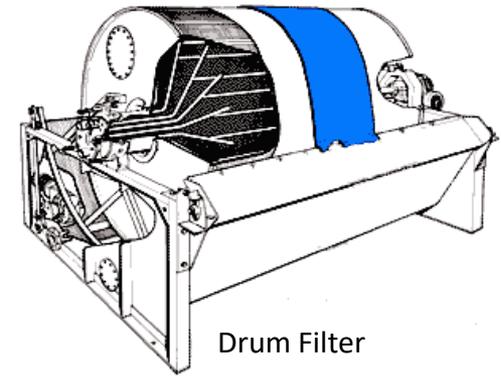
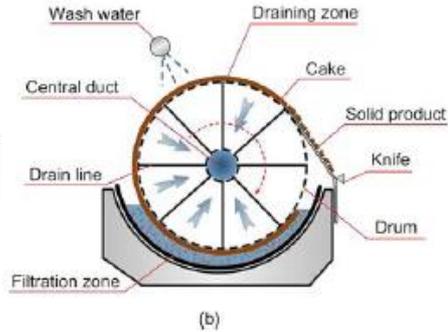
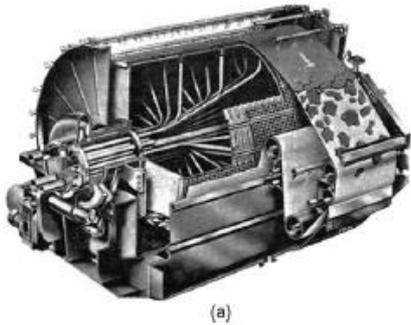
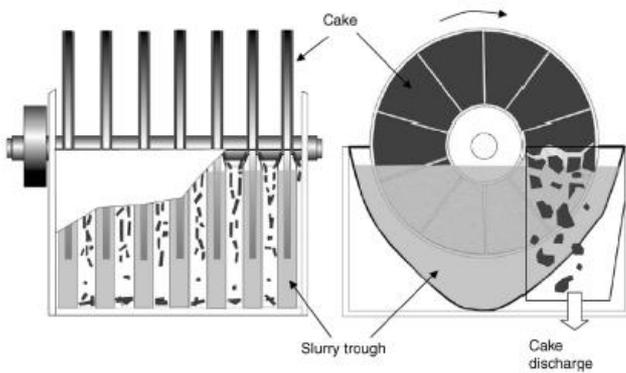
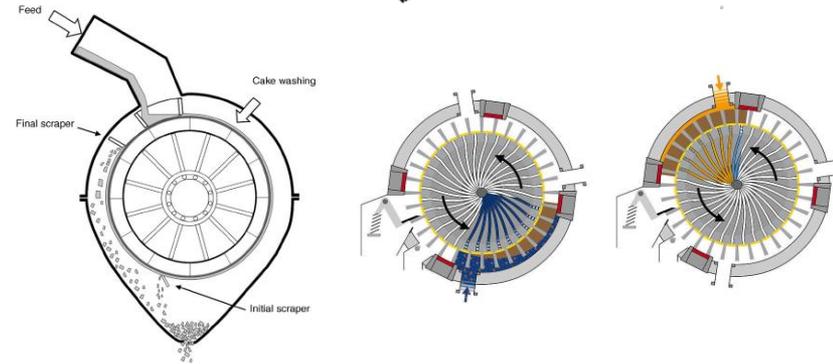


# Filtración en torta *cake filtration*, filtros continuos, operación

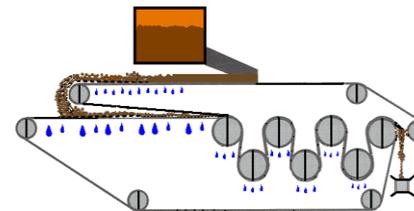
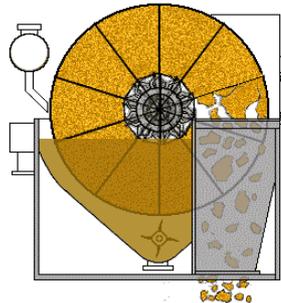
Etapas: 1) formación de la torta (*cake*) en el tanque de suspensión (*slurry*) 2) Lavado / secado 3) descarga



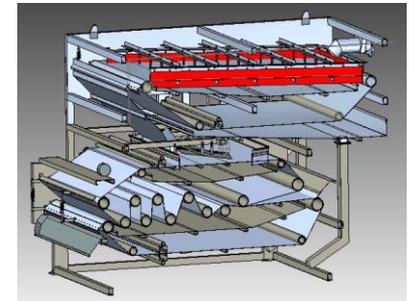
Drum Filter



Disk Filter



Belt Filter



[https://youtu.be/uoXAmHA\\_Vmw?si=qfhpQnsITXfcEWS6](https://youtu.be/uoXAmHA_Vmw?si=qfhpQnsITXfcEWS6)

Disc filter operation

<https://youtu.be/eBbPlxkyfPI?si=Uy3i8nyx0tOS4fa>

Alfa Laval Belt filter

<https://youtu.be/n4aS6kcydlo>

Belt filter working

## Filtración en torta *cake filtration*, filtros continuos, parámetros de dimensionamiento

$\theta_D$ . ángulo de sumergencia [°]

$\Omega$  velocidad de rotación *rev. s<sup>-1</sup>* o *rpm*

$A_{ef}$ : área efectiva de filtrado  $m^2$

$A_D$  área total o disponible de filtrado  $m^2$

$V_R$ : volumen filtrado en cada rotación  $m^3$

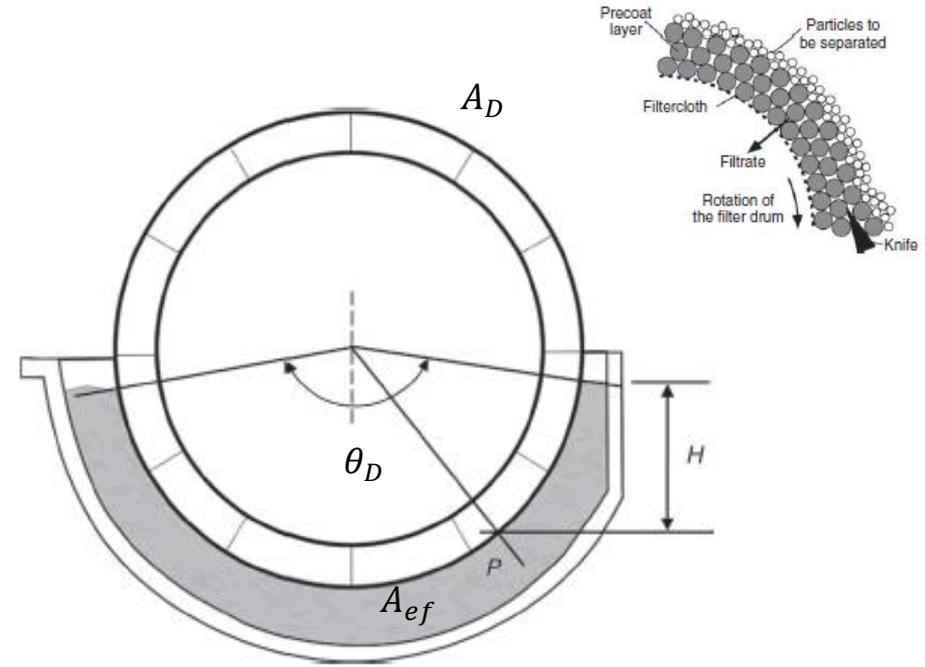
$t_R$ : tiempo empleado en una rotación  $t_R = \frac{2\pi}{\Omega} s$

$t_F$ : tiempo de inmersión o filtrado  $t_F = \theta_D \frac{1}{360\omega} = \frac{\theta_D}{360} t_R s$

$\varphi_{inm}$ : factor de inmersión  $\varphi_{inm} = \frac{t_F}{t_R} = \frac{A_{ef}}{A_D}$

$W_S$ : producción de sólidos secos  $kg_s. hr^{-1}$

$W_F$ : producción de fluido filtrado  $kg_f. hr^{-1}$



### Relaciones en torta (c)

$C_{pV}$ : relación de sólidos en torta a volumen de torta o densidad de torta  $C_{pV} = \frac{m_{s,c}}{V_{s,c} + V_{f,c}} = \rho_s(1 - \varepsilon_c)$

$h$ : humedad de torta  $h = \frac{m_{f,c}}{m_{f,c} + m_{s,c}}$

$\mathcal{H}$ : relación másica *cake* húmedo a *cake* seco  $\mathcal{H} = \frac{m_{f,c} + m_{s,c}}{m_{s,c}} = \frac{1}{1-h}$

$$\mathcal{H} = 1 + \rho \left( \frac{1}{C_{pV}} - \frac{1}{\rho_s} \right)$$

$C$ : consistencia,  $C = \frac{m_{s,c}}{V_F}$   $C = \frac{C_{pV} A L_F}{V_F}$

## Filtración en torta *cake filtration*, filtros continuos, dimensionamiento y verificación, $\Delta P = ctte$

$$\alpha_m = k \left[ \frac{(1 - \varepsilon)}{\rho_p \varepsilon^3 D_{SV}^2} \right] \quad \alpha_m \text{ m.kg}_p^{-1}: \text{resistencia específica cake}$$

$$\frac{dV_F}{d\theta} = \frac{1}{(R'_{cake} + R'_m) \mu} \frac{A}{\Delta P}$$

$$R'_{cake} = \alpha_0 (\Delta P)^s \frac{V_F C}{A} \quad R'_m = \alpha_0 (\Delta P)^s L'_f C$$

Ecuación diferencial de filtración

Si se considera sólo una rotación

$$\frac{dV_F}{d\theta} = \frac{1}{(R'_c + R'_m) \mu} \frac{A_D}{\Delta P}$$

$$R'_c = \alpha_m C \frac{V_R}{A_{ef}} \quad R'_m = \alpha_m L'_f C$$

$$R'_c = \alpha_0 (\Delta P)^s C \frac{V_R}{A_{ef}} \quad R'_m = \alpha_0 (\Delta P)^s L'_f C$$

$$R'_c + R'_m = \alpha_m C \left( \frac{V_R}{A_{ef}} + L'_f \right) \quad \bar{L}_f = 0,5(L_{f,in} + L_{f,out}) = 0,5L_{f,out} = 0,5 \frac{V_R}{A_{ef}}$$

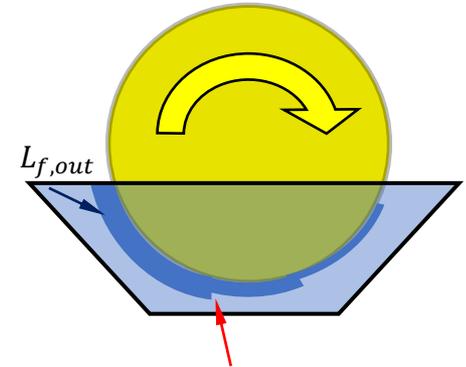
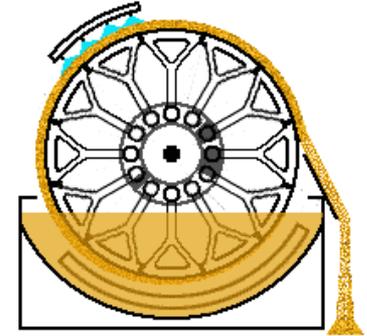
$$R'_c + R'_m = \alpha_m C \left( 0,5 \frac{V_R}{\varphi_{inm} A_D} + L'_f \right) = \frac{\alpha_m C}{2 \varphi_{inm} A_D} (V_R + 2 \varphi_{inm} A_D L'_f)$$

$$\frac{dV_F}{d\theta} = \frac{1}{(R'_c + R'_m) \mu} \frac{A_D}{\Delta P} = \frac{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P}{\alpha_m C \mu (V_R + 2 \varphi_{inm} A_D L'_f)}$$

$$\frac{d\theta}{dV_F} = \frac{\alpha_m C \mu (V_R + 2 \varphi_{inm} A_D L'_f)}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} \Rightarrow \int_0^{t_R} d\theta = \frac{\alpha_m C \mu (V_R + 2 \varphi_{inm} A_D L'_f)}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} \int_0^{V_R} dV_F$$

$$t_R = \frac{\alpha_m C \mu (V_R + 2 \varphi_{inm} A_D L'_f)}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} V_R$$

Relación entre el tiempo empleado y el volumen filtrado en una rotación



Espesor de cake variable,  $\bar{L}_f \cong 0,5L_{f,out}$   
 $A_{ef} = \varphi_{inm} A_D$

Filtración en torta *cake filtration*, filtros continuos, dimensionamiento y verificación,  $\Delta P = cte$

$$t_R = \frac{\alpha_m C \mu (V_R + 2 \varphi_{inm} A_D L'_f)}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} V_R \Rightarrow t_{NR} = \frac{\alpha_m \mu C}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} V_R^2 + \frac{\alpha_m L'_f C \mu}{\Delta P A_D} V_R$$

Ecuación de dimensionamiento:  $V_R = \phi(t_R)$

$F_{ens}$ : Factor de ensuciamiento: considera el evento de medio filtrante ocluido (luego de un periodo de operación, 1 año)  $V_{R,d} = F_{ens} V_R$

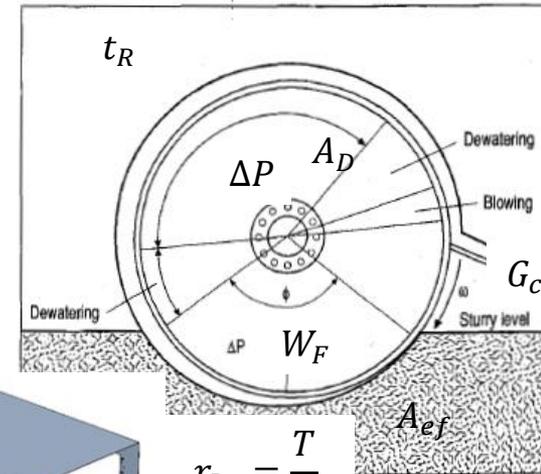
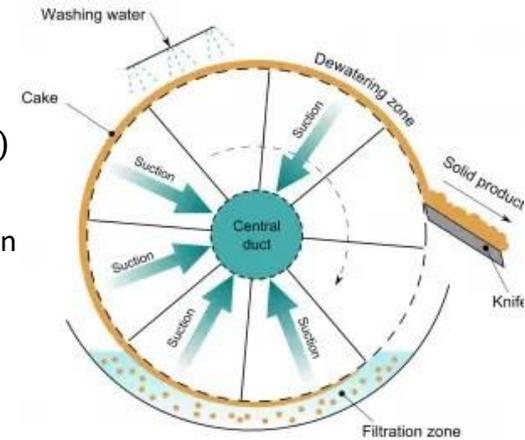
$$W_F = \rho \left( \frac{F_{ens} V_R}{t_R} \right) \Rightarrow \left( \frac{W_F t_R}{\rho} \right) = F_{ens} V_R \Rightarrow \left( \frac{W_F t_R}{F_{ens} \rho} \right) = V_R$$

$$W_S = C \left( \frac{F_{ens} V_R}{t_R} \right) \Rightarrow t_R = C \left( \frac{F_{ens} V_R}{W_S} \right) W_S = \frac{C_p V A_D L_F}{(F_{ens} V_R)} \left( \frac{F_{ens} V_R}{t_R} \right) \Rightarrow L_F = \frac{W_S t_R}{C_p V A_D}$$

$$L'_f = \frac{V'_f}{A_{ef}} = \frac{1}{\varphi_{inm}} \left( \frac{V'_f}{A_D} \right)_{exp} = \frac{1}{\varphi_{inm}} (L'_f)_{exp}$$

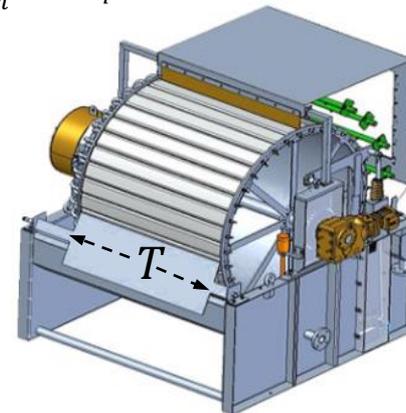
$$t_R = \frac{\alpha_m \mu C}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} \left( \frac{W_F t_R}{F_{ens} \rho} \right)^2 + \frac{\alpha_m L'_f C \mu}{\Delta P A_D} \left( \frac{W_F t_R}{F_{ens} \rho} \right)$$

Ecuación de dimensionamiento:  $W_F = \phi(t_R)$



$$r_{Dt} = \frac{T}{D}$$

$$A_D = \pi D T$$



Filtración en torta *cake filtration*, filtros continuos, factores de dimensionamiento, capacidad de filtración  $G_c: \frac{kg}{s.m^2}$

La capacidad de filtración se define como  $G_c = \frac{m_s}{A_D \cdot t_R} = \frac{W_s}{A_D} = \frac{C \cdot F_{ens} V_R}{A_D \cdot t_R}$

Un procedimiento de verificación

$$L'_f = \frac{V'_f}{A_{ef}} = \frac{1}{\varphi_{inm}} \left( \frac{V'_f}{A_D} \right)_{exp} = \frac{1}{\varphi_{inm}} (L'_f)_{exp}$$

$$t_R = \frac{\alpha_m \mu C}{2 \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P} (F_{ens} V_R)^2 + \frac{\alpha_m C L'_f \mu}{\Delta P} \frac{1}{A_D} (F_{ens} V_R) \rightarrow t_R \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P = \frac{\alpha_m \mu C}{2} (F_{ens} V_R)^2 + \alpha_m C L'_f \mu \varphi_{inm} A_D (F_{ens} V_R)$$

$$[t_R \varphi_{inm} A_D^2 \Delta P] \left[ \frac{C}{\mu \cdot A_D^2} \right] = \left[ \frac{C}{\mu \cdot A_D^2} \right] \frac{\alpha_m \mu C}{2} (F_{ens} V_R)^2 + \left[ \frac{C}{\mu \cdot A_D^2} \right] R'_m \mu \varphi_{inm} A_D (F_{ens} V_R) \Rightarrow$$

$$\frac{\varphi_{inm} t_R C \Delta P}{\mu} = \frac{\alpha_m}{2} \left[ \frac{C^2 (F_{ens} V_R)^2}{A_D^2} \right] + \left[ \frac{C (F_{ens} V_R)}{A_D} \right] \varphi_{inm} R'_m \Rightarrow w = \frac{m_s}{A_D} = \frac{C (F_{ens} V_R)}{A_D}$$

$$\frac{\varphi_{inm} t_R C \Delta P}{\mu} = \frac{\alpha_m}{2} \left[ \frac{C (F_{ens} V_R)}{A_D} \right]^2 + \left[ \frac{C (F_{ens} V_R)}{A_D} \right] \varphi_{inm} R'_m = \frac{\alpha_m}{2} w^2 + \varphi_{inm} R'_m w$$

$$w^2 + \frac{2}{\alpha} \varphi_{inm} R'_m w - \frac{2}{\alpha_m} \frac{\varphi_{inm} t_R C \Delta P}{\mu} = 0 \Rightarrow G_c = \frac{w}{t_R} \quad W_s = G_c \cdot A_D$$

$w: \frac{kg}{m^2}$  sólido seco descargado por unidad de área y ciclo de rotación

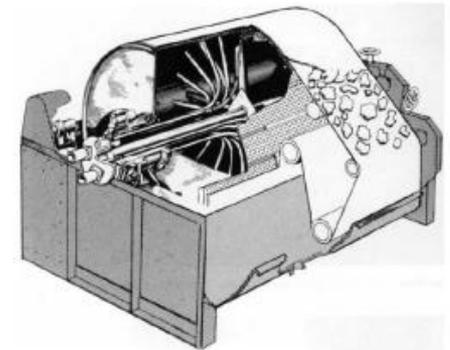


mdj\_TSP\_filtración\_rotativo CaCO<sub>3</sub>\_comp

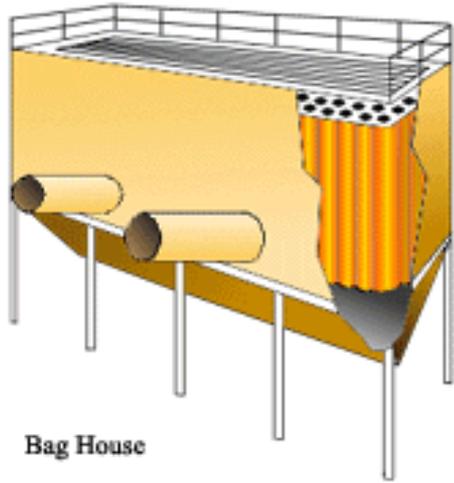
Se quiere obtener 80 tonne.day<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> de un proceso de recuperación de una planta, mediante el empleo de un filtro rotativo de vacío, que opera con una caída de presión constante de 2 bar y una velocidad de 1 rpm. Para ello el filtro se alimenta con una suspensión con las características descritas en el problema “mdj\_TSP\_filtración\_prensa CaCO<sub>3</sub>\_comp”.

El equipo tiene una fracción de área efectiva de 18%. La temperatura de la operación es de 20°C, y efluente puede considerarse esencialmente agua pura. Considere un factor de ensuciamiento de 0.80.

- a) Determine el área de filtración y dimensione el equipo. b) Calcule el caudal de filtrado y el volumen de filtrado que se obtiene por giro de tambor. c) Determine el espesor de la torta obtenida. d) Evaluar la capacidad del filtro. e) En la puesta en marcha, ¿cuál debería ser la velocidad del tambor?



# Filtración gas – sólido filtros bolsa (*bag filter*)



Bag House



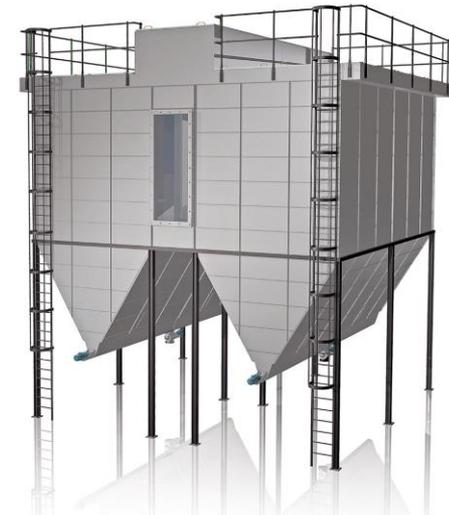
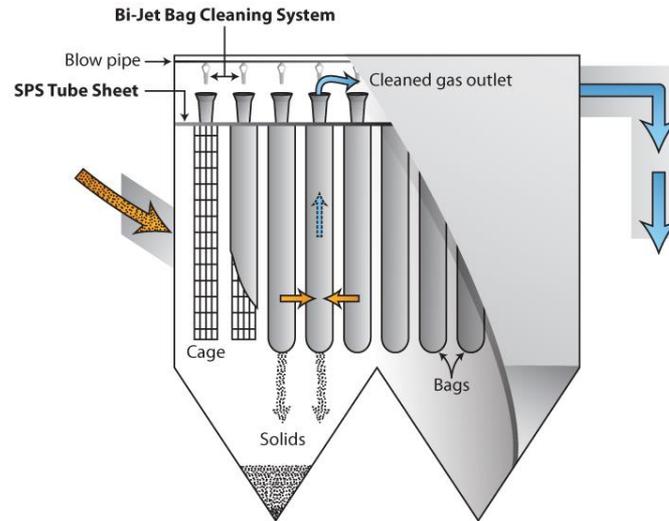
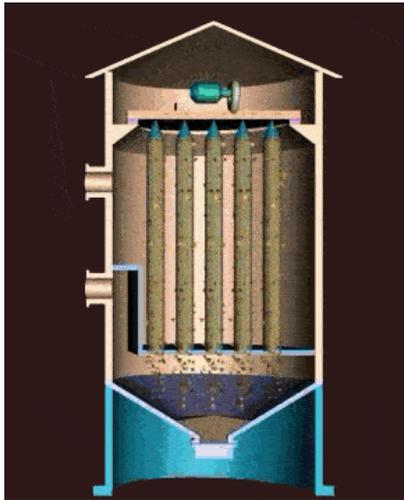
Solid-Fluid Systems

345

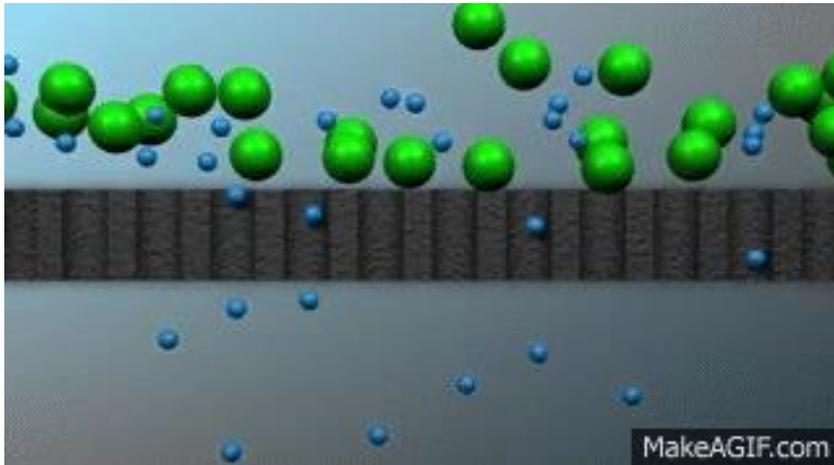
Ortega\_Rivas 2012

10.3.4 Gas Filters

10.3.4.1 Description of the Process



# Operaciones Unitarias 1



Filtración

Cross Flow Filtration



Tecnologías de membranas

# Procesos de membranas descripción, objetivos, configuraciones

Una membrana es una barrera selectiva entre dos fases. El término selectivo es inherente a la naturaleza y propósito de la membrana.

Admite diferentes clasificaciones:

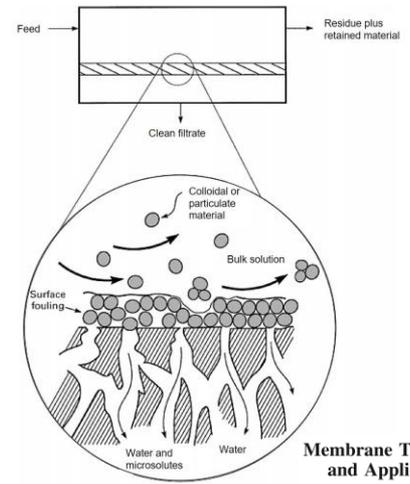
según estructura, homogénea o heterogénea

Según tipo de transporte: pasivo, impulsada por gradientes de presión, temperatura o concentración activa o activo, membranas líquidas soportadas.

Según su naturaleza: sintéticas (orgánicas, inorgánicas) o biológicas

Según su condición eléctrica: neutra o cargada

En membranas sintéticas, según su construcción: simétricas o asimétricas

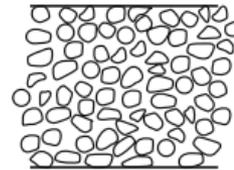


Membrane Technology and Applications

Third Edition  
RICHARD W. BAKER  
Membrane Technology and Research, Inc.  
Newark, California

## Symmetrical Membranes

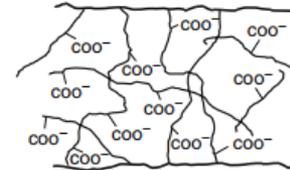
Isotropic microporous membrane



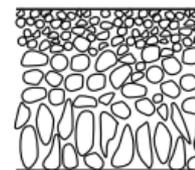
Nonporous dense membrane



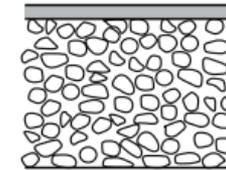
Electrically charged membrane



## Anisotropic Membranes

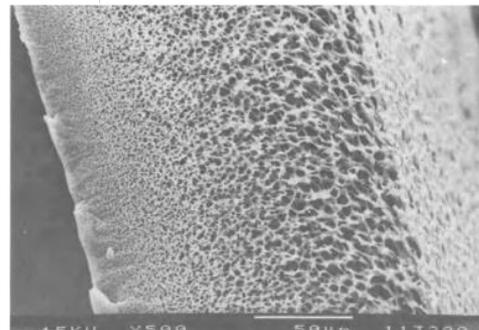
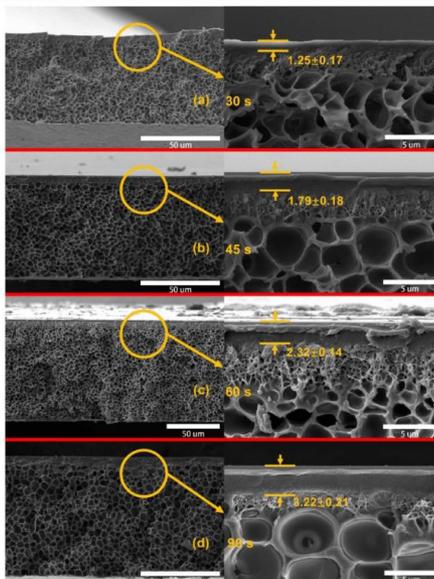
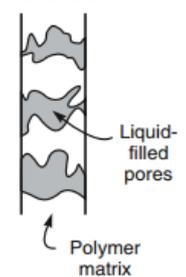


Loeb-Sourirajan anisotropic membrane



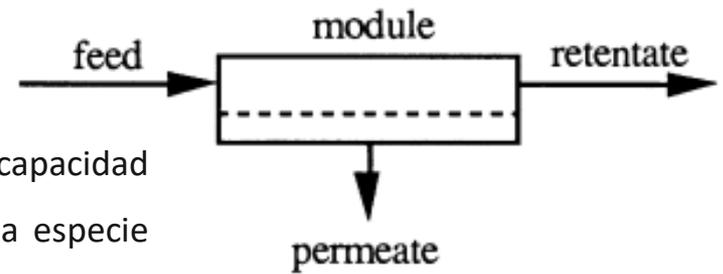
Thin-film composite anisotropic membrane

Supported liquid membrane



## Procesos de membranas descripción, objetivos, configuraciones

En procesos de membrana la propiedad clave que se aprovecha es la capacidad de una membrana para controlar la velocidad de permeación de una especie química a través de la membrana.



En aplicaciones de separación, el objetivo es permitir que un componente de una mezcla penetre libremente en la membrana, al tiempo que dificulta la permeación de otros componentes. Estos objetivos de separación se clasifican en:

Concentración: el componente deseado se encuentra presente a baja concentración y el solvente debe ser eliminado de la corriente de proceso

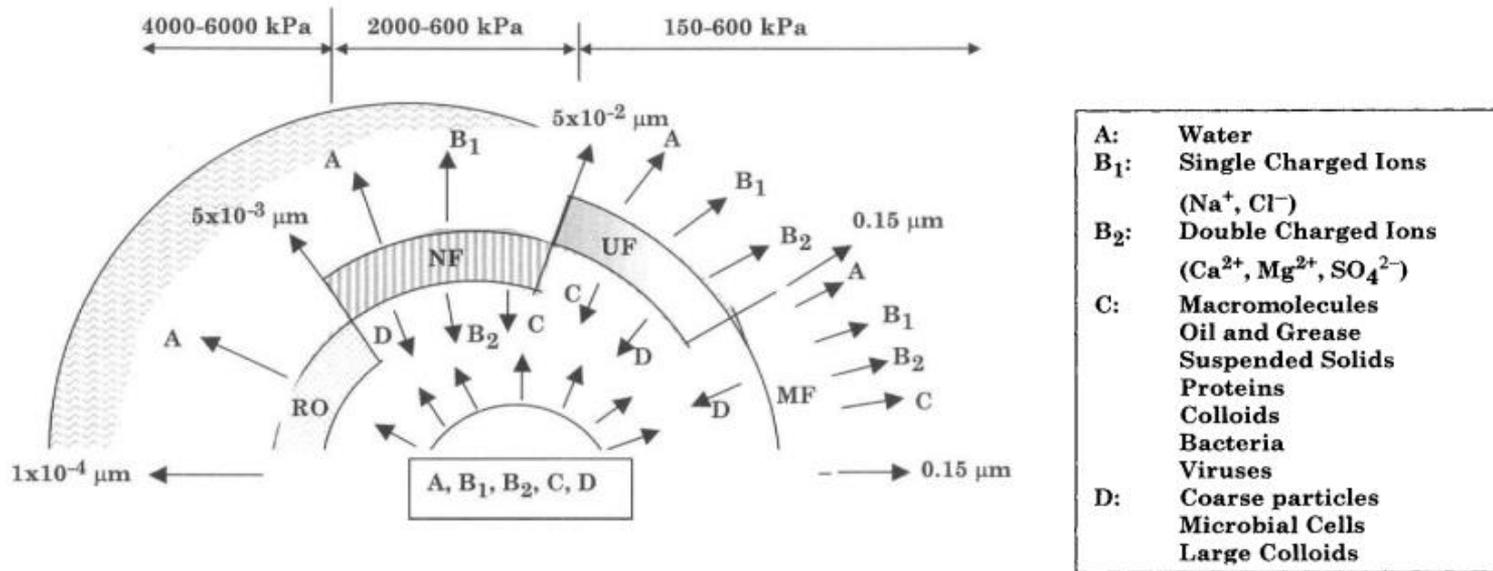
Purificación: eliminación de impurezas indeseables

Fraccionamiento: una mezcla debe ser separados en dos o más componentes deseados.

**Beneficios** de la tecnología: a) la separación se puede llevar a cabo continuamente; b) el consumo de energía es generalmente bajo; c) los procesos de membrana se pueden combinar fácilmente con otros procesos de separación; d) la separación puede llevarse a cabo en condiciones suaves; e) escalar es fácil; f) las propiedades de la membrana son variables y se pueden ajustar; g) no se requieren aditivos.

**Inconvenientes:** a) polarización de la concentración / ensuciamiento de la membrana; b) baja vida útil de la membrana; c) Selectividad generalmente baja

## Procesos de membranas industriales

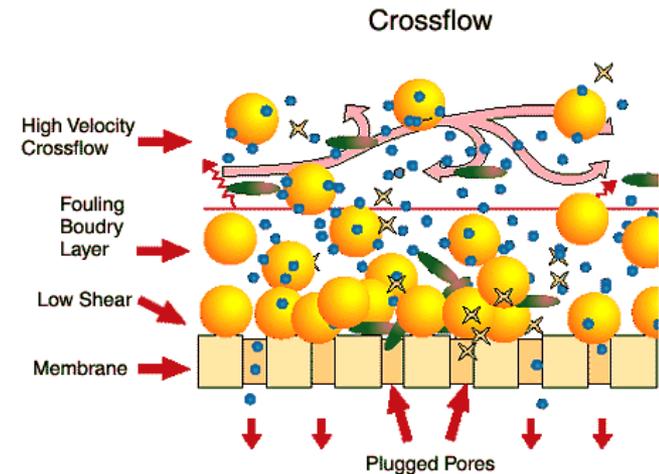


En la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), la separación se realiza mediante un mecanismo de tamizado, donde la membrana pasa las partículas más pequeñas y retiene las más grandes. Son procesos relacionados que difieren principalmente en el diámetro promedio de poro del filtro de membrana. Se utilizan para separar sólidos en suspensión

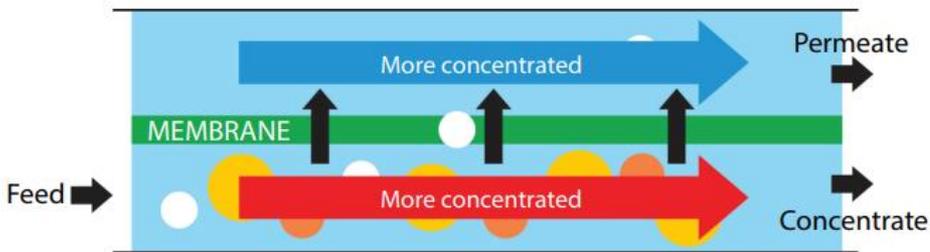
En los procesos ósmosis inversa (RO), la membrana permea solo el solvente y retiene el soluto. Se utiliza para separar sólidos disueltos. Las membranas de ósmosis inversa son tan densas que no existen poros discretos; el transporte se realiza a través de áreas de volumen libre distribuidas estadísticamente.

## Procesos de membranas Configuración *cross flow*

Un efecto de la filtración de flujo cruzado es que el afluente/concentrado al fluir a lo largo de la superficie de la membrana esencialmente "raspa" la superficie para mantenerla libre de depósitos de suspensión e incrustaciones. En la práctica, sin embargo, esta acción no suele ser lo suficientemente eficaz como para evitar por completo que los depósitos se acumulen en la membrana. Eventualmente, las membranas deben retirarse del servicio para limpiarlas o reemplazarlas



Una consecuencia de esta configuración es el aumento de las concentraciones en la alimentación y en el permeado a través del sistema. A medida que se elimina más fluido de la corriente de alimentación, los solutos que quedan se concentran más. Y, a medida que la alimentación se vuelve más concentrada, el permeado se volverá más concentrado.

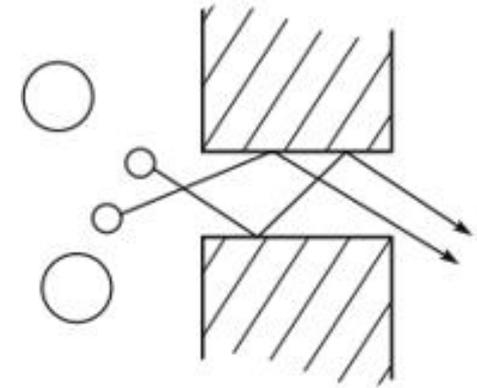


## Procesos de membranas modelos de permeación

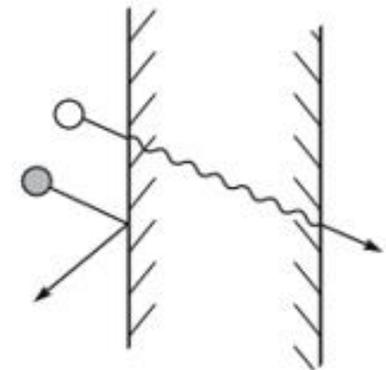
La separación en los procesos de membrana es el resultado de las diferencias en las velocidades de transporte de las especies químicas a través de la interfase. La velocidad de transporte y, por tanto, la magnitud del flujo viene determinada por la fuerza o fuerzas que actúan sobre los componentes individuales y de su movilidad y concentración en la interfase. La movilidad depende del tamaño molecular del soluto y de la estructura de la membrana y la concentración del soluto en la interfase depende fundamentalmente de la compatibilidad química del soluto y del material de la interfase. El proceso de transporte en sí mismo es un proceso de no equilibrio y se describe por una ecuación fenomenológica que relaciona el flujo con la fuerza impulsora conjugada en forma proporcional.

2 tipos de modelos:

- a) Los basados en la termodinámica de no equilibrio
- b) los que tienen en cuenta los posibles mecanismos de transferencia a través de la membrana: modelo de poros (flujo convectivo impulsado por gradientes de presión) y de solución- difusión (La difusión, base este modelo, es el proceso por el cual los permeantes son transportados de una parte de un sistema a otra por un gradiente de concentración). **Ambos tipos pueden ser conjugados en uno único**



Microporous membranes separate by molecular filtration



Dense solution-diffusion membranes separate because of differences in the solubility and mobility of permeants dissolved in the membrane material

## Procesos de membranas Principio de separación

La membrana tiene la capacidad de transportar un componente más fácilmente que otro debido a las diferencias en las propiedades físicas y/o químicas entre la membrana y los componentes permeantes. El transporte se realiza como resultado de una fuerza motriz que actúa sobre los componentes individuales de la alimentación. En muchos casos, el flux (tasa de transporte por unidad de área) es proporcional a una fuerza impulsora o gradiente

$$J = -A \frac{dX}{dx}$$

$A$ : coeficiente fenomenológico

$X$ : fuerza impulsora (temperatura, presión, concentración)

$J$ : propiedad transportada (mol, volumen, calor, momento)

---

mass flux	$J_m$	=	- D	dc/dx	(Fick)
volume flux	$J_v$	=	- $L_p$	dP/dx	(Darcy)
heat flux	$J_h$	=	- a	dT/dx	(Fourier)
momentum flux	$J_n$	=	- $\nu$	dv/dx	(Newton)
electrical flux	$J_i$	=	- 1/R	dE/dx	(Ohm)

---

Para **un componente puro** que permea a través de una membrana, es posible emplear relaciones lineales para describir el transporte. Sin embargo, cuando dos o más componentes permean simultáneamente, tales relaciones no pueden emplearse generalmente, ya que pueden ocurrir fenómenos de acoplamiento en los flujos y fuerzas. Estos fenómenos de acoplamiento pueden describirse en los términos del formalismo de la termodinámica de no equilibrio.

## Procesos de membranas modelos de permeación

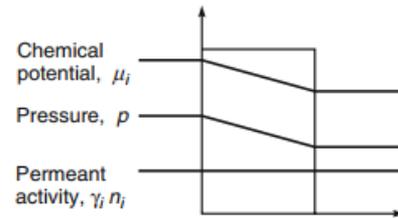
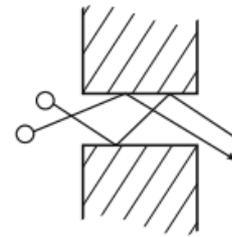
El punto de partida para la descripción matemática es la proposición, sólidamente basada en la termodinámica, de que las fuerzas impulsoras de presión, temperatura, concentración y potencial eléctrico están interrelacionadas y que la fuerza motriz general que produce el permeado de una especie química es un gradiente en su potencial químico.

$$d\mu_i = RT d \ln(\gamma_i c_i) + V_i dP$$

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx}$$

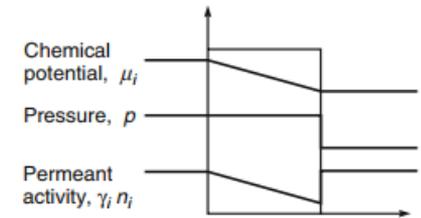
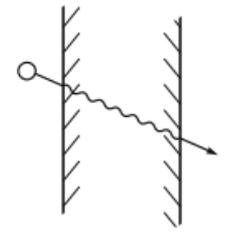
Supuestos del modelo de permeación. a) los fluidos a ambos lados de la membrana están en equilibrio con el material de la membrana en la interfaz; el gradiente de potencial químico de un lado a otro de la membrana es continuo; b) El modelo de difusión-solución asume que la presión dentro de una membrana es uniforme y que el gradiente  $\frac{d\mu_i}{dx}$  de un permeante está asociado solo como un gradiente de concentración. El modelo de flujo de poros asume que la concentración del permeante es uniforme y que  $\frac{d\mu_i}{dx}$  está representado solo como un gradiente de presión.

Microporous membranes separate by molecular filtration



(a)

Dense solution-diffusion membranes separate because of differences in the solubility and mobility of permeants in the membrane material



(b)

modelo de flujo de poros

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx}$$

$$J_i = -L_i V_i \frac{dP}{dx} = -K_i \frac{dP}{dx}$$

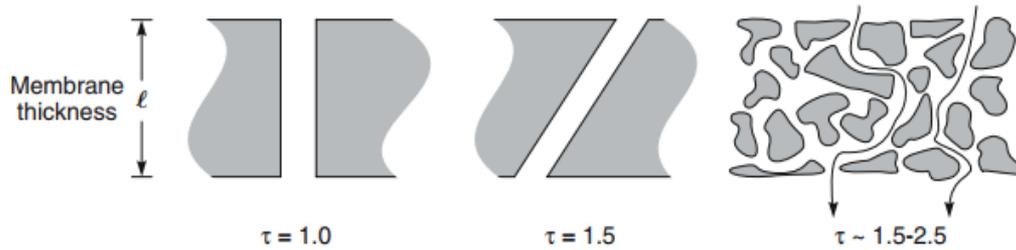
Ecuación de permeabilidad de Darcy



# Procesos de membranas modelos de permeación, modelo de flujo de poros, parámetros de caracterización

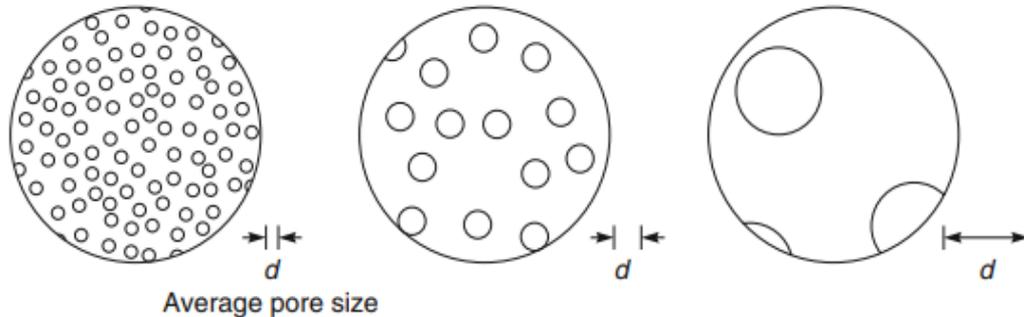
## Parámetros de caracterización

Cross-sections of porous membranes of different tortuosity



Idéntico espesor, diferentes trayectorias (tortuosidad  $\tau$ )

Surface views of porous membranes of equal porosity ( $\varepsilon$ ) but differing pore size



Idéntica porosidad  $\varepsilon$ , diferentes tamaños de poros

Los parámetros disponibles para caracterizar la complejidad de las membranas microporosas también son imperfectos.

a) La porosidad ( $\varepsilon$ ) es la fracción del volumen total de la membrana vacía. Las porosidades promedio típicas son de 0,3 a 0,7. En membranas anisotrópicas la porosidad varía de un punto a otro.

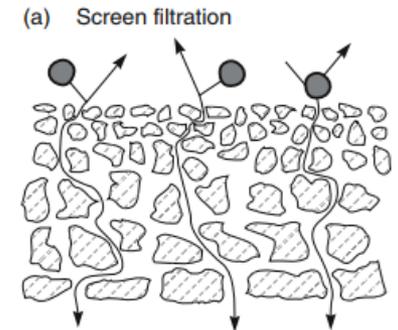
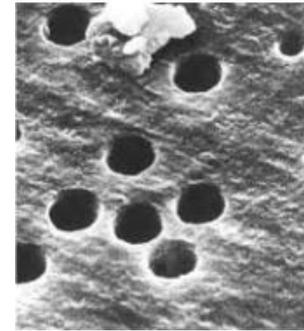
b) La tortuosidad ( $\tau$ ) refleja la longitud del poro promedio en comparación con el espesor de la membrana. Los poros cilíndricos simples en ángulo recto con la superficie presentan  $\tau = 1$ . Los poros toman un camino serpenteante a través de la membrana, por lo que las tortuosidades típicas están en el rango de 1,5 a 2,5.

## Procesos de membranas modelos de permeación, modelo de flujo de poros, mecanismos

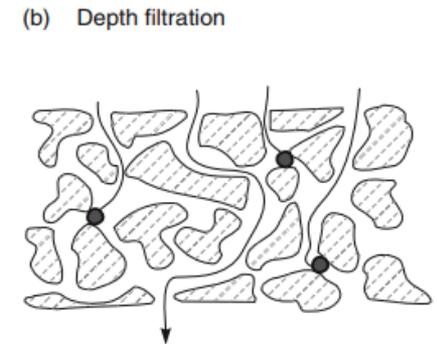
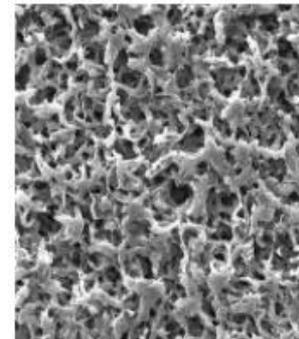
Las membranas microporosas (MF, UF) utilizadas para filtrar partículas de líquidos se dividen en:

a) Filtro por tamiz: las membranas contienen poros superficiales más pequeños que las partículas que se van a eliminar. Estas membranas son anisotrópicas, con una capa superficial microporosa relativamente fina sobre un soporte microporoso más abierto. Las partículas en el fluido permeante son capturadas y se acumulan en la superficie de la membrana. Las partículas lo suficientemente pequeñas como para pasar a través de los poros superficiales normalmente no se capturan en el interior de la membrana.

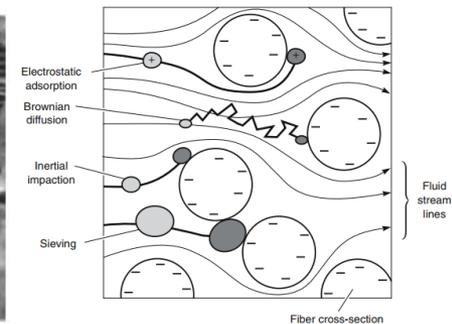
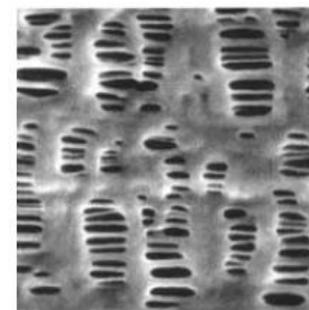
b) Filtro de profundidad: captura las partículas a eliminar en el interior de la membrana. El diámetro medio de los poros de un filtro de profundidad es 10 veces el diámetro de la partícula más pequeña capaz de penetrar en la membrana. Algunas partículas son capturadas en pequeñas constricciones dentro de la membrana, otras por adsorción a medida que penetran en la membrana por un camino tortuoso.



Tamiz molecular: separación por tamaño



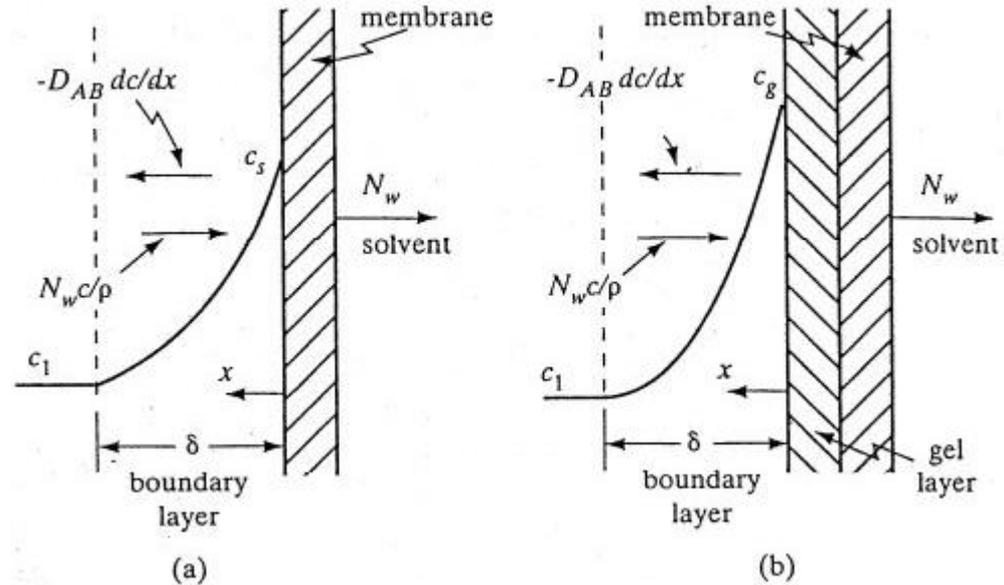
Filtración profunda: adsorción



Mecanismo mixto

## Procesos de membranas polarización por concentración

En los procesos de separación por membrana, una mezcla líquida entra en contacto con el lado de alimentación de la membrana, y un permeado enriquecido en uno de los componentes de la mezcla se retira del otro lado. Debido a que los componentes de la mezcla permean a diferentes velocidades, se pueden formar gradientes de concentración en los fluidos a ambos lados de la membrana. En este caso, las concentraciones en las superficies de las membranas no son las mismas que las concentraciones en las corrientes principales lo cual cambia la permeabilidad a través de la membrana. El fenómeno se denomina polarización de concentración



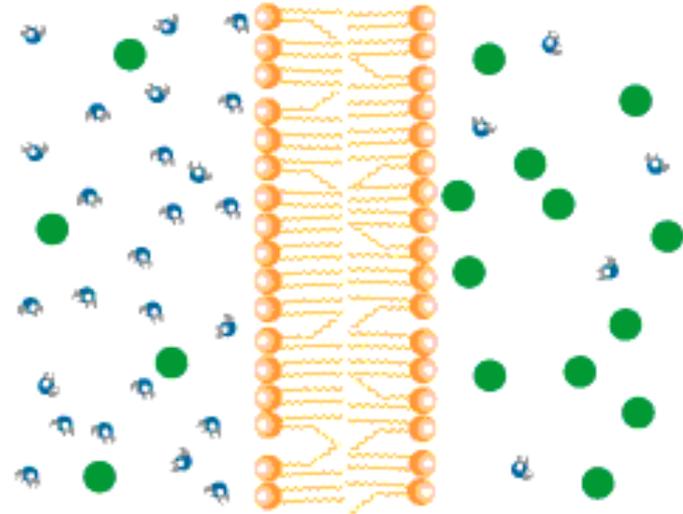
# Operaciones Unitarias 1



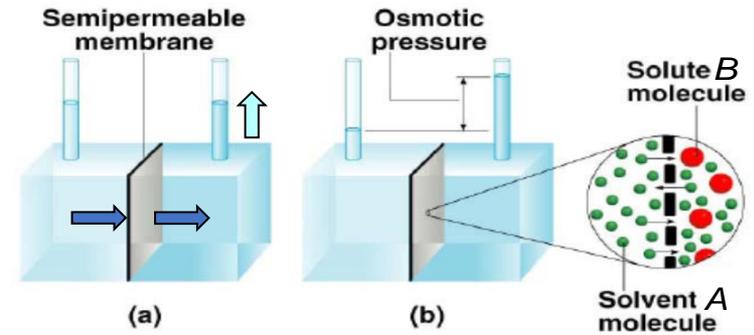
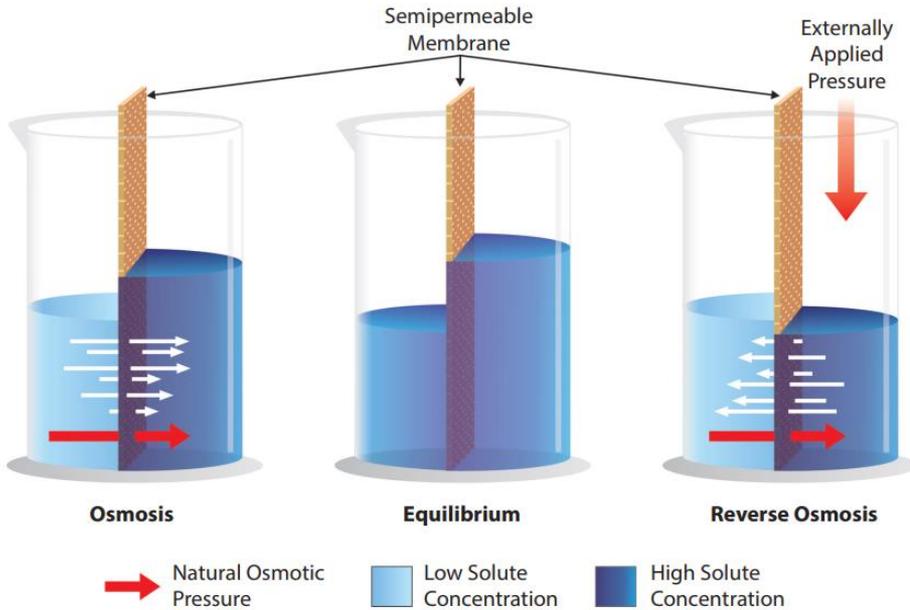
Tecnologías de membranas

Osmosis Inversa (RO)

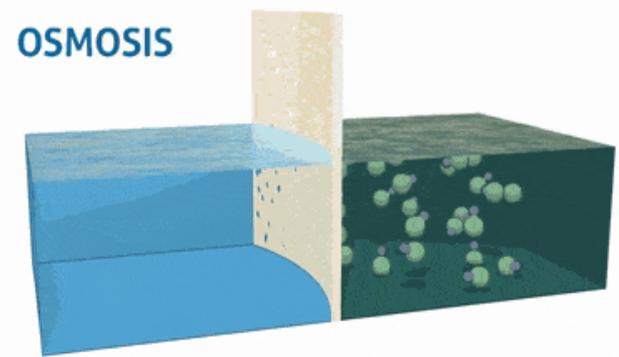
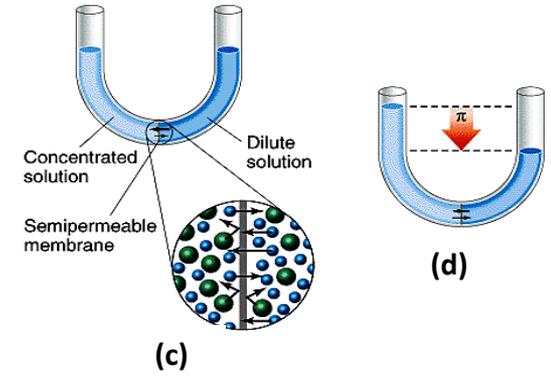
[https://youtu.be/iY\\_f\\_9NWiYA?si=28-8gmW95dy2nNce](https://youtu.be/iY_f_9NWiYA?si=28-8gmW95dy2nNce)  
RO industrial Recuperador de presión



# RO. Parámetros de interés: Presión osmótica $\Pi$ Concepto



$$\mu_{A,izq}^* > \mu_{A,der} = \mu_A^* + RT \ln a_A \quad \mu_{A,izq}^* = \mu_{A,der}$$



Ósmosis es el proceso espontáneo en el que el agua, como solvente, fluye a través de una membrana semipermeable desde una solución con baja concentración de solutos hasta una solución con alta concentración de solutos, impulsada por una diferencia de los potenciales químicos del agua de ambos lados de la membrana.

RO es el proceso inverso

[https://youtu.be/aVdWqbpbv\\_Y?si=rjs0jUoMHLzFzAxH](https://youtu.be/aVdWqbpbv_Y?si=rjs0jUoMHLzFzAxH)  
How does RO work

RO. Parámetros de interés: Presión osmótica  $\Pi$  Correlaciones



Ecuación de *van't Hoff* (válida en el límite a dilución infinita)  $\Pi = \frac{RT}{V_A^*} x_B$

$$\Pi = -\frac{RT}{V_A^*} \sum_B \ln(x_A \gamma_A)$$

R: 8.314 kPa.m<sup>3</sup>.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$\Pi$ : presión osmótica kPa

T: Temperatura K

$x_B$ : fracción molar soluto no electrolito

$c_B$ : concentración de la especie química o conjunto de especies químicas kmol.m<sup>-3</sup> o mol.L<sup>-1</sup>  $\Pi = RT \sum_B c_B$

$b_B$ : concentración de la especie química o conjunto de especies química mol.kg<sub>A</sub><sup>-1</sup>

Sv: salinidad mg.L<sup>-1</sup>

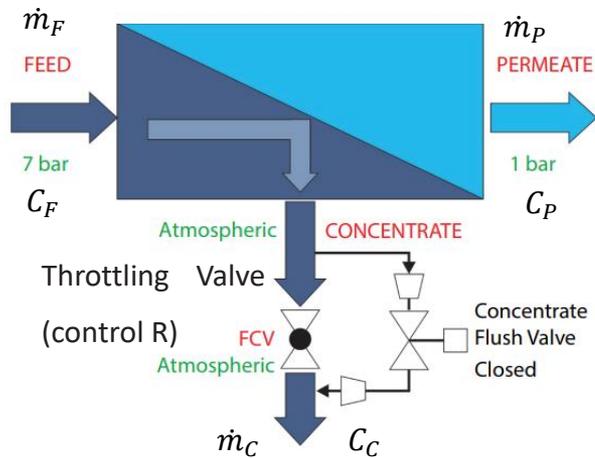
Correlaciones  $\Pi = \Phi(b_B)$ , solvente, agua  $\Pi(kPa) = 8,205(T + 273) \sum_B b_B$  T: Temperatura °C

Correlaciones  $\Pi = \Phi(Sv)$   $\Pi(bar) = 0,710^{-3} Sv$

Correlación de Dupont; T: Temperatura °C

$$\Pi_{DP}(bar) = \frac{Sv(T + 320)}{491000} Sv \leq 20000 \text{ mg/L} \quad \Pi_{DP}(bar) = \frac{0,0117Sv - 34}{14,23} \frac{(T + 320)}{345} Sv > 20000 \text{ mg/L}$$

# RO. Parámetros de interés: Recuperación, Rechazo; Factor de Concentración; balance de masa



$\dot{m}_F, \dot{m}_P, \dot{m}_C$ : flujo másico:  $kg_T \cdot hr^{-1}$

Recuperación o conversión:  $R = \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_F}$

$C_F, C_P, C_C$ : fracción másica  $kg_{sol} \cdot kg_T^{-1}$

Pasaje de soluto :  $SP = \frac{C_P}{C_F}$

Rechazo de soluto :  $SR = \frac{(C_F - C_P)}{C_F} = 1 - \frac{C_P}{C_F}$      $\frac{C_P}{C_F} \downarrow \Rightarrow (1 - SR) \rightarrow 0$

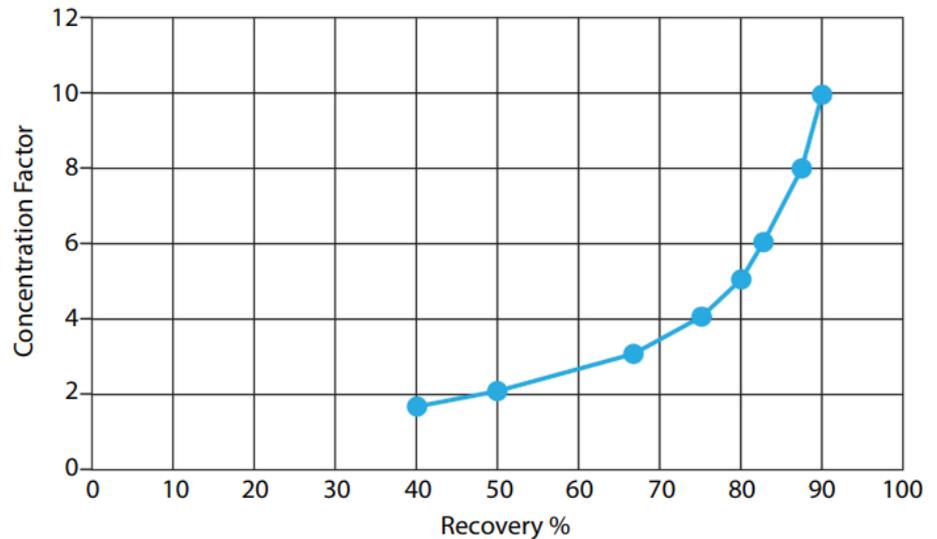
Factor de concentración :  $CF = \frac{C_C}{C_F}$

## Balance de masa (sobre el sólido)

$$\dot{m}_F C_F = \dot{m}_P C_P + \dot{m}_C C_C \quad \Rightarrow \quad 1 = \frac{\dot{m}_P C_P}{\dot{m}_F C_F} + \frac{\dot{m}_C C_C}{\dot{m}_F C_F} \quad \Rightarrow$$

$$1 = R(1 - SR) + (1 - R)CF \quad \Rightarrow$$

$$CF = \frac{1 - R(1 - SR)}{(1 - R)} \cong \frac{1}{(1 - R)}$$



RO. Parámetros de interés: flux de solvente (agua)  $J_w$ ;

Flux se define como la cantidad de una especie química que pasa a través de un área determinada durante un tiempo determinado. En RO se consideran tanto el flujo de agua como el de soluto. Según el modelo solución – difusión resulta:

$$J_w = K_w(\Delta P - \Delta\pi) \quad J_w \text{ se define como el volumen de agua que pasa a través de un área de membrana en la unidad de tiempo, } m^3.m^{-2}.s^{-1} \text{ o } L.m^{-2}.s^{-1} \text{ o } m.s^{-1} \text{ o } m.day^{-1}$$

$K_w$ : coeficiente de permeabilidad del agua.  $L.m^{-2}.hr^{-1}.bar^{-1}$   $K_w = K_{w,25^\circ C} 1,03^{(T-25)}$

$\Delta P = (P_F - P_P)$  diferencia de presión entre la alimentación y el permeado. *bar*

$\Delta\pi = (\pi_F - \pi_P)$  diferencia de presión osmótica entre la alimentación y el permeado. *bar*

[Ósmosis inversa | Membranas de agua Nano, Ultra y Microfiltración \(membranes.com\)](#)



Permeability of various hydranautics membranes at 25°C [8].

Membrane type	Model number	Flux (m/d)	Test pressure (bar)	Permeability (m/bar-d)	Solute rejection (%)
Seawater	SWC5-LD	0.919	55	0.0167	99.8
Brackish Water*	CPA7-LD	1.17	15.5	0.0757	99.8
Brackish Water	CPA5-LD	1.11	15.5	0.0722	99.7
Brackish Low Energy	ESPA2-LD	1.02	10.3	0.0989	99.6

\*Next generation polymeric membrane.

Nota 1:  $J_w$  depende directamente de la presión y la concentración a través de la presión osmótica.

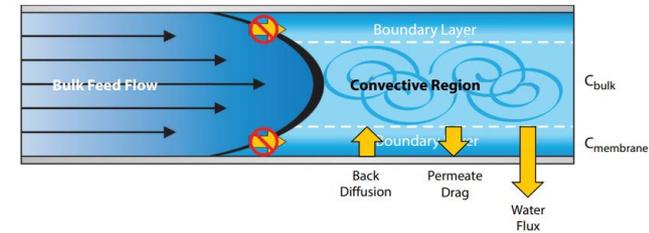
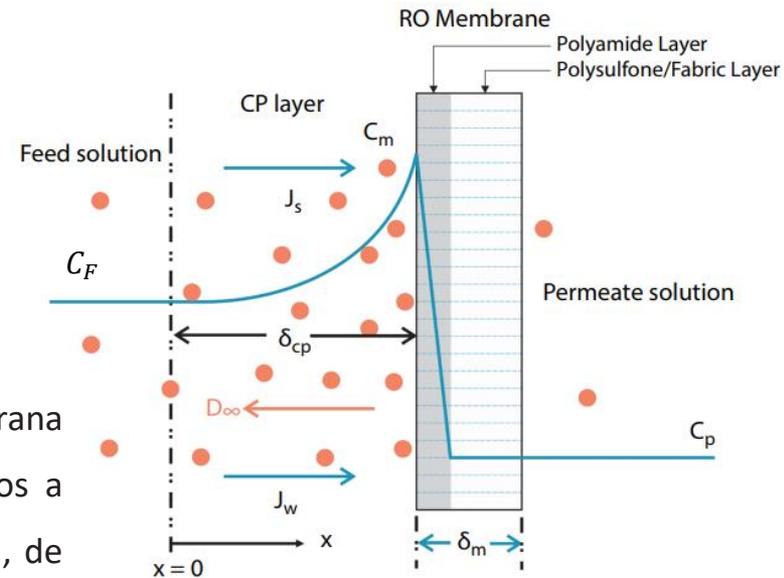
Además, es único para cada membrana específica

Nota 2: En general, a medida que disminuye  $J_w$ , SR tiende a aumentar. Esta característica mutuamente excluyente de las membranas de RO, permeabilidad y selectividad es otra característica del modelo de difusión-solución.

## Procesos de membranas polarización por concentración

Describe el gradiente de concentración dentro del elemento de membrana que se crea como consecuencia del cross-flow. Existe un gradiente de concentración de solutos entre el *bulk* de la corriente afluyente y la que se presenta en la superficie de la membrana

El fluido, en su trayectoria transversal hacia la superficie de la membrana para permearla, arrastra solutos (*permeate drag*). El flujo de solutos a través de la membrana se inhibe debido al rechazo de la membrana, de modo que a medida que el fluido permea, los solutos forman un gel de permeado que permanece en la superficie de la membrana. Los solutos tienden a permanecer cerca de la membrana en una capa límite, presentando flujo difusivo hacia el *bulk* de la corriente. La hidrodinámica axial y transversal de la membrana influyen en el fenómeno



$\beta$  es el módulo de polarización de concentración. En RO  $\beta > 1$ , la concentración de solutos en la superficie de la membrana  $C_m$  es siempre mayor a la del bulk,  $C_F$ . Si  $J_w$  aumenta,  $\beta \gg 1$ . También la disminución de la velocidad de flujo cruzado incrementará  $\delta_{CP}$  y  $\beta \gg 1$ . Un mayor valor de  $\beta$  aumenta la posibilidad de que los depósitos se acumulen en la membrana y tal vez la incrusten

$$\beta = \frac{C_m}{C_F} = \exp \left[ J_w \frac{\delta_{CP}}{D_{\infty}} \right]$$

$$\beta \sim 1,2 - 2,0$$

RO. Parámetros de interés: flux de soluto (agua)  $J_s$ . Relaciones entre parámetros

$$J_s \text{ (kg}_{\text{sol}}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}) \text{ se define como: } J_s = K_s(C_{Vm} - C_{VP}) = K_s(C_{VF} - C_{VP}) \quad K_s = K_{s,25^\circ\text{C}} 1,03^{(T-25)}$$

$K_s$  ( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) es el coeficiente de permeabilidad del soluto.  $J_s$  es independiente de la presión. Depende solo de la diferencia de concentración del soluto en la superficie de la membrana  $C_{Vm}$ ,  $\text{kg}_s\cdot\text{m}^{-3}$  y la concentración en el permeado  $C_{VP}$ ,  $\text{kg}_s\cdot\text{m}^{-3}$ .  $J_s$  es único para cada membrana específica.

### Relaciones entre parámetros

$$\pi_F = \Phi(\beta C_{VF}, T) \quad \Delta\pi = (\pi_F - \pi_P) \quad NDP = (\Delta P - \Delta\pi)$$

$$C_{VP} = \frac{J_s}{J_w} = \frac{K_s(C_{VF} - C_{VP})}{K_w(\Delta P - \Delta\pi)} = \frac{K_s}{K_w NDP} (C_{VF} - C_{VP}) \quad \Rightarrow \quad \frac{C_{VP}}{C_{VF}} = \frac{K_s}{K_w NDP} \frac{(C_{VF} - C_{VP})}{C_{VF}} \quad \Rightarrow (1 - SR) = \frac{K_s}{K_w NDP} SR$$

$$1 = \frac{K_s}{K_w NDP} SR + SR \quad \Rightarrow 1 = \left( \frac{K_s}{K_w NDP} + 1 \right) SR \quad \Rightarrow 1 = \left( \frac{B}{NDP} + 1 \right) SR \quad \Rightarrow 1 = \left( \frac{B + NDP}{NDP} \right) SR \quad \Rightarrow SR = \left( \frac{NDP}{B + NDP} \right)$$

$$CF = \frac{1 - R(1 - SR)}{(1 - R)} = \frac{C_{VC}}{C_{VF}} \quad R = \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_F} \quad J_w = K_w NDP \quad \frac{\dot{m}_F}{\rho_F} = Q_{vw} = J_w A_m$$

# Configuraciones de elementos de RO

4 configuraciones básicas de elementos RO:

- a) placa y marco, con láminas planas;
- b) tubular;
- c) *Hollow Fine Fiber* (fibra fina hueca);
- d) *Spiral Wound* (enrollado en espiral, con láminas planas).

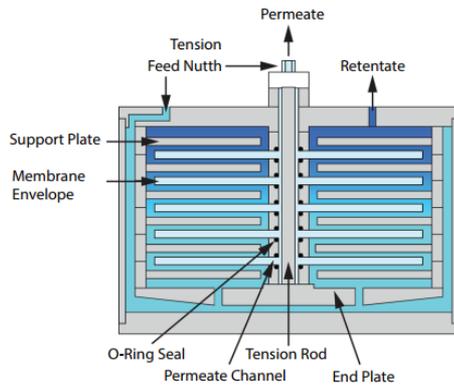
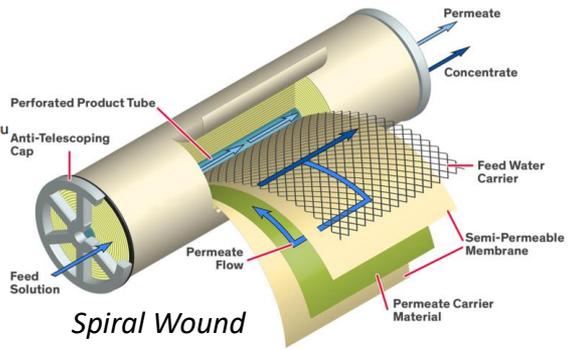
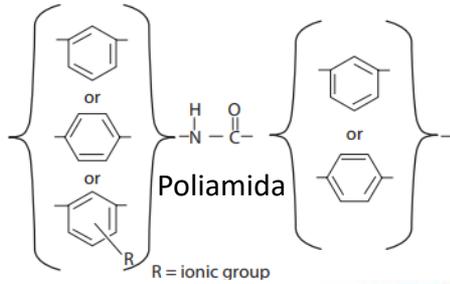
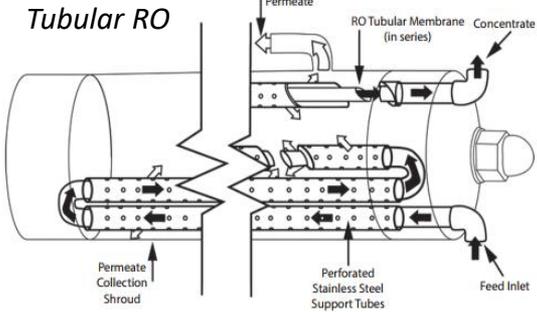


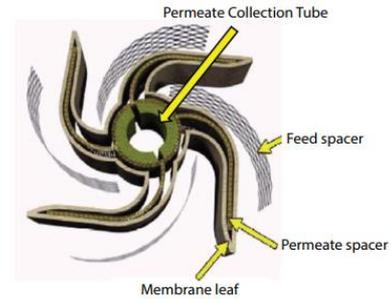
Plate and Frame RO



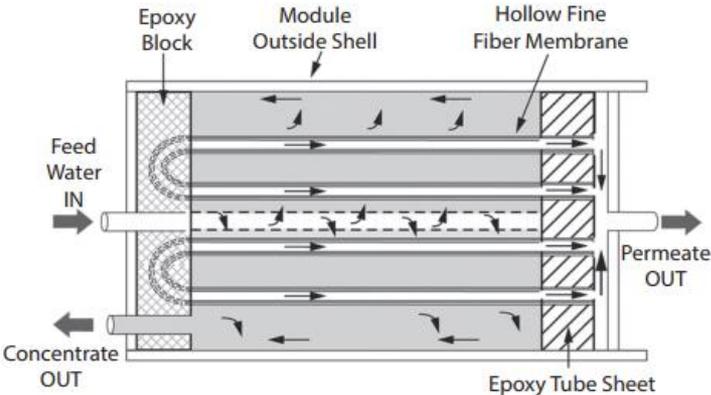
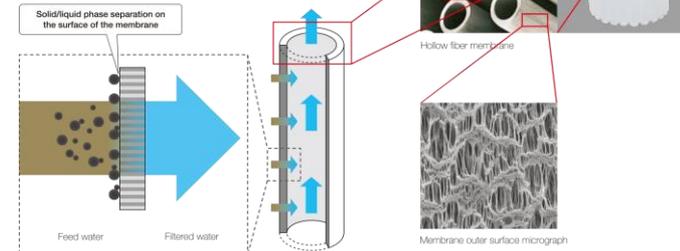
Spiral Wound



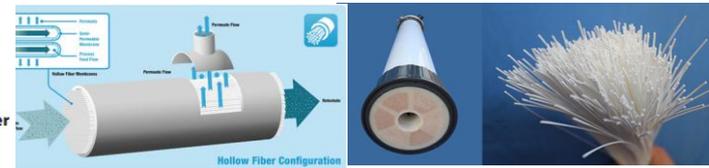
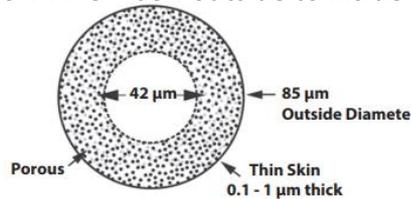
Membranas de fibra hueca (Dupont poliamida aromática) flux de 1,7 a 5 L.m<sup>-2</sup>.hr<sup>-1</sup>



## Key Features of PE Membrane



Hollow Fine Fiber: outside to inside



Se utiliza un sistema de RO para la concentración de una salmuera (densidad  $1032 \text{ kg.m}^{-3}$ ) que contiene  $46,76 \text{ gm.L}^{-1}$  de NaCl a  $15^\circ\text{C}$ , en una planta que se encuentra a 3600 msnm.

La presión manométrica en la alimentación es de 130 bar. La válvula de control en la corriente de concentrada presenta una apertura de modo que la recuperación es del 85%. El permeado egresa a la presión ambiental. La membrana tiene a  $25^\circ\text{C}$  un  $K_w$  de  $1.7297 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  y un  $K_s$  de  $1.587 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ . Su factor beta es de 1.2.

Estimar a) la salinidad del permeado; b) la salinidad del concentrado; c) el área de membrana requerida para el procesamiento de 240 toneladas de salmuera por día.

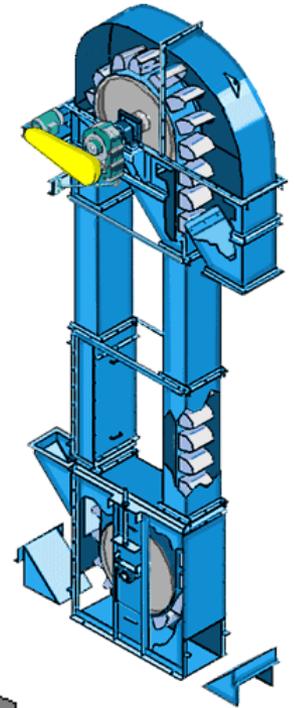
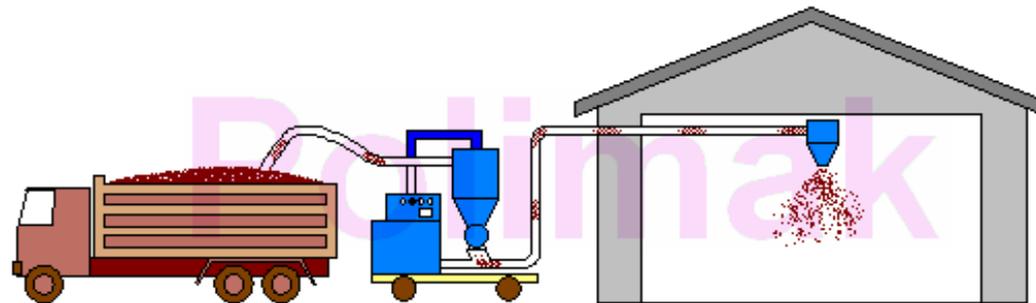
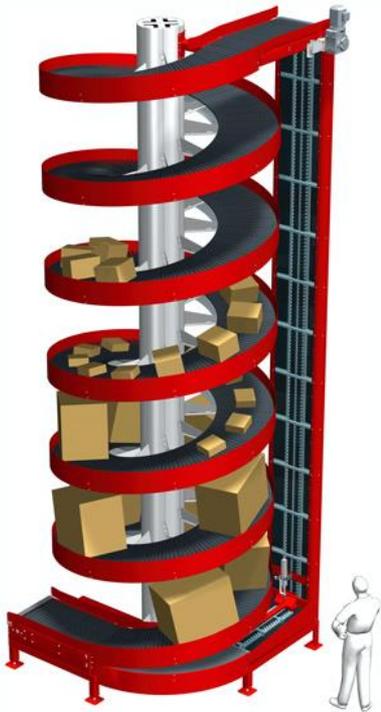


[jlz\\_TSP\\_RO\\_1](#)

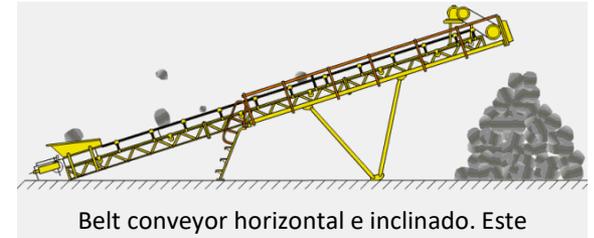
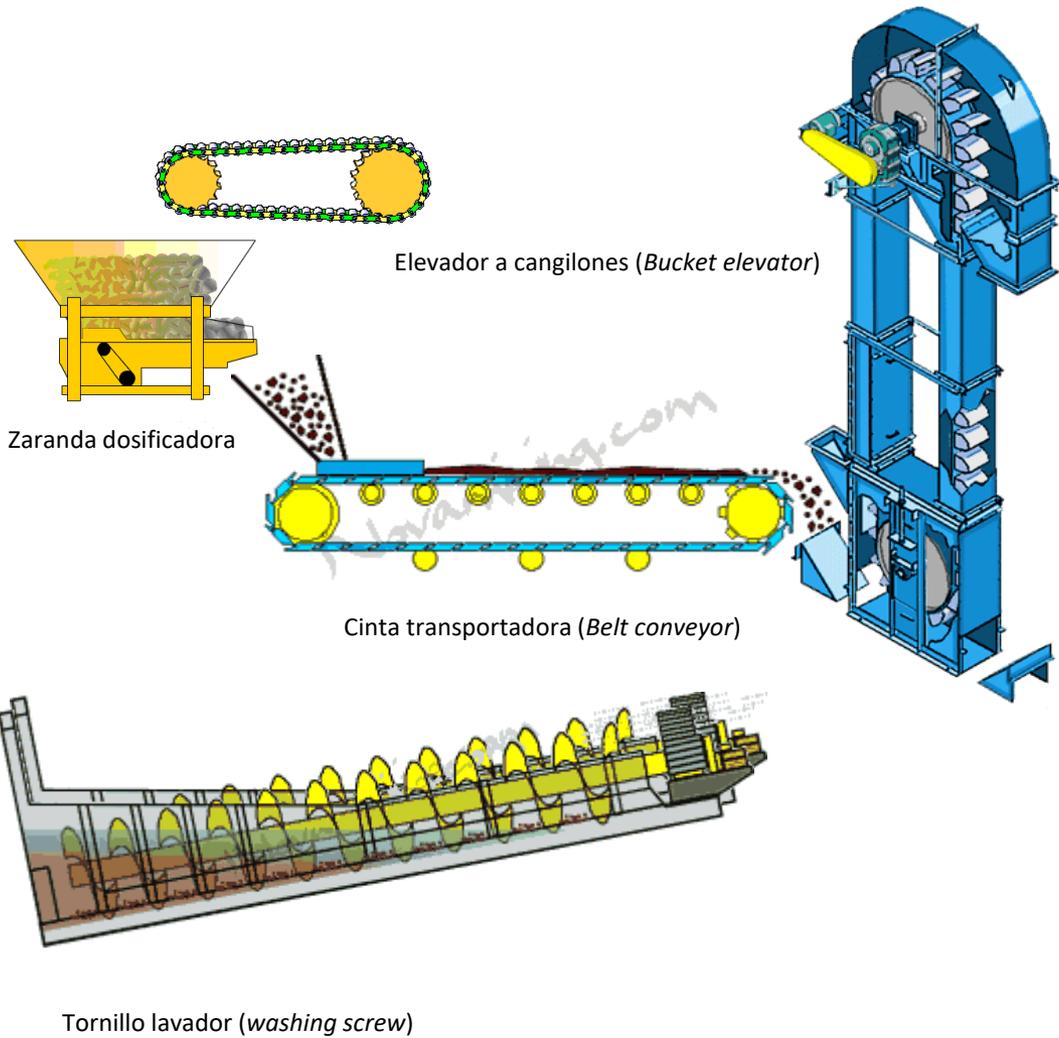
# Operaciones Unitarias 1

## Tecnología de los sistemas particulados

### ❖ Operaciones de transporte

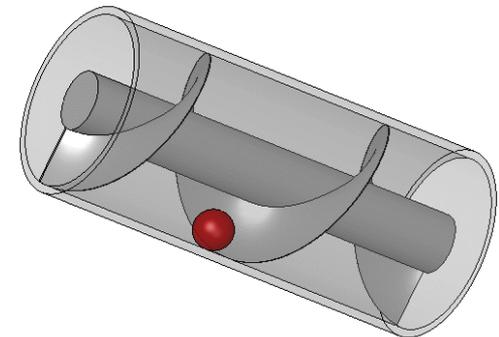
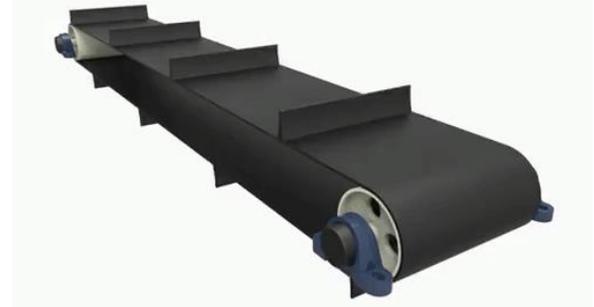


# Transporte mecánico



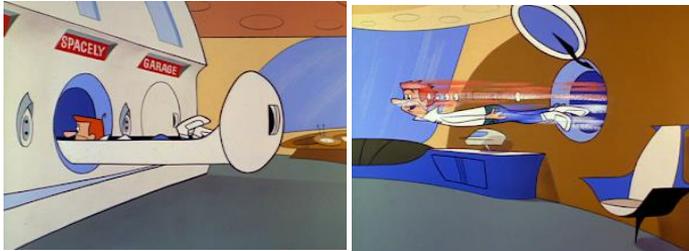
Belt conveyor horizontal e inclinado. Este

último para operaciones de apilamiento

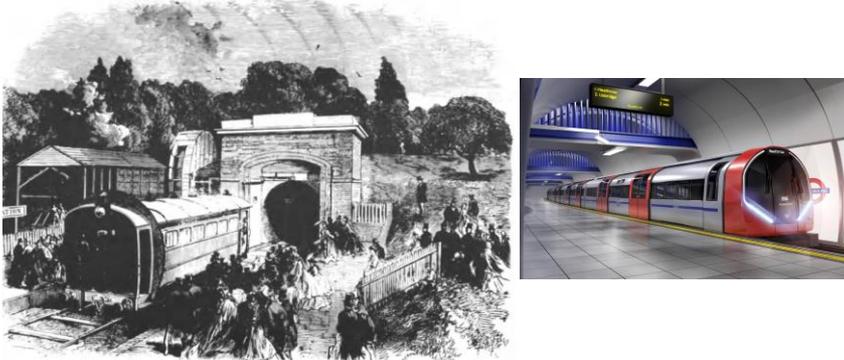


# Transporte de sólidos dispersos en fluidos

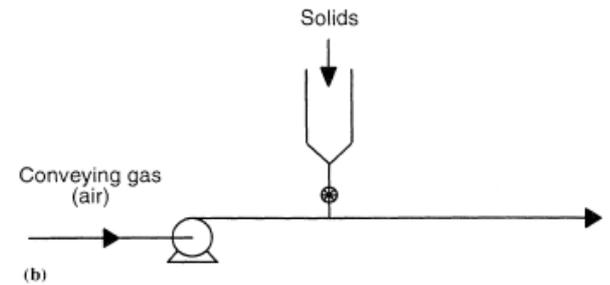
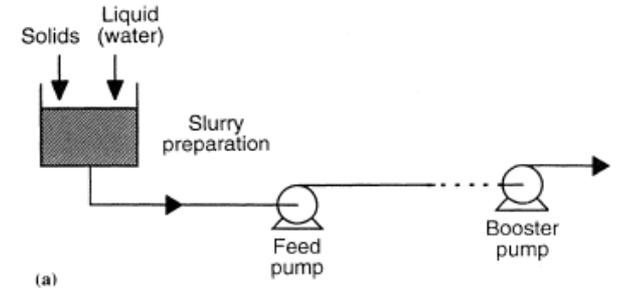
## Transporte hidráulico y neumático



Los supersónicos

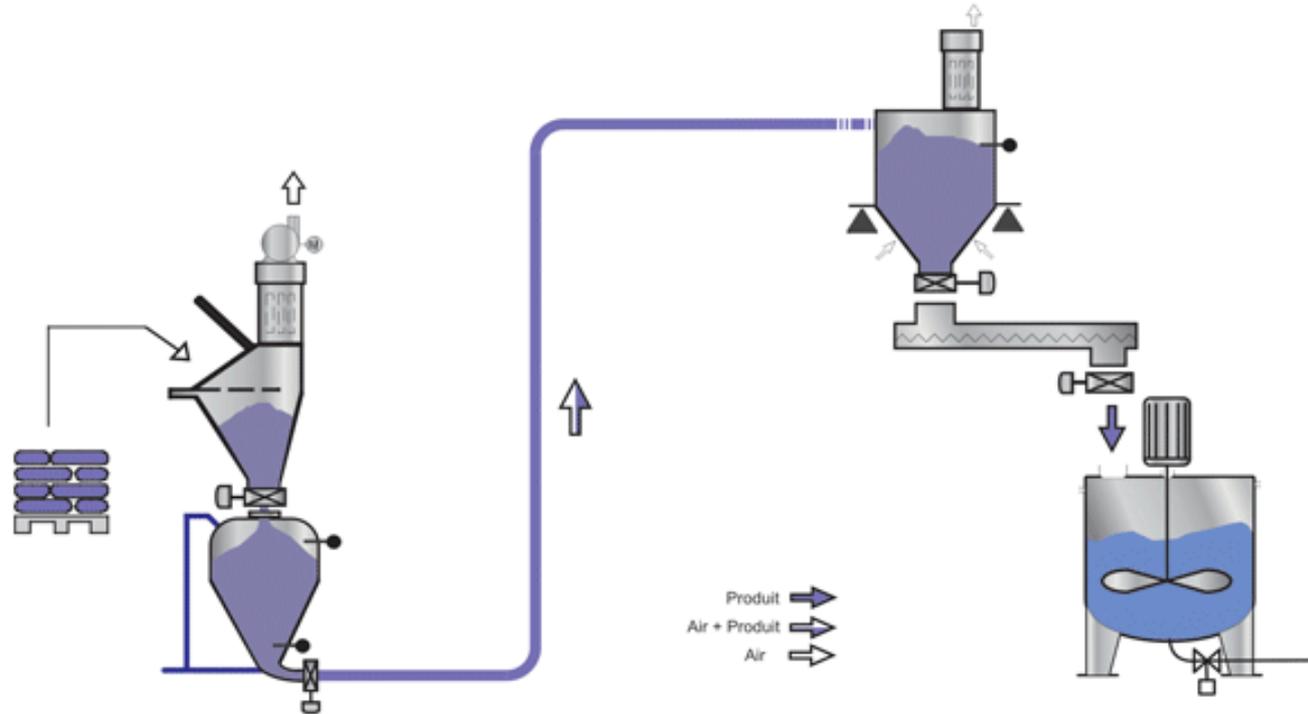


Whitehall Pneumatic Railway 1865- 1868 London Underground TUBE



## Transporte hidráulico y neumático

Cuando la velocidad superficial del fluido sobrepasa la velocidad límite de sedimentación de las partículas sólidas, éstas adquieren un movimiento de desplazamiento respecto al recipiente en la misma dirección que el movimiento del fluido. El dimensionamiento de un transporte de sólidos supone conocer el efecto que sobre las pérdidas por fricción ejercen las diversas variables, tales como el diámetro del tubo, la cantidad de fluido y de sólido en movimiento, y las propiedades del fluido y del sólido.

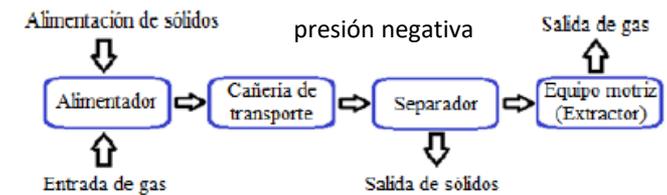
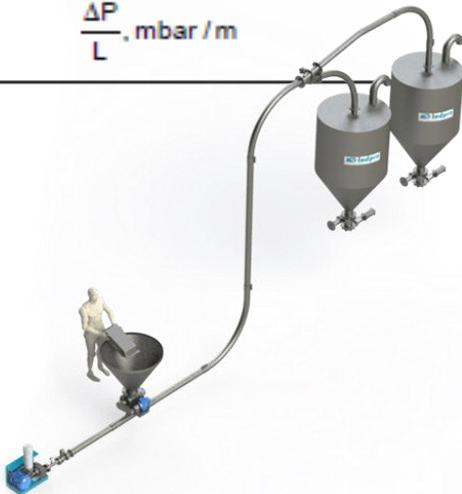


## Transporte neumático

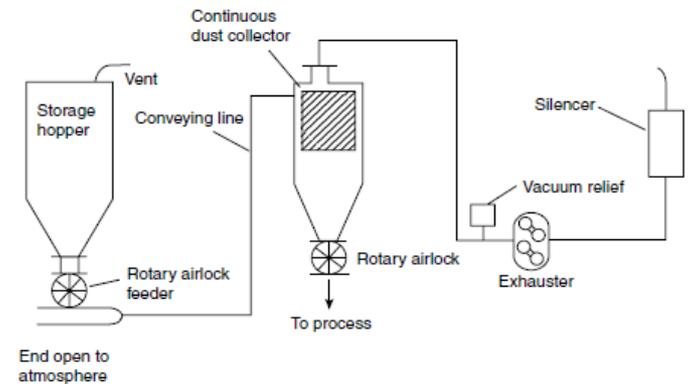
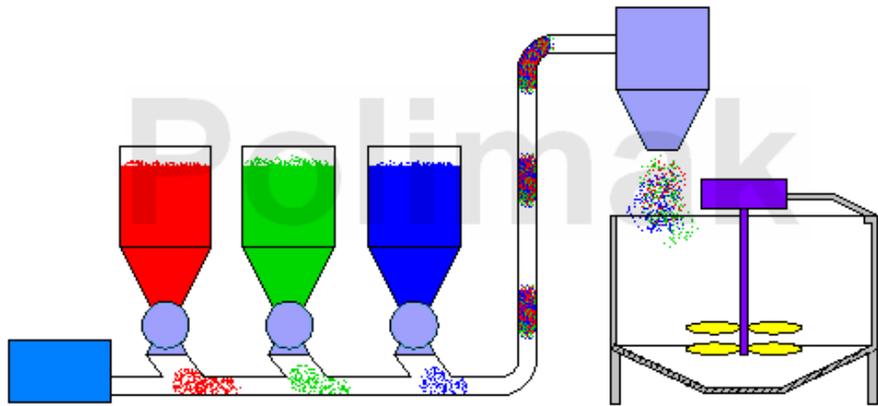
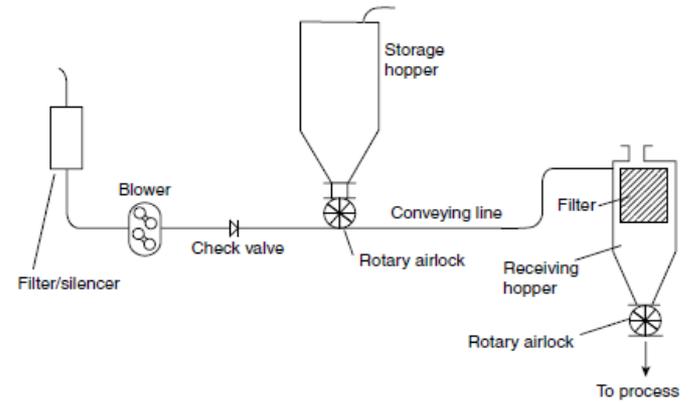
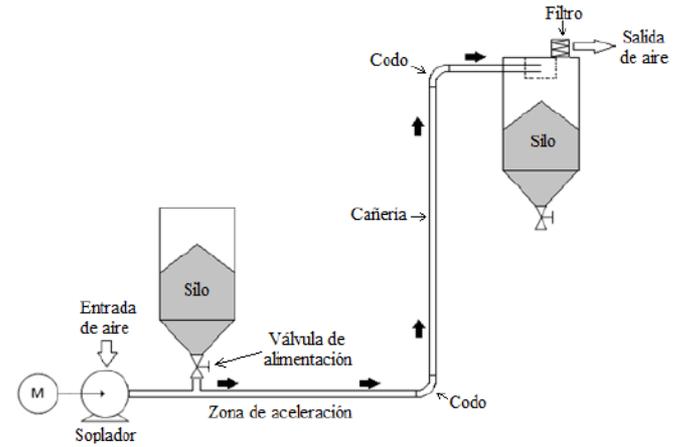
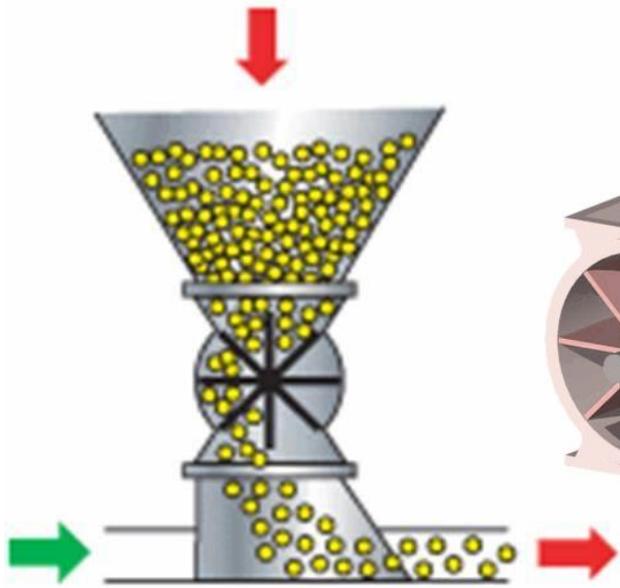
El transporte neumático puede efectuarse en **fase diluida** utilizando grandes volúmenes de aire a alta velocidad; las partículas sólidas se comportan como individuos, completamente suspendidos en el gas, y dominan las fuerzas fluido-partícula.

Un segundo modo de transporte es en **fase densa**, en el que las partículas sólidas no están completamente suspendidas. En fase densa hay mucha interacción entre las partículas. Una segunda clasificación es transporte horizontal y vertical. Una tercera clasificación, según la ubicación de la unidad motriz es transporte de presión positiva o negativa.

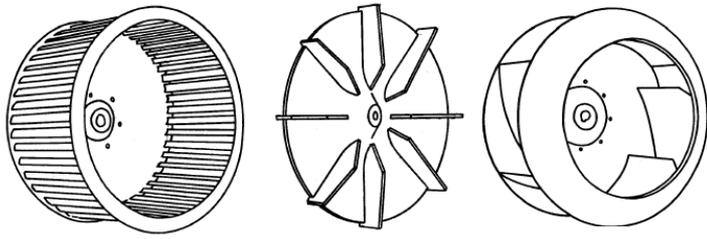
Propiedad	Transporte en fase diluida	Transporte en fase densa
Velocidad de gas, m/s	20	1-5
Concentración de sólidos, % en volumen	<1	>30
$\frac{\Delta P}{L}$ , mbar / m	< 5	>20



# Transporte neumático . Elementos del sistema



# Transporte neumático . Elementos del sistema



A) Rotor jaula de ardilla: rodete con los álabes curvados en el mismo sentido que la dirección de giro; baja velocidad periférica; baja a media presión estática.

B) Rotor radial: tienen el rodete con los alabes dispuestas en forma radial.

C) Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo.

