

Equipos de Secado

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

8 de Junio de 2021

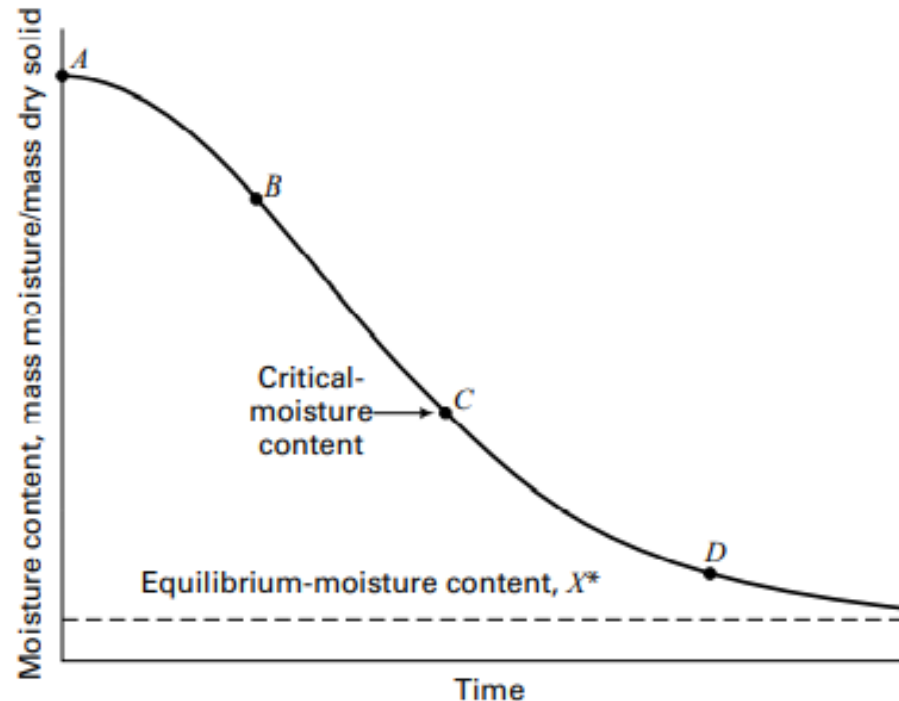


- Recordatorio de la Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Periodo de Secado Decreciente
- Equipos de Secado
 - Tipos de Equipos de Secado
 - Secador de Calor Directo
 - Secado por Banda
 - Secador Rotatorio

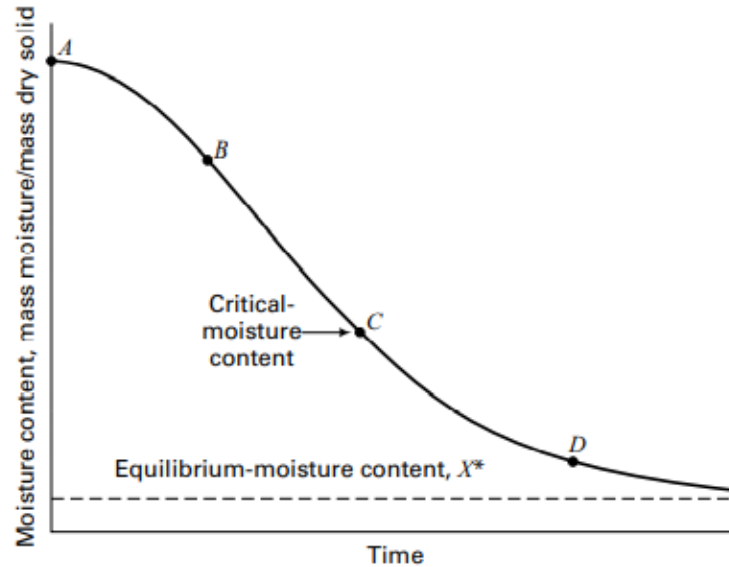
Construcción de curva de velocidad de secado

Ahora que sabemos como se comporta el equilibrio necesitamos saber como va evolucionado el proceso de secado.

Para ello Sherwood desarrollo una metodología que consiste en ir midiendo el contenido de humedad en el sólido en distintos momento del tiempo, con el fin de obtener una curva de la tasa de secado.



Construcción de curva de velocidad de secado



Se miden las pendientes de las tangentes a la curva $\rightarrow dX/dt$ para distintos t .

Se calcula el flux de secado (R) ($\text{kg agua}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) para cada punto según:

$$R = - \frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

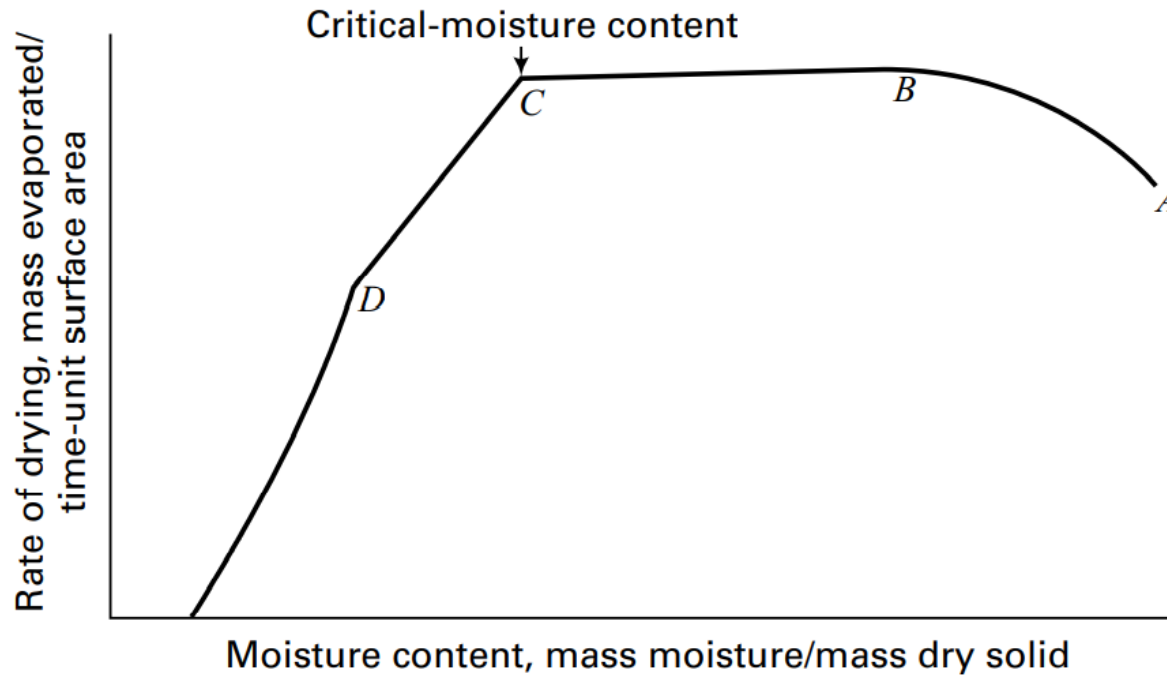
Donde:

m_s = kg de sólido seco

A = área superficial expuesta [m^2]

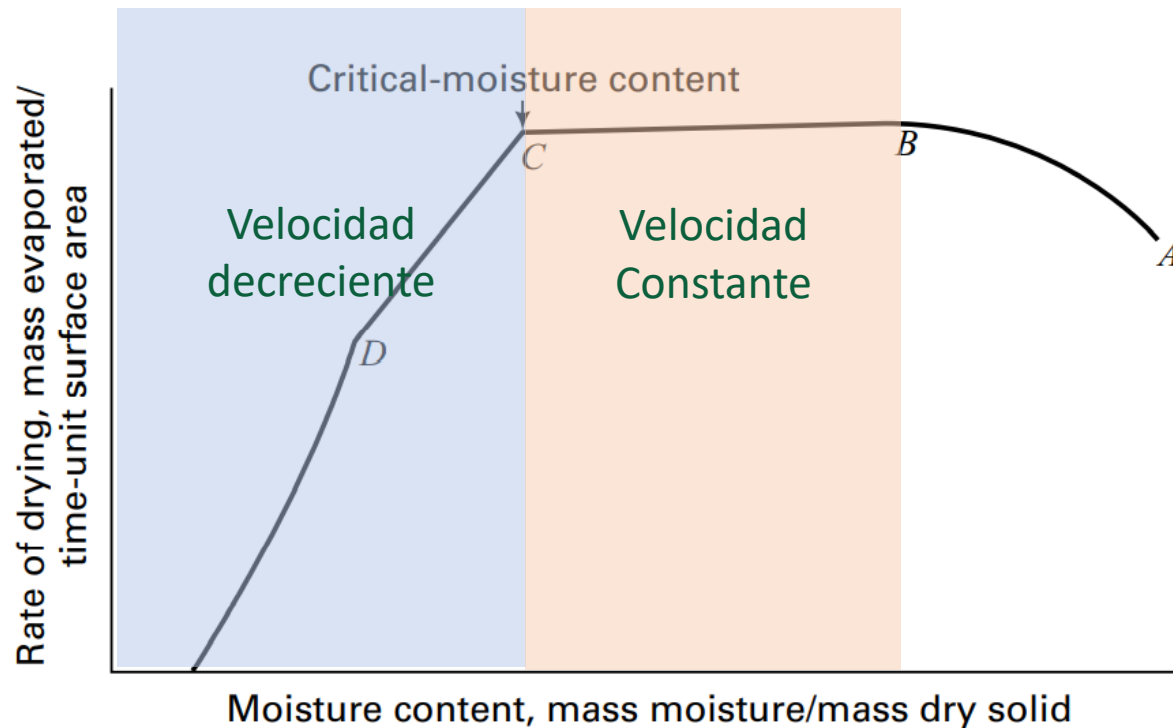
Construcción de curva de velocidad de secado

Con los valores de R para diferentes puntos se construye una curva complementaria a la velocidad de secado que es la variación de la velocidad de secado según el contenido de humedad en el sólido (X)



X_c es el punto de humedad crítico ya que es el punto en donde la velocidad de secado disminuye

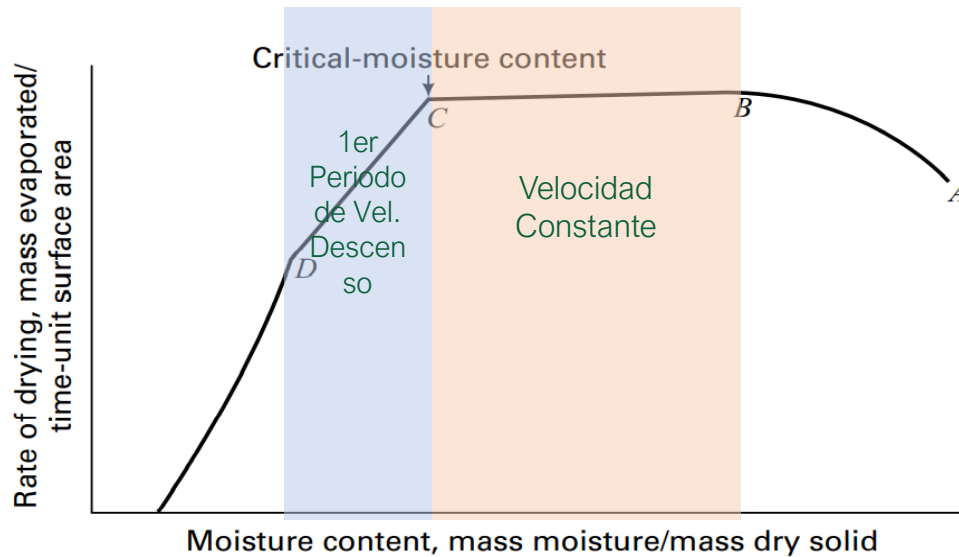
Etapas en el secado



Las curvas de secado pueden variar para distintos materiales y distintas condiciones ctes. de secado, pero en general se observará un período de velocidad cte. y un período de velocidad decreciente.

Métodos para calcular el tiempo de secado en el período de velocidad constante

1. Utilizando curva experimental de tasa de secado



$$R = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \rightarrow t = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

Período de velocidad cte.

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

En que: $R = \text{cte} = R_c$

Período de velocidad cte. y 1er período de velocidad decreciente:

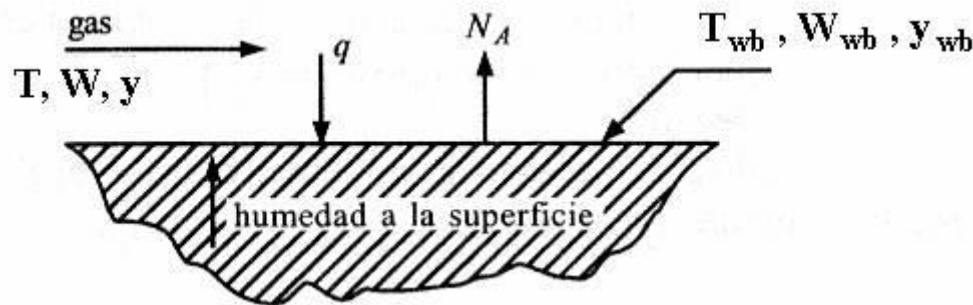
$$t = t_1 + t_2$$

$$t_1 = \frac{m_s}{AR_c} \int_{X_c}^{X_1} dX$$

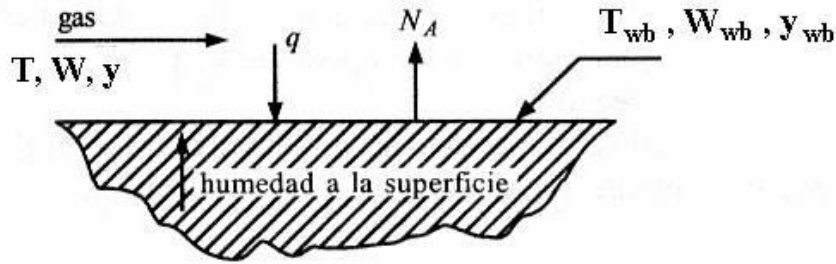
$$t_2 = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{R}$$

2. Método que emplea coeficientes de transferencia

- Las velocidades de secado pueden también estimarse a través de predicciones de coeficientes de transferencia.
- Se considera que la Transferencia de Calor del aire caliente a la superficie del sólido es por convección y de la superficie al aire por Transferencia de Materia



$$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m} = \text{velocidad de evaporación} \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}} \right]$$



$$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m} = \text{velocidad de evaporación} \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}} \right]$$

Por Transferencia de
Materia :

$$\dot{m} = k_G P M_{gas} (W_{WB} - W) A$$

Por Transferencia de Calor :

$$\dot{m} = \frac{h(T - T_{WB})A}{\lambda_{WB}}$$

$$[h] = \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$[\lambda_{WB}] = \text{J/kg}$$

$$\therefore \frac{\dot{m}}{A} = R_c = \underbrace{P M_{gas} k_G (W_{WB} - W)}_{\text{Usando Transf. de masa}} = \underbrace{\frac{h_G (T - T_{WB})}{\lambda_{WB}}}_{\text{Usando Transf. de energía}}$$

Ecuación idéntica a la de bulbo húmedo → temperatura del sólido está a la temperatura de bulbo húmedo durante el período de velocidad cte.

$$\therefore \frac{\dot{m}}{A} = R_c = PM_{aire} k_G (W_{WB} - W) = \frac{h(T - T_W)}{\lambda_{WB}}$$

Usualmente es más útil la expresión que **utiliza el coeficiente de transferencia de energía** para estimar R_c debido a que contamos con relaciones empíricas para determinar h

Table 18.6 Empirical Equations for Interphase Heat-Transfer Coefficients for Application to Dryers (h in $\text{W/m}^2\text{-K}$, G in kg/hr-m^2 , d_p in m)

Geometry	Equation
Flat-plate, parallel flow	$h = 0.0204G^{0.8}$ ($T_d = 45-150^\circ\text{C}$, $G = 2,450-29,300$) (1)
Flat-plate, perpendicular, impingement flow	$h = 1.17G^{0.37}$ ($G = 3,900-19,500$) (2)
Packed beds, through-circulation	$h = 0.151G^{0.59}/d_p^{0.41}$, ($N_{\text{Re}} > 350$) (3)
	$h = 0.214G^{0.49}/d_p^{0.51}$, ($N_{\text{Re}} < 350$) (4)
Fluidized beds	$N_{\text{Nu}} = 0.0133N_{\text{Re}}^{1.6}$ ($0 < N_{\text{Re}} < 80$) (5)

$$\text{Fluidized beds} \quad N_{\text{Nu}} = 0.0133N_{\text{Re}}^{1.6} \quad (0 < N_{\text{Re}} < 80) \quad (5)$$

$$\text{Pneumatic conveyors} \quad N_{\text{Nu}} = 0.316N_{\text{Re}}^{0.8} \quad (8 < N_{\text{Re}} < 500) \quad (6)$$

$$\text{Droplets in spray dryers} \quad N_{\text{Nu}} = 2 + 1.05N_{\text{Re}}^{0.5}N_{\text{Pr}}^{1/3}N_{\text{Gu}}^{0.175} \quad (N_{\text{Re}} < 1000) \quad (7)$$

$$\text{Spouted beds} \quad N_{\text{Nu}} = 0.0005N_{\text{Re}_s}^{1.46}(u/u_s)^{1/3} \quad (8)$$

$$N_{\text{Re}} = d_p G / \mu, N_{\text{Nu}} = h d_p / k, N_{\text{Pr}} = C_p \mu / k, N_{\text{Re}_s} = d_p G_s / \mu$$

$$G_s = \text{mass velocity for incipient spouting}$$

$$u = \text{velocity, } u_s = \text{incipient spouting velocity}$$

$$N_{\text{Gu}} = (T_d - T_w) / T_d \text{ in absolute temperature}$$

$$d_p = \text{particle size, } C_p = \text{specific heat of gas}$$

$$\mu = \text{viscosity of gas, } k = \text{thermal conductivity of gas}$$

$$\therefore \frac{\dot{m}}{A} = R_c = PM_{aire} k_G (W_{WB} - W) = \frac{h(T - T_W)}{\lambda_{WB}}$$

Ahora para obtener el tiempo de secado a tiempo constante, tenemos que reemplazar en $t = \frac{m_s}{AR_c} (X_1 - X_2)$

$$t = \frac{m_s \lambda_{WB} (X_1 - X_2)}{A \cdot h \cdot (T - T_{WB})} = \frac{m_s (X_1 - X_2)}{A \cdot PM_{gas} \cdot k_G (W_{WB} - W)}$$

Efecto de las variables de proceso en el secado

$$t = \frac{m_s \lambda_{WB} (X_1 - X_2)}{A \cdot h \cdot (T - T_{WB})} = \frac{m_s (X_1 - X_2)}{A \cdot PM_{gas} \cdot k_G (W_{WB} - W)}$$

1. **Velocidad del aire:** R_c es proporcional a h y por ende a G
2. **Efecto de la humedad del gas:** si T es cte. y W del aire disminuye $\rightarrow T_{wb}$ disminuye (carta psicrométrica) $\rightarrow R_c$ aumenta
3. **Temperatura del aire:** si W es cte. y aumenta la T del gas $\rightarrow W_{wb}$ aumenta (carta psicrométrica) $\rightarrow R_c$ aumenta
4. **Características del sólido:** aumento de espesor para un área cte., aumenta m_s y por ende el tiempo de secado

Objetivos de la Clase

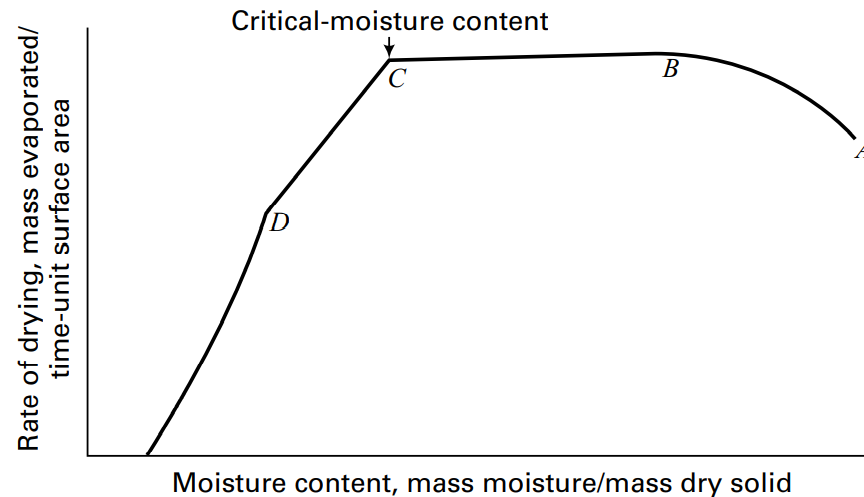
- Entender el periodo de secado a tasa decreciente
- Conocer los equipos de secado más comunes
- Comprender y analizar los balances de materia y energía en secadores de calor directo y secado por banda

Periodo de Secado a Tasa Decreciente

En el proceso de secado, generalmente se busca operar los equipos en el periodo de secado a tasa constante

Sin embargo, cuando esta tasa de secado en el periodo constante es **alta** y/o el trayecto que tiene que recorrer la humedad es **grande**, la humedad puede empezar a tener problemas para alcanzar la superficie del sólido.

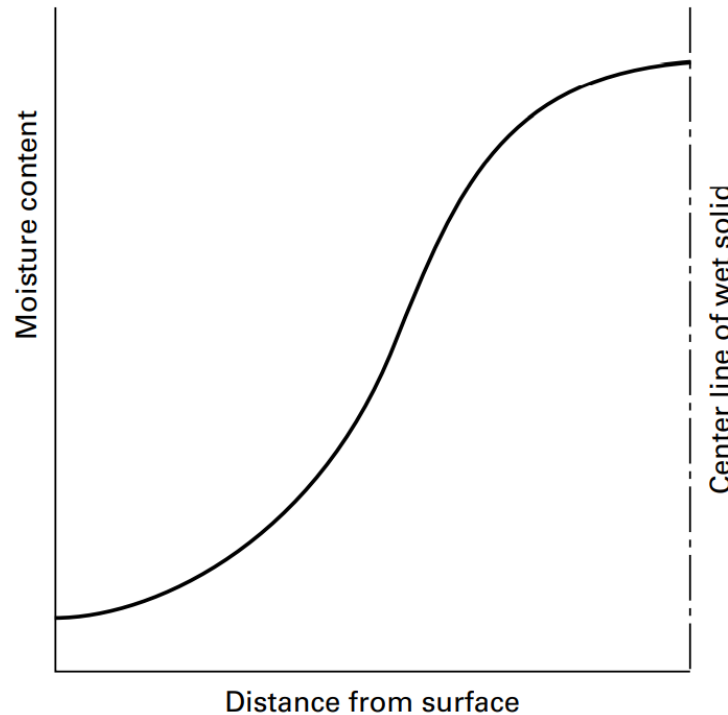
Por lo tanto, empezamos a tener problemas para mantener la tasa de secado constante, y por consiguiente, iniciar una transición al periodo de tasa de secado a tasa decreciente



Periodo de Secado a Tasa Decreciente

Este movimiento de la humedad a la superficie del sólido depende de varios factores como la temperatura, presión o naturaleza del materia.

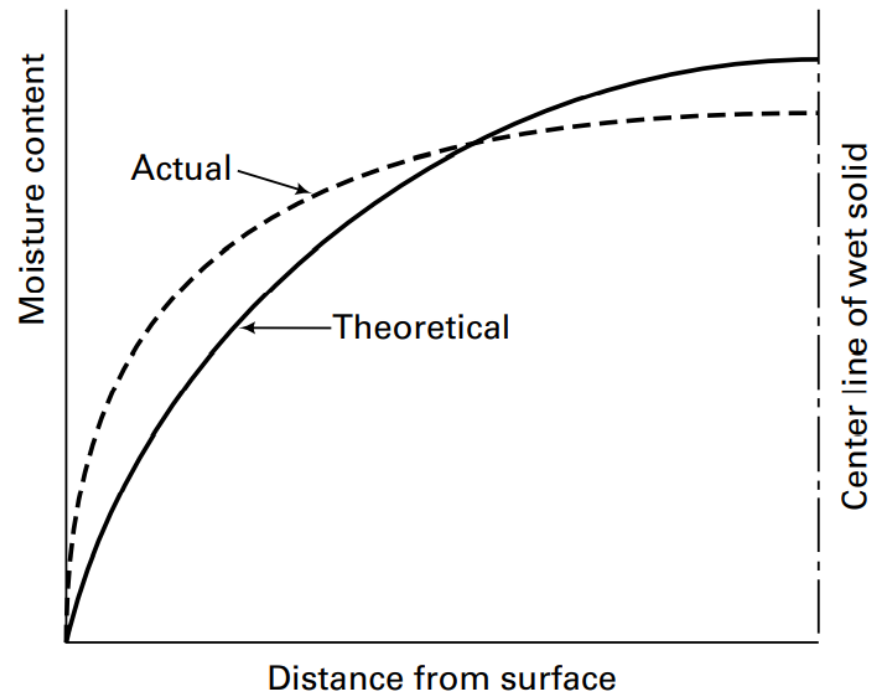
Para sólidos de la primera categoría (sólidos granulares) donde la humedad no se mantiene en solución o en las fibras, pero hay humedad libre en los intersticios de las partículas como tierra y arena, entonces el movimiento de humedad ocurre por **capilaridad**.



Periodo de Secado a Tasa Decreciente

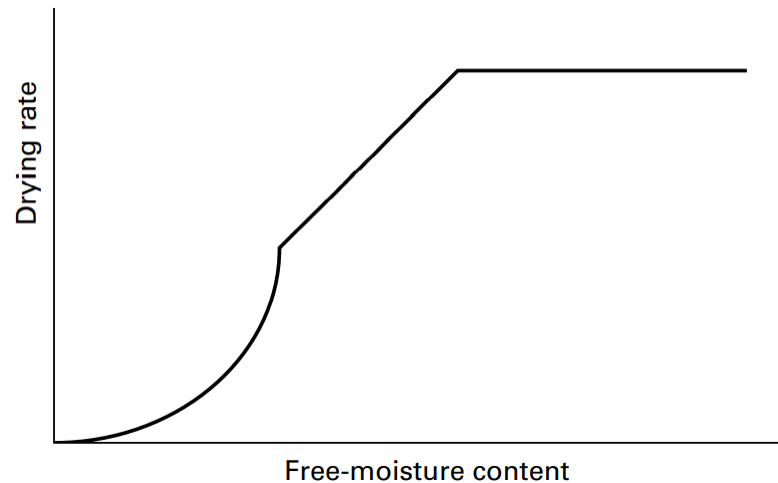
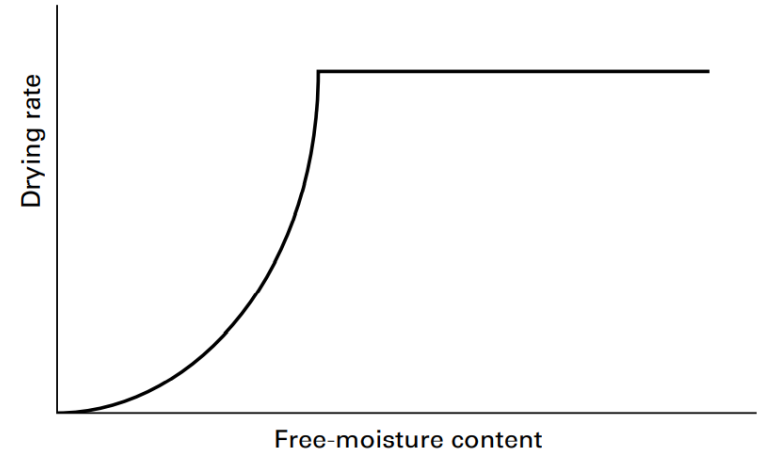
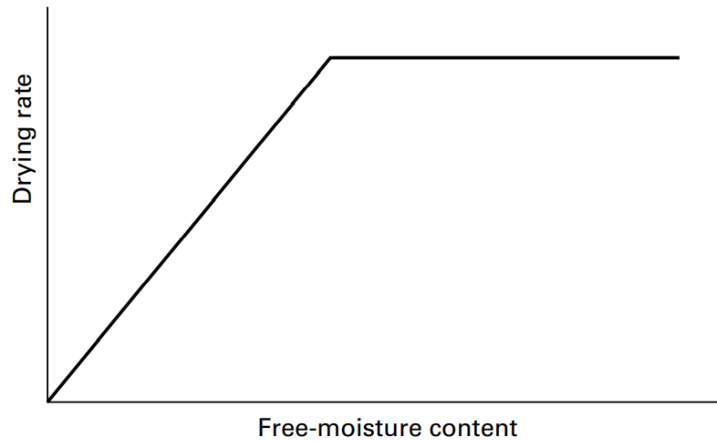
Este movimiento de la humedad a la superficie del sólido depende de varios factores como la temperatura, presión o naturaleza del materia.

Para sólidos de la segunda categoría (sólidos cristalinos) la humedad interna es humedad ligada, por lo que la migración del humedad a la superficie es mediante la **difusión del líquido**.



Tipos de Curvas de Secado

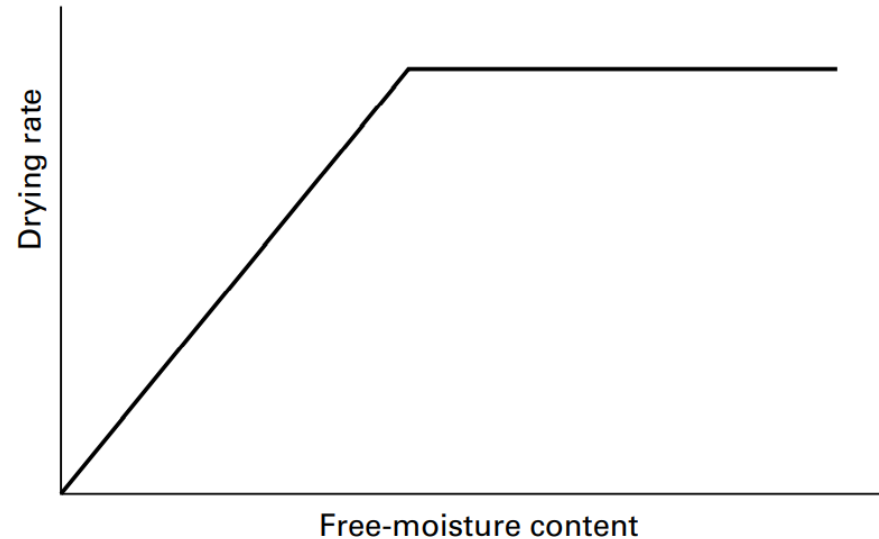
Utilizando datos experimentales es posible conocer la tasa de secado en el periodo de descenso. Para ellos existen 3 casos más frecuentes



Adicionalmente, en varios casos, para cálculos de tiempo, ignoramos el periodo de precalentamiento del material

Modelo Empírico para Secado Decreciente Lineal

Consideremos el caso de un proceso de secado con un periodo de decrecimiento lineal



En este sistema nos interesa conocer el tiempo de secado del sistema, por lo tanto, tenemos que resolver:

$$R = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad \rightarrow \quad \int dt = -\frac{m_s}{A} \int \left(\frac{dX}{R} \right)$$

Modelo Empírico para Secado Decreciente Lineal

En el periodo de secado constante, ya deducimos que el tiempo sigue la siguiente expresión:

$$t_c = \frac{m_s(X_o - X_c)}{A \cdot R_c}$$

En el caso del periodo de secado decreciente, como es lineal, y si asumimos que este periodo termina en el origen ($X_F = 0$), tenemos que la tasa de secado es:

$$R = R_c \frac{X}{X_c}$$

Con ello, si reemplazamos esta expresión en la ecuación del tiempo de secado en ese periodo:

$$\int_{t_c}^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_c}^X \left(\frac{dX}{R} \right) = -\frac{m_s X_c}{A \cdot R_c} \int_{X_c}^X \left(\frac{dX}{X} \right)$$

Con ello, si reemplazamos esta expresión en la ecuación del tiempo de secado en ese periodo:

$$\int_{t_c}^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_c}^X \left(\frac{dX}{R} \right) = -\frac{m_s X_c}{A \cdot R_c} \int_{X_c}^X \left(\frac{dX}{X} \right)$$

Por lo tanto, el tiempo de secado en el periodo decreciente (t_f) es igual a:

$$t_f = t - t_c = \frac{m_s X_c}{A \cdot R_c} \ln \left(\frac{X_c}{X} \right)$$

Por lo tanto, el tiempo total de secado del sistema es:

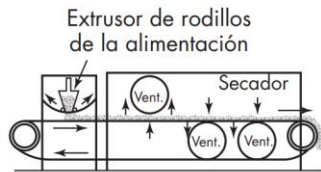
$$t_T = t_c + t_f = \frac{m_s}{A \cdot R_c} \left[(X_o - X_c) - X_c \ln \left(\frac{X_c}{X} \right) \right]$$

Modelos de Masa y Energía para Secadores

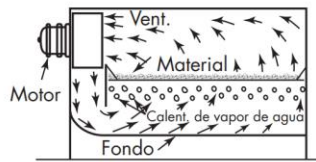
A lo largo de los años se han desarrollado varios tipos de secadores, por lo tanto, las ecuaciones de balance para cada una de las situaciones depende del tipo de equipos que estemos utilizando.

En la industria los equipos de secado más comunes son:

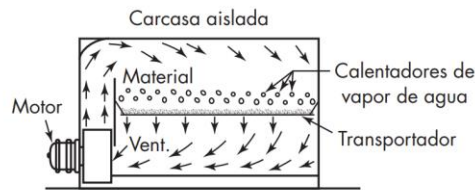
1. Secado por banda o Secador con cinta de circulación
2. Secador rotatorio



a) Recorrido del lecho permeable en un secador con circulación a través de sólidos de 3 unidades

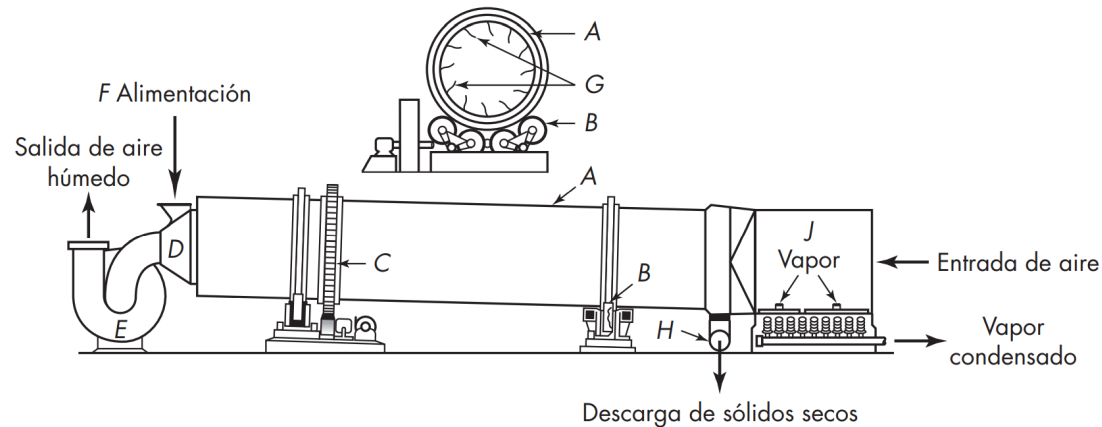


b) Flujo de aire en el extremo húmedo



c) Flujo de aire en el extremo seco

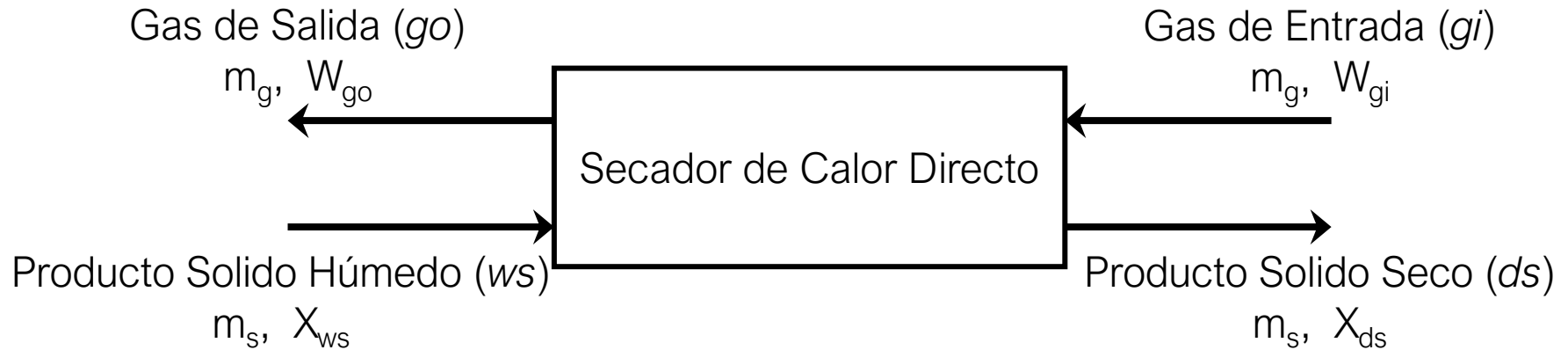
Secado por banda



Secador rotatorio

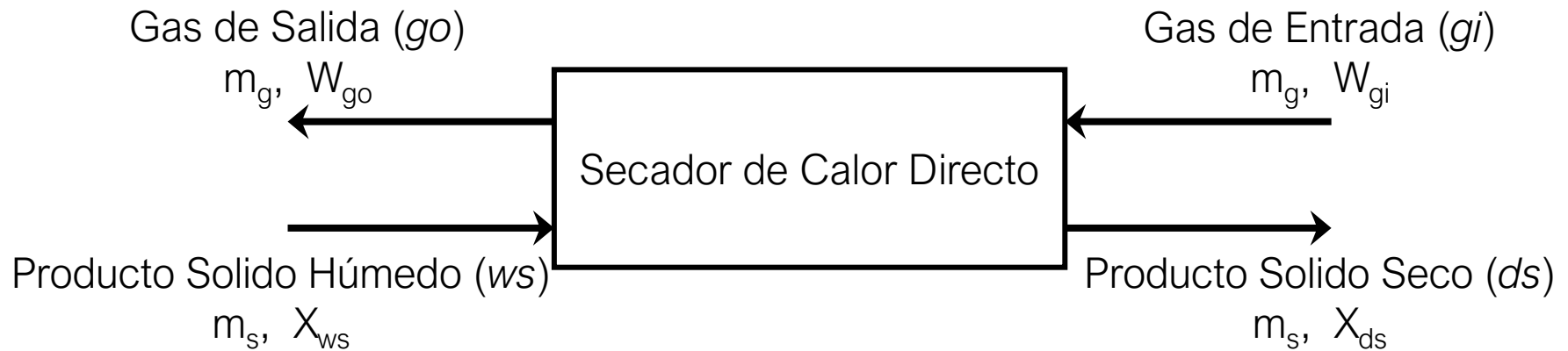
Balance de Masa y Energía en un Secador de Calor Directo

Asumamos que tenemos un secador por el cual el sólido y el gas van ingresando y saliendo de manera continua del equipo.



Si en este sistema asumimos que el equipo está perfectamente aislado, por lo tanto, el **sistema es adiabático**, y asumimos que las **variaciones de masa del sólido y líquido son despreciables**.

Ahora podemos empezar a plantear los balances tanto de masa como de energía del sistema.



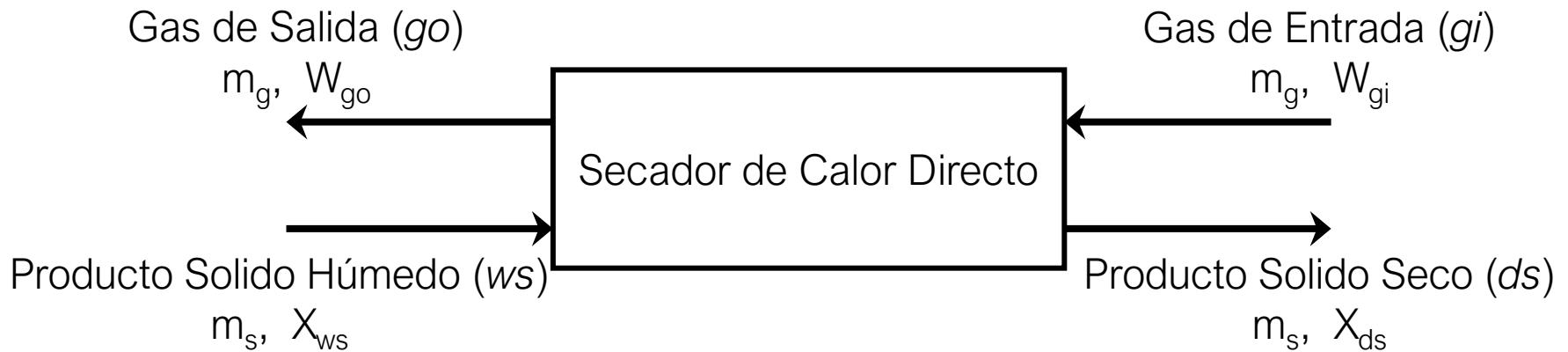
El balance de humedad en el sistema es:

Humedad a la ingreso = Humedad a la salida

$$m_s X_{ws} + m_g W_{gi} = m_s X_{ds} + m_g W_{go}$$

Si hacemos un reordenamiento del sistema, podemos obtener la tasa de evaporación de la humedad, m_v :

$$m_v = m_s (X_{ws} - X_{ds}) = m_g (W_{go} - W_{gi})$$

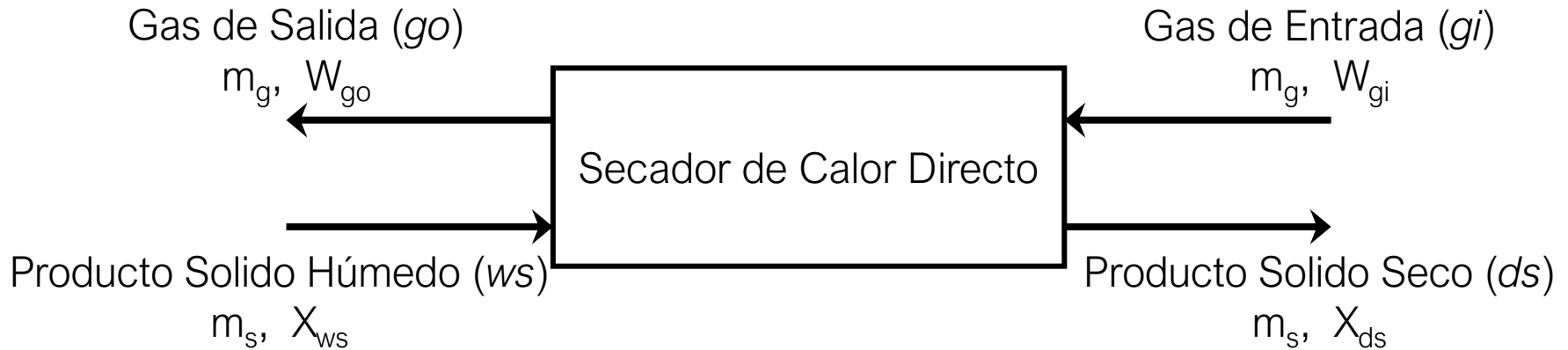


Para el balance de energía es conveniente considerar la energía del sólido seco, gas seco y la humedad:

$$m_s(H_s)_{ws} + X_{ws}m_s(H_{humedad})_{ws} + m_g(H_g)_{gi} + W_{gi}m_g(H_{humedad})_{gi} \\ = m_s(H_s)_{ds} + X_{ds}m_s(H_{humedad})_{ds} + m_g(H_g)_{go} + W_{go}m_g(H_{humedad})_{go}$$

Con ello el calor necesario para evaporar el sistema (Q) es:

$$Q = m_s[(H_s)_{ds} - (H_s)_{ws} + X_{ds}(H_{humedad})_{ds} - X_{ws}(H_{humedad})_{ws}] \\ = m_g \left[(H_g)_{gi} - (H_g)_{go} + W_{gi}(H_{humedad})_{gi} - W_{go}(H_{humedad})_{go} \right]$$

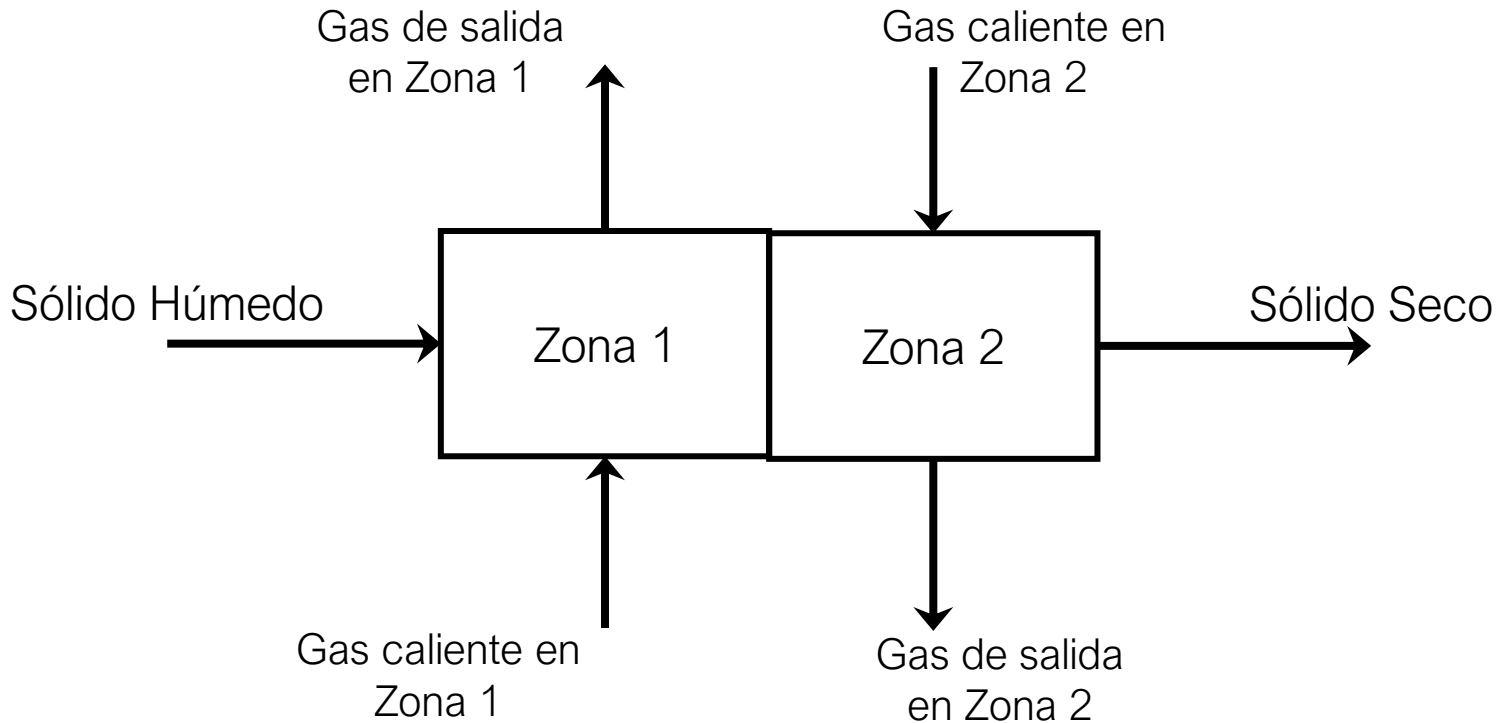


En el caso particular del sistema de aire-agua, tenemos que los calores específicos y calores latentes son casi constantes, por lo que el calor para realizar la evaporación es:

$$\begin{aligned}
 Q &= m_s \left\{ (C_p)_s (T_{ds} - T_{ws}) + X_{ws} (C_p)_{H_2O(l)} (T_{\text{evap}} - T_{ws}) + X_{ds} (C_p)_{H_2O(l)} (T_{ds} - T_{\text{evap}}) \right. \\
 &\quad \left. + (X_{ws} - X_{ds}) \left[\Delta H_{\text{evap}}^{\text{vap}} + (C_p)_{H_2O(g)} (T_{go} - T_{\text{evap}}) \right] \right\} \\
 &= m_g \left\{ \left[(C_p)_{\text{aire}} + W_{gi} (C_p)_{H_2O(v)} \right] (T_{gi} - T_{go}) \right\}
 \end{aligned}$$

Secado por Banda

Asumamos que tenemos un secador por el cual el sólido ingresa y sale a una cierta velocidad del equipo, pero el gas va ingresado al equipo en dirección perpendicular al flujo de sólido

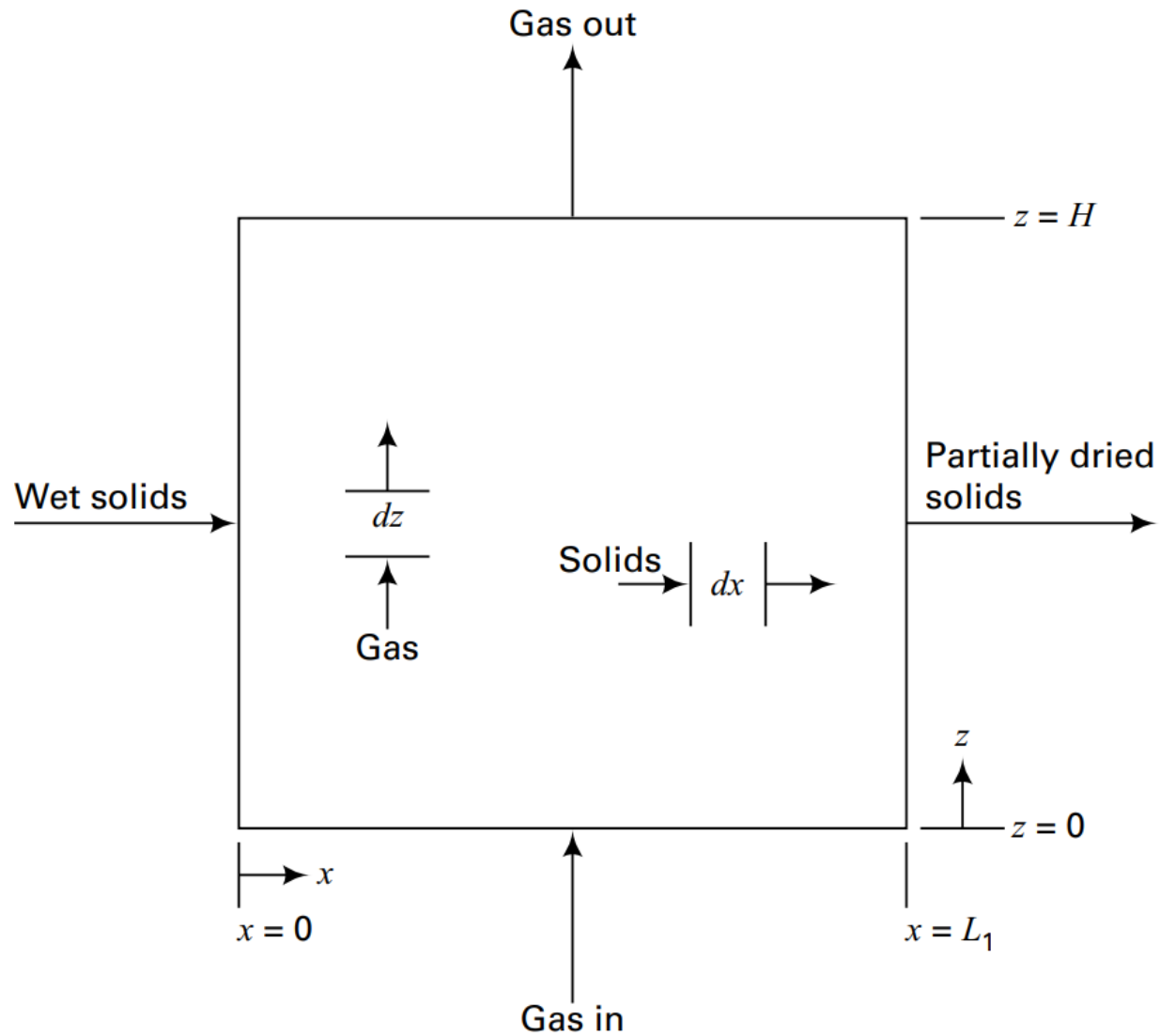


Generalmente, en estos sistemas se generan zonas con flujos del aire caliente en distintas direcciones con el fin de asegurar la uniformidad del contenido de humedad en el sólido

En estos sistemas se plantean los siguientes supuestos con el fin de poder plantear los balances de materia y energía:

1. Los sólidos húmedos entra a la Zona 1 con un contenido de humedad uniforme de X_0 en base seca.
2. Los gases pasan a través del lecho en un patrón de flujo tipo pistón sin que haya dispersión.
3. El secado toma lugar en el periodo de tasa constante, controlado mediante la tasa de transferencia de calor desde el gas a la superficie de las partículas sólidas, donde la temperatura es la temperatura de saturación adiabática.
4. Los efectos de calores sensibles son despreciables en comparación a los efectos de los calores latentes.
5. La fracción de vacío en el lecho es uniforme y constante.
6. El sólido es transportado a una velocidad uniforme lineal e igual a S .

Con esos supuestos el sistema que estamos analizando es el siguiente:



En este sistema el balance diferencia de humedad en el sistema en la Zona 1 es:

$$\frac{dX_1}{dt} = S \frac{dX_1}{dx} = - \frac{(h \cdot a)(T_1 - T_{evap})}{\Delta H_{evap}^{vap} \cdot (\rho_b)_{ds}}$$

Donde a es el área superficial de las partículas sólidas por unidad de volumen del lecho. T_1 es la temperatura del seno del gas en la Zona 1 en la altura z . $(\rho_b)_{ds}$ es la densidad aparente del sólido cuando está seco. Adicionalmente sabemos que la condición inicial es que a $x = 0$ entonces $X_1 = X_0$

El balance de energía para la fase gaseosa para cualquier posición x es:

$$\rho_g (C_p)_g u_s \frac{dT_1}{dz} = -(h \cdot a)(T_1 - T_{evap})$$

Donde ρ_g es la densidad del gas. u_s es la velocidad superficial del gas que pasa por el lecho. Con la condición inicial que a $z = 0$ tenemos que $T_1 = T_{gi}$

El balance de energía para la fase gaseosa para cualquier posición x es:

$$\rho_g (C_p)_g u_s \frac{dT_1}{dz} = -(h \cdot a)(T_1 - T_{evap})$$

Donde ρ_g es la densidad del gas. u_s es la velocidad superficial del gas que pasa por el lecho. Con la condición inicial que a $z = 0$ tenemos que $T_1 = T_{gi}$

Si integramos esta ecuación obtenemos que:

$$T_1 = T_{evap} + (T_{gi} - T_{evap}) \exp\left(-\frac{h \cdot a \cdot z}{\rho_g (C_p)_g u_s}\right)$$

Si reemplazamos este término de temperatura en la ecuación de balance de humedad obtenemos que:

$$\frac{X_1}{X_0} = 1 - \frac{x h a (T_{gi} - T_{evap}) \exp\left(-\frac{h \cdot a \cdot z}{\rho_g (C_p)_g u_s}\right)}{S \Delta H_{evap}^{vap} (\rho_b)_{ds}}$$

De manera análoga para la Zona 2, tenemos que ecuaciones similares se pueden plantear, pero hay cambios en las condiciones de borde debido a que el gas caliente se alimenta desde arriba del equipo.

Por lo tanto, la ecuación de energía, con la condición de borde es que a $z = H$ tenemos que $T_2 = T_{gi}$:

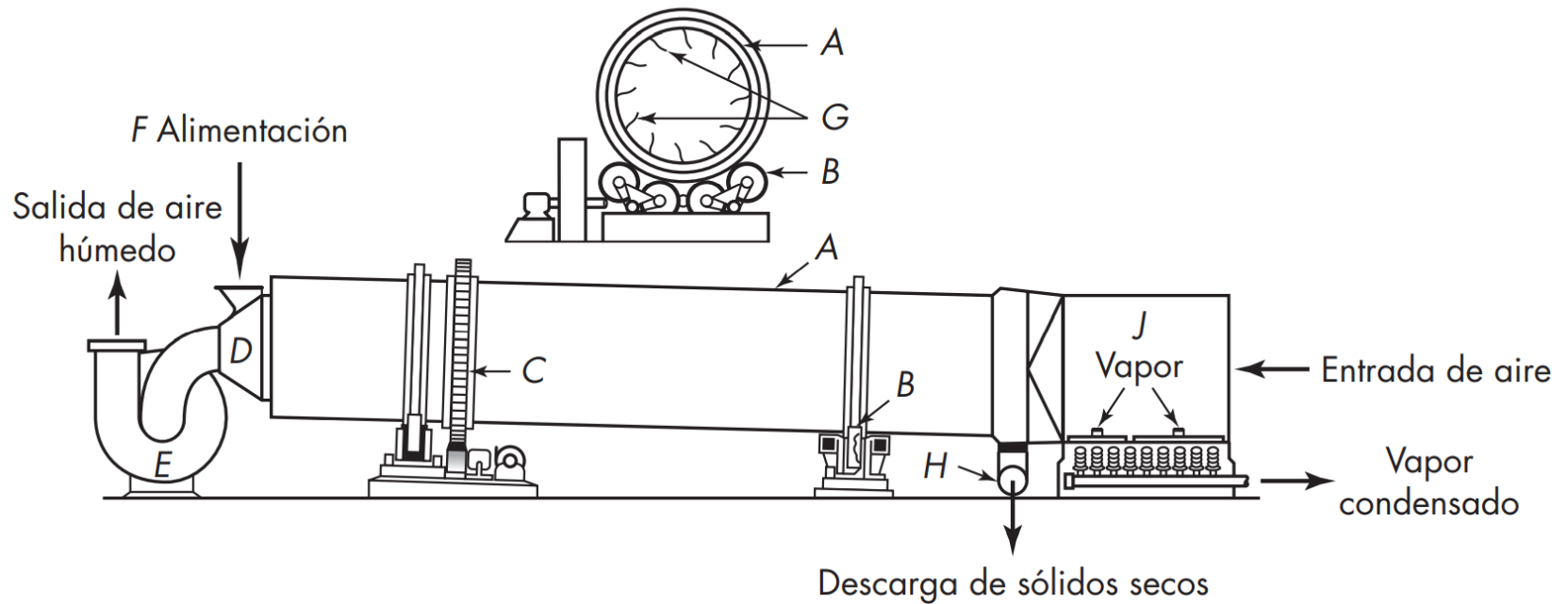
$$T_2 = T_{evap} + (T_{gi} - T_{evap}) \exp\left(-\frac{h \cdot a \cdot (H - z)}{\rho_g (C_p)_g u_s}\right)$$

Para el caso del balance de masa, tenemos que la condición de borde es que al inicio del sistema tenemos $X_2(x = L_2) = (X_1)_{L_1}$, por lo tanto:

$$\frac{X_2}{(X_1)_{L_1}} = 1 - \frac{x \cdot h \cdot a (T_{gi} - T_{evap}) \exp\left[-\frac{h \cdot a \cdot (H - z)}{\rho_g (C_p)_g u_s}\right]}{S \Delta H_{evap}^{vap} (\rho_b)_{ds}}$$



Secador Rotatorio

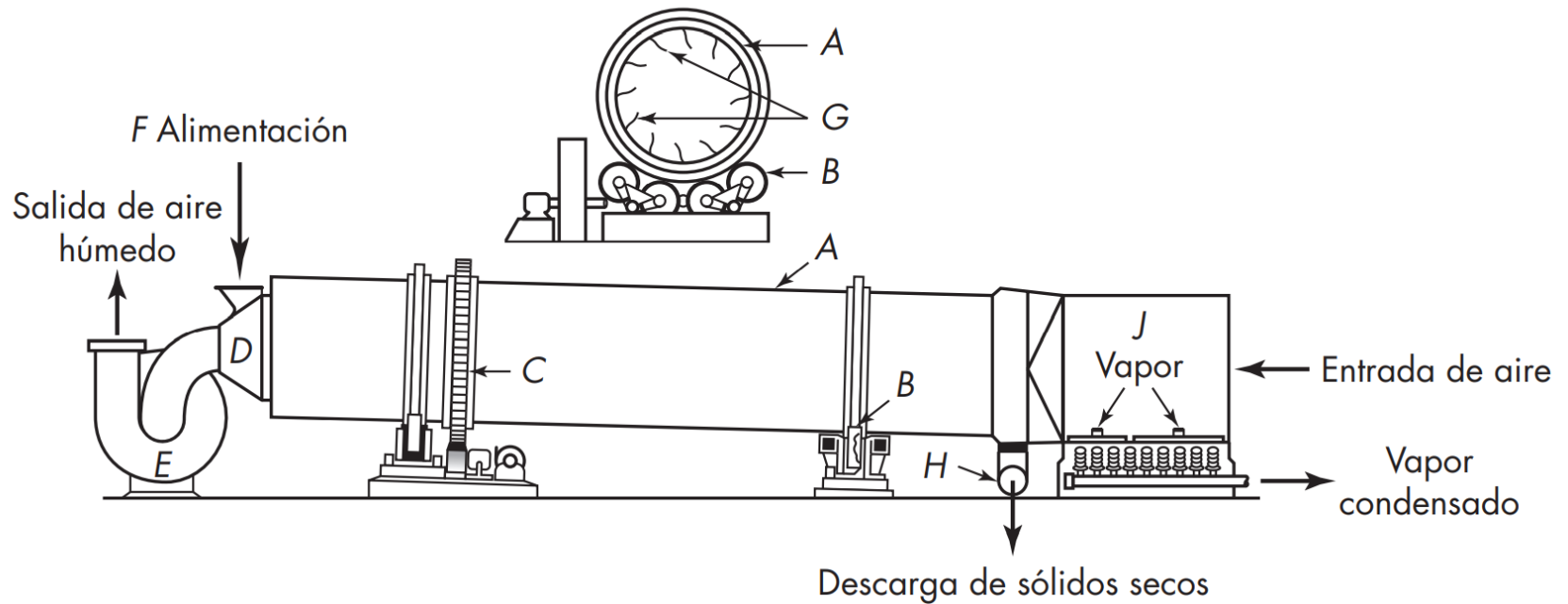


En estos equipos el sólido se alimenta a un cilindro inclinado que va girando a una cierta velocidad.

El cilindro por dentro tiene aletas que permiten el levantamiento del sólido que va girando y avanzando.

El gas caliente se puede alimentar a co-corriente o a contracorriente

Secador Rotatorio



En estos sistemas es importante considerar al momento del sistema:

- Velocidad del gas
- Ángulo de Inclinación del cilindro
- Cantidad de sólido alimentado con respecto al gas
- Diámetro del cilindro
- Velocidad de giro del cilindro



Conceptos Revisados en la Clase

- Entender el periodo de secado a tasa decreciente
- Conocer los equipos de secado más comunes
- Comprender y analizar los balances de materia y energía en secadores de calor directo y secado por banda

Equipos de Secado

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

8 de Junio de 2021

