

## UNIDAD 4

# OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA

# CONTENIDOS

Conceptos de balance de materia.

Representación de curvas de equilibrio.

Coeficientes de transferencia de masa.

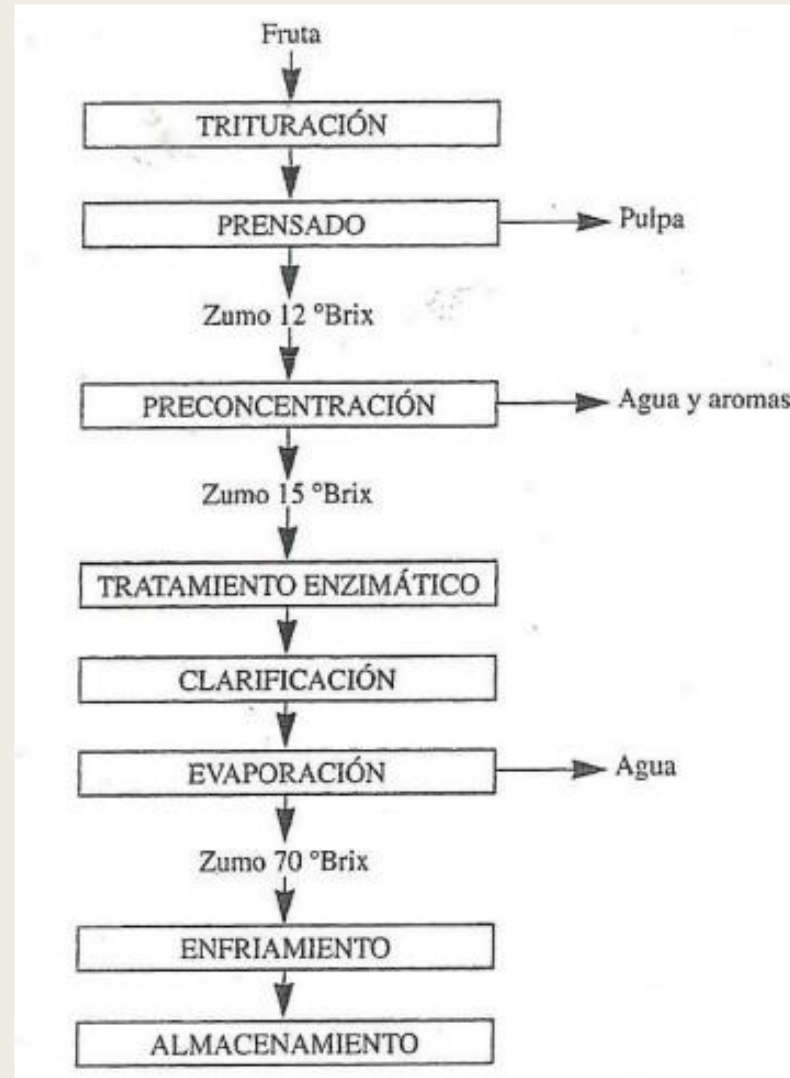
Descripción de las operaciones y de los equipos utilizados en absorción, destilación, extracción y lixiviación. Humidificación. Psicometría.

Adsorción y Secado de sólidos. Descripción de equipos.

# INTRODUCCION

La ingeniería en alimentos, como la ingeniería química es una ingeniería de procesos. En ella se analizan todos los procesos físicos en un cierto numero de operaciones básicas, llamadas operaciones unitarias.

# Ejemplo: sumo concentrado de fruta



# PROCESO

Conjunto de actividades u operaciones industriales que tienden a modificar las propiedades de la materia prima, con el fin de obtener productos que sirvan para cubrir las necesidades de la sociedad.

# OPERACIÓN UNITARIA

Es un paso u operación básica, dentro de una serie de operaciones que forman un proceso.

Pueden ser transformaciones físicas o químicas.

Según la naturaleza de la transferencia pueden ser:

- Transferencia de Masa.
- Transferencia de Calor.
- Transferencia de cantidad de Movimiento.

# OPERACIONES UNITARIAS

FISICAS	QUIMICAS	BIOLOGICAS
Molienda.	Refinado	Fermentación
Tamizado	Pelado	Esterilización
Mezcla		Pasteurización
Fluidización		Pelado enzimático
Sedimentación		
Flotación		
Filtración		
Absorción		
Extracción		
Adsorción		
Evaporación		
Secado		

# Operaciones unitarias con transferencia de materia

- Destilación: separación de 2 o mas componentes aprovechando la diferencia de presiones.
- Absorción: de un componente de una mezcla gaseosa por un liquido. Según solubilidad del gas en el liquido. Con o sin reacción química.
- Extracción: es la disolución de una mezcla (liquida o solida) en un disolvente selectivo.
- Adsorción: es la eliminación de uno o mas componentes de un fluido (liquido o gas) por retención en la superficie de un solido.
- Intercambio iónico: es la sustitución de uno o mas iones, por otros iones del agente intercambiador.



# Operaciones con transferencia simultaneas de calor y masa

- Humidificación y deshumidificación: humidificación de un gas, deshumidificación de un gas y enfriamiento de líquidos.
- Cristalización: es la formación de partículas solidas en el seno de un liquido de fase homogénea.
- Deshidratación: eliminación de un liquido contenido en el seno de un solido. Por evaporación o sublimación. (Liofilización).

# Planteo matemático del problema

Se deben cumplir las leyes de conservación de: la materia, energía, cantidad de movimiento y estequiométricas.

Se deben hacer balances de materia, energía y cantidad de movimiento.

$$\text{Entra} = \text{Sale} + \text{Acumula}$$

Al resolver hay variables o incógnitas, por lo que se plantean ecuaciones para resolverlas.

# SISTEMAS

Un sistema es una región definida en el espacio o una cantidad finita de materia. Este sistema está envuelto (definido) por una frontera, que puede ser real o imaginaria.

Sistemas: - Abierto: permeable al flujo de masa y energía.

- Cerrado: impermeable al flujo de masa.

- Aislado: impermeable al flujo de masa y energía (ideal).

# Propiedades de los sistemas

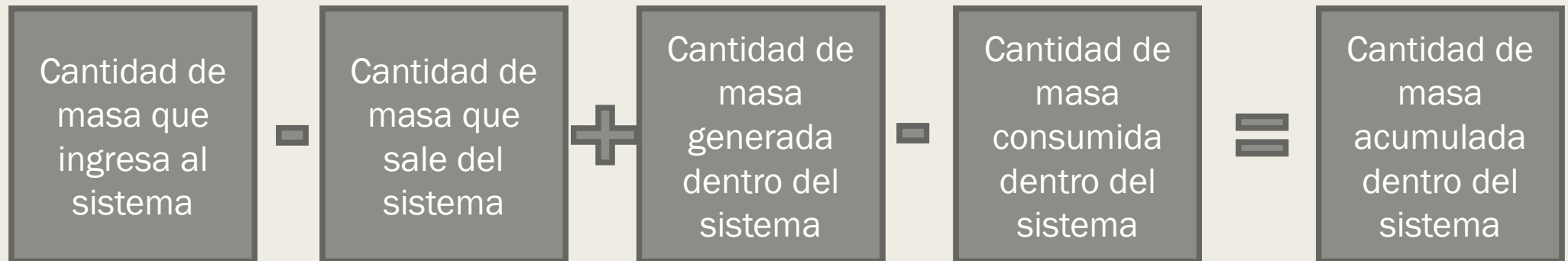
Son las características observables que definen el sistema termodinámico. Son solo función del estado del sistema y no del camino seguido para obtenerlo.

- Intensivas: no depende de la masa del sistema. (Temperatura, presión, densidad)
- Extensiva: dependen de la masa del sistema. (Masa, longitud, volumen, energía)

El cociente de 2 propiedades extensivas resultan en una intensiva. Ejemplo:  $\text{masa/volumen}=\text{densidad}$ ).

# Conservación de masa (Balance de materia)

La ley de conservación de masa se puede escribir de la siguiente forma:



Los balances de materia son útiles para evaluar equipos individuales, líneas de procesos y plantas enteras.

# Pasos para realizar el balance de materia

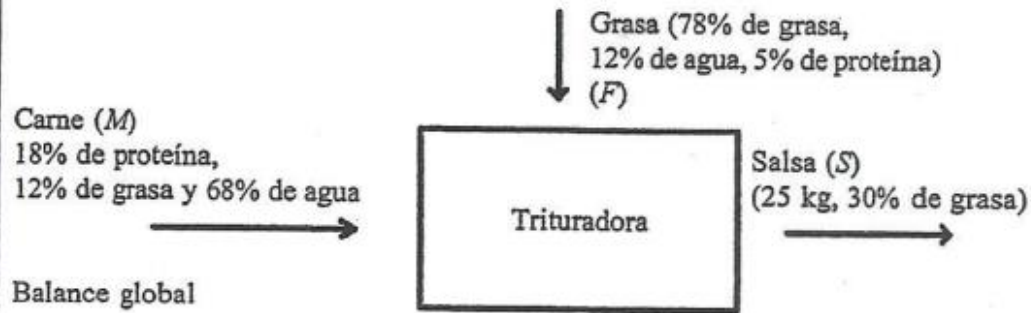
- 1 - Registre todos los datos conocidos de materia y composición en todos los flujos de entrada y salida, de acuerdo a la definición del problema.
- 2 - Dibuje un diagrama de bloques. Indicando el proceso, con entradas y salidas perfectamente identificadas. Dibuje las fronteras del sistema.
- 3 - Escriba todos los datos disponibles en el diagrama de bloques.
- 4 - Seleccione una base apropiada (masa, composición o tiempo) para los cálculos.
- 5 - Escriba los balances de materia en términos de la base para los cálculos seleccionada. Se requiere un balance independiente para cada incógnita a resolver.
- 6 - Resuelva los balances de materia en términos de las incógnitas.

Realizar el balance de masa global y de componentes para la mezcla de ingredientes para hacer 25 kg de salchichas de ternera que tienen un contenido en grasa del 30% usando carne y grasa de ternera. La composición habitual de la carne de ternera es 18% de proteínas, 12% de grasa y 68% de agua, mientras que la grasa de ternera tiene una composición de 78% de grasa, 12% de agua y 5% de proteínas.

*Solución al problema 1.2*

Siendo  $F$  = la masa de grasa (kg) y

$M$  = la masa de carne (kg)



Balance global

$$M + F = 25$$

Balance de grasa

$$0,12M + 0,78F = 0,3(25)$$

Sustituyendo  $M = 25 - F$  en el balance de grasa

$$\begin{aligned} 0,12(25 - F) + 0,78F &= 7,5 \\ 3,0 - 0,12F + 0,78F &= 7,5 \\ &= 6,82 \text{ kg} \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} M &= 25 - 6,82 \\ &= 18,18 \text{ kg} \end{aligned}$$

# EJERCICIO

En el Proceso de producción y elaboración de Te negro estudiado en la unidad 1, realizar:

- 1 – Registre todos los datos conocidos de materia y composición en todos los flujos de entrada y salida, de acuerdo a la definición del problema.
- 2 – Dibuje un diagrama de bloques. Indicando el proceso, con entradas y salidas perfectamente identificadas. Dibuje las fronteras del sistema.
- 3 – Escriba todos los datos disponibles en el diagrama de bloques.



# Operaciones con transferencia de masa

Si las operaciones cambian la composición de soluciones, entonces se conocen como operaciones de transferencia de masa.

Con frecuencia, el costo principal de un proceso deriva de las separaciones. Los costos por separación o purificación dependen directamente de la relación entre la concentración inicial y final de las sustancias separadas; si esta relación es elevada, también lo serán los costos de producción.

# Difusión de materia

- Por diferencia de concentración
- Por gradiente de temperatura.
- Por diferencia de presiones.
- Por agitación.

# Fenómeno de la transferencia.

Las operaciones de transferencia de masa se caracterizan por transferir una sustancia a través de otras a escala molecular.

La transferencia de masa es un resultado de la diferencia de concentraciones, o gradiente, en donde la sustancia que se difunde abandona un lugar en que esta muy concentrada y pasa a un lugar de baja concentración.

# FUNDAMENTOS DEL DISEÑO

Hay cuatro factores principales que se deben establecer en el diseño de cualquier planta que trabaje con operaciones de difusión: el número de etapas en el equilibrio o su equivalente, el tiempo de contacto requerido entre las fases, la velocidad de flujo permisible y la energía requerida para llevar a cabo la operación.

# Número de etapas en el equilibrio

Con el fin de determinar el número de etapas en el equilibrio que se requieren en una cascada para obtener el grado deseado de separación, o para determinar la cantidad equivalente en un aparato de contacto continuo, se necesitan las características de equilibrio para el sistema y los cálculos de balance de materia.

# Tiempo requerido para llevar a cabo la operación

En las operaciones por etapas, el tiempo de contacto está íntimamente relacionado con la eficiencia de la etapa, mientras que en el equipo para contacto continuo el tiempo determina el volumen o longitud del aparato necesario.

El balance de materia permite calcular las cantidades relativas que se necesitan de las diferentes fases. Las características de equilibrio del sistema establecen las concentraciones posibles y la velocidad de transferencia del material entre las fases depende de la desviación del equilibrio que se mantenga.

# Rapidez de flujo permisible

La consideración de la dinámica del fluido establece la rapidez de flujo permisible, y el balance de materia determina la cantidad absoluta requerida de cada uno de los flujos.

# Energía requerida para llevar a cabo la operación

Generalmente se necesita energía calorífica y mecánica para llevar a cabo las operaciones de difusión. El calor es necesario para producir cualquier cambio de temperatura o formación de nuevas fases. La energía mecánica se necesita para el transporte de fluidos y sólidos, para dispersar líquidos y gases y para mover ciertas partes de la maquinaria.



# Difusión

La solución alcanzará espontáneamente la uniformidad por difusión, ya que las sustancias se moverán de un punto de concentración elevada a otro de baja concentración. La rapidez con la cual un soluto se mueve en cualquier punto y en cualquier dirección dependerá, por tanto, del gradiente de concentración en ese punto y esa dirección.

La rapidez de transferencia puede describirse adecuadamente en función del flujo molar, o moles/(tiempo)(área).

Así, la difusividad, o coeficiente de difusión,  $D_{AB}$  de un componente A en solución en B, que es una medida de la movilidad de difusión, se define como la relación de su flux  $J_A$  y su gradiente de concentración.

# Primera ley de Fick

Difusión

Unidimensional

$$J_A = -D_v \frac{dc_A}{db}$$

$J_A$  = flux molar del componente A, kg mol/m<sup>2</sup> · h o lb mol/ft<sup>2</sup> · h

$D_v$  = difusividad volumétrica, m<sup>2</sup>/h o ft<sup>2</sup>/h

$C_A$  = concentración, kg mol/m<sup>3</sup> o lb mol/ft<sup>3</sup>

$b$  = distancia en dirección de la difusión, m o ft

Difusión en 3

dimensiones

$$J_A = D_v \nabla c_A = \rho_M D_v \nabla x_A$$

$\rho_M$  = densidad molar de la mezcla, kg mol/m<sup>3</sup> o lb mol/ft<sup>3</sup>

$x_A$  = fracción mol de A en la fase L.

# Coeficiente de Difusividad

Representa la facilidad con la que un soluto A se mueve en un disolvente B, y depende de los siguientes factores:

- Propiedades de las sustancias.
- Temperatura de las sustancias.
- Naturaleza de la sustancia que se difunde y del solvente donde realiza la difusión.

# Analogías con la transferencia de momentum y la transferencia de calor

Para masa:

$$J_A = -D_v \frac{dc_A}{db}$$

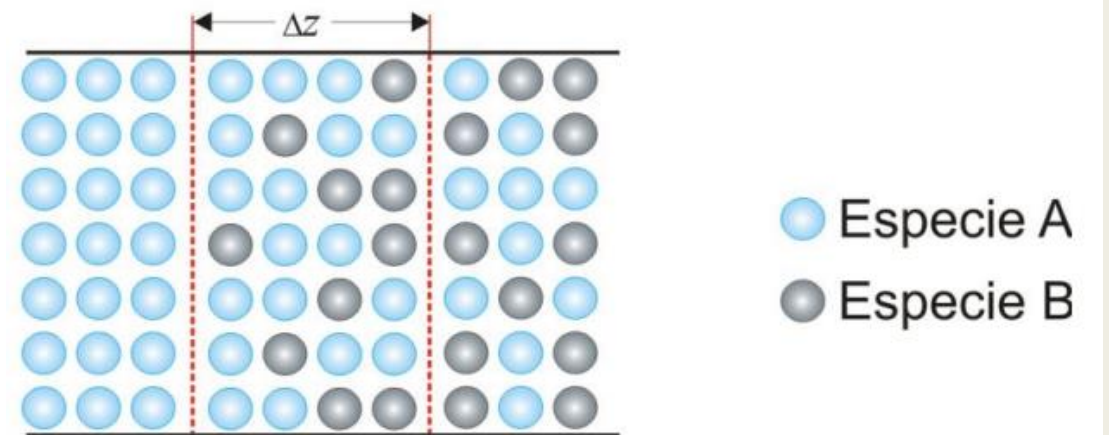
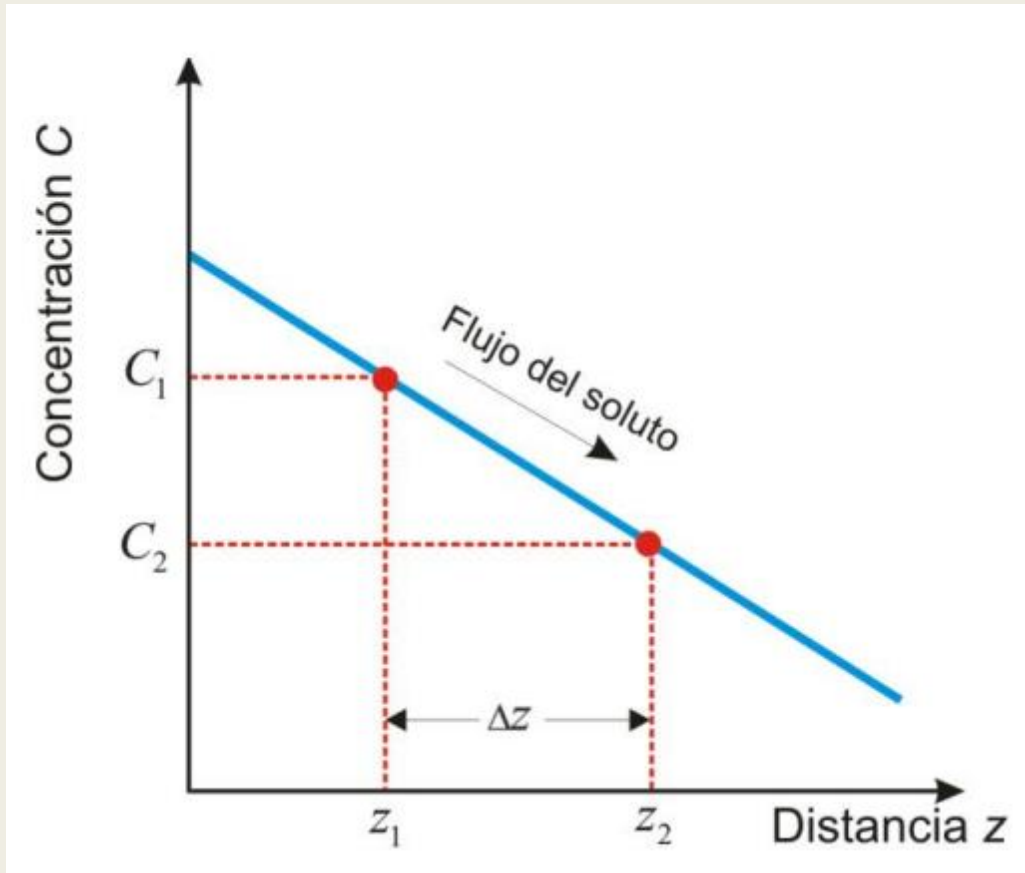
Para energía calórica:

$$\frac{dq}{dA} = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dx}$$

Para momentum:

$$\tau_v = \nu \frac{d(u\rho)}{dy}$$

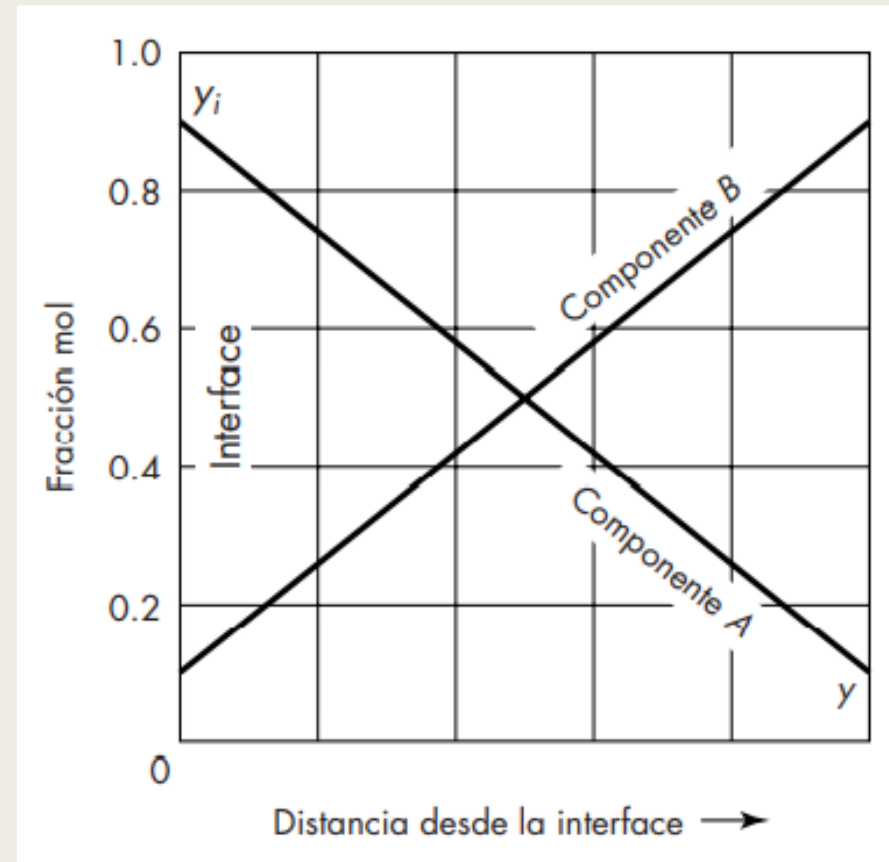
## ■ Descripción grafica



# Difusión equimolar

El gradiente de concentración de A en la película es lineal, y el gradiente de concentración de B tiene la misma magnitud pero signo contrario, tal como se muestra en la figura.

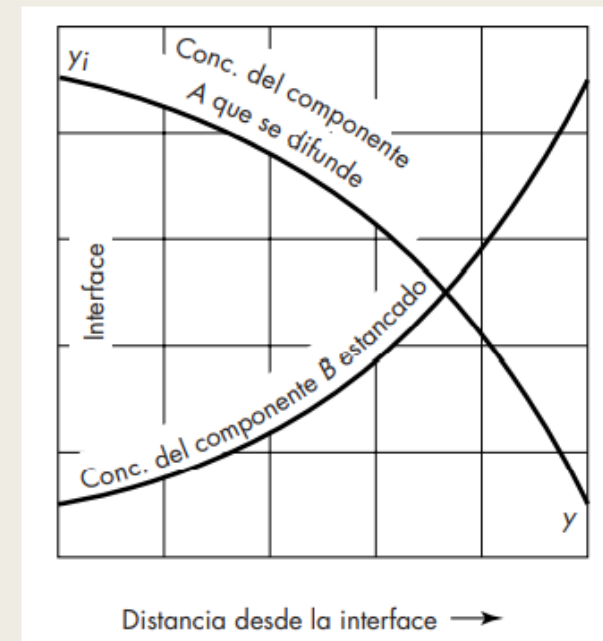
$$N_A = J_A = \frac{D_v}{B_T} (c_{Ai} - c_A)$$



# Transferencia de masa del componente (difusión en una sola dirección)

El flujo del componente A para una determinada diferencia de concentración es por lo tanto mayor para la difusión en una sola dirección que para la difusión equimolar, ya que el término  $(1 - y_A) L$  es siempre menor que 1. El gradiente de concentración para la difusión en una sola dirección no es lineal sino que presenta una pendiente más pronunciada a bajos valores de  $y_A$ , como se observa en la figura.

$$N_A = \frac{D_v \rho_M}{B_T} \frac{y_{Ai} - y_A}{(1 - y_A)_L}$$



## Ejemplo

Una tubería contiene una mezcla de He y N<sub>2</sub> gaseosa a 298 K y 1 atm de presión total, constante en toda la extensión del tubo. En uno de los extremos de este punto 1, la presión parcial  $P_{A1}$  del He es 0,60 atm y en el otro extremo, a 20 cm,  $P_{A,2}$  es 0,20 atm. Calcule en unidades SI el flujo específico de He en estado estacionario cuando el valor de  $D_{AB}$  de la mezcla He-N<sub>2</sub> es 0,687 cm<sup>2</sup>/s.



# Solución

Considerando que el He cumple la ley de los gases ideales:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Se tiene que:

$$C_A = \frac{n_A}{V} = \frac{P_A}{R \cdot T}$$

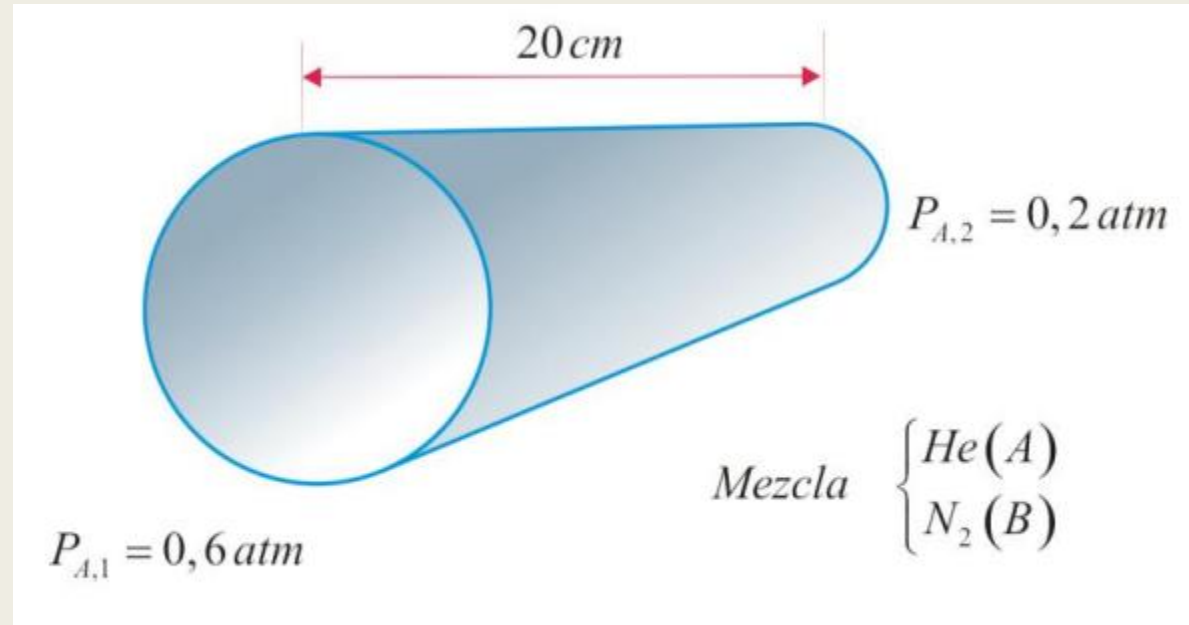
Teniendo en cuenta la 1° Ley de

Fick

$$J_A = -D_{AB} \cdot \frac{d\left(\frac{P_A}{R \cdot T}\right)}{dz}$$

$$J_A = \frac{D_{AB} \cdot (P_{A,1} - P_{A,2})}{R \cdot T \cdot (z_2 - z_1)}$$

$$J_A = \frac{D_{AB} \cdot (P_{A,1} - P_{A,2})}{R \cdot T \cdot (z_2 - z_1)} = \frac{\left(6,87 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right) \cdot (0,6 \text{ atm} - 0,2 \text{ atm})}{\left(0,082 \frac{\text{atm} \cdot L}{\text{mol} \cdot K}\right) \cdot (298 \text{ K}) \cdot (0,2 \text{ m}) \times \frac{1 m^3}{10^3 L}} = 5,62 \times 10^{-3} \frac{\text{mol He}}{m^2 \cdot s}$$



# DIFUSIÓN MOLECULAR EN GASES

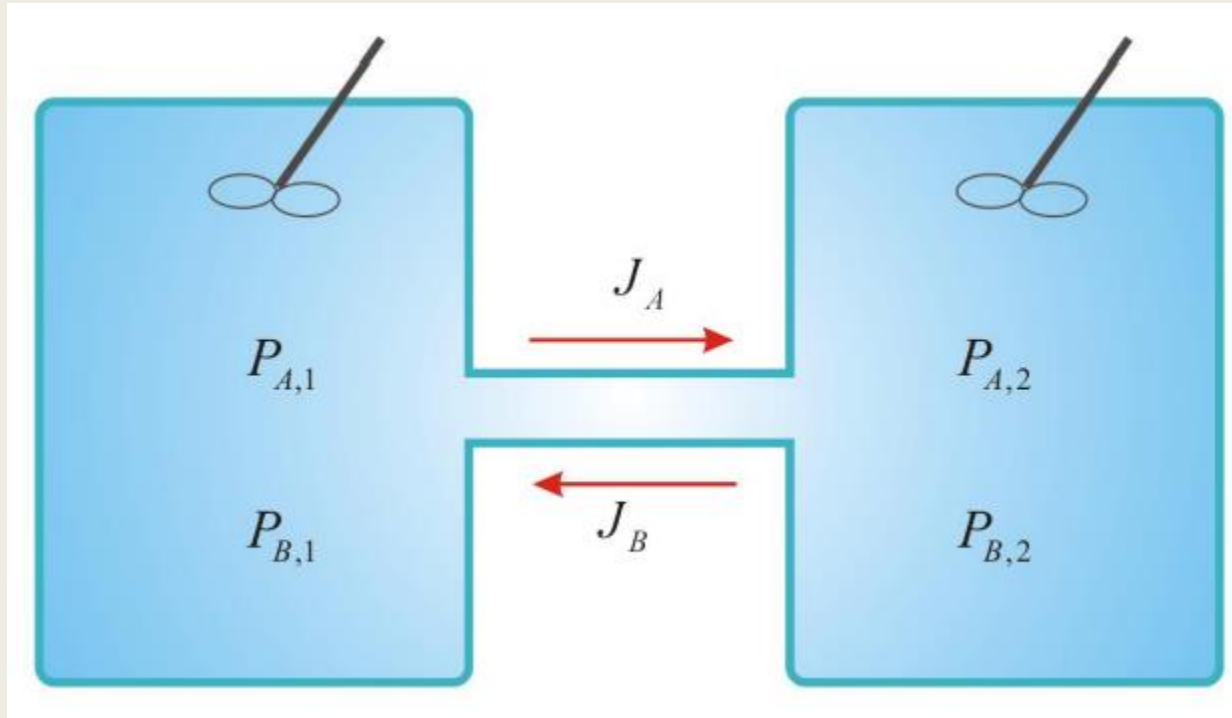
Las fuerzas intermoleculares en los gases son relativamente débiles. Esto debido a que contienen pocas moléculas por unidad de volumen, en donde cada molécula tiene pocas moléculas vecinas con las que pueda interactuar teniendo que recorrer distancias considerables antes de poder colisionar.

# Contradifusión equimolar en gases

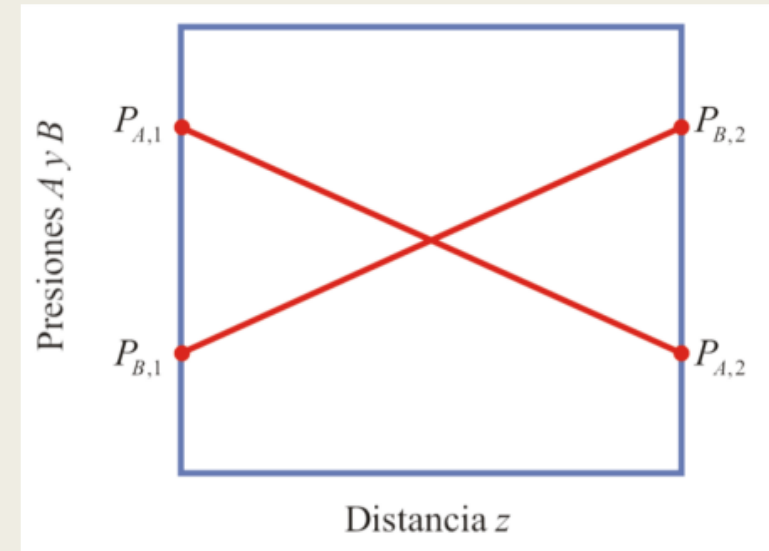
Se presenta con frecuencia en las operaciones de destilación. Supongamos que se tienen dos cámaras grandes conectadas por un tubo, en donde se tienen los gases A y B a la presión total  $P$  que se mantiene constante. Ambas cámaras están siendo agitadas para mantener las concentraciones uniformes. Las presiones parciales están relacionadas

como:  $P_{A,1} > P_{A,2}$  y  $P_{B,2} > P_{B,1}$  por lo que las moléculas de A se difunden hacia la derecha y las de B lo hacen hacia la izquierda. Como la presión total  $P$  se mantiene constante, los moles netos de A que se difunden hacia la derecha deben ser iguales a los moles netos de B que lo hacen hacia la izquierda.

# Descripción grafica



$$J_A = -J_B$$

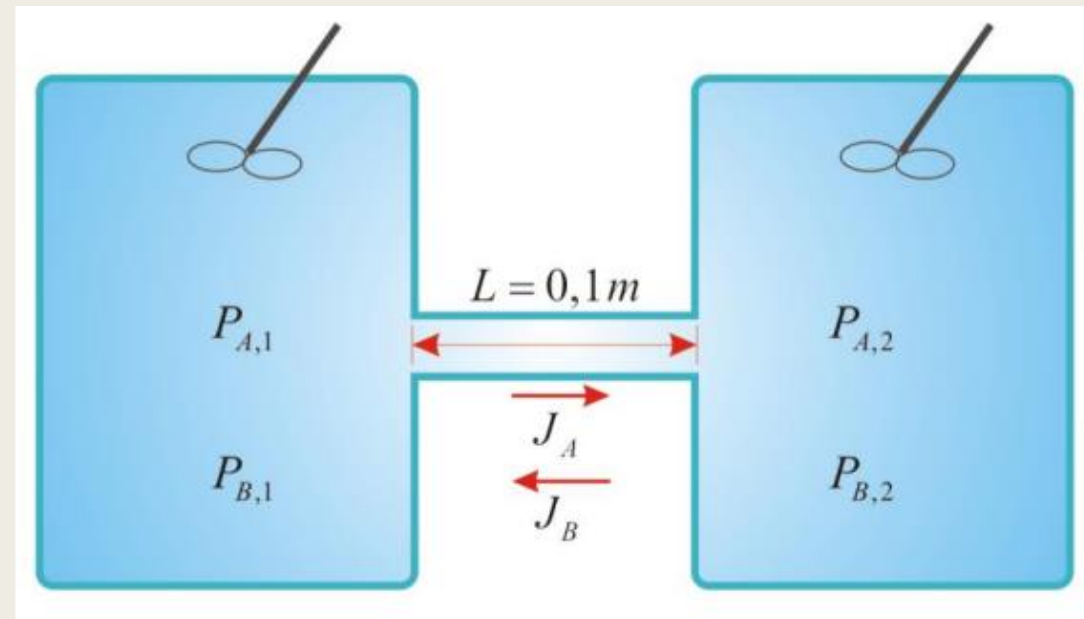


$$D_{AB} = D_{BA}$$

# Ejemplo

En un tubo uniforme de 0,10 m de largo se difunde amoniaco gaseoso (A) en N<sup>2</sup> gaseoso (B) a  $1,0132 \times 10^5$  Pa de presión y 298 K°. En el punto 1,  $P_{A1} = 1,013 \times 10^4$  Pa y en el punto 2,  $P_{A2} = 0,507 \times 10^4$  Pa. La difusividad  $D_{AB}$  es  $0,230 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

- Calcule el flujo específico  $J_A$  en estado estacionario.
- Repita para  $J_B$ .



a) Aplicando la ecuación

$$J_A = \frac{D_{AB} \cdot (P_{A,1} - P_{A,2})}{R \cdot T \cdot (z_2 - z_1)} = \frac{\left(0,230 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s}\right) \cdot \left[(1,013 \times 10^4 - 0,507 \times 10^4) Pa \times \frac{1 atm}{101325 Pa}\right]}{\left(0,082 \frac{atm \cdot L}{mol \cdot K}\right) \cdot (298 K) \cdot (0,1 m) \times \frac{1 m^3}{10^3 L}}$$
$$J_A = 4,7 \times 10^{-4} \frac{mol}{m^2 \cdot s}$$

b) Para calcular  $J_B$  modificaremos la ecuación

$$J_B = \frac{D_{BA} \cdot (P_{B,1} - P_{B,2})}{R \cdot T \cdot (z_2 - z_1)} \quad D_{BA} = D_{AB} = 0,23 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s}$$

$$P_{B,1} = P - P_{A,1} = 1,0132 \times 10^5 \text{ Pa} - 1,013 \times 10^4 \text{ Pa} = 9,119 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$P_{B,2} = P - P_{A,2} = 1,0132 \times 10^5 \text{ Pa} - 0,507 \times 10^4 \text{ Pa} = 9,625 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Reemplazando en la ecuación anterior:

$$J_B = \frac{D_{BA} \cdot (P_{B,1} - P_{B,2})}{R \cdot T \cdot (z_2 - z_1)} = \frac{\left(0,230 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s}\right) \cdot \left[(9,119 \times 10^4 - 9,625 \times 10^4) \text{ Pa} \times \frac{1 \text{ atm}}{101325 \text{ Pa}}\right]}{\left(0,082 \frac{\text{atm} \cdot L}{\text{mol} \cdot K}\right) \cdot (298 \text{ K}) \cdot (0,1 \text{ m}) \times \frac{1 m^3}{10^3 L}}$$

$$J_B = -4,7 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{m^2 \cdot s}$$

# Caso general para la difusión de los gases A y B más convección

Flujo específico de difusión  $J_A$  solo se debe al gradiente de concentraciones

$$J_A = v_{dif,A} \cdot C_A$$

$v_{dif,A}$ :

Velocidad de difusión de A, en m/s, considerando que lo hace hacia la derecha

El flujo total será:

$$v_A = v_{dif,A} + v_M$$

Donde:  $v_A$ : Velocidad de A con respecto a un punto estacionario.

$v_M$ : Velocidad molar promedio de la totalidad del fluido con respecto a un punto estacionario

$$N = C \cdot v_M = N_A + N_B$$

$$N_A = J_A + \frac{C_A}{C} \cdot (N_A + N_B)$$



$$N_A = J_A^* + x_A(N_A + N_B)$$

FLUJO TOTAL  
DE A  
RESPECTO A  
UN PUNTO  
FIJO

FLUJO  
DIFUSIONAL  
DE A

FLUJO  
CONVECTIVO

$$N_A = -D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{dz} + \frac{C_A}{C} \cdot (N_A + N_B)$$

$$N_B = -D_{BA} \cdot \frac{dC_B}{dz} + \frac{C_B}{C} \cdot (N_A + N_B)$$

Se pueden aplicar para la difusión en gases,  
líquidos y sólidos

# Difusión de gases

$$D_{AB} = \frac{0.001858T^{3/2}[(M_A + M_B)/M_A M_B]^{1/2}}{P\sigma_{AB}^2\Omega_D}$$

donde  $D_{AB}$  = difusividad, cm<sup>2</sup>/s

$T$  = temperatura, K

$M_A, M_B$  = pesos moleculares de los componentes A y B

$P$  = presión, atm

$\sigma_{AB} = (\sigma_A + \sigma_B)/2$  = diámetro de colisión efectiva, Å

$\Omega_D$  = colisión integral =  $f(kT/\epsilon_{AB})$

$k$  = constante de Boltzmann

$\epsilon$  = constante de fuerza de Lennard-Jones para gases comunes

$\epsilon_{AB} = \sqrt{\epsilon_A \epsilon_B}$

Ecuación de Chapman-Enskog

# Difusión en líquidos

## Ecuación de Stokes-Einstein

$$D_v = \frac{\mathbf{k}T}{6\pi r_o \mu}$$

donde  $\mathbf{k}$  es la constante de Boltzmann,  $1.380 \times 10^{23}$  J/K.

Una forma conveniente de la ecuación es

$$D_v = \frac{7.32 \times 10^{-16} T}{r_o \mu}$$

donde  $D_v$  = difusividad, cm<sup>2</sup>/s

$T$  = temperatura absoluta, K

$r_o$  = radio molecular, cm

$\mu$  = viscosidad, cP

# Absorción

La absorción se refiere a la capacidad de un material o fluido para retener cierta cantidad de sustancia en su interior. Este concepto es fundamental en diversos procesos industriales, donde se busca maximizar la eficiencia en la utilización de materiales y recursos.

La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de éstos en el líquido.

# Absorción

La absorción es una operación de transferencia de masa entre fases (del G al L), para separar 1 o mas componentes de una mezcla de gases en un líquido. Se suelen usar: columnas de platos o de rellenos, en contracorriente.

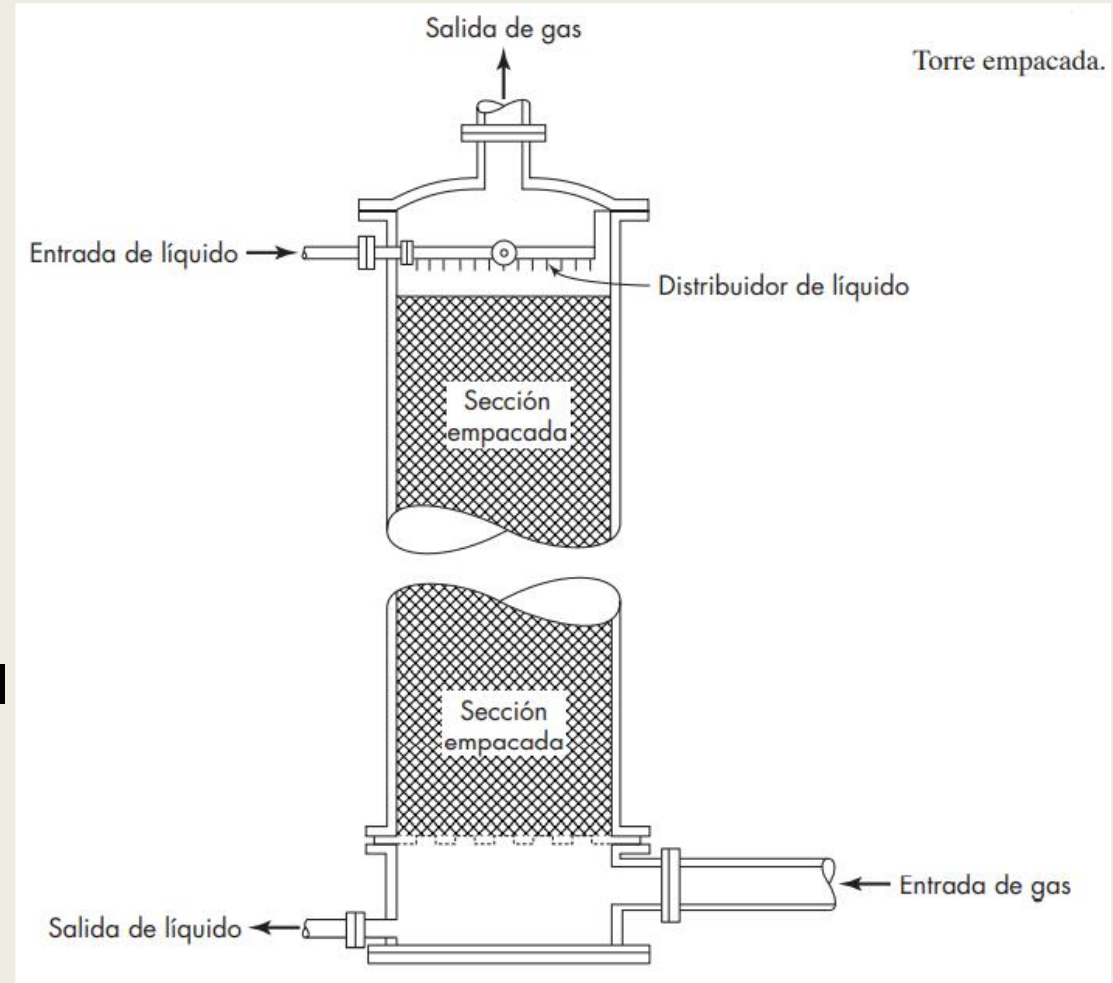
La desorción (stripping): es la operación contraria (del L al G) Ej.: eliminación de HC en aceite obtenidos por extracción con solventes.

# Ejemplos de absorción

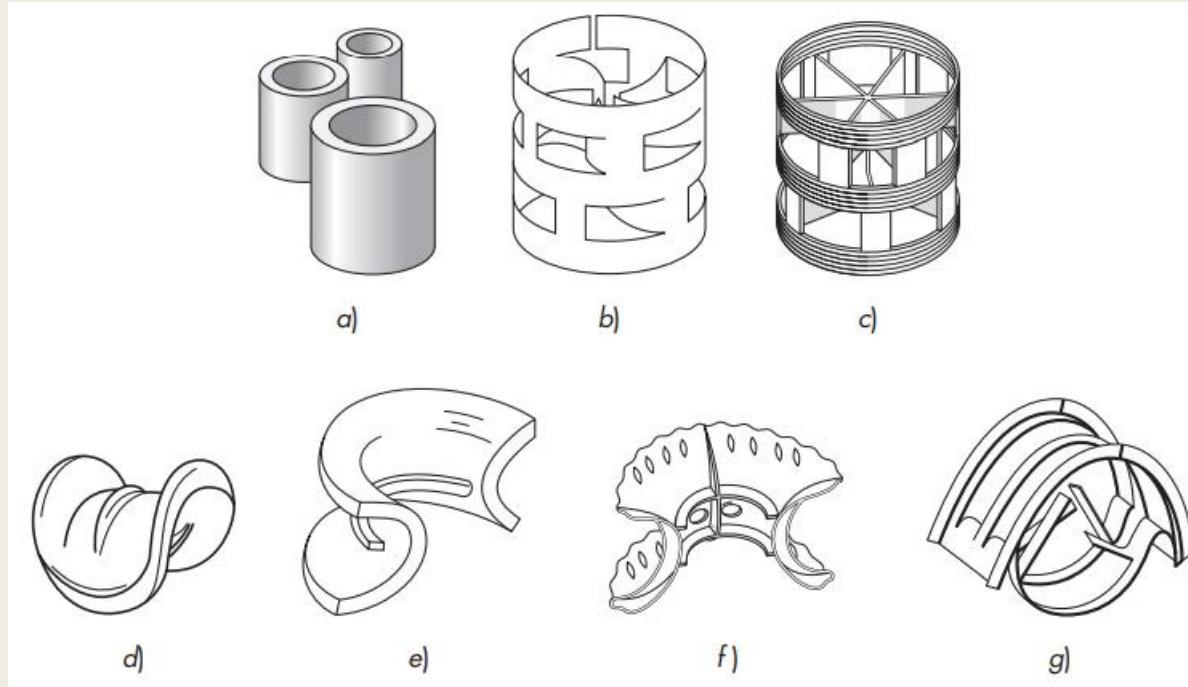
Una aplicación primordial de la tecnología de absorción es la eliminación de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) y  $\text{H}_2\text{S}$  (ácido sulfhídrico) a partir del gas natural o del gas de síntesis por absorción en disoluciones de sales de aminas o alcalinas. El lavado de amoníaco a partir de una mezcla de amoníaco y aire por medio de agua líquida es otro ejemplo típico. El soluto se recupera después del líquido por destilación, y el líquido absorbente se desecha o se reutiliza. En ocasiones un soluto se remueve de un líquido poniendo este último en contacto con un gas inerte; tal operación, que es inversa a la absorción, recibe el nombre de desorción de gases o eliminación.

# Absorción de gases

El empaque proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, favoreciendo así un íntimo contacto entre las fases. El soluto contenido en el gas rico es absorbido por el líquido fresco que entra en la torre, y el gas diluido o agotado sale de la torre por la parte superior. El líquido se enriquece en soluto a medida que desciende por la torre y el líquido concentrado, llamado licor concentrado, sale por el fondo de la torre a través de la salida de líquido.



# Tipos de empaques



Empaques comunes en torres: *a)* anillos Raschig; *b)* anillo metálico Pall; *c)* anillo plástico Pall; *d)* montura Berl; *e)* montura de cerámica Intalox; *f)* montura plástica Super Intalox; *g)* montura metálica Intalox.



# Características de empaques para torres

Tipo	Material	Tamaño, nominal, in.	Densidad global, <sup>†</sup> lb/ft <sup>3</sup>	Área total, <sup>†</sup> ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup>	Porosidad $\varepsilon$	Factores de empaquet <sup>‡</sup>	
						$F_p$	$f_p$
Anillos Raschig	Cerámica	$\frac{1}{2}$	55	112	0.64	580	1.52§
		$1\frac{1}{2}$	42	58	0.74	155	1.36§
		$1\frac{1}{2}$	43	37	0.73	95	1.0
		2	41	28	0.74	65	0.92§
Anillos Pall	Metal	1	30	63	0.94	56	1.54
		$1\frac{1}{2}$	24	39	0.95	40	1.36
		2	22	31	0.96	27	1.09
	Plástico	1	5.5	63	0.90	55	1.36
$1\frac{1}{2}$		4.8	39	0.91	40	1.18	
Monturas Berl	Cerámica	$\frac{1}{2}$	54	142	0.62	240	1.58§
		1	45	76	0.68	110	1.36§
Monturas Intalox	Cerámica	$1\frac{1}{2}$	40	46	0.71	65	1.07§
		$\frac{1}{2}$	46	190	0.71	200	2.27
		1	42	78	0.73	92	1.54
		$1\frac{1}{2}$	39	59	0.76	52	1.18
		2	38	36	0.76	40	1.0
Monturas Super Intalox	Cerámica	3	36	28	0.79	22	0.64
		1	—	—	—	60	1.54
		2	—	—	—	30	1.0
IMTP	Metal	1	—	—	0.97	41	1.74
		$1\frac{1}{2}$	—	—	0.98	24	1.37
		2	—	—	0.98	18	1.19
Hy-Pak	Metal	1	19	54	0.96	45	1.54
		$1\frac{1}{2}$	—	—	—	29	1.36
		2	14	29	0.97	26	1.09

# Principios que rigen el fenómeno

**Fuerzas intermoleculares:** La absorción está influenciada por las fuerzas intermoleculares entre las moléculas del material absorbente y las moléculas de la sustancia que está siendo absorbida. Estas fuerzas pueden incluir enlaces de hidrógeno, fuerzas dipolo-dipolo, fuerzas de dispersión de London, entre otras.

**Superficie y porosidad:** La capacidad de absorción de un material depende en gran medida de su superficie y porosidad. Los materiales con una mayor área superficial y una estructura porosa tienen una mayor capacidad de absorción, ya que ofrecen más sitios de contacto para que la sustancia absorbida se adhiera.

**Solubilidad y afinidad:** La solubilidad y la afinidad entre la sustancia absorbida y el material absorbente son factores clave. Si la sustancia es soluble en el material absorbente o si hay una afinidad química entre ellos, la absorción será más eficiente.

# Principios que rigen el fenómeno

**Equilibrio de absorción:** La absorción alcanza un estado de equilibrio dinámico entre la cantidad de sustancia absorbida y la cantidad que permanece en la fase líquida o gaseosa. Este equilibrio está influenciado por factores como la temperatura, la presión y la concentración de la sustancia absorbida.

**Cinética de absorción:** describe la velocidad a la que ocurre el proceso de absorción. Este proceso puede seguir diferentes modelos cinéticos, como la absorción de primer orden, de segundo orden, o seguir una cinética más compleja dependiendo de la naturaleza del sistema.

**Difusión:** La difusión es un proceso fundamental en la absorción, donde la sustancia absorbida se mueve desde la fase líquida o gaseosa hacia el interior del material absorbente debido a un gradiente de concentración.

# FUNDAMENTOS DE LA ABSORCIÓN:

El diámetro de una torre empacada de absorción depende de las cantidades de gas y líquido tratadas, de sus propiedades, y de la relación de una corriente con otra. La altura de la torre, y por lo tanto el volumen total del empaque, depende de la magnitud de los cambios deseados en la concentración y de la velocidad de transferencia de masa por unidad de volumen empacado. Por lo tanto, los cálculos de la altura de la torre se basan en balances de materia, balances de entalpía y en estimaciones de la fuerza impulsora y de los coeficientes de transferencia de materia.

# Ecuaciones básicas de transferencia de materia

Difusión en fase gaseosa.  $D_v$  difusividad ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).  $L$  espesor de capa gaseosa ( $\text{cm}$ ).  $N_A$  velocidad de difusión ( $\text{gmol}/\text{cm}^2 \text{ s}$ ).

$$k_g = \frac{D_v}{R T L}$$

$$N_A = k_g (P - P_i)$$

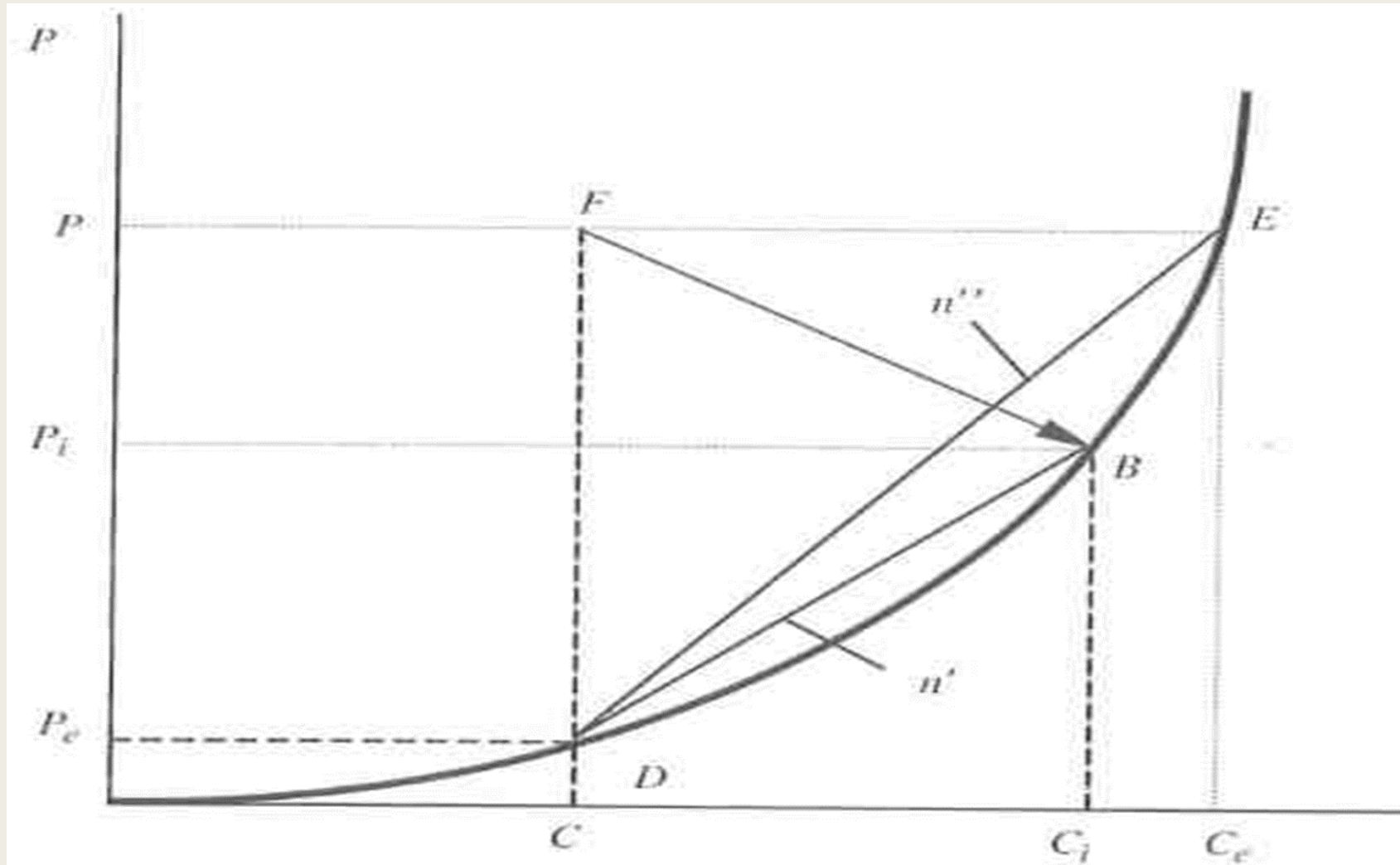
Difusión en fase líquida.  $D_L$  difusividad ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).  $L$  espesor de capa líquida ( $\text{cm}$ ).  $N_A$  velocidad de difusión ( $\text{gmol}/\text{cm}^2 \text{ s}$ )

$C_i$  y  $C$  concentración en la interface y en el líquido.

$$k_l = \frac{D_L}{L}$$

$$N_A = k_l (C_i - C)$$

Velocidad de absorción en estado estacionario:  $N_A = N_A$



$$N_A = k_x (P - P_i) = k_l (C_i - C) \quad N_A = K_G (P - P_e) = K_L (C_e - C)$$

$$N_A = \frac{P - P_i}{\frac{1}{k_g}} = \frac{P_i - P_e}{\frac{n'}{k_l}} = \frac{P - P_e}{\frac{1}{K_G}} = \frac{P - P_e}{\frac{n''}{K_L}}$$

Si se cumple Henry:  $n' = n''$

$$\frac{1}{k_g} + \frac{n'}{k_l} = \frac{1}{K_G} = \frac{n''}{K_L}$$

Para gas muy soluble  $C_i = C$  ;  $P_i = P_e$ ;  $k_l$  muy elevado y  $k_g = K_G$

Para gas poco soluble  $P_i = P$ ;  $C_i = C_e$ ;  $k_g$  muy elevado y  $k_l = K_L$

Si el gas absorbido es puro:  $P_i = P$

# Características estáticas del relleno

Superficie unitaria o superficie específica del lecho  $a_s$

$a_s$  = m<sup>2</sup> de superficie/m<sup>3</sup> de lecho relleno

Fracción de huecos

$$\varepsilon = \frac{\text{m}^3 \text{ de relleno vacío}}{\text{m}^3 \text{ de relleno}}$$

$$\text{Factor de relleno} = \frac{a_s}{\varepsilon^3}$$

$$\rho_u = \frac{\text{Peso relleno}}{\text{Volumen ocupado}}$$

Superficie específica de cada partícula

$$a_s = a_p (1 - \varepsilon) = a_{s0} (1 - \varepsilon)$$



# Características dinámicas

$L_m$  caudal mojado o de humectación

$$L_m = \frac{\text{Caudal volumétrico}}{\text{Perímetro mojado}} \left( \frac{\frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\text{m}} \right)$$

$$\text{Perímetro mojado} = \frac{\text{Superficie mojada}}{\text{Altura mojada}} = \frac{S z a}{z} = S a$$

$S$  = sección transversal de la columna ( $\text{m}^2$ ).

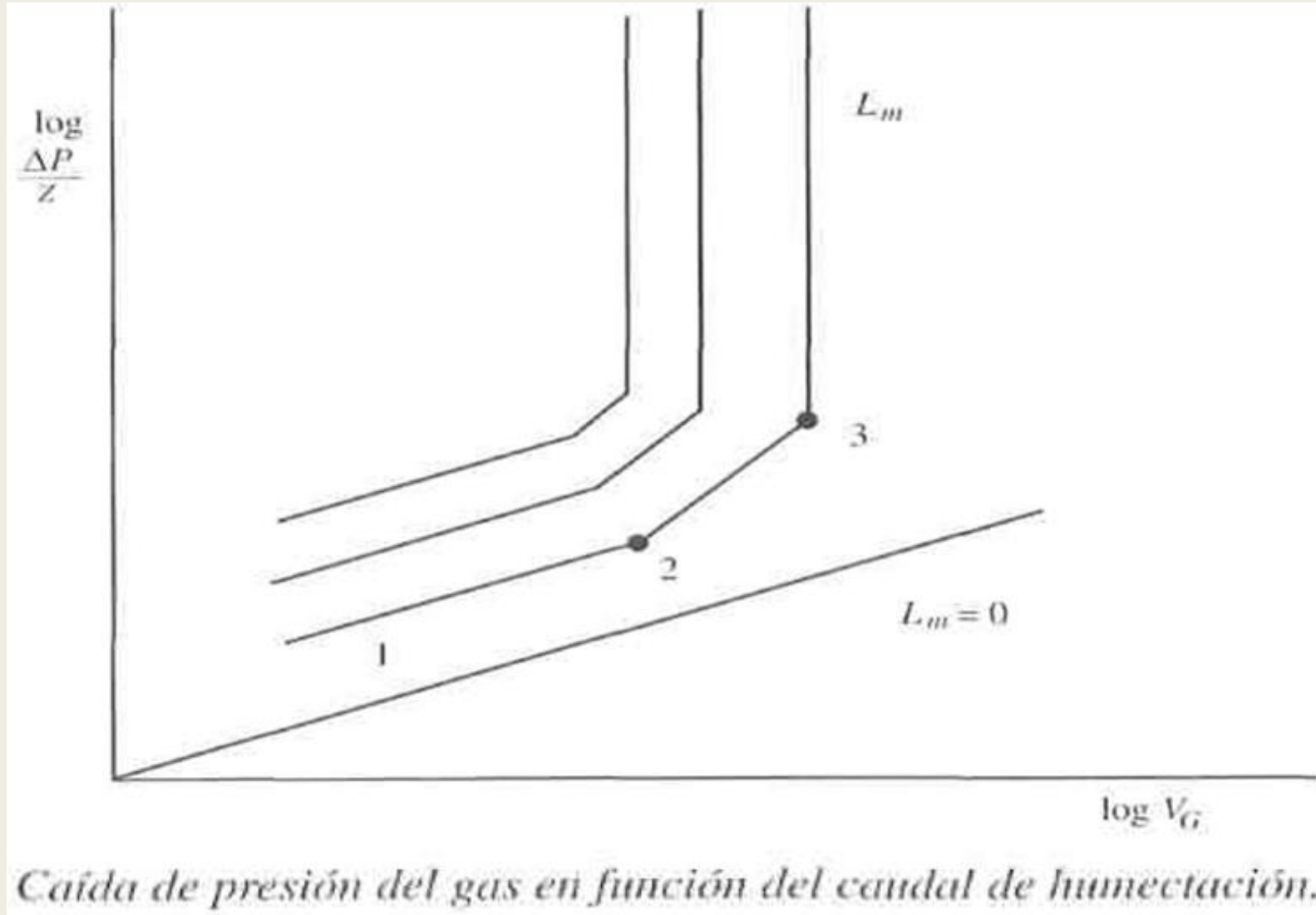
$z$  = altura de la columna (m).

$a$  = superficie específica del relleno ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ).

Lv caudal volumétrico del liquido

$L_m = 0$  (lecho seco)

$$L_m = \frac{L_V}{S a} = \frac{w_L}{\rho_L S a}$$



# Determinación de la velocidad de anegamiento

$$G_{CARGA} \approx 0,6 G_{ANEGAMIENTO} \quad [21.36]$$

## Ecuación de Sawistowsky

$$\ln \left[ \frac{(G_{ANEG})^2}{g} \frac{a}{\epsilon^3} \left( \frac{\eta_L}{\eta_{agua}} \right)^{0.2} \frac{1}{\rho_G \rho_L} \right] = -4 \left( \frac{L}{G} \right)^{1/4} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad [21.38]$$

$a/\epsilon^3$  = factor de relleno ( $m^2/m^3$ ).

$\eta_L$  = viscosidad del líquido (Pa·s).

$\eta_{agua}$  = viscosidad del agua a 20 °C (Pa·s).

$\rho_G$  = densidad del gas ( $kg/m^3$ ).

$\rho_L$  = densidad del líquido ( $kg/m^3$ ).

$G$  = densidad de flujo másica del gas ( $kg/s \cdot m^2$ ).

# Cálculo: altura de la columna

Mezclas diluidas  $Y < 0,2$  y  $X < 0,2$ .

$$N_G = (NUT)_{GT} = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y_e}$$

$$H_G = (AUT)_{GT} = \frac{\frac{G'}{S}}{K_G a P}$$

$$N_L = (NUT)_l = \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X_i - X}$$

$$H_L = (AUT)_l = \frac{\frac{L'}{S}}{k_l a \rho_{mv}}$$

**Altura de relleno = (AUT) (NUT) = (H) (N)**

$N = (NUT) = N^\circ$  unidades de transferencia.

$H = (AUT) =$  Altura de la unidad de transferencia.

## PROBLEMAS

### Problema 1

Una corriente de aire está contaminada con una sustancia orgánica que se desea eliminar. Para ello, 800 kg/h de aire son introducidos por la base de una torre de relleno con anillos Raschig dispuestos al azar, por la que circulan en contracorriente 3.000 kg/h de un aceite mineral.

Calcular:

- El diámetro de la torre correspondiente a la velocidad de anegamiento,
- El diámetro de la torre cuando la velocidad es 0,5 veces la de anegamiento.

Datos. Propiedades de los fluidos:

Líquido: Densidad = 900 kg/m<sup>3</sup>; viscosidad = 40 mPa s.

Gas: Densidad = 1,1 kg/m<sup>3</sup>.

Para el relleno utilizado:  $(a/E^3) = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

La velocidad de anegamiento se puede calcular a partir de la ecuación de Sawistowsky:

$$\ln \left[ \frac{V_{ANEG}^2}{g} \frac{a}{\epsilon^3} \left( \frac{\eta_L}{\eta_{AGUA}} \right)^{0,2} \frac{\rho_G}{\rho_L} \right] = -4 \left( \frac{w_L}{w_G} \right)^{1/4} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/8}$$

en la que w es el caudal másico, denotando los subíndices G y L, gas y líquido, respectivamente.

$$\ln \left[ \frac{V_{ANEG}^2}{9,8} 400 \left( \frac{40}{1} \right)^{0,2} \left( \frac{1,1}{900} \right) \right] = -4 \left( \frac{3.000}{800} \right)^{1/4} \left( \frac{1,1}{900} \right)^{1/8}$$

$$V_{ANEG} = 0,929 \text{ m/s.}$$

El diámetro de la torre puede calcularse si se conoce la sección de paso, y ésta puede obtenerse a partir de la ecuación de continuidad:

$$S = \frac{w_G}{\rho_G V_{ANEG}} = \frac{(800/3.600)}{(1,1) (0,929)} = 0,218 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{4 S/\pi} = 0,526 \text{ m}$$

**b) Con una velocidad  $V_G = 0,5 \cdot V_{ANEG} = 0,465 \text{ m/s}$ , se opera de modo análogo al apartado anterior, obteniendo un diámetro de columna  $D = 0,744 \text{ m}$ .**

# SECADO - DESHIDRATAACION

- Operación unitaria que elimina la mayor parte de agua de los alimentos, por evaporación aplicando calor.
- Al extraer el agua, se inhibe la actividad enzimática y bacteriana, por lo que otorga muchos beneficios al alimento.
- Usos comerciales: café, leche, te, pastas, harinas, mezclas para hornear, legumbres, frutas secas, cereales para desayuno, especias, etc.
- Usos industriales: huevo en polvo, aromas, colorantes, lactosa, sacarosa, enzimas, levaduras, etc.

# Ventajas de la deshidratación

- Aumentan la vida útil.
- No se pierden proteínas, hidratos de carbono y grasas o lípidos.
- Reducen el peso y el volumen de los alimentos, por lo que reducen el espacio de almacenamiento y optimizan el transporte y la distribución.
- No se requieren instalaciones especiales para el almacenamiento posterior.
- Añaden valor agregado al alimento utilizado.
- Evitan el desperdicio de alimentos.
- Se obtienen alimentos compatibles con cualquier otro alimento deshidratado para la elaboración de mezclas y sirven de base para la elaboración de otros alimentos.
- Los alimentos deshidratados son de fácil preparación y ahorran tiempo y energía.



# Generalidades del secado

El contenido de líquido de una sustancia seca varía de un producto a otro. En ocasiones, el producto no contiene líquido, por lo que recibe el nombre de totalmente seco; pero lo más frecuente es que el producto contenga algo de líquido. La sal de mesa seca, por ejemplo, contiene 0.5% de agua, el carbón seco 4% y la caseína seca 8%. El secado es un término relativo y sólo significa que hay una reducción del contenido de líquido desde un valor inicial hasta algún valor final aceptable.

Los sólidos que se secan presentan diferentes formas —escamas, gránulos, cristales, polvos, hojas o láminas continuas— y poseen propiedades muy diferentes.

# Clasificación de secadores

1) En los que el sólido se encuentra directamente expuesto a un gas caliente (por lo general aire).

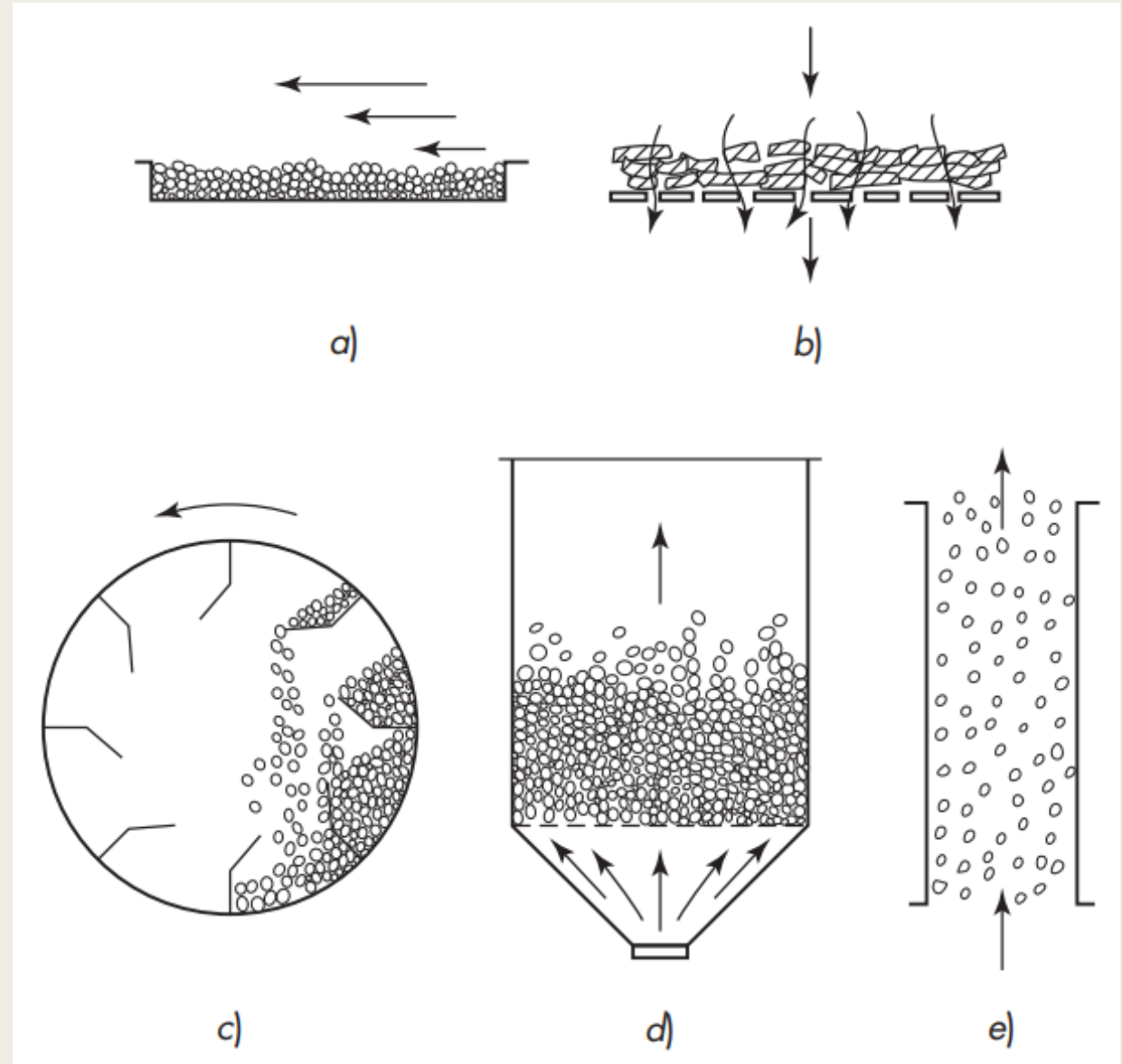
2) En los que el calor es transferido al sólido desde un medio externo tal como vapor de agua condensante, generalmente a través de una superficie metálica con la que el sólido está en contacto.

3) Que son calentados por energía dieléctrica, radiante o de microondas.

Los secadores que exponen los sólidos a un gas caliente se llaman secadores directos o adiabáticos; aquellos en los que el calor es transferido desde un medio externo reciben el nombre de secadores indirectos o no adiabáticos.

## Modelos de interacción gas-sólido en los secadores:

- a) Flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos;
- b) Flujo de gas a través de un lecho de sólidos preformados.
- c) Acción de lluvia en un secador rotatorio.
- d) Lecho fluidizado de sólidos.
- e) Flujo en paralelo gas-sólido en un secador súbito de transporte neumático.



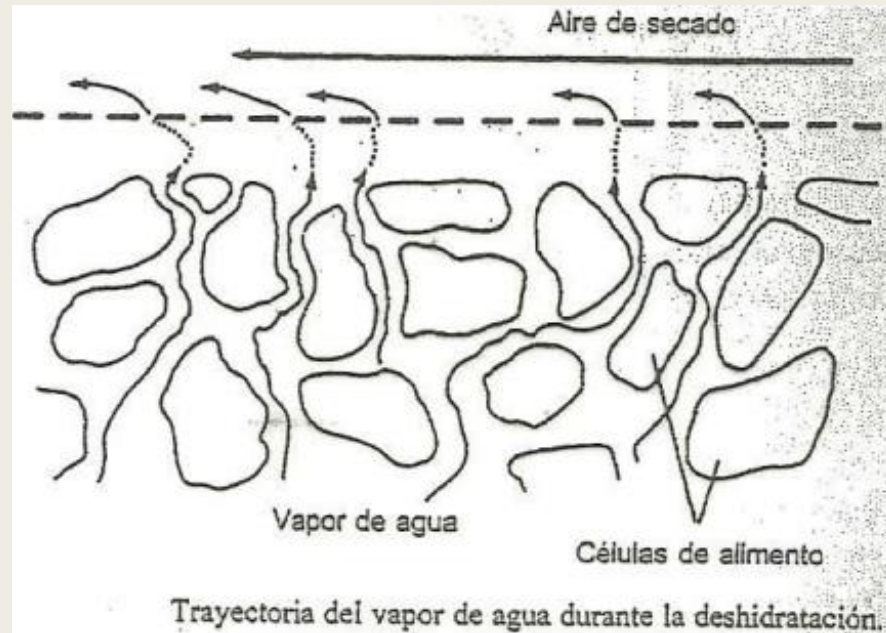
# Desventajas de la deshidratación

- Pérdida de vitaminas hidrosolubles (como la vitamina C).
- Pérdida de características organolépticas (como olor, color, sabor, textura).
- Pardeamientos o cambios de color indeseables.

# Efectos deseados

- Para un buen secado son necesarias 3 características:
  - *Temperatura de bulbo seco elevada.*
  - *Humedad relativa baja.*
  - *Velocidad del aire elevada.*

# Mecanismo de secado



- Factores que controlan la velocidad de secado:
  - Velocidad del aire.
  - Temperatura del aire
  - Humedad del aire.

# Cálculo de la carga térmica

El calor se debe aplicar a un secador para lograr lo siguiente:

1. Calentar la alimentación (sólidos y líquido) hasta la temperatura de evaporación.
2. Evaporar el líquido.
3. Calentar los sólidos hasta su temperatura final.
4. Calentar el vapor hasta su temperatura final.
5. Calentar el aire u otro gas agregado hasta su temperatura final.

$$\frac{q_T}{\dot{m}_s} = c_{ps}(T_{sb} - T_{sa}) + X_a c_{pL}(T_v - T_{sa}) + (X_a - X_b)\lambda$$

$$+ X_b c_{pL}(T_{sb} - T_v) + (X_a - X_b)c_{pv}(T_{va} - T_v)$$

$$q_T = \dot{m}_g c_{sb}(T_{hb} - T_{ha})$$

$T_{sa}$  = temperatura de la alimentación

$T_v$  = temperatura de vaporización

$T_{sb}$  = temperatura final de los sólidos

$T_{va}$  = temperatura final del vapor

$\lambda$  = calor latente de vaporización

$c_{ps}$ ,  $c_{pL}$ ,  $c_{pv}$  = calores específicos del sólido, líquido y vapor, respectivamente.

$\dot{m}_g$  = velocidad másica del gas seco

$c_{sb}$  = calor húmedo del gas para la humedad de entrada



Coeficientes de transferencia de calor

$$q_T = UA \overline{\Delta T}$$

$U$  = coeficiente global

$A$  = área de transferencia de calor

$\Delta T$  = diferencia media de temperatura (no necesariamente la media logarítmica).

En ocasiones se conocen  $A$  y  $\Delta T$ , y la capacidad del secador se estima a partir de un valor de  $U$  calculado o medido. Para secadores de placas perforadas y de bandas en movimiento,  $A$  es el área de la superficie horizontal que transporta los sólidos húmedos. Para los secadores de tambor,  $A$  es el área de superficie activa del tambor y para los secadores de circulación a través del sólido se considera como el área de la superficie total de las partículas.

En algunos secadores (los de transportadores de tornillos sinfín o rotatorios), es difícil determinar el área efectiva para la transferencia de materia y calor. Tales secadores se diseñan sobre la base de un coeficiente volumétrico de transferencia de calor  $U_a$ , donde  $A$  es el área de transferencia de calor por unidad de volumen del secador

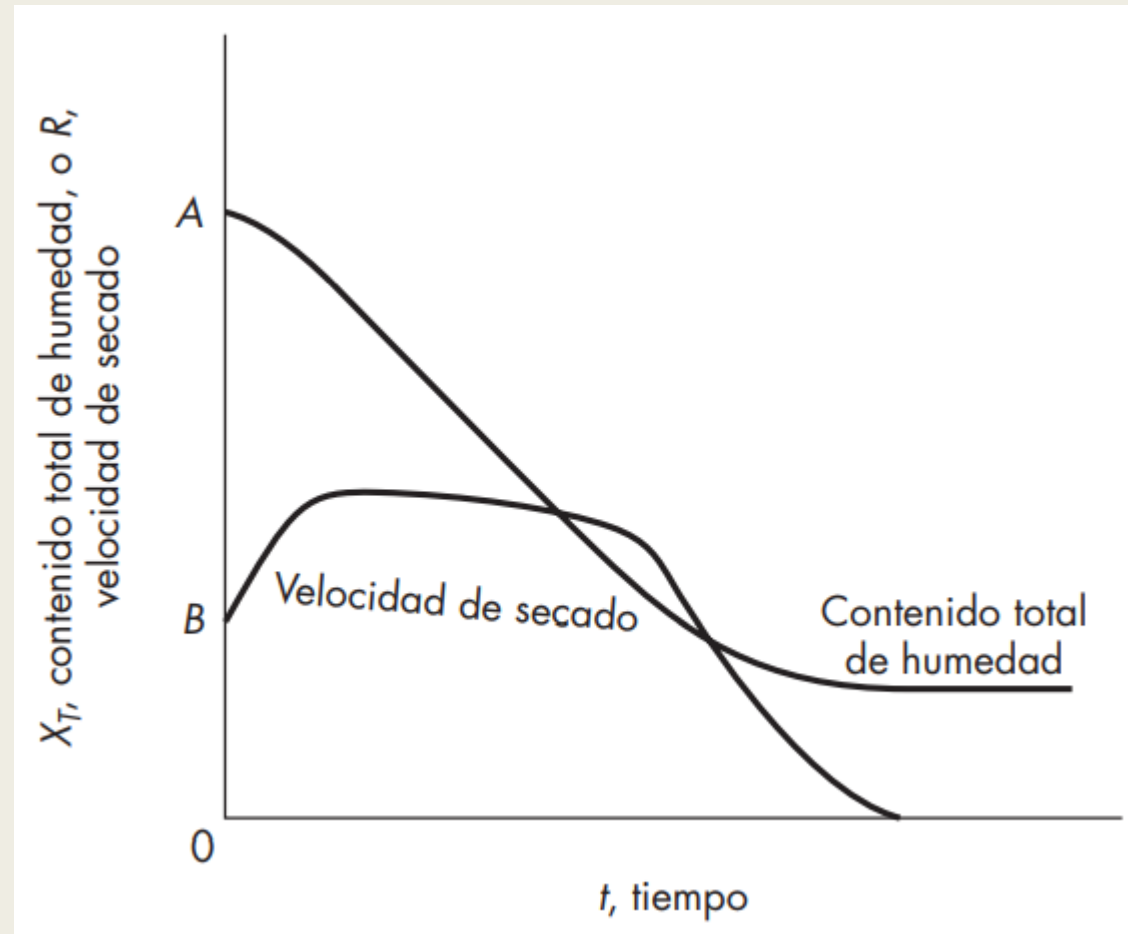
$$q_T = U_a V \overline{\Delta T}$$

$U_a$  = coeficiente volumétrico de transferencia de calor, Btu/ft<sup>3</sup>·h·°F o W/m<sup>3</sup>·°C

$V$  = volumen del secador, ft<sup>3</sup> o m<sup>3</sup>

# Velocidades de secado

- Gráficas típicas del contenido total de humedad y de la velocidad de secado contra el tiempo de secado.



# Ecuaciones

$\dot{m}_v$  = velocidad de evaporación

$A$  = área de secado

$h_y$  = coeficiente de transferencia de calor

$k_y$  = coeficiente de transferencia de masa

$M_v$  = peso molecular del vapor

$T$  = temperatura del gas

$T_i$  = temperatura de la superficie de contacto

$y$  = fracción molar del vapor en el gas

$y_i$  = fracción molar del vapor en la superficie de contacto

$\lambda_i$  = calor latente de vaporización a la temperatura  $T_i$

$$\dot{m}_v = \frac{M_v k_y (y_i - y) A}{(1 - y)_L}$$

$$\dot{m}_v = \frac{h_y (T - T_i) A}{\lambda_i}$$

# Tiempo de secado

$X_1$ : Humedad inicial

$X_2$ : Humedad final

$R : R_c$ : Velocidad de secado

$$t_c = \frac{m_s(X_1 - X_2)}{AR_c}$$

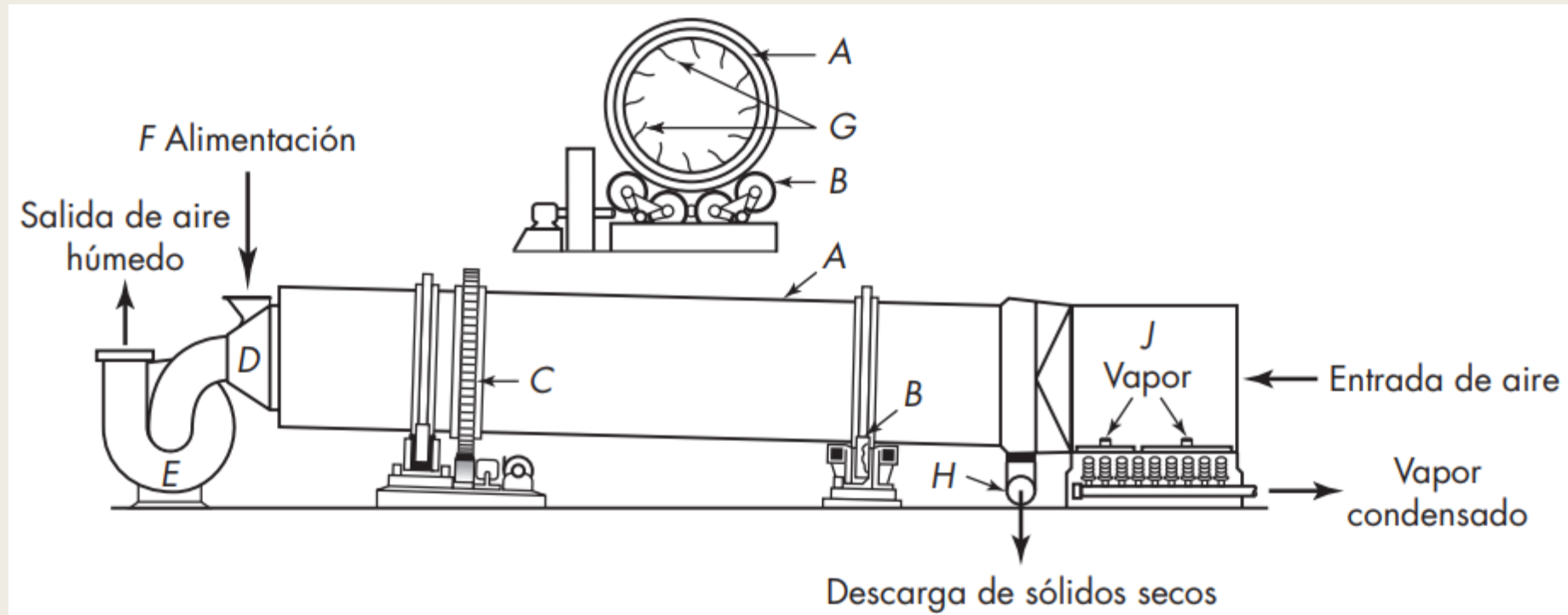
Para el secado en condiciones constantes, el tiempo de secado se determina a partir de la curva de la velocidad de secado cuando se dispone de la misma. Con frecuencia esta curva se obtiene en un experimento de secado con el material en cuestión.

# EQUIPOS DE SECADO

Se considerarán un reducido número de secadores de los muchos tipos comerciales existentes.

El primero y gran grupo comprende secadores para sólidos granulares o rígidos y pastas semisólidas; el segundo grupo se refiere a secadores que aceptan alimentaciones líquidas o suspensiones

# Secadores rotatorios



Secador rotatorio calentado con aire en contracorriente: A, carcasa del secador; B, rodillos para el soporte de la carcasa; C, engranaje; D, campana de descarga de aire; E, ventilador de descarga; F, conducto de alimentación; G, pestañas elevadoras; H, descarga de producto; J, calentador de aire.

# Características

La velocidad másica permitida para el gas en un secador rotatorio de contacto directo depende de las características de formación de polvos del material que se seca y varía entre 2.000 y 25.000 kg/m<sup>2</sup>\*h (400 y 5 000 lb/ft<sup>2</sup>\*h) para partículas gruesas. Las temperaturas típicas del gas a la entrada oscilan entre 120 a 175 °C (250 y 350 °F) para aire calentado con vapor y entre 550 a 800 °C (1 000 y 1 500 °F) para gases de combustión procedentes de un horno. Los diámetros de los secadores están comprendidos entre 1 a 3 m (3 y 10 ft); la velocidad periférica de la carcasa en general varía entre 20 y 25 m/min (60 y 75 ft/min).

# Cálculos

$$q_T = \frac{0.5G^{0.67}}{D} V \overline{\Delta T}$$
$$= 0.125\pi DLG^{0.67} \overline{\Delta T}$$

$V$  = volumen del secador, ft<sup>3</sup>

$L$  = longitud del secador, ft

$\overline{\Delta T}$  = diferencia media de temperatura, tomada como una medida logarítmica de las depresiones del bulbo húmedo a la entrada y salida del secador.

$G$  = velocidad másica, lb/ft<sup>2</sup> · h

$D$  = diámetro del secador, ft

$$Ua = \frac{0.5G^{0.67}}{D}$$

El coeficiente volumétrico de transferencia de calor  
 $Ua$  en Btu/ft<sup>3</sup> · h · °F.



$$\text{Nu} = \frac{h_y D_e}{k} = 0.037 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.33}$$

Coeficiente para un gas con flujo turbulento paralelo a la superficie de un sólido, como en un secador de bandeja.

$$H_y = 24.2G^{0.37}$$

$$R_c = \frac{\dot{m}_v}{A} = \frac{h_y(T - T_i)}{\lambda_i}$$

Flujo es perpendicular a la superficie, a velocidades del aire de entre 0.9 y 4.5 m/s

# BIBLIOGRAFIA

- Operaciones de transferencia de masa – Robert E. Treybal - Segunda edición.
- Operaciones unitarias en ingeniería química – Warren N. McCabe – Séptima edición.