{d_p^{0.35}} \left(\frac{d_p G}{\mu} \right)^{0.215} (X \rho_s z_s)^{0.64}$$

Considerando $3,2 \text{ mm} < d_p < 20 \text{ mm}$ y $10 \text{ mm} < Z_s < 64 \text{ mm}$ 

$$k_Y = \frac{j_D G_S}{Sc^{2/3}}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Secado Continuo

- Equipo pequeño en comparación con las cantidades de sólidos a secar.
- Operación integrada al proceso
- Secado uniforme
- Costo unitario es bajo

- $S_s = \text{kg ss} / \text{m}^2 * \text{h}$

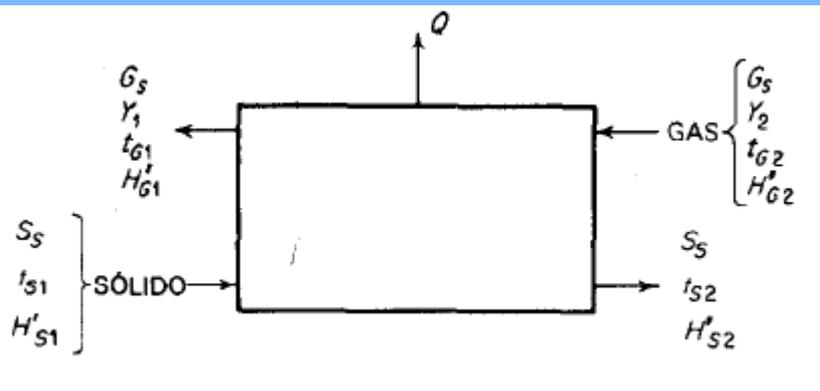
- $H'_s = \text{entalpía del sól. Humedo con respecto al sól. seco (kJ/kg ss)}$

$$H'_S = C_S(t_S - t_0) + X C_A(t_S - t_0) + A H_A$$

- $C_s = \text{cap. calorífica ss (kJ/C*kg ss)}$

- $C_A = \text{cap. calorífica líquido (kJ/C*kg liq.)}$

- $AH_A = \text{calor de humidificación}$



BM)



$$S_S X_1 + G_S Y_2 = S_S X_2 + G_S Y_1$$

$$S_S (X_1 - X_2) = G_S (Y_1 - Y_2)$$

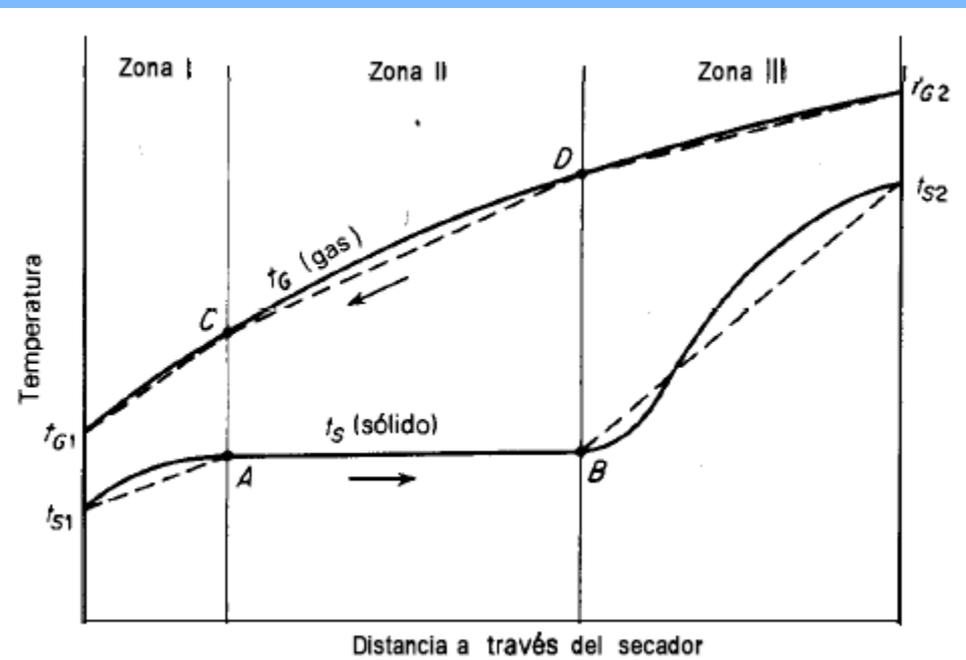
BE)



$$S_S H'_{S1} + G_S H'_{G2} = S_S H'_{S2} + G_S H'_{G1} + Q$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

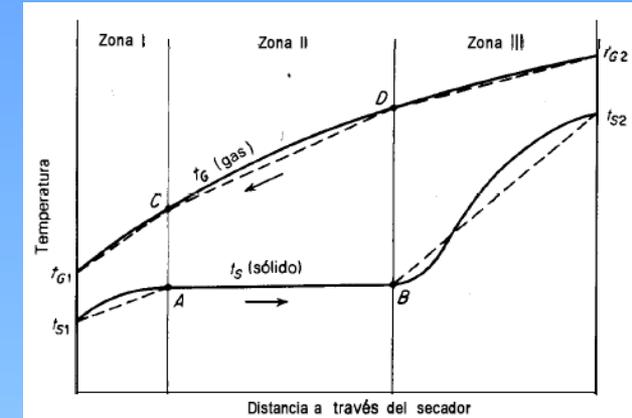
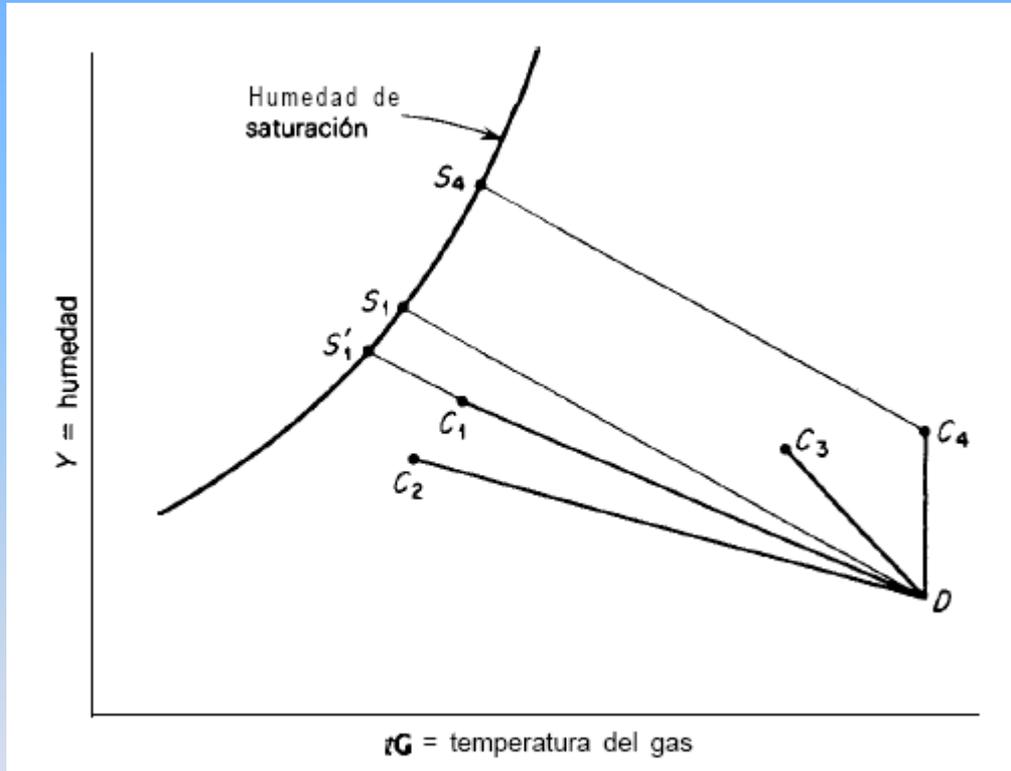
- Secado Continuo Alta Temperatura



- Zona I: Precalentamiento (no se considera secado)
- Zona II: la temperatura del sólido se mantiene cte mientras se elimina humedad no ligada superficial. En B se alcanza la humedad crítica (X_c)
- Zona III: Secado de superficie con manchas secas y de humedad ligada.

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

Secado Continuo Alta Temperatura

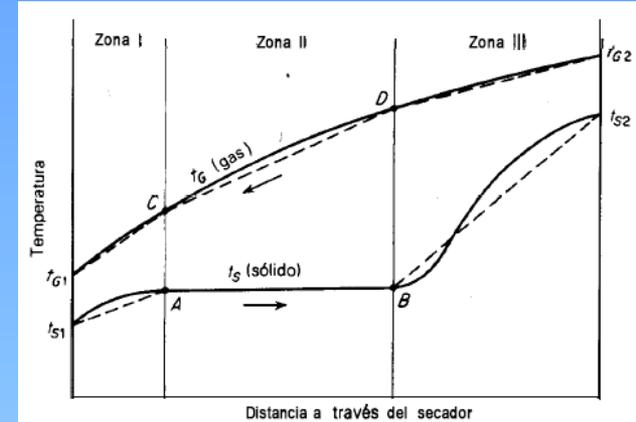


- Evolución $D \rightarrow C_1$ = secado adiabático
Si q_r y $q_k = 0 \rightarrow$ la temperatura del sólido coincide con $t_{sa} = t_w$ del gas.
- Evolución $D \rightarrow C_2$ = secado con pérdidas de calor
- Evolución $D \rightarrow C_3$ = secado con aporte de calor
- Evolución $D \rightarrow C_4$ = secado con temperatura de gas cte.

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

• Secado Continuo Alta Temperatura

- Balance de entalpía para un dZ del secador



$$dq_G = dq + dQ$$

$q_G \rightarrow$ calor cedido por el gas

$q \rightarrow$ calor entregado al sólido

$Q \rightarrow$ pérdidas de calor

$$dq = dq_G = dQ = U dS(t_G - t_S) = Ua(t_G - t_S) dZ$$

$$dq = G_S C_s dt'_G = Ua(t_G - t_S) dZ$$

llamando $dt'_G \rightarrow$ caída de temperatura debido a dq (excluye pérdidas)

$$dN_{IOG} = \frac{dt'_G}{t_G - t_S} = \frac{Ua dZ}{G_S C_s}$$

Si $U = \text{cte}$

$$N_{IOG} = \frac{\Delta t'_G}{\Delta t'_m} = \frac{z}{H_{IOG}}$$

con

$$H_{IOG} = \frac{G_S C_s}{Ua}$$

$$\rightarrow Z = N_{tOG} * H_{tOG}$$

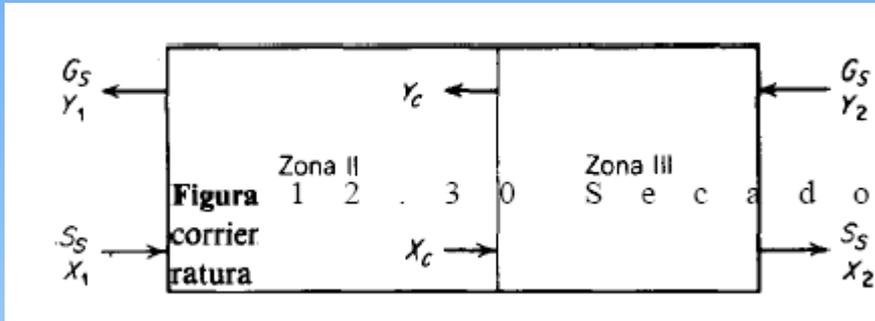
$$\left[1,5 < N_{OG} = \sum N_{OGi} < 2,5 \right]$$

Flujograma

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

Secado Continuo Baja Temperatura secador Túnel o de cinta

(las condiciones del gas varían punto a punto)



La zona I se desprecia

La zona II se elimina humedad no ligada

La zona III se elimina humedad no ligada y ligada

$$\theta = \theta_{II} + \theta_{III} = \frac{S_s}{A} \left(\int_{X_c}^{X_1} \frac{dX}{N} + \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{N} \right)$$

En la zona II: $X > X_c \rightarrow N = N_c = k_Y (Y'_s - Y')$

$$\theta_{II} = \frac{S_c}{A} \frac{1}{k_Y} \int_{X_c}^{X_1} \frac{dX}{Y_s - Y}$$

Del BM diferencial $G_s dY = S_s dX$,

$$\theta_{II} = \frac{G_s}{A * k_Y} \int_{Y_c}^{Y_1} \frac{dY}{(Y_s - Y)}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Secado Continuo Baja Temperatura secador Túnel o de cinta (cont.)

Si no existe radiación, ni conducción, ni pérdidas \longrightarrow $Y_s = Y_w$
(secador adiabático)

$$\theta_{II} = \frac{G_s}{A * k_Y} \ln \frac{(Y_s - Y_c)}{(Y_s - Y_1)}$$

En la zona III: $X < X_c$ Suponiendo N linealmente decreciente \longrightarrow

$$N = N_c * \frac{(X - X^*)}{(X_c - X^*)} = k_Y * (Y_s - Y) * \frac{(X - X^*)}{(X_c - X^*)} \longrightarrow$$

$$\theta_{III} = \frac{S_s * (X_c - X^*)}{A * k_Y} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{(Y_s - Y)(X - X^*)}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Secado Continuo Baja Temperatura secador Túnel o de cinta (cont.)

2 variables Y, X \longrightarrow BM vincula las variables $Y = Y_2 + (X - X_2) * S_s / G_s$

\longrightarrow X^* despreciable y $Y_s = Y_w = \text{cte.}$

$$\theta_{III} = \frac{G_s * X_c}{A * k_Y} \frac{1}{\left\{ (Y_s - Y_2) * S_s / G_s + X_2 \right\}} \ln \frac{X_c * (Y_s - Y_2)}{X_2 * (Y_s - Y_c)}$$

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Secado Continuo Baja Temperatura secador Túnel o de cinta (cont.)

$$\theta_{II} = \frac{G_s}{A * k_Y} \ln \frac{(Y_s - Y_c)}{(Y_s - Y_1)}$$

Contracorriente

$$\theta_{III} = \frac{G_s * X_c}{A * k_Y} \frac{1}{\left\{ (Y_s - Y_2) * S_s / G_s + X_2 \right\}} \ln \frac{X_c * (Y_s - Y_2)}{X_2 * (Y_s - Y_c)}$$

$$\theta_{II} = \frac{G_s}{A * k_Y} \ln \frac{(Y_s - Y_1)}{(Y_s - Y_c)}$$

Co-corriente

$$\theta_{III} = \frac{G_s * X_c}{A * k_Y} \frac{1}{\left\{ (Y_s - Y_c) * S_s / G_s - X_2 \right\}} \ln \frac{X_c * (Y_s - Y_1)}{X_2 * (Y_s - Y_c)}$$

Clasificaciones:

a) continuos y discontinuos

continuos: El secado se lleva a cabo en régimen estacionario. El contacto entre sólido y medio de secado puede ocurrir en:

 cocorriente (producto seco sensible a altas temperaturas)

 contracorriente (producto húmedo requiere secado suave; secado más uniforme)

 corrientes cruzadas (cuando se requiere un secado rápido y eficiente)

discontinuos: Son de construcción sencilla y el secado se regula fácilmente. ($L_s < 1000 \text{ kg/h}$)

Desventajas principales:

 mayor mano de obra

 mayor consumo energético (para calentar cada vez la cámara)

 secado menos uniforme

b) a presión atmosférica y al vacío

a presión atmosférica: La inmensa mayoría de los equipos opera a presión atmosférica.

al vacío: Para secar sustancias termosensibles, para recoger vapores separados del sólido que sean valiosos o tóxicos. Se reducen las pérdidas de calor.

Son discontinuos y de construcción más compleja.

La transferencia de calor tiene lugar por conducción y radiación solamente!

c) contacto directo con el medio secante y secado indirecto

contacto directo con el medio secante: Es el más común. El aire caliente, gases de combustión o vapor sobrecalentado circulan por encima del material o lo atraviesan. Son más baratos y se evitan más fácilmente sobrecalentamientos del sólido.

Se pierde calor con los gases de salida. Puede economizarse con recirculación, etc.

secado indirecto: Es más bien un proceso de evaporación de agua por entrega de calor por conducción.

El material a secar está separado del medio calefactor (agua caliente, vapor, humos, resistencias eléctricas) por una pared conductora. Contaminación y producción de polvos mínimas.

d) material agitado y sin movimiento de material

material agitado: El secado es muy eficiente puesto que se renueva constantemente la superficie de contacto con el medio secante.

material sin movimiento relativo de las partículas: Se usa cuando debe preservarse la forma del material o se requiere control estricto de condiciones y tiempo de secado, o cuando el material no puede ser subdividido fácilmente (pastas).

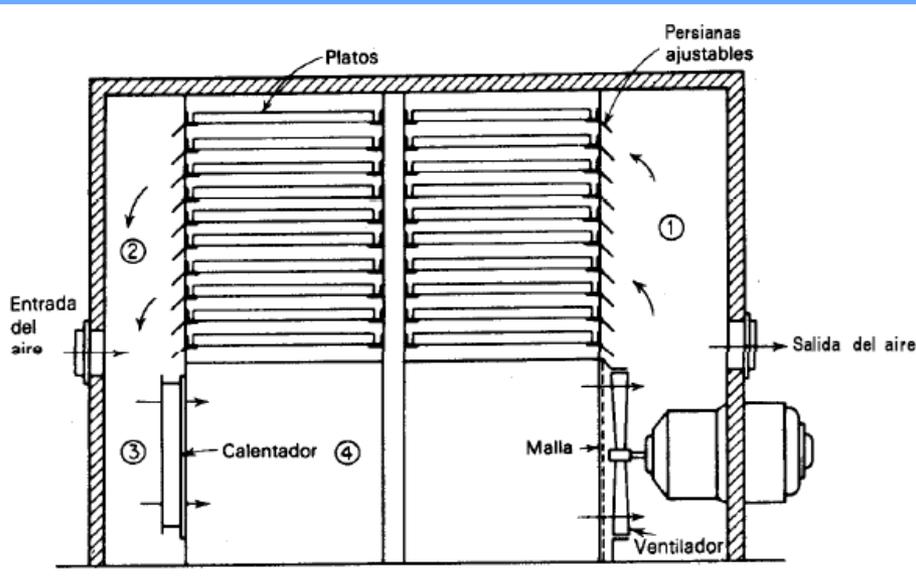
e) según el material a secar

Líquidos, suspensiones, barros suficientemente fluidos para ser bombeados se secarán con secadores spray, rodillos.

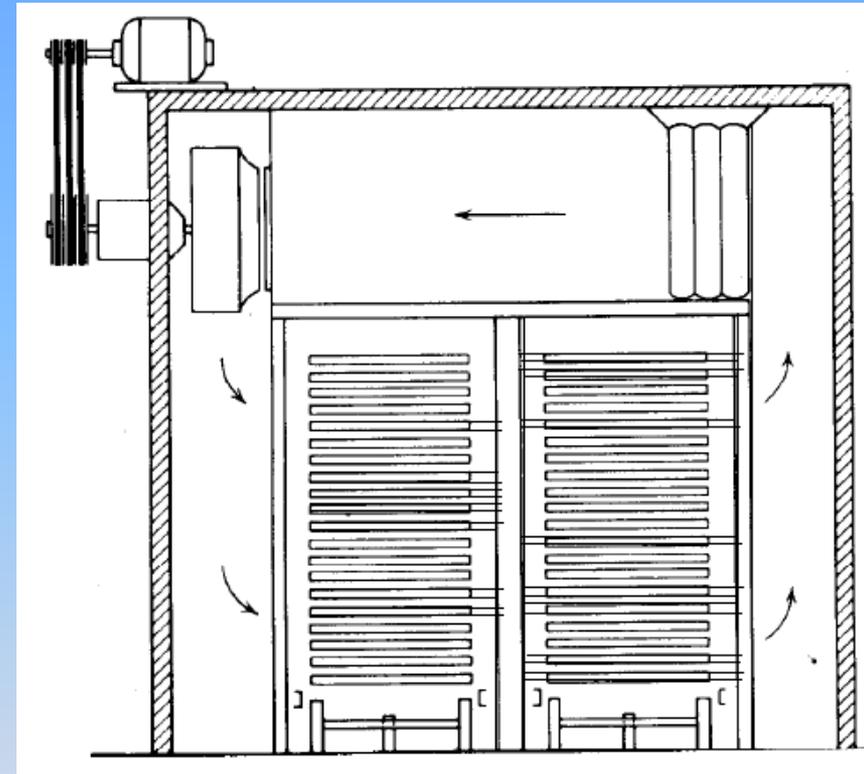
Pastas se secan con equipos especiales como los secadores de cinta, o se licúan agregando agua y se tratan como líquidos o se agrega producto seco y se tratan como sólido.

Sólidos granulares podrán secarse en varios equipos, dependiendo la selección de la humedad, tamaño, forma, etc.

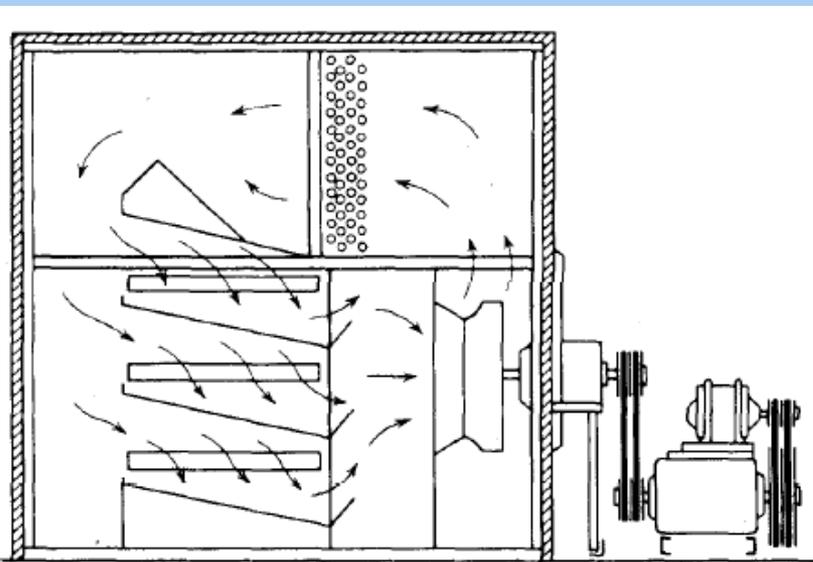
Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia



Secador de bandejas

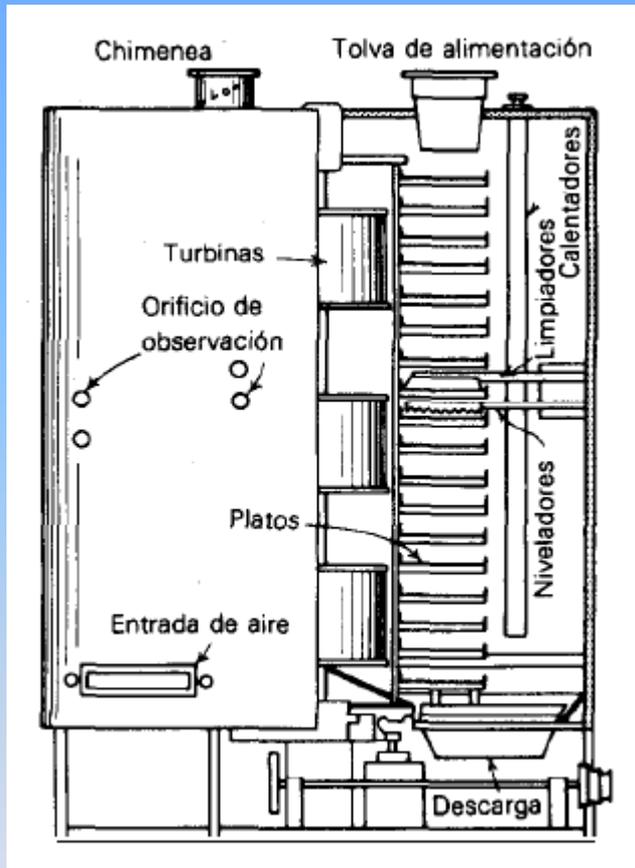


Secador de circulación transversal

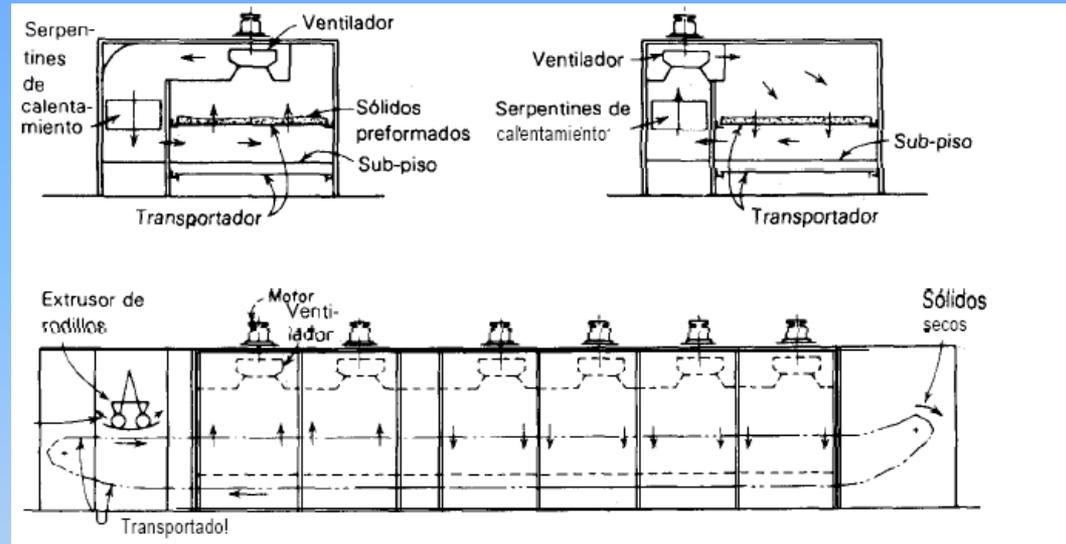


Secador de circulación transversal

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

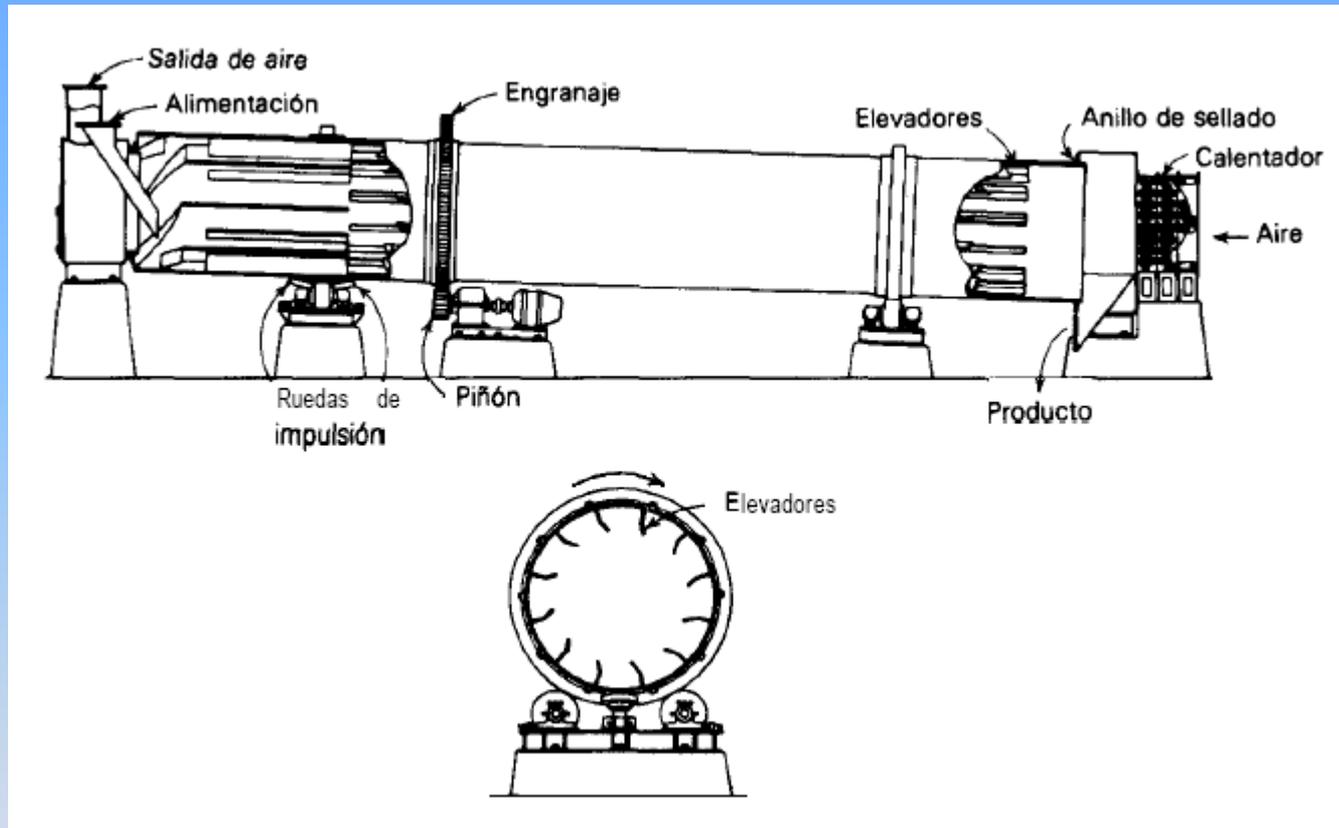


Secador Turbo



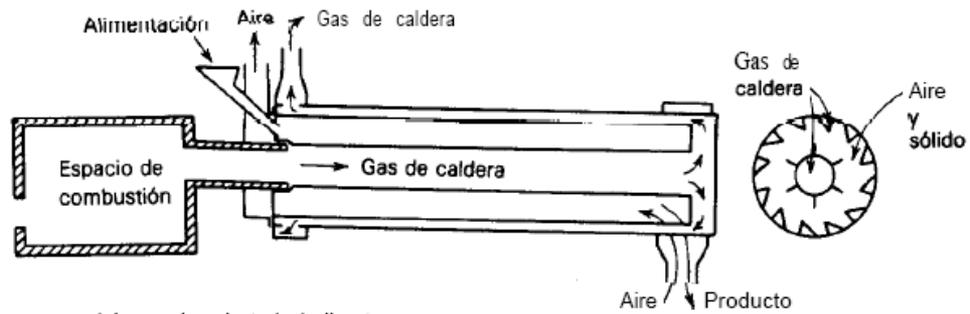
Secador Transversal

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

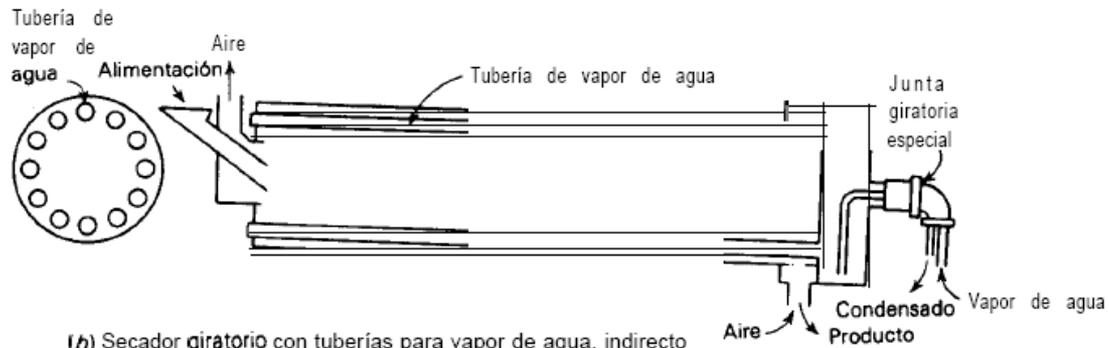


Secador Rotativo

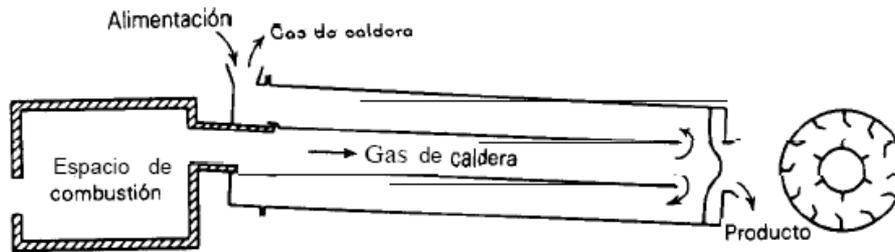
[Fotos](#)
[Videos](#)



(a) secador giratorio indirecto



(b) Secador giratorio con tuberías para vapor de agua, indirecto



(c) Secador giratorio indirecto-directo

Secador Rotativo

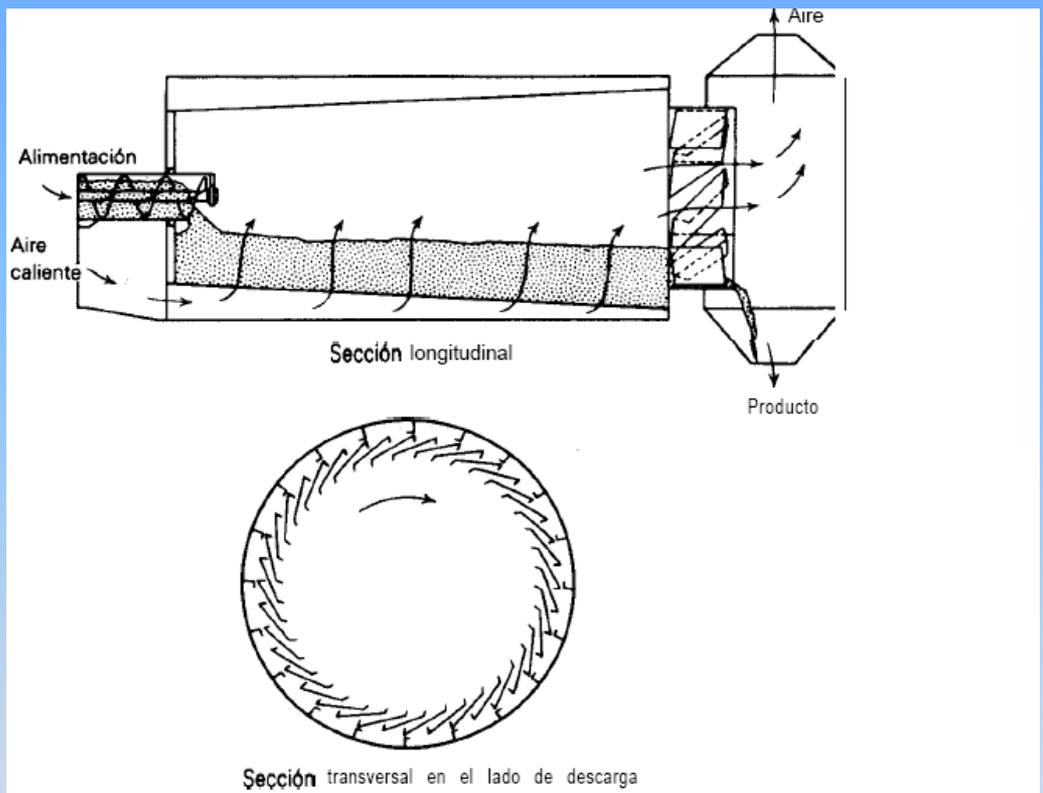


Figura 12.22 Secador rotatorio de circulación **transversal** continuo (Roto-Louvre) (*Link-Belt Co.*)

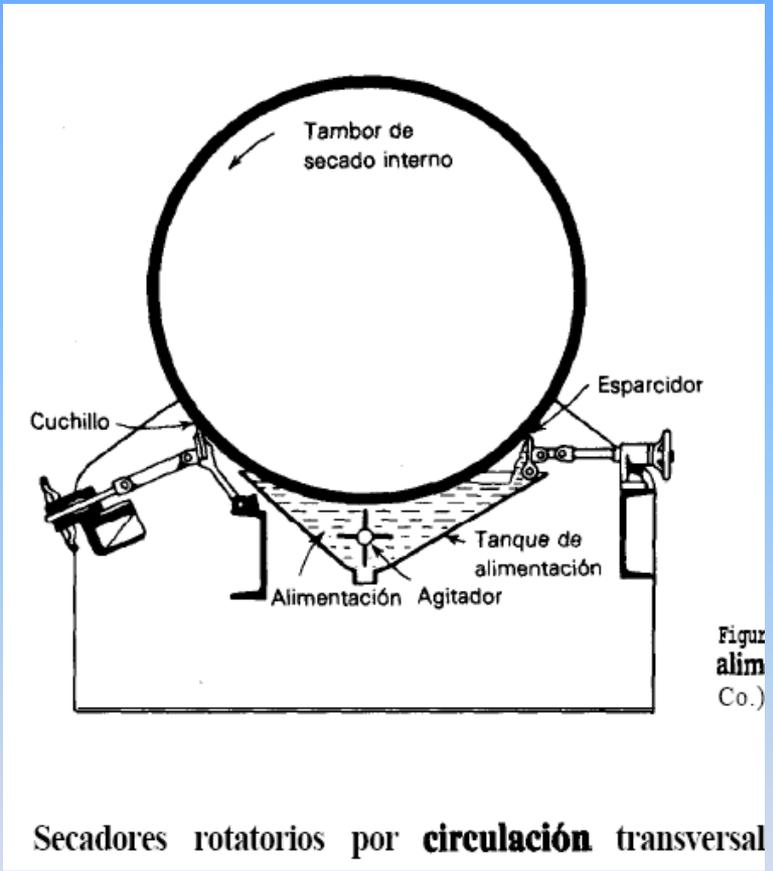


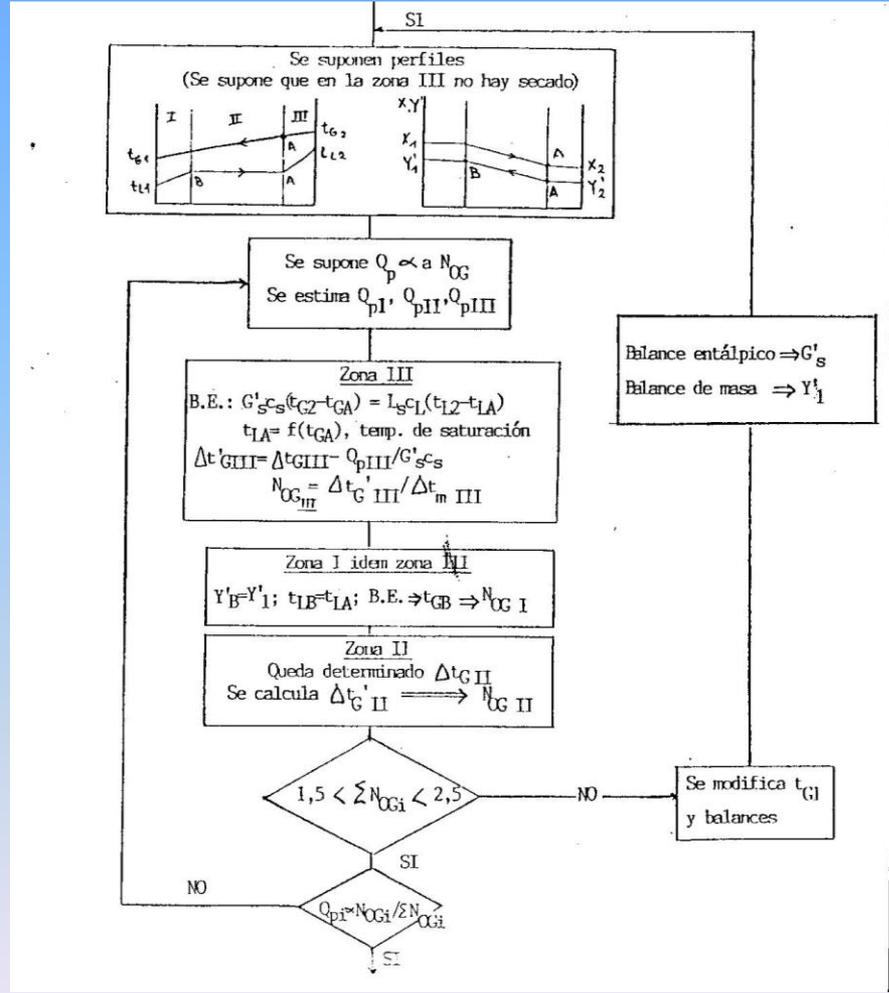
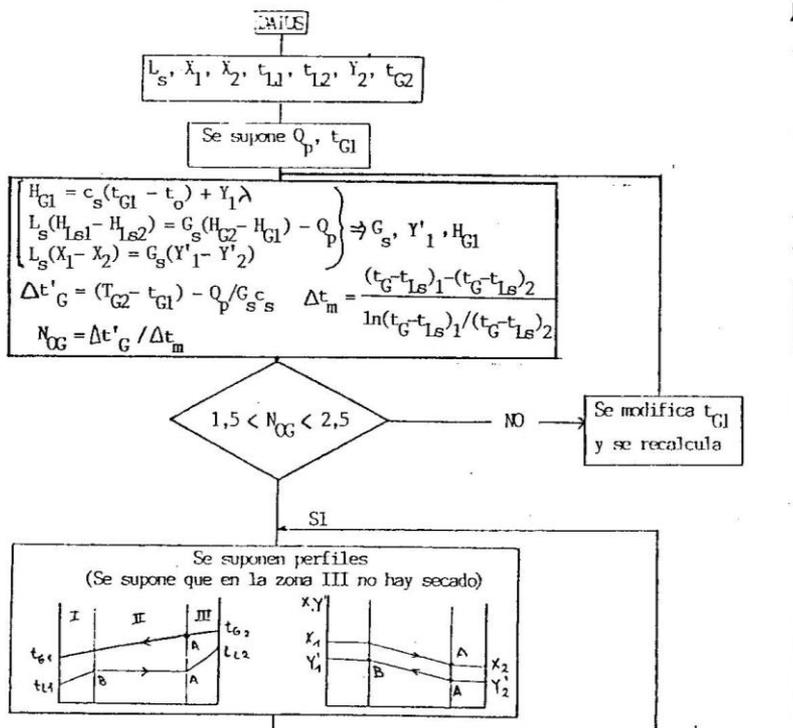
Figura 12.23 (Link-Belt Co.)

Secadores rotatorios por **circulación** transversal

Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Flujograma Secador Rotatorio

de flujo para el cálculo de un secador rotatorio de alta temperatura



Operaciones Unitarias de Transferencia de Materia

- Flujograma Secador Rotatorio

