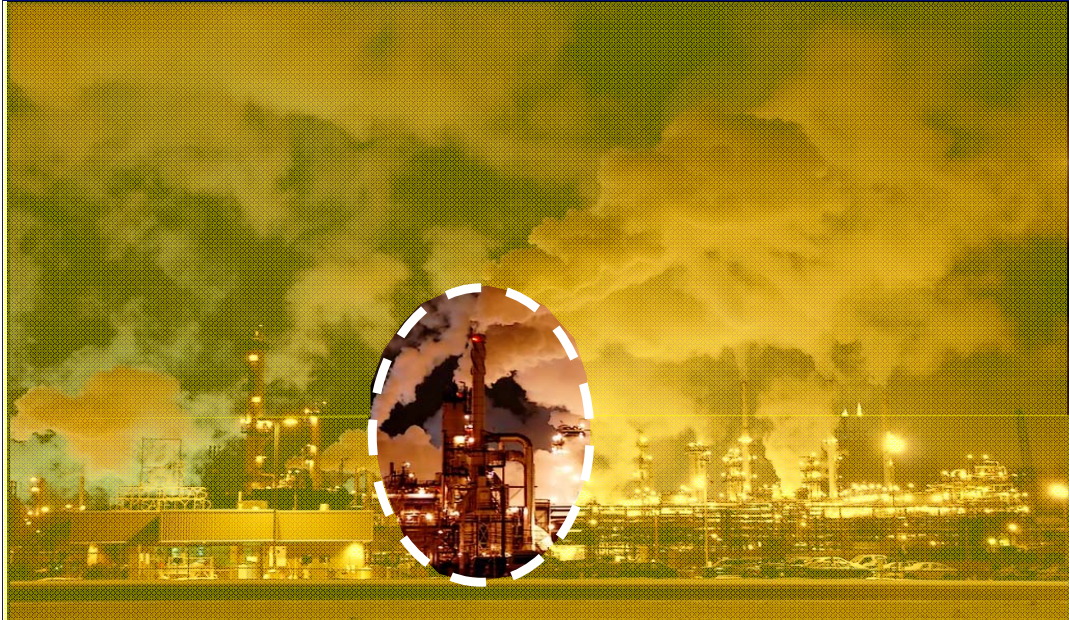


## OPERACIONES BÁSICAS DE PREPARACIÓN DE REACTIVOS Y SEPARACIÓN DE PRODUCTOS.

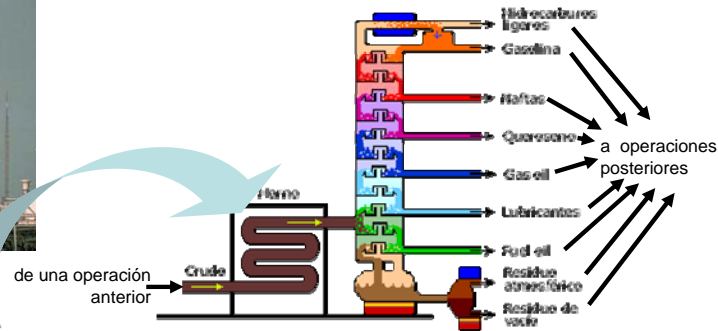
Tema desarrollado por los profesores Dr. D. Antonio Aznar y Dr. D. Juan Carlos Cabanelas del Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad Carlos III de Madrid.



## 1.2.- OPERACIONES BÁSICAS DE PREPARACIÓN DE REACTIVOS Y SEPARACIÓN DE PRODUCTOS:

Cuando observamos una instalación donde se realizan operaciones químicas, lo primero que apreciamos es el "caos" que rodea a una gran parte de las mismas. Generalmente pensamos en grandes instalaciones como son las de la industria química pesada o la petroquímica, consistentes en una serie de depósitos, torres, naves, hornos, etc. unidos por conducciones para el transporte de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas de una parte de la misma a otra. Todo este entramado parece que está colocado de una manera casi caótica y que afrontar cualquier estudio del mismo es casi imposible.

Si además juntamos que al observar otra instalación, aunque sea diseñada para la obtención del mismo producto, el conglomerado de instalaciones parece diferir en gran medida del anterior con el cual solo guarda similitud por su alto grado de complicación, podemos suponer que afrontar el estudio, diseño y construcción de cualquier instalación química es una tarea inabordable.



### OPERACIONES UNITARIAS.

Cada una de las etapas en que se puede dividir un proceso, apoyándose en técnicas comunes y en los mismos principios teóricos y métodos de cálculo.

**PROCESO QUÍMICO =  $\Sigma$  OPERACIONES INDIVIDUALES**

Todo proceso químico realizado a escala industrial puede subdividirse en diferentes etapas individuales de acondicionamiento, transporte o transformación de las materias involucradas en el proceso. A cada una de estas acciones la denominaremos operación unitaria o básica, y se caracterizará por basarse en un mismo conjunto de técnicas, principios teóricos y métodos de cálculo, realizándose en una instalación denominada unidad de proceso, similar para cada operación unitaria, e independiente del proceso global en que participen. El número total de estas operaciones unitarias no es muy grande, no excediendo de 25 ó 30 diferentes, y normalmente sólo unas pocas de ellas intervienen en cada proceso concreto.

Cada operación unitaria recibe materia de la anterior y obtiene productos que utiliza la siguiente.



## CLASIFICACIÓN DE LAS OPERACIONES UNITARIAS O BÁSICAS

- Según la reestructuración de enlaces:
  - químicas
  - física
  
- Según la miscibilidad de los compuestos:
  - homogéneas
  - heterogéneas
  
- Según la variabilidad temporal:
  - estacionarias
  - no estacionarias

Las operaciones básicas pueden ser:

oSegún la reestructuración de los enlaces:

✓químicas: si existe reestructuración de enlaces intramoleculares (reacción química), o excepcionalmente intermoleculares (reacciones de transposición, isomerización, etc.).

✓físicas: si solamente existe reestructuración de enlaces intermoleculares (cambio de fase, desplazamiento, etc.).

oSegún la miscibilidad de los compuestos involucrados:

✓homogéneas: si todos los componentes son miscibles entre si formando una disolución o mezcla homogénea, de forma que las propiedades (composición, temperatura, etc.) en todo el volumen sean las mismas o presenten variaciones continuas.

✓heterogéneas: si uno o más de los componentes se presentan en una fase diferente e inmisible con las demás, de forma que se produzcan discontinuidades en las propiedades dando lugar a interfases que marcan la región donde la propiedad cambia bruscamente de valor.

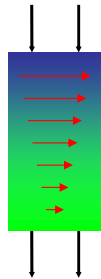
oSegún la variación en el tiempo:

✓estacionarias: son aquellas operaciones en las que las propiedades del sistema no se modifican con el tiempo.

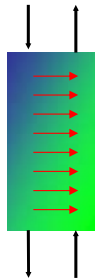
✓no estacionarias: son aquellas operaciones en las que las propiedades del sistema sufren variación en el tiempo de manera continua o discontinua.



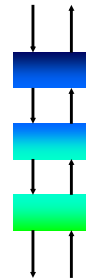
### CONTACTO ENTRE FASES NO MISCIBLES.



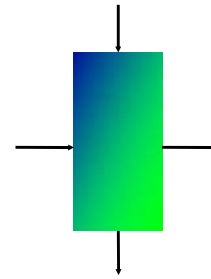
**Paralelo**



**Contracorriente**



**Intermitente**



**Cruzado**

**Ininterrumpido**

**Etapa:** cada uno de los fenómenos de contacto entre fases no miscibles.

**Eficacia de una etapa real:** rendimiento respecto al máximo alcanzable en una etapa de equilibrio o ideal

El contacto entre fases inmiscibles puede ser:

- ✓ en paralelo: si las diversas fases inmiscibles se desplazan en la misma dirección y sentido.
- ✓ en contracorriente: si las diversas fases inmiscibles se desplazan en la misma dirección y sentidos opuestos.
- ✓ cruzado: si las diversas fases inmiscibles se desplazan en distinta dirección.

Se denomina etapa a cada uno de los fenómenos de contacto entre fases inmiscibles. En el caso de que se alcance el equilibrio en dicha etapa hablamos de etapa ideal o de equilibrio, en caso contrario decimos que se trata de una etapa real.

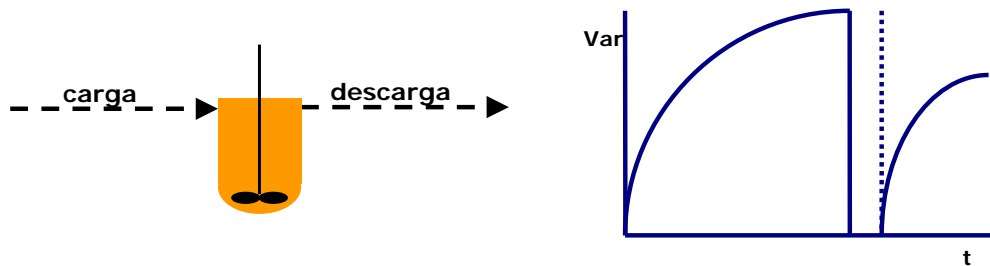


**OPERACIONES DISCONTINUAS, CONTINUAS Y SEMICONTINUAS.**

Régimen estacionario  $Var \neq f(t)$

**OPERACIÓN DISCONTINUA** (régimen no estacionario)

carga  $\Rightarrow$  desarrollo del proceso  $\Rightarrow$  descarga

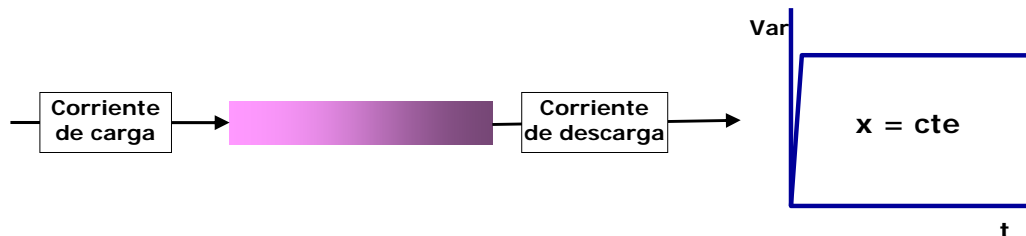


**Ejemplos: filtración, cambio iónico, reactor flujo discontinuo secuencial, síntesis por lotes.**

**DISCONTINUA:** En este tipo de operaciones unitarias, las variables características del sistema se modifican de forma creciente o decreciente, pero continuamente con el tiempo para una misma posición. Se caracterizan por poderse dividir temporalmente en etapa de carga, realización de la operación y etapa de descarga y acondicionamiento, repitiéndose estas operaciones de forma cíclica. En muchos casos, existe un tiempo muerto para acondicionamiento del equipo, entre el fenómeno de descarga (valor final de la variable) y el de carga (valor inicial de la variable) del ciclo siguiente.



### OPERACIÓN CONTINUA (régimen estacionario)



Ejemplos: decantador, digestor, alto horno

#### VENTAJAS

- Elimina periodos carga/descarga
- Fácil automatización
- Reducción mano de obra
- Recirculación de reactivos y productos
- Mayor uniformidad de productos
- Fácil recuperación materia y energía

#### INCONVENIENTES

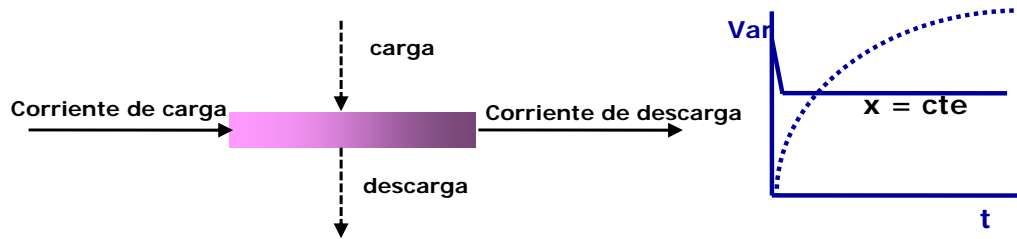
- Puesta en marcha complicada
- Difícil adaptabilidad
- Mano de obra cualificada
- Equipos delicados y caros
- Materias primas mas uniformes
- Solo indicado para grandes producciones

**CONTINUA:** El sistema trabaja en régimen estacionario, de forma que las variables características del sistema no sufren variación con el tiempo ( $Var \neq f(t)$ ) para una posición fija en el espacio aunque si pueden hacerlo de un punto a otro del sistema ( $Var = f(x,y,z)$ ). En este tipo de operaciones se eliminan los tiempos de carga y descarga, operaciones que se efectúan mediante corrientes de entrada y salida del sistema. Por contra, suele existir un corto espacio de tiempo inicial no estacionario durante el cual las variables del sistema alcanzan los valores de trabajo.

Las operaciones continuas eliminan los periodos de carga y descarga, aunque presentan una mayor complicación a la hora de la puesta en marcha y modificación de las condiciones de trabajo durante la realización del proceso, permitiendo una gran automatización del mismo y una reducción de la mano de obra, aunque esta ha de ser más especializada al emplear equipos más delicados, sofisticados y caros. Las operaciones discontinuas permiten la utilización de materias primas menos uniformes, dando lugar a productos también menos uniformes y no favoreciendo los procesos de recirculación de reactivos y productos, así como la recuperación del calor o frío del sistema, y están indicadas para procesos de producción de pequeñas cantidades.



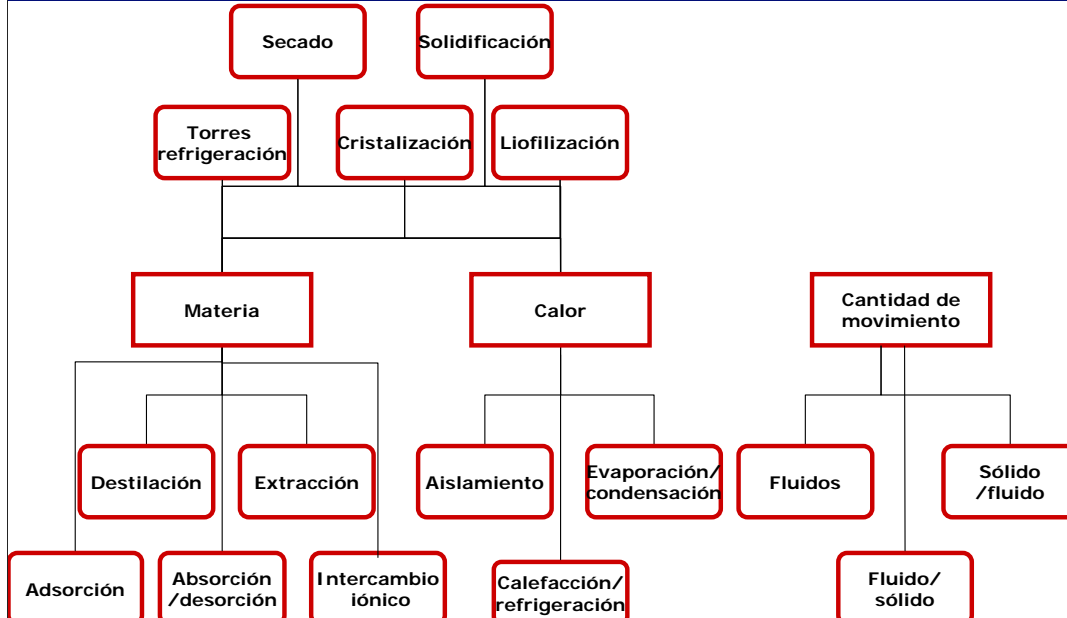
## OPERACIÓN SEMICONTINUA (régimen no estacionario)



**Ejemplos: Secado de gases en doble columna.**

**SEMICONTINUA:** cuando uno o más materiales se cargan en la unidad de proceso, donde permanecen durante cierto tiempo mientras que otros materiales entran y salen continuamente de la misma. En este caso, el régimen de funcionamiento será también no estacionario





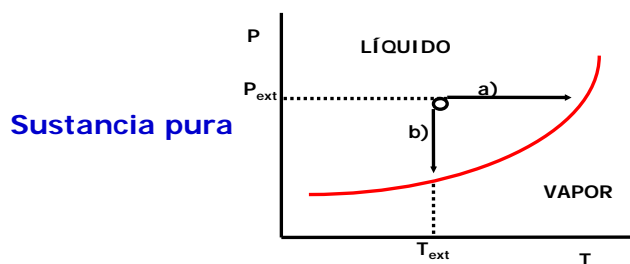
En este apartado estudiaremos las operaciones unitarias en las que existe fundamentalmente reestructuración de enlaces intermoleculares, dejando para más adelante el estudio de las operaciones unitarias en las que existe reordenación de enlaces intramoleculares, campo que estudia la Ingeniería de las reacciones químicas. Como hemos apuntado anteriormente, todo proceso físico o químico y por tanto, toda operación unitaria estará gobernado por fenómenos de transporte. Por esto resulta conveniente clasificar las operaciones unitarias atendiendo a la propiedad (materia, energía o cantidad de movimiento) cuyo transporte sea más característico



## DESTILACIÓN

<http://www.diquima.upm.es/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/COLUMNAS/PAG3.HTM>

Separación por diferencia en las temperaturas de ebullición de los componentes de una disolución.



### Destilación:

Es una operación unitaria basada en la ebullición de una disolución al igualarse la presión de vapor de la disolución ( $p_{\text{vap}} = f(T)$ ) a la presión externa, con objeto de producir la separación por diferencia en las temperaturas de ebullición de los componentes de la disolución. Al aumentar la temperatura de una disolución hasta alcanzar la temperatura de ebullición se produce un vapor enriquecido en el componente de menor temperatura de ebullición (mayor presión de vapor) en equilibrio con el líquido enriquecido en el componente de mayor temperatura de ebullición (menor presión de vapor). Al vapor, condensado posteriormente, se le denomina destilado y al líquido restante residuo.

Existen dos métodos de producir el fenómeno de ebullición:

- ✓ aumentando la temperatura de la disolución hasta alcanzar el valor indicado por la curva de equilibrio para la presión externa (camino a)
- ✓ disminuyendo la presión externa hasta que la presión del sistema iguale la de equilibrio (camino b)



**Disolución bicomponente**

$$P_A = P_A^0 \cdot x_A$$

$$P_B = P_B^0 \cdot x_B$$

$$P_A = P_T \cdot y_A$$

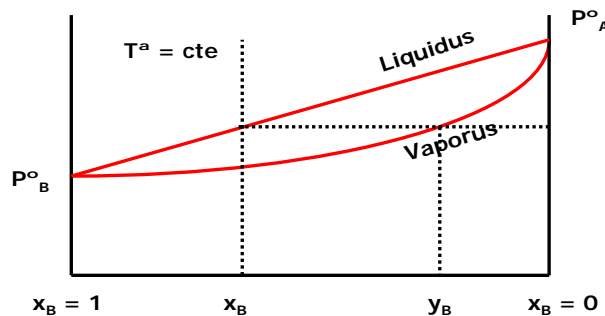
$$P_B = P_T \cdot y_B$$

$$\Rightarrow P_T = P_A + P_B = P_A^0 \cdot x_A + P_B^0 \cdot x_B = P_A^0 \cdot x_A + P_B^0 \cdot (1 - x_A) = P_B^0 + x_A(P_A^0 - P_B^0)$$

**Ley de Raoult**

$$\Rightarrow y_A = \frac{P_A}{P_T} = \frac{P_A}{P_A + P_B} \quad \text{Ley de Dalton}$$

$$\frac{P_A^0 \cdot x_A}{P_B^0 \cdot x_B} = \frac{y_A}{y_B}$$



**a) Curvas de destilación:**

Para representar en un plano el equilibrio líquido/vapor de un sistema de dos componentes, necesitamos fijar una de las tres variables siguientes: presión, temperatura o composición.

· Diagramas a temperatura constante: Para el cálculo de la presión de equilibrio de una disolución a una temperatura dada en función de la composición, se emplea la relación conocida como Primera Ley de Raoult, que dice que la presión de vapor de un componente en una disolución es igual a la presión de vapor del componente puro por la fracción molar del mismo.

$$P_A = P_A^0 \cdot x_A$$

$$P_B = P_B^0 \cdot x_B \quad \Rightarrow P_T = P_A + P_B = P_A^0 \cdot x_A + P_B^0 \cdot x_B = P_A^0 \cdot x_A + P_B^0 \cdot (1 - x_A) = P_B^0 + x_A(P_A^0 - P_B^0)$$

En equilibrio con el líquido se encuentra un vapor cuya presión vendrá dada por la Ley de Dalton que dice que la presión de vapor de un componente de un gas es igual a la presión total de la mezcla gaseosa por la fracción molar de dicho componente en la misma.

$$P_A = P_T \cdot y_A$$

$$P_B = P_T \cdot y_B \quad \Rightarrow \quad y_A = P_A / P_T = P_A / (P_A + P_B)$$

Cuando el vapor se encuentra en equilibrio con el líquido, las presiones parciales de los componentes A y B se igualan en ambas fases

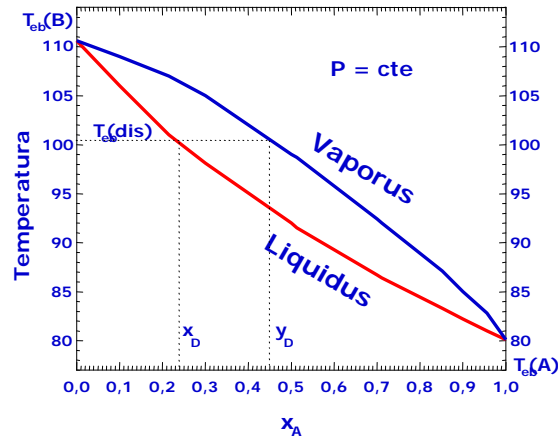
$$P_A = P_A^0 \cdot x_A = P_T \cdot y_A$$

$$P_B = P_B^0 \cdot x_B = P_T \cdot y_B \quad \Rightarrow \quad (P_A^0 / P_B^0) \cdot (x_A / x_B) = y_A / y_B$$

Si suponemos que  $P_A^0 > P_B^0$

$$P_A^0 / P_B^0 > 1 \quad \Rightarrow \quad x_a / x_b < y_a / y_b \quad \Rightarrow \quad (1 - x_b) / x_b < (1 - y_b) / y_b \quad \Rightarrow \quad x_b > y_b$$

por lo tanto la composición del vapor en equilibrio con una disolución, se enriquece en el componente más volátil (mayor presión de vapor)

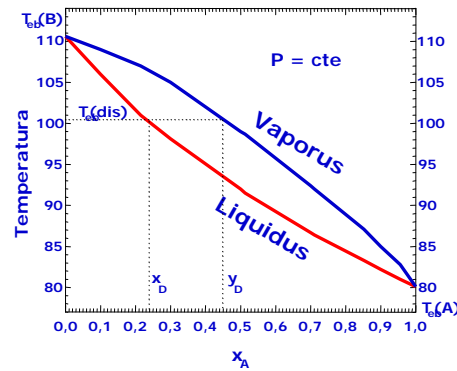
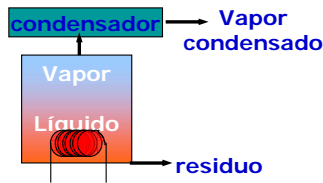


**Diagramas a presión constante:** Los procesos de destilación se realizan normalmente en condiciones de presión constante, ya sea esta la atmosférica o menor que ella (destilación a presión reducida). En los diagramas  $x$ - $T$ , hay que tener en cuenta que la situación es inversa a la de los diagramas  $x$ - $P$  antes estudiados, de forma que el compuesto más volátil será el que tendrá menor temperatura de ebullición, y que la curva inferior corresponderá a la línea de liquidus y la superior a la de vaporus. El área situada por debajo de la línea de liquidus representa las condiciones temperatura y composición para las que se puede encontrar la disolución en estado líquido, el área situada por encima de la línea de vaporus, indica las condiciones en que se puede encontrar en fase vapor dicha disolución, y por último, el área comprendida entre ambas curvas nos da la región de coexistencia de las fases líquido y vapor, siendo la temperatura de ebullición de la disolución el valor de la ordenada de la línea de liquidus para la composición de dicha disolución ( $x_D$ ), encontrándose en equilibrio con el vapor de composición dada por la línea de vaporus para esa misma temperatura ( $y_D$ )

En los sistemas de destilación, existe una transferencia neta de masa desde la región del calderín hacia la del condensador, que se puede calcular mediante un sistema de dos ecuaciones formado por el balance total molar y el de uno de los componentes.



### Destilación simple:



$$P_{\text{ext}} = \sum x_i \cdot P_i^0$$

$$P_{\text{ext}} = x_A \cdot P_A^0 + (1 - x_A) P_B^0$$

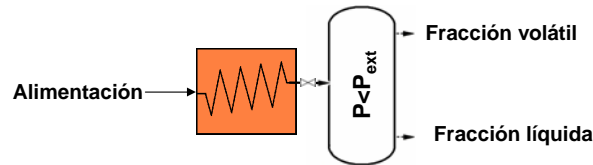
$$t \uparrow \Rightarrow x_A \downarrow$$

**TIPOS DE DESTILACIÓN:** En función del contacto entre fases:

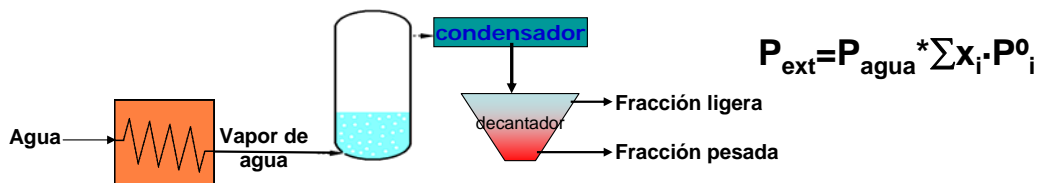
**Destilación simple:** es aquella en que la disolución a destilar, de composición  $x_D$ , es calentada en el calderín, formándose un vapor enriquecido en el componente más volátil, de composición  $y_D$ , que es recogido en el condensador. La disolución restante se empobrece en dicho componente, hasta alcanzar la composición de equilibrio  $x_A$ , variando con ello la temperatura de ebullición de la disolución, la cual aumenta en función del tiempo. Este método de destilación es utilizable solo cuando tenemos una disolución bicomponente y las sustancias a separar poseen puntos de ebullición muy diferentes ( $>25$  °C) y sus temperaturas de ebullición a 1 atm no superan los 150 °C. La mezcla comienza a ebullicir cuando la suma de las presiones parciales ( $P_i^0 \cdot x_i$ ) iguala a la presión exterior (generalmente la atmosférica)



**Destilación flash ó súbita:** alimentación a P y T  $\uparrow \Rightarrow$  brusco  $\downarrow$  P (expansión)

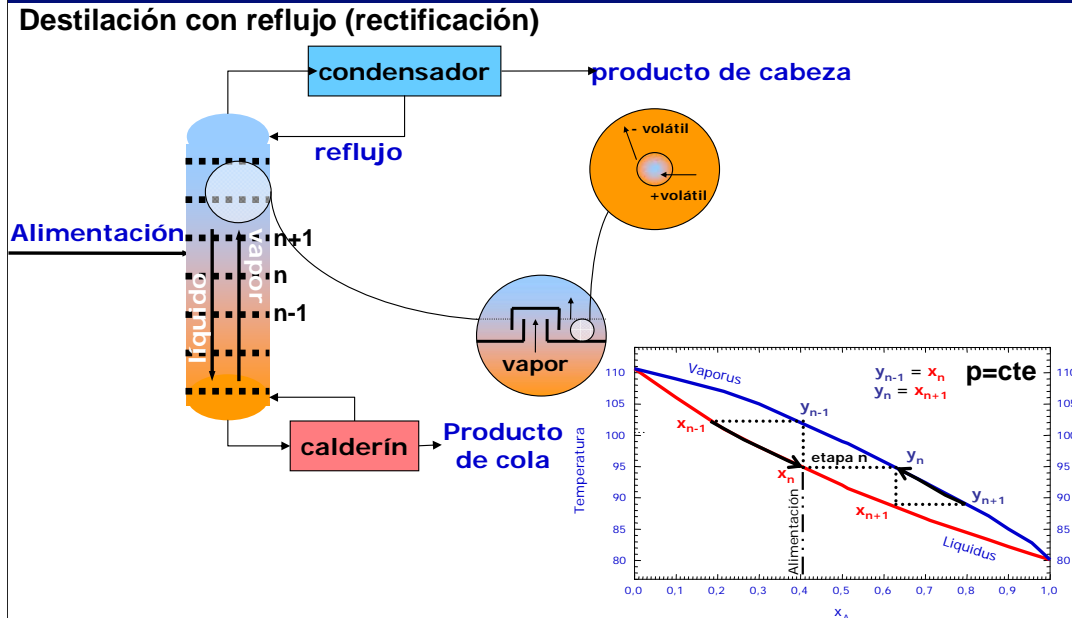


**Destilación por arrastre de vapor:** vapor (agua), disminución  $P_{\text{parcial}}$  componentes  $\Rightarrow T_{\text{eb}}$



**Destilación flash o súbita:** Se emplea fundamentalmente cuando se desea destilar un compuesto que se descompone térmicamente a temperatura inferior a la de destilación. La mezcla a destilar se precalienta a una temperatura inferior a la de descomposición del componente inestable, y la mezcla precalentada se introduce en una columna de destilación a baja presión, donde entra en ebullición brusca, recogiendo en el condensador la fracción enriquecida en el componente volátil y en la región inferior un líquido enriquecido en el menos volátil.

**Destilación por arrastre de vapor.** La destilación por arrastre de vapor se aplica a la separación de sustancias poco solubles en agua. La destilación por arrastre de vapor se emplea para separar una sustancia de una mezcla que posee un punto de ebullición muy alto y que se descomponen al destilar, pues el vapor de agua introducido cumple dos funciones: calentar la mezcla a destilar y disminuir la presión parcial a la que comienzan a ebullicir los componentes, pues la presión total que deben alcanzar es la exterior menos la del vapor de agua. El vapor condensado es una mezcla inmiscible del agua condensada y del componente a destilar, la separación de ambas fases se realiza por decantación.



**Destilación con reflujo o rectificación:** es aquella en que el vapor condensado se reintroduce en la zona superior del destilador (reflujo), de forma que se crea una circulación en contracorriente entre el vapor que asciende, formado en el calderín, y el líquido que desciende. El contacto entre fases se efectúa de forma discontinua en el interior de la columna de rectificación. Cada una de las etapas de contacto se denomina plato, y en términos generales puede asimilarse a una etapa de equilibrio. En la etapa n-sima se ponen en contacto el vapor formado en la etapa "n+1" (las etapas se numeran desde el condensador hacia la alimentación, y desde esta hacia el calderín) con el líquido que desciende de la etapa "n-1". Durante el contacto líquido vapor, y al transferirse el componente más volátil desde el líquido al vapor, se alcanza el equilibrio, el vapor formado tendrá la composición  $y_n$  y el líquido  $x_n$ .

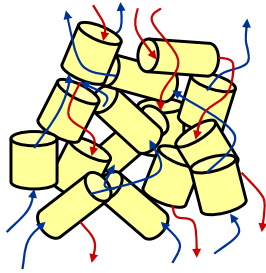
· En función de la alimentación puede ser destilación continua o discontinua.

✓ La **destilación continua** es aquella en que tenemos un caudal de alimentación, y se recoge en continuo un destilado y unas colas de destilación.

✓ La **destilación discontinua** implica procesos de carga de la disolución a destilar, así como de descarga del residuo que queda sin destilar en el calderín, el destilado se recoge de forma continua durante casi toda la realización del proceso de destilación.



### Columnas de relleno



#### CARACTERISTICAS DEL RELLENO

- Resistencia mecánica
- Gran superficie
- Geometrías no apilables
- Resistencia química

#### MOTIVOS


- Favorecer el contacto líquido-vapor
- Evitar sobrepresiones
- No crear caminos preferenciales

**Sistemas de destilación:** La unidad de proceso característica de la destilación consiste en una torre cilíndrica vertical, con un sistema de condensación y recirculación en su parte superior (cabeza), y un sistema de calefacción en la inferior (cola) por donde se extraen los residuos de la destilación. A diversas alturas de la torre pueden estar localizadas otras salidas con objeto de poder retirar productos intermedios, de composición más rica en el componente más volátil, según se localicen estas salidas más cerca del condensador. El rendimiento de la columna de destilación es mas alto cuanto mayor es el contacto entre la fase vapor ascendente y la líquida descendente. Para favorecer este contacto se utilizan dos estrategias:

**Columnas de rellenos:** Son columnas de destilación en las que se favorece el contacto líquido/vapor mediante un relleno consistente en elementos sólidos, que provocan la ruptura de la corriente descendente de líquido en multitud de pequeñas corrientes y gotas, de manera que al aumentar la superficie del líquido, se facilita la transferencia de masa líquido/vapor. Los elementos de relleno son de naturaleza inerte (cerámicas, vidrios, polímeros, etc.) y tienen como características comunes su bajo peso, alta superficie específica (área por unidad de peso), resistencia mecánica, formas geométricas complejas que evitan su compactación e inalterabilidad.



$$\text{Eficacia de piso} = \frac{\text{N}^\circ \text{ pisos teóricos}}{\text{N}^\circ \text{ pisos reales}}$$



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

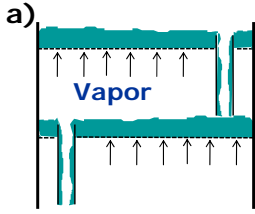
Operaciones básicas de preparación de reactivos y separación de productos

**DESTILACION**

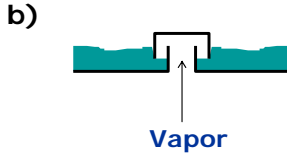
A. Aznar y J.C. Cabanelas

**Columnas de platos**

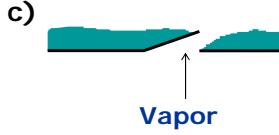
a)



b)



c)



$$\text{Eficacia de piso} = \frac{\text{N}^\circ \text{ pisos teóricos}}{\text{N}^\circ \text{ pisos reales}}$$

$$\text{Altura equivalente de piso teórico (AEPT)} = \frac{\text{Altura de la columna}}{\text{N}^\circ \text{ pisos teóricos}}$$

**Columnas de platos:** son columnas de destilación donde se ubican superficies planas perpendiculares al eje principal de la columna y en las que se va a efectuar el contacto líquido/vapor. Suelen disponer de algún dispositivo tal que permita el burbujeo del vapor ascendente (perforaciones, campanas, válvulas, etc.) a través del líquido retenido en el plato. El vapor transfiere calor al líquido del plato, al cual cede parte del componente más volátil, de tal forma que se produce un doble efecto, el líquido se calienta, formándose un vapor enriquecido en el componente más volátil, y aumentando su volumen al condensarse parte del vapor ascendente, descendiendo por el rebosadero al plato inferior, el exceso de líquido enriquecido con el componente menos volátil.

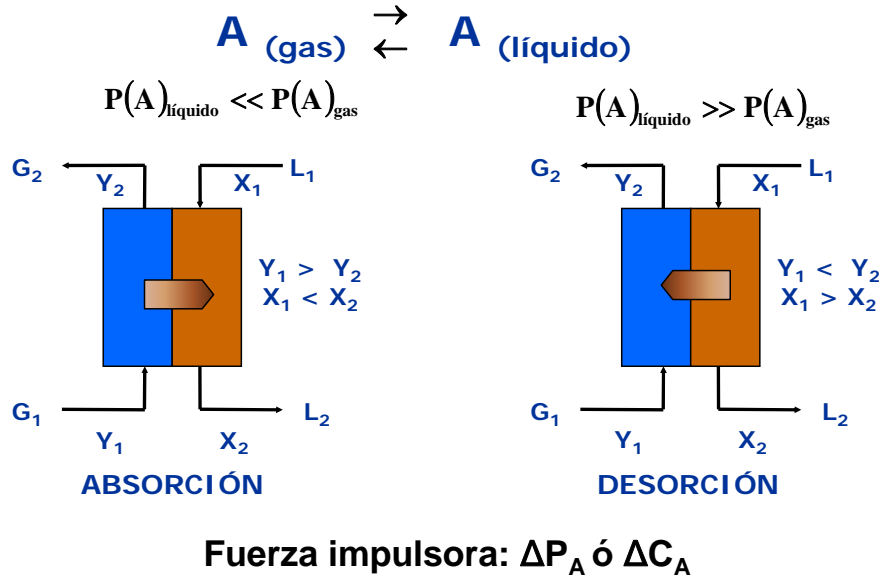
**Método de contacto:** en columnas de platos será mejor cuanto mayor sea la altura del líquido en cada plato, aunque aumentará la pérdida de carga a lo largo de la columna. En una columna de relleno sucede lo mismo. Un relleno mas compacto permite un mejor contacto pero aumenta la pérdida de carga.

**Altura de la columna:** Evidentemente, cuanto mayor sea el número de pisos mayor será la capacidad de separación de la columna. Un piso en el que se alcanza el equilibrio entre el líquido y el vapor se denomina **piso teórico**. En la realidad nunca se da este caso, pues el número de pisos reales para conseguir una separación es siempre mayor que el número de pisos teóricos. Se define una **eficacia de piso** que indica el grado de aproximación al equilibrio:

$$\text{Eficacia de piso} = \text{N}^\circ \text{ piso teóricos} / \text{N}^\circ \text{ pisos prácticos}$$

En columnas de relleno se define la **altura equivalente de un piso teórico (AEPT)** que indica la altura de relleno necesaria para conseguir la misma separación que un piso teórico:

$$\text{Altura equivalente piso teórico (AEPT)} = \text{Altura de la columna} / \text{N}^\circ \text{ pisos teóricos}$$



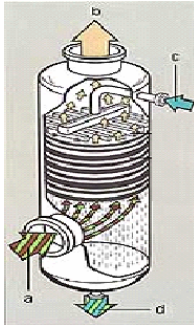
El proceso de absorción consiste en poner en contacto un gas con un líquido, o dos líquidos inmiscibles entre si, de forma que algún componente pase una fase (G) a la otra (L) aumentando su concentración en esta última ( $X_2 > X_1$ ) y disminuyendo en la primera ( $Y_2 < Y_1$ ).

En los sistemas de absorción/desorción, se crean en cada punto de los mismos situaciones de no-equilibrio debido a la diferencia de presión parcial de la sustancia a absorber entre las dos fases, de forma que este gradiente es el causante de la transferencia de masa desde una fase a la otra. La desorción o "stripping" es el proceso inverso, obteniéndose una transferencia de materia desde la corriente líquida a la gaseosa.

En el caso de que las dos fases en contacto sean líquidos, en vez de las presiones parciales la fuerza impulsora es el gradiente de concentraciones entre ellas.



$$K_p = \frac{P(A)_{\text{liquido}}}{P(A)_{\text{gas}}}$$



Columna de absorción/desorción

- a. Entrada de gas
- b. Salida de gas
- c. Entrada de líquido
- d. Salida de líquido



Torre de refrigeración

### a) Sistemas de absorción:

Son sistemas que normalmente funcionan mediante flujo continuo o semicontinuo, en función de que el aporte de líquido absorbente al sistema sea en continuo o por cargas. El gas se suministra al sistema siempre mediante un flujo continuo. En el caso de flujo continuo, el contacto entre las fases gas y líquido se realiza en contracorriente, de forma que se haga máximo el gradiente de presión parcial del compuesto a transferir a la salida del flujo de gas, con lo que se desplaza el equilibrio de absorción hacia el vapor absorbido.

Como  $K_p = P(A)_{\text{liquido}}/P(A)_{\text{gas}}$  y  $P(A)_{\text{liquido}} \ll P(A)_{\text{gas}}$ , dado que  $K_p$  solo depende de la temperatura, el equilibrio se desplazará hacia la derecha para compensar el alto valor de  $P(A)_{\text{gas}}$ .

Otra forma de clasificar los sistemas de absorción es en función de que exista reactividad o no entre la sustancia absorbida y el absorbente.

**b) Sistemas de acondicionamiento de gases:** Los sistemas de absorción/desorción son comúnmente empleados en procesos que implican una modificación de la cantidad de agua contenida en una corriente de aire, ya sea aumentándola (humidificación de gases) o disminuyéndola (secado de gases).



**Presión de vapor:** presión de saturación de una sustancia gaseosa en equilibrio con su líquido a una determinada temperatura

**Presión parcial:** presión que ejerce una determinada cantidad de sustancia gaseosa en un recipiente a una determinada temperatura.

**Humedad absoluta:** masa de vapor contenida en la unidad de masa del gas

$$H.A. = \frac{W_{\text{vapor}}}{(W_{\text{total}} - W_{\text{vapor}})}$$

**Humedad relativa:** razón entre la presión parcial del vapor contenido en el gas y la presión de vapor de esa sustancia a la temperatura del gas, expresada como porcentaje.

$$H.R.(%) = \frac{P(A)}{P_{\text{vapor}}(A)} \cdot 100$$

Para el cálculo de los balances de masa referidos a los procesos de acondicionamiento de gases, conviene tener en cuenta las siguientes definiciones:

- **Presión de vapor:** es la presión de saturación de una sustancia gaseosa en equilibrio con su líquido a una determinada temperatura
- **Presión parcial:** es la presión que ejerce una determinada cantidad de sustancia gaseosa en un recipiente a una determinada temperatura. Siempre ha de ser igual o inferior a la presión de vapor a esa misma temperatura, en caso contrario se dice que las condiciones son de sobresaturación, situación termodinámicamente inestable.
- **Humedad absoluta:** es la masa de vapor contenida en la unidad de masa del gas
- **Humedad relativa:** es la razón entre la presión parcial del vapor contenido en el gas y la presión de vapor de esa sustancia a la temperatura del gas, expresada como porcentaje.



**Gas saturado:** cuando la presión parcial coincide con la presión de vapor a esa temperatura. La humedad relativa será del 100% y la humedad absoluta se denomina humedad de saturación.

**Punto de rocío:** temperatura a la que hay que enfriar un gas para que la presión parcial iguale a la de saturación.

$$P(A)_T = P_{\text{vap}}(A)_{T_{\text{rocío}}}$$

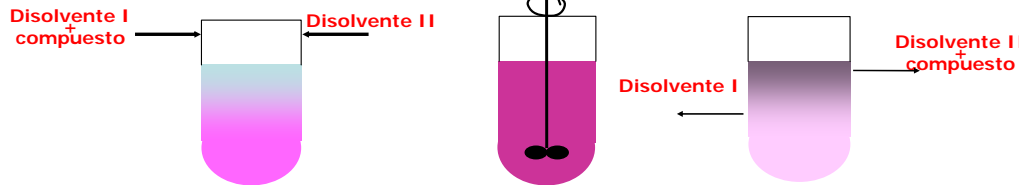
La relación entre la humedad relativa y la temperatura de rocío, viene dada por el cociente de la presión de vapor a la temperatura de rocío y la presión de vapor a la temperatura del gas.

$$H.R. = \frac{P(A)_T}{P_{\text{vap}}(A)_T} 100 = \frac{P_{\text{vap}}(A)_{T_{\text{rocío}}}}{P_{\text{vap}}(A)_T} 100$$

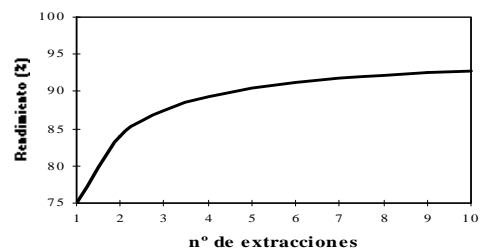
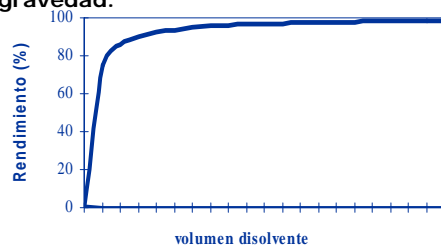
· **Gas saturado:** es aquel en el que la presión parcial de una sustancia coincide con la presión de vapor a esa temperatura. La humedad relativa será del 100% y la humedad absoluta se denomina humedad de saturación.

· **Punto de rocío:** temperatura a la que hay que enfriar un gas para que la presión parcial iguale a la de saturación.

La relación entre la humedad relativa y la temperatura de rocío, viene dada por el cociente de la presión de vapor a la temperatura de rocío y la presión de vapor a la temperatura del gas.



- ✦ Los dos disolventes deben ser inmiscibles entre si.
- ✦ El componente a separar debe ser más soluble en el disolvente con el que se va a realizar la extracción, que en el que se encuentra disuelto inicialmente.  
$$K_D = S_A(\text{DisII})/S_A(\text{Dis I}) = [A]_{\text{Disolvente II}}/[A]_{\text{Disolvente I}}$$
- ✦ Los dos disolventes deben poseer diferente densidad para separarse entre si por gravedad.

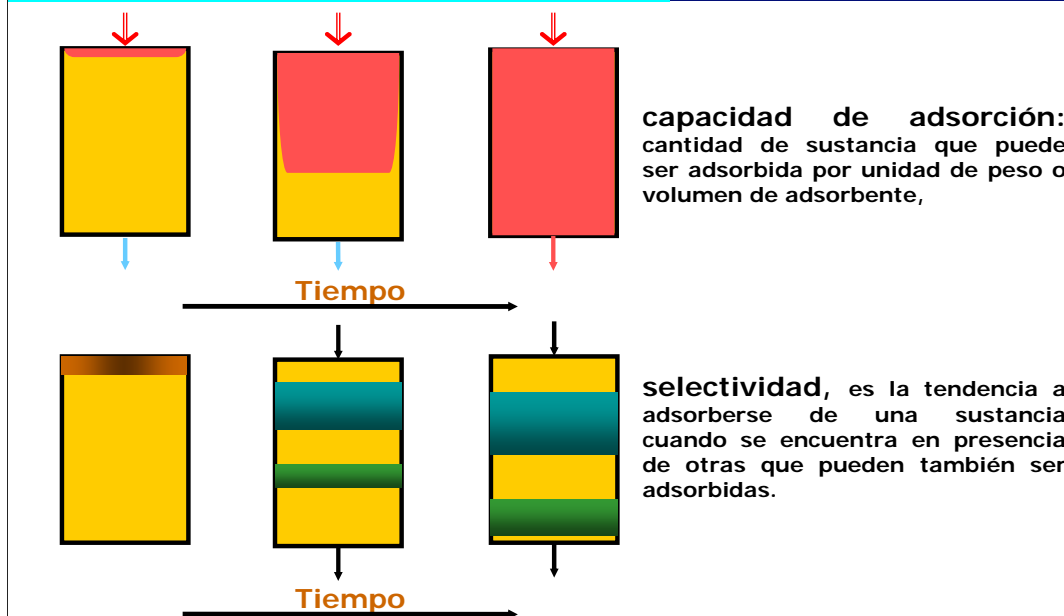


## EXTRACCIÓN:

Es la disolución de uno o más de los componentes de una disolución en otro disolvente distinto. Las condiciones para realizar un proceso de extracción son:

- ✓ que el componente a separar sea más soluble en el disolvente con el que se va a realizar la extracción, que en el que se encuentra disuelto inicialmente
- ✓ que los dos disolventes sean inmiscibles entre si
- ✓ que posean diferente densidad para poder separarse entre si por gravedad.

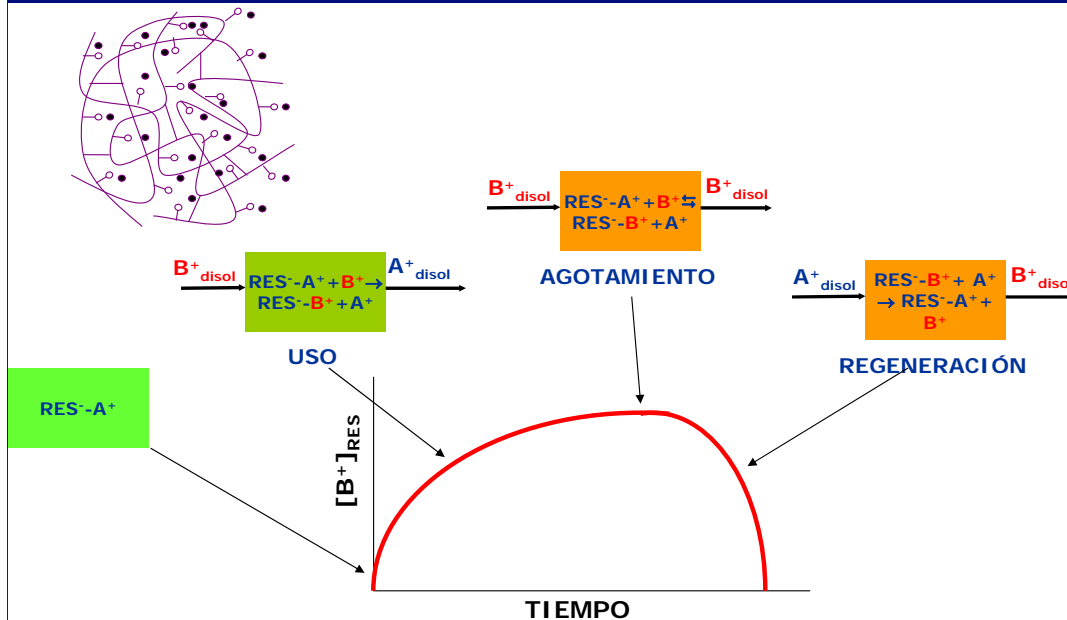
La proporción en que se disuelve en cada líquido la sustancia a extraer viene dada por el coeficiente de reparto  $K_D = S_A(\text{DisII})/S_A(\text{DisI}) = [A]_{\text{disolII}}/[A]_{\text{disolI}}$  la pareja de disolventes y de la temperatura a que se realice el proceso.



### ADSORCIÓN:

Es la eliminación de algunos componentes de una fase fluida mediante un sólido (carbón activo, arcilla, etc.) que los retiene en su superficie por medio de interacciones débiles (fisisorción) o fuertes (quimisorción). Se basa en diferentes etapas locales de equilibrio, de forma que la sustancia que tiene mayor tendencia a adsorberse tarda más en desplazarse a través del lecho de adsorbente, que la que se adsorbe menos, pudiendo incluso quedar retenida permanentemente en el sólido. Los adsorbentes quedan definidos por dos factores:

- ✓ capacidad de adsorción: cantidad de sustancia que puede ser adsorbida por unidad de peso o volumen de adsorbente,
- ✓ selectividad, es la mayor o menor tendencia a adsorberse de una sustancia cuando se encuentra en presencia de otras que pueden también ser adsorbidas



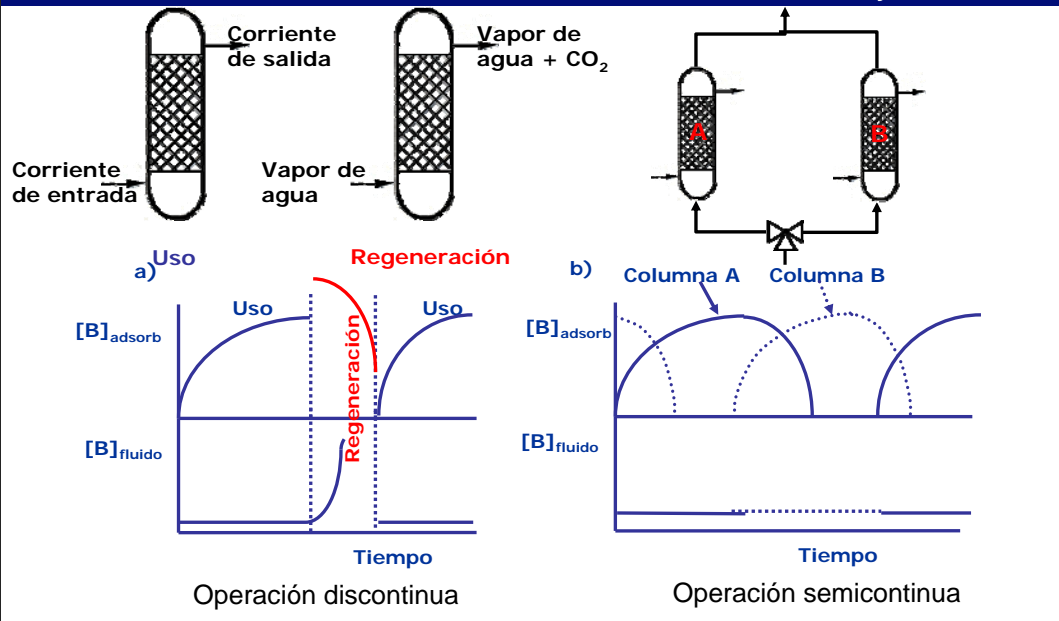
### INTERCAMBIO IÓNICO:

Se basa en la posibilidad de sustituir especies iónicas unidas por fuerzas electrostáticas a la red de un sólido de naturaleza orgánica (red polimérica) o inorgánica por otras del mismo signo presentes en un líquido que se hace discurrir a su través. De manera similar que los adsorbentes, los materiales cambiadores de iones quedan definidos por su capacidad de cambio (cantidad de ión monovalente que pueden intercambiar por unidad de masa o volumen) y por su selectividad.

Los procesos de cambio iónico están gobernados por la diferencia de concentración (transporte de masa) existente entre el material intercambiador y la disolución, de manera que se establece un flujo neto de materia desde el líquido hacia el sólido (sustancia adsorbida o intercambiada). Otra de las características comunes con los materiales adsorbentes es que los de cambio iónico una vez alcanzada la concentración dada por su capacidad de cambio (función de la constante de equilibrio del proceso) cesa el flujo neto de materia sólido/líquido y deben ser tratadas para su regeneración. El tratamiento de las columnas de cambio iónico agotadas se puede efectuar de dos maneras distintas:

- ✓ haciendo circular una disolución concentrada del contraión original a su través, de forma que se recupera un concentrado del ión de la disolución de partida,
- ✓ inertizando la columna de cambio iónico por combustión (resinas orgánicas) o vitrificación (resinas inorgánicas).





Los sistemas de adsorción e intercambio iónico funcionan de manera discontinua, de forma que un cierto caudal de fluido se hace pasar por una columna de adsorbente, quedando retenido el componente a separar en dicha columna. La concentración en el adsorbente aumenta con el tiempo, hasta alcanzar un valor máximo (saturación) dado por la capacidad de adsorción del adsorbente para esa sustancia. A medida que el adsorbente llega a su saturación, la eficiencia de la columna disminuye, aumentando la concentración en la corriente de salida. Una vez que la columna está saturada, se procede a su regeneración, recuperando la situación inicial. Para evitar los periodos de inactividad que representa la regeneración, las unidades de proceso suelen estar compuesto de dos columnas de regeneración montadas en paralelo, de forma que mientras una funciona la otra se esta regenerando, invirtiéndose la situación cuando la primera se satura, de esta forma el sistema funciona en régimen semicontinuo



Conducción es el proceso en el que la energía térmica se transfiere por colisiones moleculares adyacentes a través del medio material. El medio en sí no se mueve.



Convección es el proceso en el cual el calor se transfiere mediante el movimiento real de un fluido.



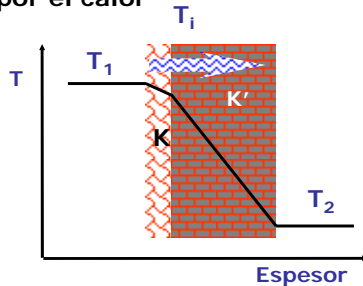
Radiación es el proceso por el cual el calor se transfiere en forma de ondas electromagnéticas.

Transferencia de calor, en física, es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura.

El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de una barra metálica fundamentalmente por conducción, al poner la mano sobre una fuente de calor la sensación de calor que percibimos es debida al aire caliente que asciende desde la fuente de calor por convección, y cuando nos colocamos a cierta distancia de una fuente de calor notamos el mismo por radiación.



**CONDUCCIÓN:** transmisión de calor ligada a la vibración de los átomos por el calor



$$q_x = \frac{Q}{A} = -K \frac{dT}{dx}$$

**LEY DE FOURIER**

Conductividad térmica de diversos materiales		
Compuesto	T <sup>a</sup> (K)	K (Watt.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Aire	273	0,024
Corcho	298	0,055
Fenilsilicona	373	0,144
PET	298	0,15
Poliéster	298	0,17
Rexinas epoxy	298	0,19
PVC	298	0,21
Arena silícica	373	0,26
Lana de vidrio	298	0,502
Agua	273	0,552
	298	0,606
	373	0,680
Vidrio "Pyrex"	373	1,254
Sílice vítrea	373	1,48
Ladrillo refractario	1000	1,52
Acero inoxidable	373	16,24
Acero dulce	373	38,70
Hierro (fundición)	373	52,2
Aluminio	373	205,32
Cobre	373	375,84

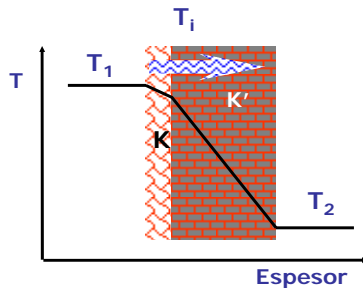
## TRANSFERENCIA DE CALOR.

En los sistemas que no existe reacción química ni transporte de carga eléctrica (trabajo eléctrico), las formas más comunes de transferencia de energía son el trabajo y el calor. Cuando la transferencia de energía se efectúa mediante trabajo, los sistemas suelen estar gobernados por la transferencia de cantidad de movimiento, y serán estudiados más adelante.

### Mecanismos de transferencia de calor.

Los procesos de transmisión de calor pueden efectuarse por uno o más de los mecanismos expuestos a continuación.

**a) Conducción:** Cuando entre dos partes de un sistema material, existe un gradiente de temperatura, se da una transmisión de calor desde el foco caliente hacia el frío, sin que haya transmisión macroscópica de materia, simplemente por transmisión de la energía cinética de las moléculas y/o electrones de la zona caliente (mayor energía cinética) hacia la zona fría (menor energía). La cantidad de energía térmica transferida en estado estacionario puede calcularse aplicando la ley de Fourier, siendo proporcional al gradiente de temperatura y a la conductividad térmica del material. En la tabla se recogen los valores medios de la conductividad térmica de alguno de los materiales más comúnmente utilizados como conductores y aislantes térmicos.



$$q_x = \frac{Q}{A} = -K \frac{dT}{dx}$$

plano  
cilindro

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{e}{K \cdot A}} = \frac{\Delta T}{R}$$

$$Q = \frac{2\pi L K \Delta T}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$\frac{\delta q_{zy}}{\delta x} = 0 \quad \text{No existe acumulación de calor: estado estacionario}$$

$$\Delta T_{\text{total}} = (T_1 - T_i) + (T_2 - T_i) = \Delta T + \Delta T' = Q \cdot R + Q \cdot R' = Q(R + R') = Q \cdot R_{\text{total}}$$

$$\frac{Q}{L} = \frac{K A_L (T_1 - T_2)}{(r_2 - r_1)}$$

$$Q = \frac{\Delta T_{\text{total}}}{R_{\text{total}}}$$

Dada una superficie plana infinita de un material de conductividad térmica  $K$ , cuyas superficies externas se encuentran sometidas a una diferencia de temperatura  $\Delta T$ , si tomamos una sección de área  $A$  y espesor  $e$ , el cálculo del flujo de calor por unidad de área, se determina aplicando la ley de Fourier al estado estacionario, de forma que la cantidad de calor,  $Q$ , transmitida por la misma, sería:  $q_x = Q/A = -K \cdot dT/dx$  reagrupando variables e integrando tenemos

$$dT = -(Q/K \cdot A) dx \Rightarrow Q = K \cdot A \cdot \Delta T / e$$

donde  $x_2 - x_1 = e$  y  $T_1 - T_2 = \Delta T$ . Redefiniendo ctes., tenemos  $Q = \Delta T / R$

denominándose  $e/(K \cdot A)$  como resistencia térmica de dicho material ( $R$ ).

Otra geometría muy común en sistemas que transmiten energía térmica, es la cilíndrica, en la cual se puede suponer que en condiciones estacionarias no se transmite calor más que en dirección radial. Si tomamos una longitud  $L$  de un cilindro infinito de radio interior  $r_1$  y radio exterior  $r_2$ , al aplicar la ley de Fourier en coordenadas cilíndricas, tenemos:  $q = Q/(2\pi r L) = -K \cdot dT/dr$

reagrupando variables, e integrando entre los valores a un lado y otro de la pared del cilindro  $Q/L = [2\pi K (T_1 - T_2) / \ln(r_2/r_1)]$  expresión similar a la obtenida para una placa plana e infinita

En el caso de que la transmisión de calor se efectúe a través de una pared formada por láminas de distinta naturaleza, considerando las temperaturas que se alcanzan en las interfases de dichos materiales ( $T_i$ ) y que el flujo de calor es el mismo en todas las secciones (proceso estacionario) tendremos:

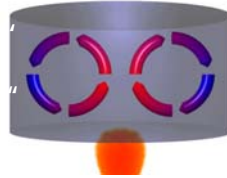
$$\Delta T_{\text{Total}} = (T_1 - T_i) + (T_2 - T_i) = \Delta T + \Delta T' = Q \cdot R + Q \cdot R' = Q(R + R') = Q \cdot R_{\text{total}} \quad Q = \Delta T_{\text{total}} / R_{\text{total}}$$



**CONVECCIÓN:** transmisión de calor ligado al movimiento de masa en el interior de un fluido

◆ Natural

$$q' \propto c_p \cdot \Delta T$$

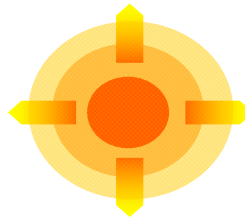


$$\rho' \geq \rho''$$

◆ Forzada: Agitación y movimiento de fluidos, son operaciones de transferencia de cantidad de movimiento.

**RADIACIÓN:** transmisión de calor ligada a ondas electromagnéticas que se desplazan por el espacio

$$q_1 \propto q_2 \left( r_2 / r_1 \right)^2$$



$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$A_1 < A_2 < A_3$$

**Convección:** Es el proceso de transmisión de calor ligado al movimiento de masa en el interior de un fluido, y puede ser:

✓ Natural: cuando viene motivada por el movimiento ascensional causado por la diferencia de densidad entre regiones calientes del fluido (generalmente menos densas) y regiones frías.

✓ Forzada: cuando el movimiento del fluido viene inducido por algún agente de impulsión externo (agitación, bombes, etc.)

**Radiación:** Es la forma de transmisión del calor ligada a ondas electromagnéticas que se desplazan por el espacio, de forma que cuando son absorbidas por algún cuerpo, provocan un aumento de la temperatura de este. Al producirse en todas las direcciones del espacio la atenuación de la cantidad de calor por unidad de superficie es una función del cuadrado de la distancia a la fuente de radiación.



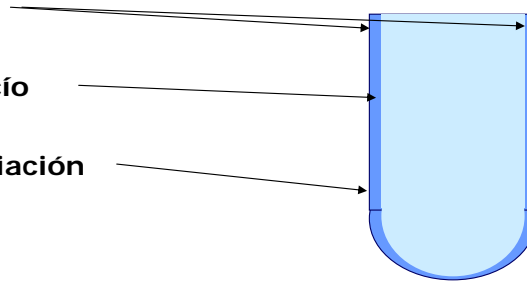
OPERACIÓN	MECANISMO		
	CONDUCCIÓN	CONVECCIÓN	RADIACIÓN
Aislamiento térmico	Aislantes refractarios Camisas de vacío		Espejos de radiación
Calefacción ó refrigeración de fluidos	Intercambiadores Placas solares		Hornos
Evaporación/condensación	Evaporadores/ condensadores		

**AISLAMIENTO TÉRMICO:**

➤refractarios

➤camisas de vacío

➤espejos de radiación



Los procesos de transferencia de calor pueden basarse en uno o más de los mecanismos de transferencia antes estudiados, como se resume en la tabla.

**Aislamiento térmico:** tiene por objeto evitar la transferencia de calor desde regiones del sistema que se encuentren a alta temperatura a otras a baja temperatura. Uno de los casos más complejos de este tipo de sistemas es lo que se conoce como vasos termo o Dewar que utiliza los tres tipos de efectos.

✓ **Aislantes refractarios:** son sistemas en los cuales se introduce una sustancia de baja conductividad térmica, de forma que se crea una barrera a los fenómenos de transmisión por conducción. Los aislantes térmicos suelen ser materiales cerámicos o plásticos, a los cuales en muchos casos se les favorece la formación de microcavidades internas llenas de gas, con lo que se mejora el efecto de aislamiento. En los Dewar hace las funciones de refractario el recipiente de doble pared de vidrio ( $K = 1,254 \text{ Watt} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

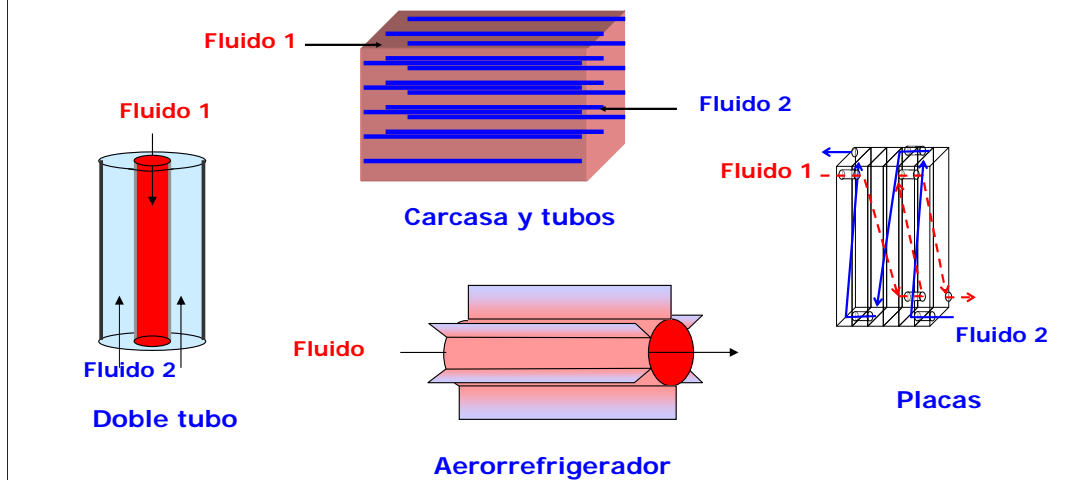
✓ **Camisas de vacío:** son regiones del sistema donde se efectúa vacío con objeto de que al no haber un medio material se impide la transmisión de calor tanto por conducción como por convección. En los Dewar se obtiene este efecto haciendo vacío entre las dos paredes de vidrio del recipiente.

✓ **Espejos de radiación:** son superficies reflectantes a la radiación infrarroja, de forma que devuelven la energía calorífica que les llega en forma de radiación. En los vasos termo esta función la realiza el recubrimiento de espejo que se efectúa en la pared exterior de vidrio.



## Calefacción o refrigeración de fluidos:

### • Intercambiadores de calor



**Calefacción o refrigeración de fluidos:** Tiene por objeto aumentar (calefacción) o disminuir (refrigeración) la temperatura de un sistema fluido. Se puede realizar mediante:

✓ **Intercambiadores de calor:** Son sistemas por los que se pone en contacto térmico dos fluidos separados por una pared permeable al calor (alto valor de conductividad térmica), pero que no permite el paso de ninguno de los dos fluidos. Pueden ser:

▪ **De doble tubo:** los fluidos circulan por tubos concéntricos, generalmente en contracorriente, de forma que el tubo interior hace de pared de intercambio.

▪ **De carcasa y tubos:** dentro de un baño de un fluido se encuentran sumergidos los tubos por los que circula el segundo fluido.

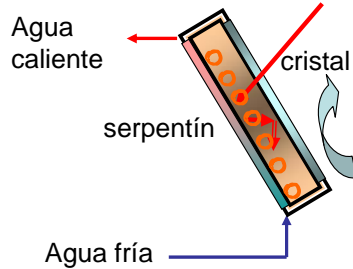
▪ **De placas:** por un sistema de placas rugosas apiladas, unidas entre si de forma alterna (las pares formando un circuito y las impares otro), se hace circular un fluido por cada sistema de placas. Suelen trabajar en contracorriente.

▪ **Aerorrefrigeradores:** el fluido a acondicionar térmicamente se hace circular por un sistema tubular constituido por un material de alta conductividad térmica al que se le aumenta la superficie de contacto con la atmósfera, transmitiendo este el calor a la atmósfera, de donde se disipa por convección natural o forzada.



## Calefacción o refrigeración de fluidos:

### ➤ Placas solares



- Absorción radiación solar (RADIACIÓN)
- Calentamiento aire recinto (cristal opaco a la RADIACIÓN IR, efecto invernadero)
- Calentamiento agua serpentín (CONVECCIÓN-CONDUCCIÓN)
- Pérdidas: CONDUCCIÓN (cristal y soportes), CONVECCIÓN (aire exterior).

### ➤ Hornos



**Placas solares:** Son sistemas en los cuales se calienta (enfría) una superficie, de forma que esta transmite el calor (absorbe el calor) por conducción.

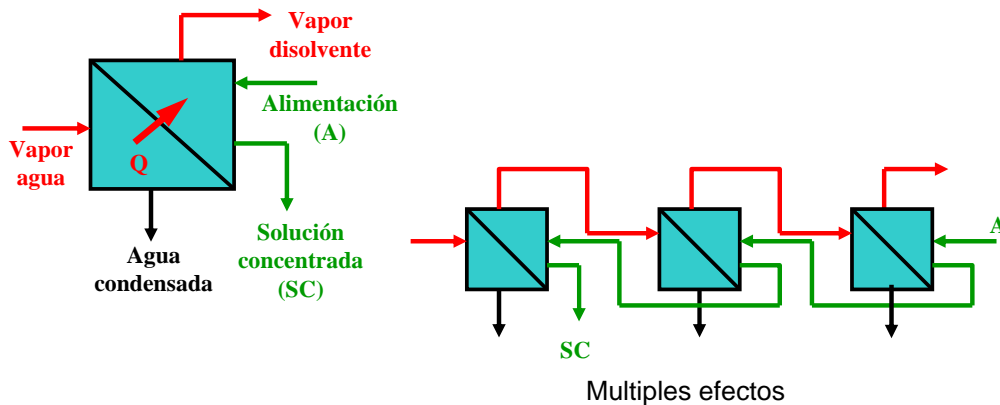
**Hornos:** Son sistemas en los que existe algún elemento (paredes, serpentín, etc.) que se calienta mediante combustión, corriente eléctrica o un fluido, y por radiación transmiten al resto del sistema.





## Calefacción o refrigeración de fluidos:

Evaporación/condensación: concentración de una disolución obteniéndose vapor del disolvente/condensación de un vapor mediante un líquido frío.

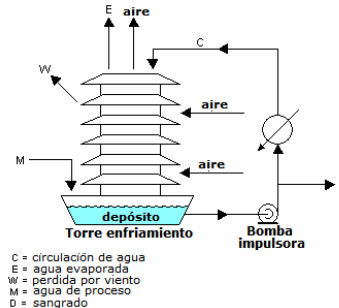
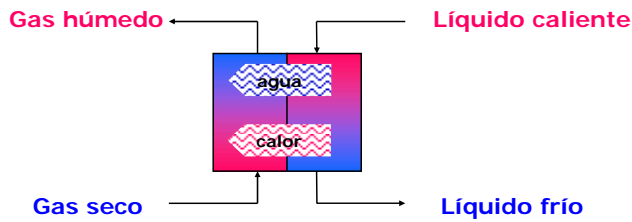


**Evaporación/condensación:** Son sistemas en los que la transmisión de calor se efectúa provocando un cambio de fase (evaporación o condensación) de forma que la variación de entalpía de dicho cambio es la que hace variar la temperatura del sistema. Se emplean en sistemas en los que uno de los componentes (disolvente) tiene una alta presión de vapor con respecto al otro (soluta), de forma que los vapores que se recogen son exclusivamente del componente volátil. Los evaporadores, funcionan conceptualmente igual que los destiladores simples, aunque generalmente se colocan varios evaporadores en serie para recuperar el calor latente del vapor formado, de forma que sirva para calentar la disolución a evaporar en una etapa posterior.



## CONTACTO GAS-LÍQUIDO:

### ➤ Torres de refrigeración



## TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA.

Son operaciones en las que se produce un contacto entre fases, realizándose transporte de materia y energía entre ambas fases, dicho transporte puede ser en la misma dirección o en direcciones opuestas.

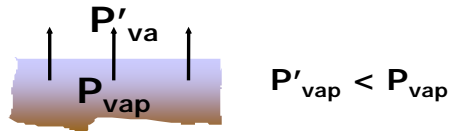
### Operaciones de Contacto Gas-líquido.

Están muy relacionadas con los procesos de absorción/desorción, con la diferencia de que este tipo de operaciones unitarias son controladas por el gradiente de concentración y el de temperatura simultáneamente.

**Torres de refrigeración:** Son sistemas por los que una corriente de un líquido caliente, generalmente proveniente de un proceso de refrigeración, se pone en contacto con una corriente de gas frío y no saturado en el vapor del líquido a refrigerar, de forma que existe una transferencia de vapor desde la corriente de líquido caliente al gas, similar al del proceso de humidificación, realizándose simultáneamente transferencia de masa y de calor. Son operaciones heterofásicas, de forma que el contacto entre fases suele ser continuo y en contracorriente. Para mejorar el contacto entre fases, el líquido suele ser pulverizado en forma de "lluvia", pudiendo pasar parte del mismo a la corriente de gas. Este tipo de sistemas es ampliamente utilizado en los sistemas de climatización de edificios, centrales térmicas, etc.



## ➤ Secado



$$P_{vap} \uparrow \Rightarrow T^a \uparrow$$

$$P'_{vap} \downarrow \Rightarrow \text{vacío, corriente de gas seco}$$

$$S_{\text{sólido-gas}} \uparrow \Rightarrow \text{disminución de tamaño de partícula, extensión sobre bandejas, ...}$$



**Secado:** Es el proceso por el cual el líquido retenido por un sólido es eliminado del mismo por contacto con una corriente de gas caliente no saturado en dicho líquido. La transferencia de masa se realiza en contra del gradiente de presiones existente entre el líquido embebido en el sólido a secar ( $P_{vap}$ ) y la presión parcial del vapor en la atmósfera circundante a la superficie de dicho sólido ( $P'_{vap}$ ). Teniendo en cuenta que ( $P_{vap}$ ) es función creciente de la temperatura del sistema, el empleo de una corriente de gas caliente aumenta el grado de secado y la velocidad del mismo. Otra forma complementaria de acelerar el proceso de secado y el rendimiento del mismo, es disminuyendo  $P'_{vap}$  haciendo vacío (secado a vacío) o, más comúnmente, evacuando el vapor de las inmediaciones del sólido por medio de una corriente gaseosa. El tercer factor a controlar para un aumento de la velocidad del proceso es hacer que la superficie sólido-gas aumente, lo cual se consigue disminuyendo el tamaño de partícula del sólido. La transferencia de energía térmica se da por dos vías: i) por transmisión/convección desde las zonas calientes a las frías del sistema, ii) como calor absorbido por el vapor debido al fenómeno de evaporación (endotérmico). El secado es una operación heterofásica, generalmente de carácter semicontinuo, donde se hace circular una corriente continua de gas caliente no saturado en el vapor a eliminar, a través del lecho fijo o fluidificado (ver §2.4.2) del sólido a secar.



## CONTACTO SÓLIDO-LÍQUIDO

### ➤ Solubilidad

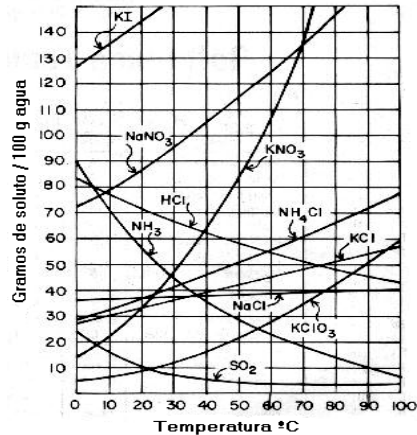
$$\ln \frac{S_1}{S_2} = \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \Rightarrow T_1 < T_2 \Rightarrow \frac{1}{T_1} > \frac{1}{T_2} \Rightarrow \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) < 0$$

✓ Si endotérmica  $\Delta H > 0 \Rightarrow \ln \frac{S_1}{S_2} < 0$

$S_1 < S_2$ , la solubilidad aumenta con  $T^a$

✓ Si exotérmica  $\Delta H < 0 \Rightarrow \ln \frac{S_1}{S_2} > 0$

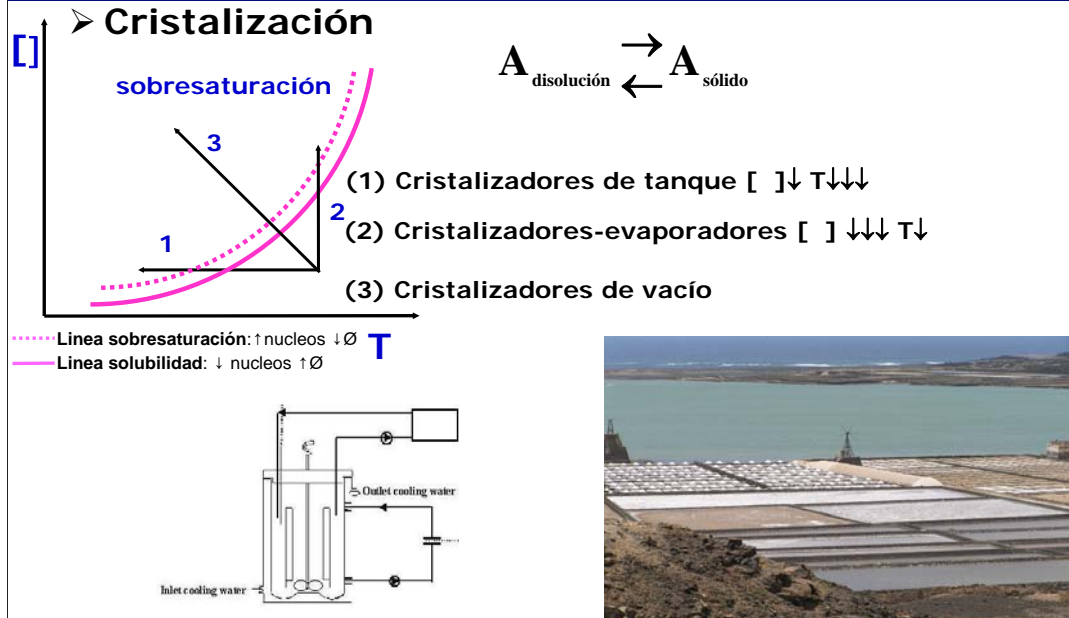
$S_1 > S_2$ , la solubilidad disminuye con  $T^a$



### OPERACIONES DE CONTACTO SÓLIDO-LÍQUIDO:

• **Solubilidad:** Al poner en contacto un soluto con un disolvente se establece una serie de interacciones entre las partículas de soluto y las del disolvente, fruto de estas interacciones es el paso de parte de las moléculas de soluto a la disolución, estableciéndose un equilibrio

Como todo equilibrio, queda definido por una constante característica del proceso y de la temperatura que denominamos solubilidad, o cantidad máxima de un soluto que puede estar en disolución en un disolvente dado a una determinada temperatura. La mayor parte de las sustancias aumentan su solubilidad con la temperatura (proceso endotérmico), pero algunas la disminuyen (proceso exotérmico)



**Cristalización:** se basa en llevar una disolución a condiciones tales de concentración y temperatura que el compuesto disuelto ( $A$ ) supere las condiciones de solubilidad ( $S_A$ ), dando lugar a una disolución sobresaturada, que espontáneamente evoluciona hasta alcanzar las condiciones de equilibrio, segregando el exceso de sustancia disuelta en forma sólida

**Tipos de cristalización:** para producir la cristalización de un compuesto  $A$  a partir de una disolución del mismo en unas determinadas condiciones de concentración y temperatura, podemos actuar de dos maneras diferentes:

modificando la temperatura del sistema.

aumentando la concentración del soluto  $A$  en la disolución

**Tipos de cristalizadores:**

**Cristalizadores de tanque:** son depósitos termostatzados, donde al variar la temperatura del sistema disminuye la solubilidad del compuesto que se quiere cristalizar.

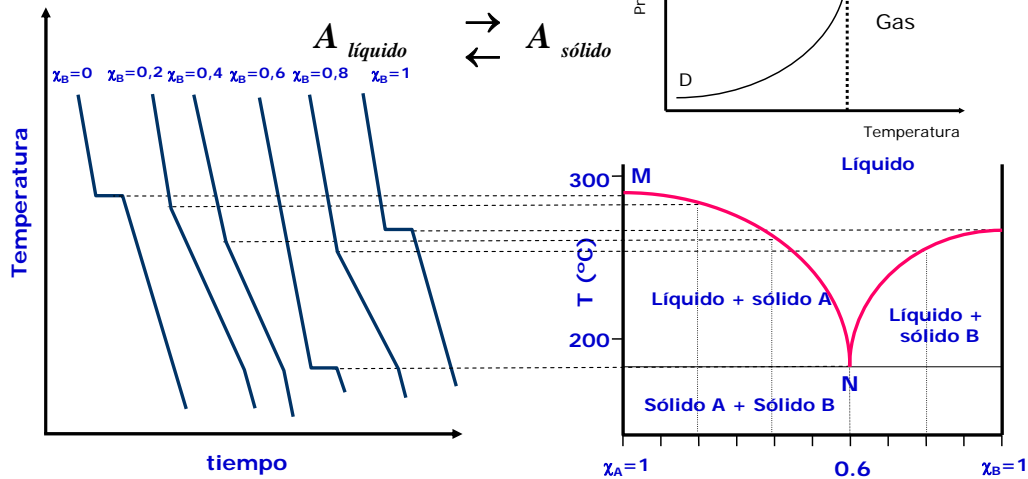
**Cristalizadores evaporadores:** son balsas de gran tamaño donde se produce la evaporación de parte del disolvente mediante calefacción (solar o por aire caliente), aumentando la concentración de soluto y con ello su cristalización

**Cristalizadores de vacío:** son recipientes cerrados donde al efectuar vacío, se provoca la evaporación de parte del disolvente y con ello la insolubilización del soluto.



## CONTACTO SÓLIDO-LÍQUIDO:

### ➤ Solidificación

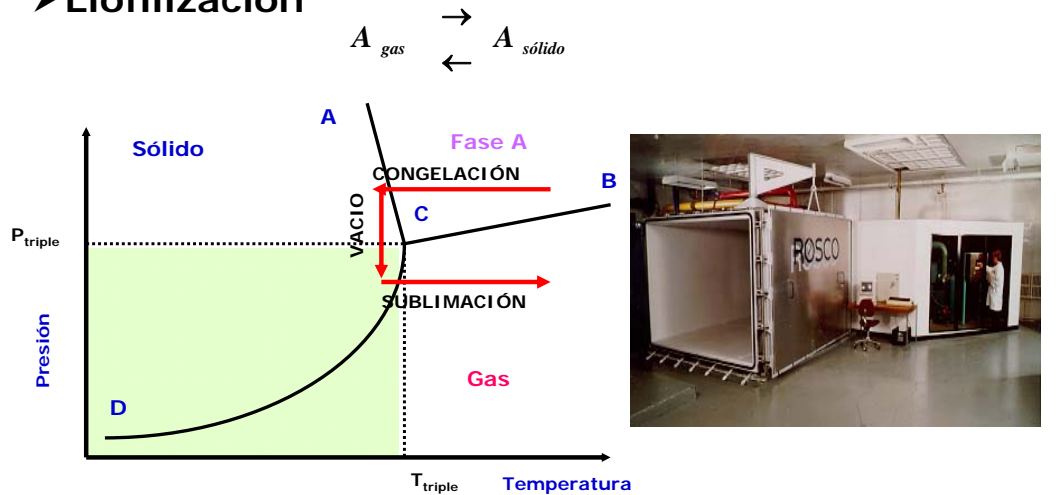


La solidificación es el proceso por el cual una sustancia en estado líquido, pasa a estado sólido. Cuando se realiza el proceso con una sustancia pura la transformación tiene lugar a temperatura fija para una misma presión (temperatura o punto de solidificación), por el contrario cuando la solidificación involucra a una mezcla de sustancias la temperatura puede no ser fija, sino variar entre ciertos límites en función de la composición relativa del sistema.



## CONTACTO GAS-SÓLIDO:

### ➤ Liofilización



La liofilización es el proceso por el cual una sustancia sólida pasa directamente a estado vapor. Este proceso es posible siempre que el sistema se encuentre a presiones inferiores a las del punto triple de coexistencia sólido-vapor-fase condensada.

Las instalaciones donde se realiza esta operación son cámaras cerradas y refrigeradas donde se somete al material a liofilizar a un proceso de congelación y posterior vacío.

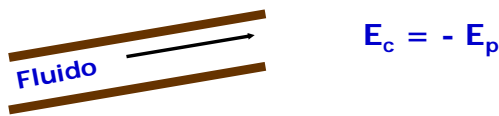


## CIRCULACIÓN INTERNA DE FLUIDOS:

### ➤ Transformación de energía cinética en calor:



### ➤ Transformación de energía cinética en energía potencial:



### Sistemas de impulsión y control

- Conducciones
- Bombas y compresores
- Válvulas

La transferencia de cantidad de movimiento se da en aquellos sistemas en que una parte del mismo se desplaza con respecto a otra o a las paredes del recipiente.

## CIRCULACIÓN INTERNA DE FLUIDOS:

Cuando un fluido (gas, líquido o polvo finamente dividido) se desplaza por el interior de una instalación, parte de su energía cinética se transforma en calor debido a los fenómenos de rozamiento. Este efecto se ve acrecentado cuando en la instalación se producen estrechamientos, codos, rugosidades, etc. que perturban el movimiento o cuando se favorece el régimen turbulento del fluido (alta velocidad, diámetros estrechos, etc.)

Otra causa de modificación en la energía cinética de un fluido es la diferencia de altura, que provoca una transformación de energía cinética en potencial o viceversa.

Los sistemas de desplazamiento de fluidos incluyen:

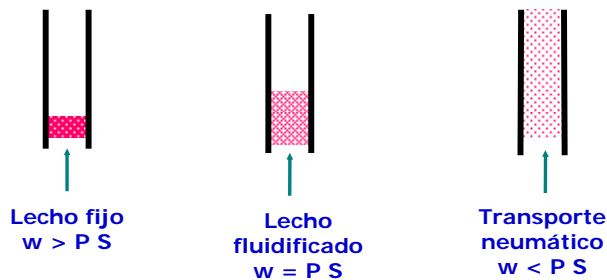
- ✓ Conducciones: son sistemas abiertos (canales) o cerrados (tuberías) por cuyo interior se desplazan los fluidos.
- ✓ Bombas y compresores: para contrarrestar estos efectos antes descritos es necesario aportar al sistema energía cinética suplementaria mediante sistemas de impulsión que pueden ser bombas (líquidos) o compresores (gases).
- ✓ Válvulas: son los sistemas que sirven para controlar el flujo de fluido permitiendo el paso de mayor o menor cantidad del mismo.





## CIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE UN LECHO SÓLIDO:

### ➤ Fluidización y transporte neumático:



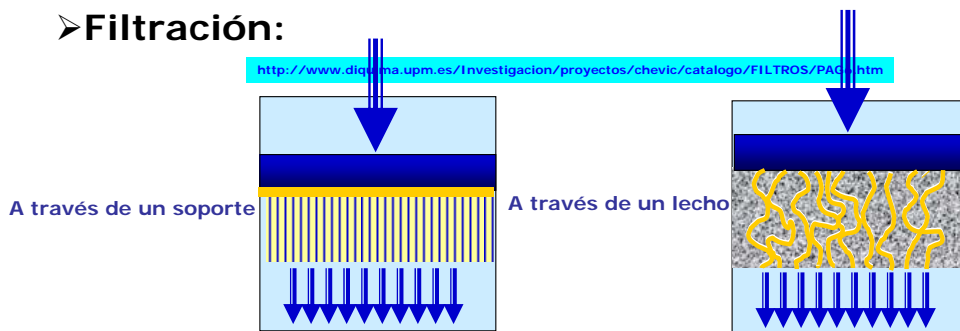
## CIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE UN LECHO SÓLIDO

poroso puede presentar tres situaciones:

- ✓ El peso del lecho sea mayor que la fuerza ejercida por el fluido ( $w > P \cdot S$ ), en cuyo caso el fluido atravesará dicho lecho poroso sin desplazarlo.
- ✓ El peso del lecho sea igual que la fuerza ejercida por el fluido ( $w = P \cdot S$ ), en cuyo caso solo podrá haber desplazamiento relativo de unas partes del lecho con respecto a otras (lecho fluidificado).
- ✓ El peso del lecho sea menor que la fuerza ejercida por el fluido ( $w < P \cdot S$ ), en cuyo caso se da un desplazamiento global del lecho con respecto a su posición original (transporte neumático)



### ➤ Filtración:



**Filtración:** Es el proceso de separación sólido-fluido por diferencia de tamaño, mediante la retención de partículas de dimensiones superiores a las dadas por la luz de la malla filtrante. La filtración se efectúa superficialmente, actuando el material filtrante como tamiz, y por aumento del espesor de la torta de filtración (lecho filtrante). Los parámetros a determinar son la velocidad de filtración y la calidad del filtrado obtenido, los cuales dependen de la temperatura, presión de filtrado, viscosidad del medio, material filtrante y características del sólido a filtrar y de la torta formada. Los sistemas de filtración presentan problemas de pérdida de caudal a medida que aumenta el espesor de la torta (atascamiento), este efecto se ve atenuado mediante el lavado en contracorriente y por la introducción de precapas entre el material filtrante y la torta.

Los filtros pueden actuar de dos formas diferentes:

- ✓ Filtración a través de un soporte: el material filtrante retiene las partículas en el exterior del mismo (cartuchos, bastidores, microtamizado, filtro prensa, discos, ...)
- ✓ Filtración a través de un lecho: el material filtrante retiene las partículas en su interior (arena, tierra de diatomeas, antracita, ...).

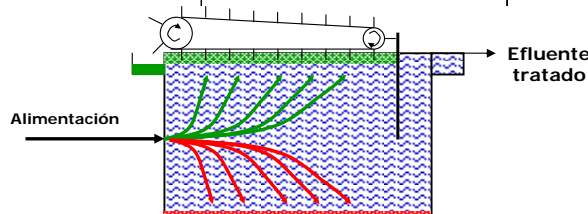


CIRCULACIÓN DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS EN EL SENO DE UN FLUIDO:

➤ **Sedimentación y flotación: operaciones S-L basadas en la diferencia de densidades**

Diferencias y similitudes de los procesos de sedimentación y flotación.

	SEDIMENTACIÓN	FLOTACIÓN
Densidad relativa ( $\rho_{\text{dispersa}} / \rho_{\text{cont}}$ )	> 1	< 1
Recogida fase dispersa	Zona inferior	Zona superior
Aparataje	Decantadores, espesadores	balsas de flotación
Forzada	Coagulación/floculación	aeración/espumantes



**MOVIMIENTO DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS EN EL SENO DE UN FLUIDO.**

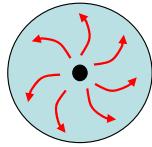
**Sedimentación:** La sedimentación se basa en la separación por densidad en el caso en que la fase continua (agua) es menos densa que la dispersa (sólidos en suspensión). Las partículas a sedimentar pueden encontrarse formando un sistema en equilibrio por interacciones electrostáticas entre ellas y con el medio (sistema coloidal), de forma que será necesario romper este equilibrio, aumentando la concentración de cargas en la disolución por adición de iones polivalentes (coagulantes). Complementariamente a este proceso de coagulación, es generalmente necesario provocar la unión de partículas, para favorecer el proceso de sedimentación floculante, lográndose este efecto por adición de polielectrolitos (floculantes).

Los sedimentadores, son balsas en las que se ralentiza el flujo del agua de manera que el tiempo de permanencia en las mismas, o tiempo de retención, sea el necesario para que se depositen en el fondo los sólidos en suspensión. Las unidades de proceso donde se realiza la sedimentación se denominan decantadores y espesadores.

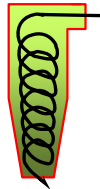
**Flotación:** La flotación es un proceso de separación basada en la diferencia de densidad de la fase continua (mayor densidad) y la dispersa (menor densidad). La unidad de proceso donde se efectúa la flotación se denomina balsas de flotación y consiste en un tanque de dimensiones tales que el agua tenga un tiempo de residencia suficientemente grande para que las partículas de menor densidad que el fluido asciendan hasta la superficie del mismo.



- ✗ **Centrifugación y ciclonado:** Separación de una fase dispersa (sólido o líquido) de una fase continua (líquido o gas) de densidades diferentes, basadas en un sistema mecánico o neumático de rotación.



Centrifugación

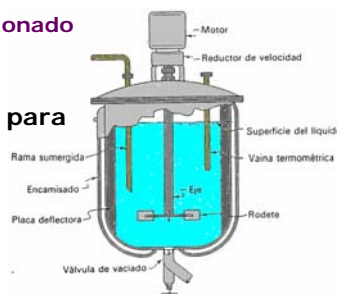


Ciclonado

<http://www.diquima.upm.es/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/CICLONES/PAG8.htm>

- ✗ **Agitación y mezcla:**

**Sistemas mecánicos utilizados para homogeneizar fases fluidas.**



**Centrifugación y ciclonado.** Son métodos de separación de una fase dispersa (sólido o líquido) de una fase continua (líquido o gas) de densidades diferentes, basadas en un sistema mecánico de rotación (centrifugación) o neumático (ciclonado).

**La agitación y mezcla** son sistemas mecánicos o neumáticos utilizados para homogeneizar fases fluidas.

Los objetivos de **mezclado** son:

1. Producir **mezclas físicas simples** donde no se efectúen reacciones ni cambios en el tamaño de partícula.
2. Efectuar cambios físicos:
  - **disolución de compuestos.**
  - **formación de cristales.**
3. Llevan a cabo una **dispersión** en aquellos casos en que se va a fabricar un producto de apariencia homogénea.
4. **Promover una reacción**, es el uso más importante.

**Tipos de mezcladores:**

**a) Mezclador de flujo:** se usa en los sistemas continuos, el mezcla se produce por interferencia en el flujo.

**b) Mezcladores de paletas o brazos:** incluyen un gran número de tipos según las paletas utilizadas. El flujo se produce hacia las paredes del tanque. Se utiliza para fluidos viscosos.

**c) Mezcladores de hélice:** utilizan dos hélice con las paletas dispuestas para que propulsen el fluido en direcciones opuestas. Fluidos poco viscosos.

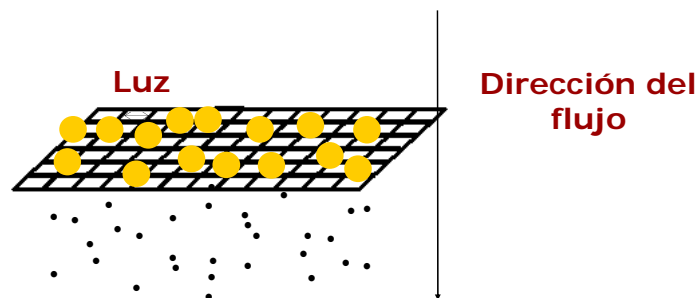
**d) Mezcladores de turbina:** los materiales son sumergidos en el fluido con el que va a mezclarse. Giran a velocidades moderadas y altas. Fluidos con viscosidad intermedia.



➤ **Trituración y molienda:** acondicionado al tamaño adecuado. Reducción del tamaño sometiendo al material a esfuerzos de compresión, impacto, cortado, cizalladura y fricción.

- ✓ Quebrantado:  $60 \text{ mm} > \phi > 30 \text{ mm}$ .
- ✓ Triturado:  $\phi > 1 \text{ mm}$ .
- ✓ Molido:  $0,42 \text{ mm} > \phi > 0,074 \text{ mm}$  (35 y 200 mallas).
- ✓ Maquinas de corte: dimensiones fijas.

➤ **Cribado y tamizado:** separación de sólidos en función de su tamaño.



**REDUCCIÓN DE TAMAÑO:** Consiste en cortar o romper partículas sólidas en piezas más pequeñas. Formas de romper un sólido en los equipos de reducción de tamaño:

1. **Compresión:** reducción gruesa, sólidos duros, da lugar a sólidos poco finos.
2. **Impacto:** genera productos gruesos medios y finos.
3. **Fricción o rozamiento:** da lugar a productos muy finos a partir de materiales blandos.
4. **Cizalladura o corte:** da lugar a un tamaño definido de partícula.

#### Equipos utilizados

**A. Quebrantadores:** maquinas de baja velocidad para la reducción gruesa de grandes cantidades de sólidos.

**B. Trituradores:** El producto procedente del quebrantador se introduce en el molino y se reduce a partículas finas ( $\phi > 1 \text{ mm}$ ).

**C. Molinos:** Reducen sólidos hasta partículas finas (polvo) con un tamaño comprendido entre 0,42 y 0,074 mm.

**D. Maquinas de corte:** Se utilizan cuando se quieren conseguir dimensiones fijas o para materiales demasiado tenaces o elásticos.

**CRIBADO Y TAMIZADO:** separación de sólidos de diferentes tamaños por medio de un medio material discontinuo o malla que se caracteriza por las dimensiones de la discontinuidad o luz.



	<b>SÓLIDO-FLUIDO</b>	<b>SÓLIDO-SÓLIDO</b>	<b>FLUIDO-FLUIDO</b>
<b>SEPARACIÓN MECÁNICA</b>	Sedimentación Flotación Filtración Centrifugación Colección polvos	Manual Cribado Separación magnética	Decantación Flotación
<b>SEPARACIÓN MOLECULAR</b>	Secado Adsorción Intercambio iónico Cristalización	Extracción con disolventes (lixiviación)	Evaporación Destilación Adsorción/desorción Extracción con disolventes Membranas

Los procesos de separación pueden ser a escala macro y microscópica (operaciones de separación mecánica) o molecular. En ambos casos sirven para separar un sólido de un fluido, dos sólidos entre si o dos fluidos entre sí.



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

Operaciones básicas de preparación de reactivos y separación de productos  
**CUADRO RESUMEN OPERACIONES BÁSICAS**  
(transferencia de materia)

A.Aznar y J.C.Cabanelas

Operación	Contacto	Ejemplos
DESTILACIÓN	$L \leftrightarrow G$	Fraccionamiento del petróleo
ABSORCIÓN/ DESORCIÓN	$G \Rightarrow L$ $L \Rightarrow G$	Eliminación $CO_2$ en la síntesis $NH_3$ Eliminación de disolventes orgánicos en el agua
EXTRACCIÓN	$S \Rightarrow L$ (lixiviación) $S \Rightarrow L$ (lavado) $L \Rightarrow L$	Obtención extractos vegetales, extracción de grasas animales y vegetales, obtención metales Lavado de la ropa Separación de asfaltos del petróleo
ADSORCIÓN/ DESORCIÓN	$L \Rightarrow S, G \Rightarrow S$ $S \Rightarrow L, S \Rightarrow G$	Eliminación de olores con carbón activo, secado de gases
INTERCAMBIO IÓNICO	$L \leftrightarrow S$	Desmineralización del agua



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

Operaciones básicas de preparación de reactivos y separación de productos  
**CUADRO RESUMEN OPERACIONES BÁSICAS**  
(transferencia de materia/energía)

A.Aznar y J.C.Cabanelas

Operación	Contacto	Ejemplo
INTERCAMBIADORES CALOR	L,G (placas, tubos...) L,S,G (Hornos)	Refrigeración y calefacción de fluidos, reactores... Cocción cerámicas y porcelanas
EVAPORADORES/ CONDENSADORES	$L \Rightarrow G$	Concentrado de la leche, obtención de agua potable en plantas desalinizadoras
TORRES REFRIGERACIÓN HUMIDIFICACIÓN DESHUMIDIFICACIÓN (ACONDICIONAMIENTO GASES)	$L + \text{calor} \Rightarrow G$ $L + \text{calor} \Rightarrow G$ $G + \text{calor} \Rightarrow L$	Refrigeración circuito agua en centrales térmicas Aire acondicionado
CRISTALIZACIÓN	$L + \text{calor} \Rightarrow S$	Purificación antibióticos de síntesis
SECADO	$S + \text{calor} \Rightarrow G$	Compactación fangos en estaciones depuradoras
LIOFILIZACIÓN	$S + \text{calor} \Rightarrow G$	Obtención café soluble