

# Tema 3:

## Las operaciones unitarias

Ingeniería Química

Máster en Ingeniería Industrial

# 3.1 Fundamentos y clasificación de las operaciones unitarias

Cuando se modifican las condiciones de un sistema puede comprobarse experimentalmente que se produce la **variación** de una o varias de las siguientes **propiedades extensivas**:

- Materia (masa o composición)
- Energía (cantidad o calidad)
- Movimiento (velocidad o dirección)

Esta afirmación tiene su expresión matemática en las **leyes de conservación de las propiedades extensivas**:

- Conservación de la materia
- Conservación de la energía
- Conservación del momento o de la cantidad de movimiento



**Ecuaciones de conservación o balance**

$$E + G = C + S + A$$

**E:** velocidad de entrada de propiedad al sistema

**G:** Velocidad de generación de propiedad en el interior del sistema

**S:** Velocidad de salida de propiedad del sistema

**A:** Velocidad de acumulación de propiedad en el interior del sistema

**C:** Velocidad de consumo

Cualquiera de las **operaciones básicas** tiene por objeto modificar las condiciones de una determinada cantidad de materia para adecuarla a nuestros fines.

Para que se produzca esta modificación en los valores de las variables del sistema ha de tener lugar el **transporte de alguna de las 3 propiedades extensivas** que se conservan: materia, energía o cantidad de movimiento

En la mayor parte de las operaciones básicas tiene lugar una transferencia simultanea de las tres propiedades siendo la más lenta, el llamado **mecanismo controlante**, la que determina la velocidad global del proceso.

La **transferencia** de cualquiera de las tres propiedades se produce esencialmente por dos causas:

- **Gradiente de la concentración** de la propiedad
- **Desplazamiento** másico del fluido

- Si en una mezcla multicomponente existe un **gradiente en la composición**, existirá un **transporte de materia**

- Si existe en un medio un **gradiente de temperatura**, se producirá un **transporte de energía**

- Si existe un **gradiente de velocidades** entre diferentes partes de un fluido, se generará un **transporte de cantidad de movimiento**

# ¿Qué hay que estudiar para entender el funcionamiento de las operaciones básicas en ingeniería química?

**Leyes de conservación**  
propiedades extensivas

Balances de materia y energía

**Operaciones básicas:** Gradiente de concentraciones de la propiedad

Tipos de operaciones básicas

Evolución hasta alcanzar el **equilibrio**

Condiciones de equilibrio

Fenómenos **de transporte**

Régimen molecular y turbulento

Leyes cinéticas de transporte  
(dependen del régimen de circulación del fluido)

Régimen molecular: Leyes de Newton, Fourier y Fick

Régimen turbulento: Coeficientes de transporte

## **Clasificación en función del mecanismo controlante**

De esta forma, una primera clasificación de las operaciones unitarias en función de la propiedad involucrada podría ser:

- A)** Operaciones de transporte de materia
- B)** Operaciones de transporte de energía
- C)** Operaciones de transporte de momento

## **Clasificación en función de las fases que intervienen**

Dependiendo el estado de las fases entre las que se produce el intercambio:

- A)** Líquido - Líquido
- B)** Gas - Líquido
- C)** Gas – Sólido
- D)** Líquido - Sólido

Criterio de clasificación		Operación unitaria
Según el <b>mecanismo controlante</b>	Transferencia de materia	<b>Destilación-Rectificación</b> <b>Absorción</b> <b>Adsorción</b> <b>Lixiviación</b> <b>Intercambio iónico</b> <b>Extracción</b>
	Transmisión de calor	<b>Evaporación</b>
	Transferencia de materia + transmisión de calor	<b>Humidificación</b> <b>Cristalización</b> <b>Secado</b> <b>Liofilización</b>
	Transporte de cantidad de movimiento	<b>Filtración</b> <b>Filtración</b> <b>Sedimentación/Centrifugación</b> <b>Flotación</b>

**Gas-Líquido**

**Líquido-Líquido**

**Líquido-Sólido**

**Gas-Sólido**

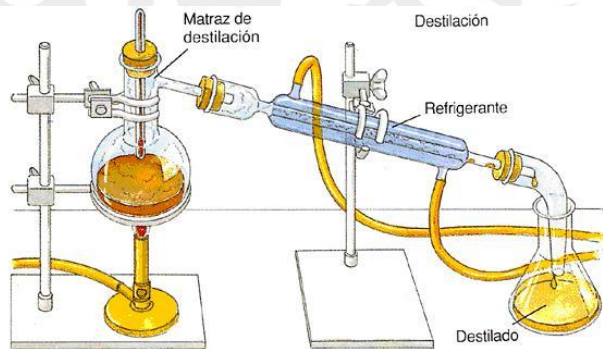
# TRANSFERENCIA DE MATERIA

## Destilación y rectificación

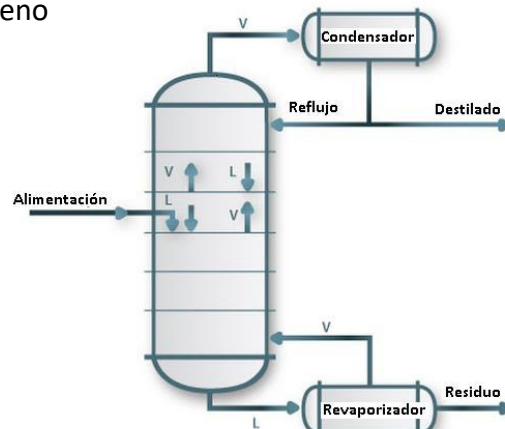
### Líquido-Gas

Proceso de separación de los componentes de una mezcla líquida por **vaporización** parcial de la misma y posterior **condensación** del vapor generado. Se basa en la diferencia de los puntos de ebullición de los componentes a separar.

Equipos más comunes: columnas de platos o de relleno



Destilación simple



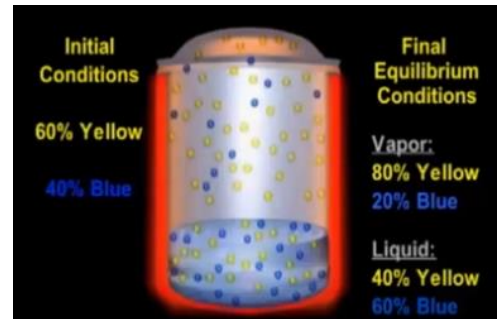
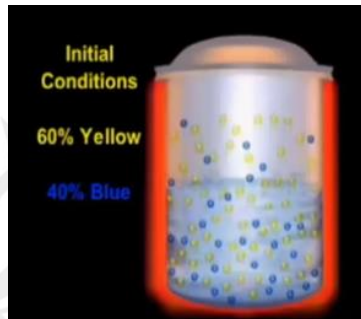
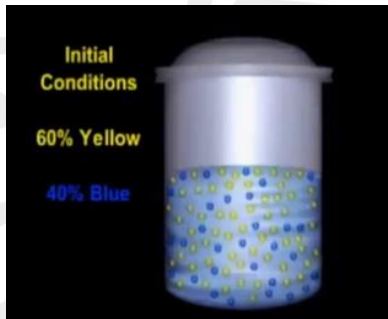
Rectificación

**Aplicaciones:** Obtención de etanol comercial, industria de bebidas alcohólicas, obtención de derivados del petróleo.

## Destilación Simple

2

Se forma la fase vapor: al aplicar calor por encima de la temperatura de ebullición de uno de los dos componentes



1

Mezcla inicial líquida en equilibrio compuesta por dos componentes con diferentes temperaturas de ebullición

3

No solo se evapora el componente más volátil, sino que se forman dos fases en equilibrio (L y V) de diferente composición:

- **Fase vapor:** rica en el componente más volátil
- **Fase líquida:** rica en el componente menos volátil

La destilación se basa en el equilibrio líquido-vapor que se genera entre las dos sustancias: Esto se verá con detalle en el tema 4.

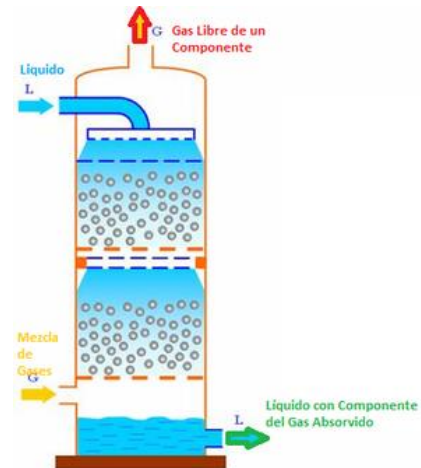
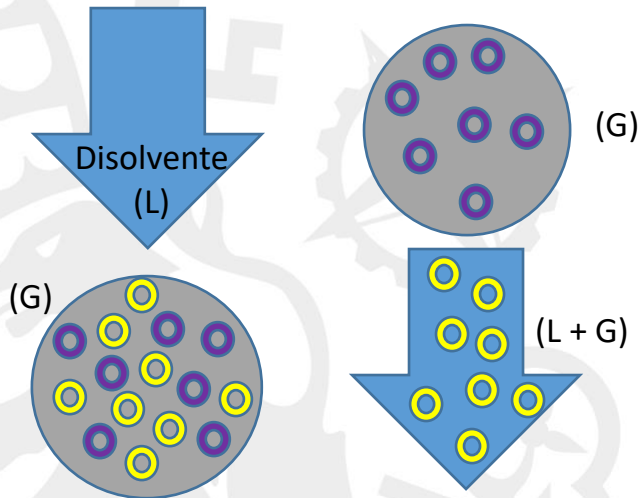


# Absorción

## Líquido-Gas

Separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa mediante su **disolución selectiva** en un líquido ajeno a la misma, en el cual son más solubles los componentes a separar.

Equipos más comunes: torres de pulverización, de platos o de relleno.

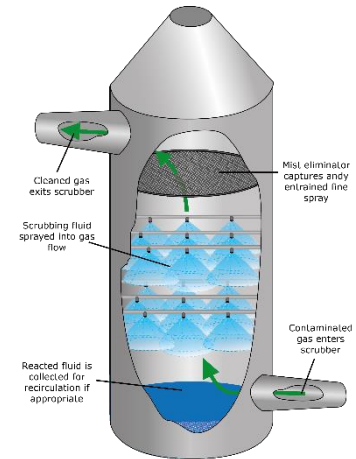


## Aplicaciones:

- Separación de los gases de de combustión mediante agua: ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , hidrocarburos ligeros).



- Eliminación de contaminantes de corrientes gaseosas de industrias químicas:  $\text{HCl}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.



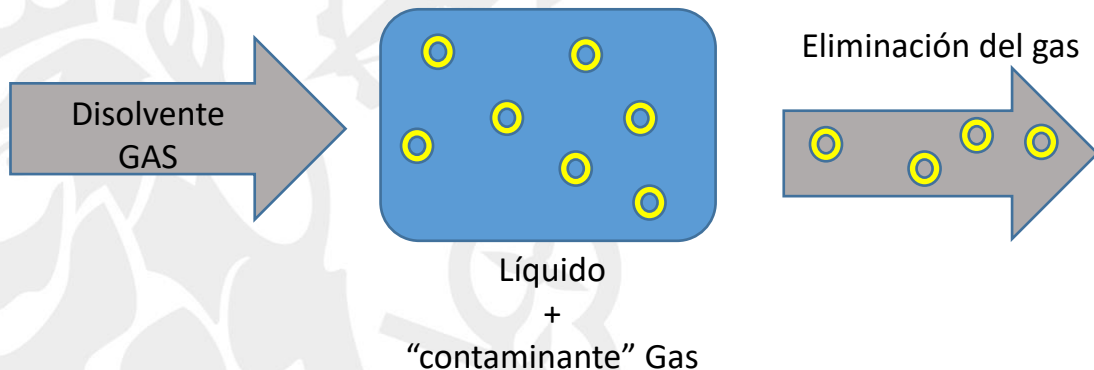
## Stripping (Desorción)

### Gas-Líquido

Se trata de la operación unitaria contraria a la absorción. Proceso mediante el cual se elimina ciertos componentes gaseoso disueltos o retenidos en una corriente líquida.

- La desorción suele realizarse utilizando otro **gas inerte** donde el componente gaseoso a eliminar se disuelve.
- Otra forma de realizar la desorción es **aumentando la temperatura**: la solubilidad del gas en el líquido disminuye y se “escapa” del mismo produciéndose la separación.

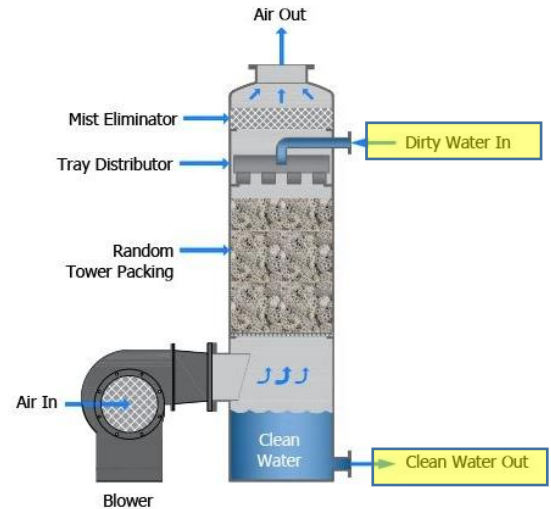
Equipos más comunes: torres y columnas de relleno



**Aplicaciones:** eliminación de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  o Compuestos orgánicos volátiles de corrientes líquidas.

## Aplicaciones:

- Eliminación de contaminantes de corrientes líquidas:
  - Eliminación de  $\text{NH}_3$  (amoníaco) de corrientes líquidas.
  - Eliminación de  $\text{CO}_2$ , o compuestos orgánicos volátiles de corrientes líquidas.

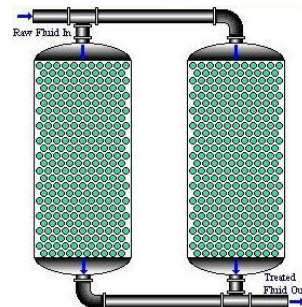
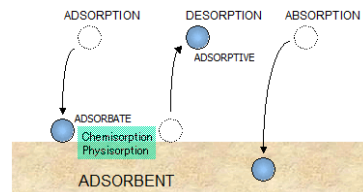
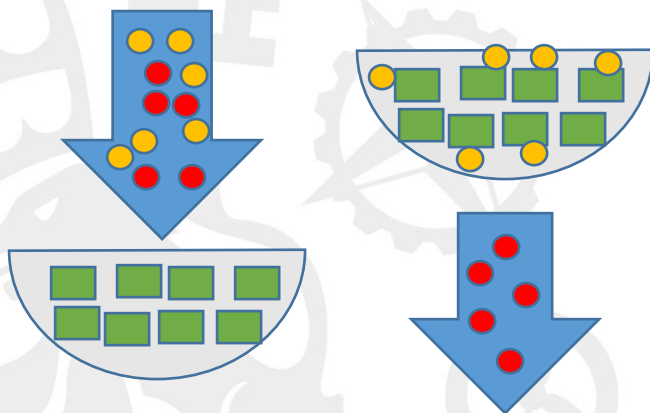


# Adsorción

## Líquido-Sólido / Gas-Sólido

Separación de uno o más componentes de una mezcla fluida (líquido o gas) mediante un sólido (adsorbente) ajeno a la misma, donde quedan retenidos.

En la adsorción la acumulación del compuesto extraído (**adsorbato**) se realiza en la superficie del **adsorbente**, a diferencia de la absorción donde esa acumulación se realiza en todo el volumen.



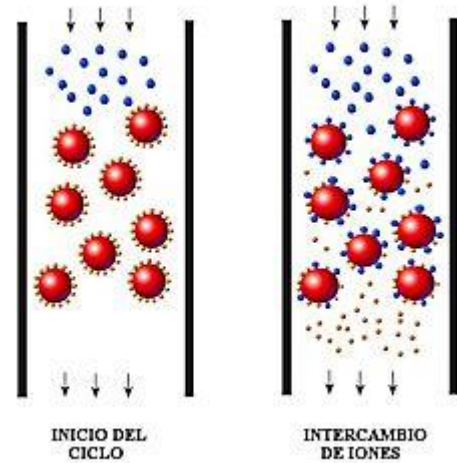
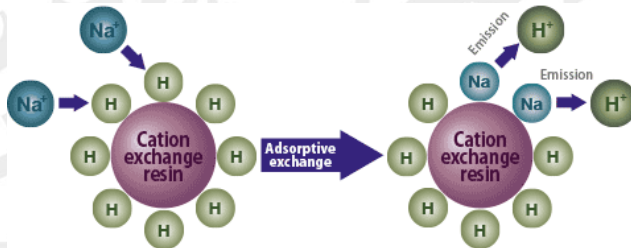
**Aplicaciones:** Potabilización de aguas, decoloración en la industria alimentaria, desulfuración del gas natural, eliminación de NOx de combustión

## Intercambio iónico

### Líquido-Sólido

Similar a la adsorción, siendo en este caso el componente a separar especies iónicas en fase líquida. Básicamente, durante el proceso de separación se producen reacciones químicas entre iones que se encuentran en una disolución e iones que se encuentran en una fase sólida insoluble en contacto con aquella (resina sintética, zeolita,...)

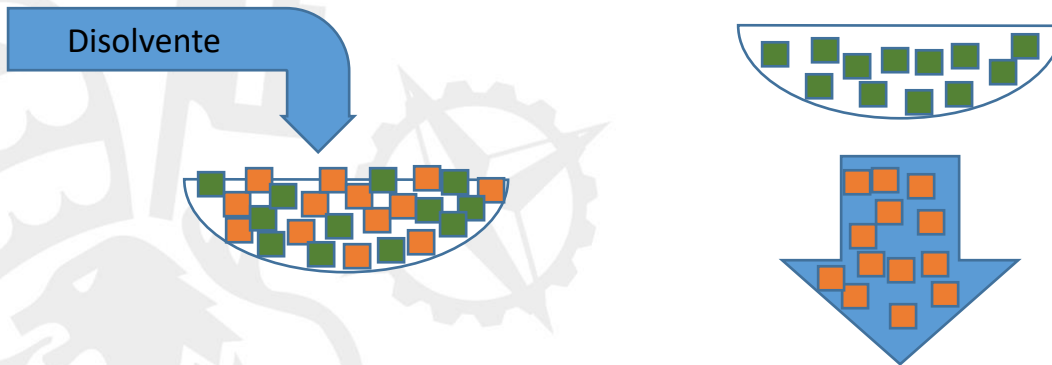
Intercambio: Iones de la disolución pasan al soluto, y a su vez, iones del soluto pasan a la disolución para mantener la neutralidad de carga.



## Lixiviación

### Líquido-Sólido

Separación de uno o más componentes de una mezcla sólida mediante un disolvente líquido ajeno a la misma, el cual disuelve de forma selectiva algunos de los componentes.



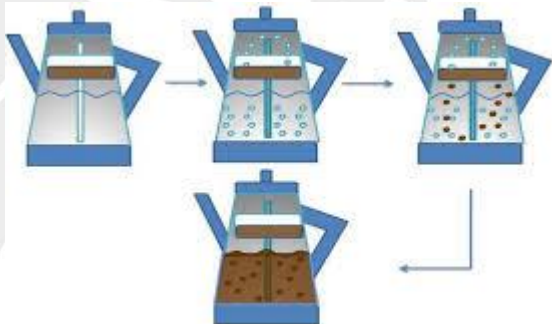
A veces también se le denomina “extracción sólido-líquido”

## Aplicaciones:

- Extracción del azúcar de la remolacha (agua caliente)



- Preparación del café o bebidas solubles



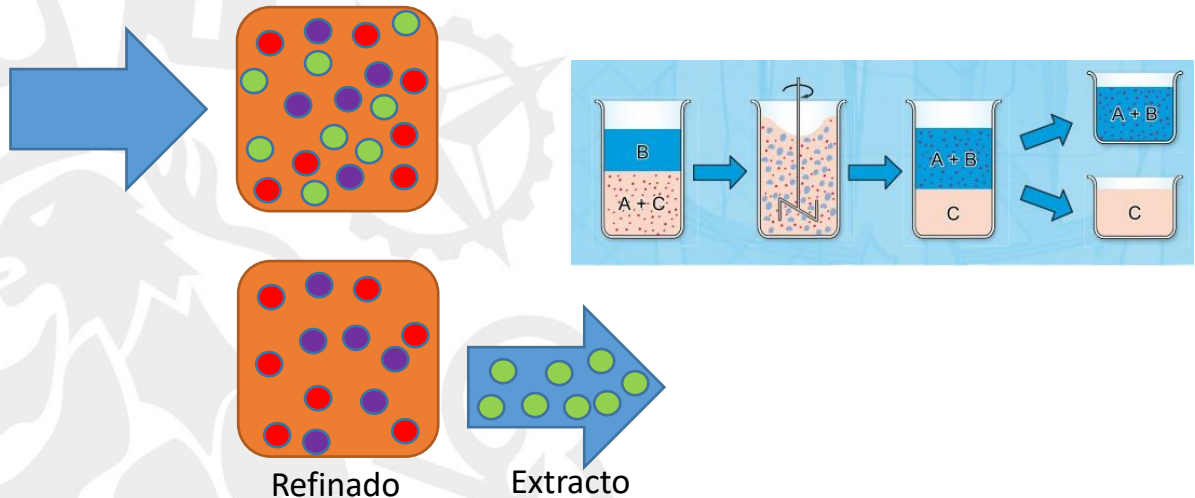


# Extracción

## Líquido-Líquido

Separación de uno o más componentes de una mezcla líquida mediante un disolvente inmiscible con ella y ajeno a la misma. Se basa en la diferencia de solubilidad de sus componentes entre dos líquidos inmiscibles.

Se ponen en contacto dos mezclas líquidas inmiscibles (fases distintas), con objeto de transferir uno o varios componentes de una fase a otra. Normalmente, a la mezcla original (cuyos componentes desean separarse), se le añade un disolvente selectivo, inmiscible con ella, que actúa de agente extractor.



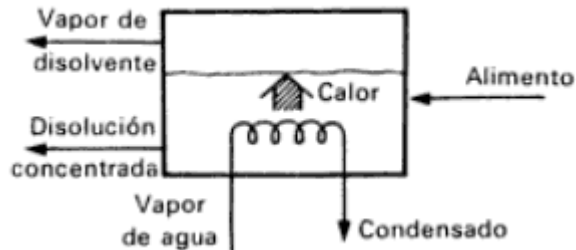
**Aplicaciones:** Extracción de la cafeína del café. Desparafinado (separación de hidrocarburos parafínicos) de aceites lubricantes mediante propano líquido.

# TRANSMISIÓN DE CALOR

## Evaporación

### Gas-Líquido

Separación de los componentes volátiles de una disolución en la que el soluto no es volátil, por generación de su vapor a partir de la misma mediante calefacción.



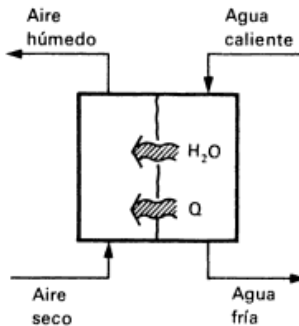
**Aplicaciones:** Concentración de zumos, de leche, desalinización del agua

## Humidificación

### Gas-Líquido

La humidificación es una operación que consiste en aumentar la cantidad de vapor presente en una corriente gaseosa; el vapor puede aumentar pasando el gas a través de un líquido que se evapora en el gas.

En el proceso de evaporación la energía necesaria para el cambio de estado de  $\text{H}_2\text{O (l)}$  a  $\text{H}_2\text{O (v)}$  es tomada del sistema termodinámico del  $\text{H}_2\text{O (l)}$ , de tal manera que inevitablemente la fase líquida se enfría para saturar la fase gaseosa.



**Aplicaciones:** Torres de enfriamiento



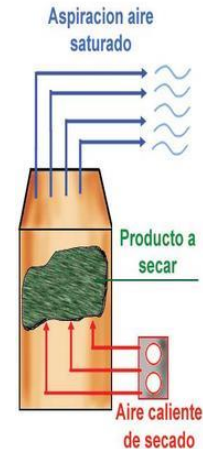
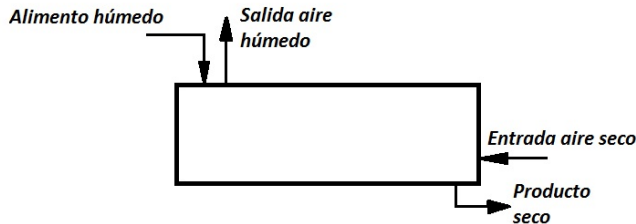
## Secado

### Gas-sólido

Separación de un líquido que impregna un sólido mediante su vaporización en un gas, normalmente aire, ajeno al mismo.

Algunas diferencias con la evaporación son:

- La cantidad de agua evaporada por producto tratado es mucho menor en el secado.
- La temperatura de operación es por lo general menor, pues para secar no es necesario alcanzar la ebullición



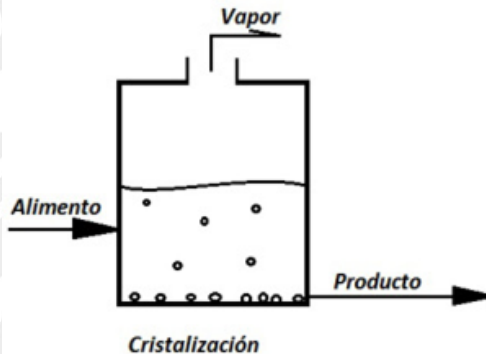
**Aplicaciones:** industria alimentaria

## Cristalización

### Líquido-sólido

La cristalización es una operación de transferencia de materia en la que se produce la formación de un sólido (cristal o precipitado) a partir de una fase homogénea (soluto en disolución o en un fundido).

Se transfiere un soluto de una disolución a su fase sólida mediante un cambio de temperatura o de composición.

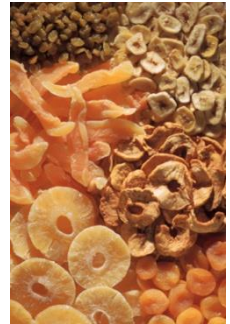
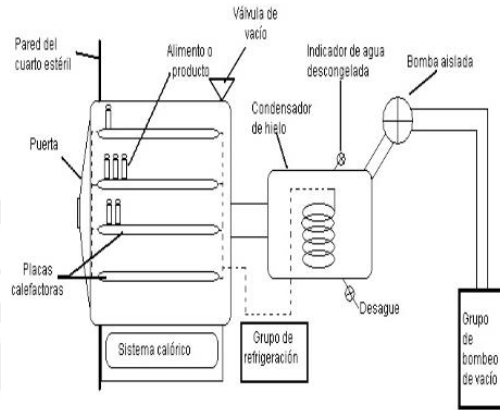
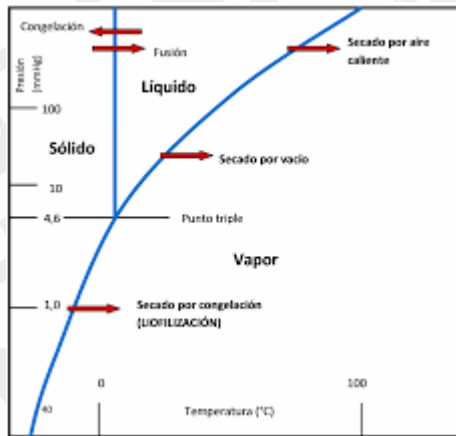


**Aplicaciones:** cristalización de la sacarosa en la industria azucarera, obtención de la aspirina

# Liofilización

## Gas-sólido

Separación de un líquido que impregna un sólido mediante su congelación y posterior sublimación a vacío.

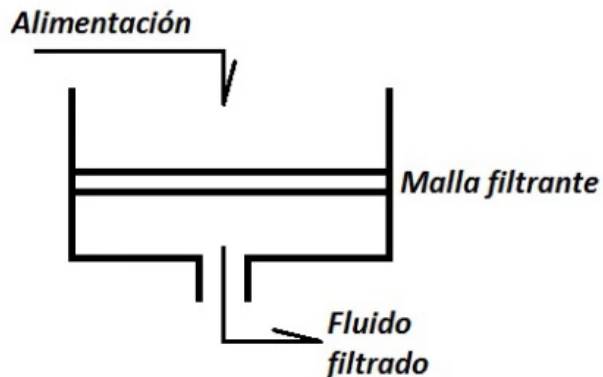


**Aplicaciones:** Se utiliza mucho para secar productos que pueden sufrir alteraciones térmicas, industria alimentaria

### Filtración

#### Líquido-sólido

Separación de las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un fluido mediante su retención sobre un material poroso que es atravesado por el fluido.



**Aplicaciones:** Clarificación de aguas residuales mediante lechos de arena

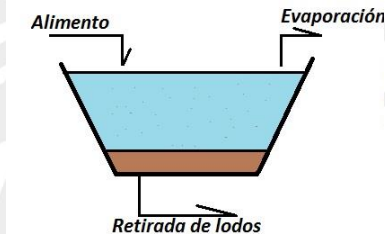
## Sedimentación - Centrifugación

### Líquido-sólido

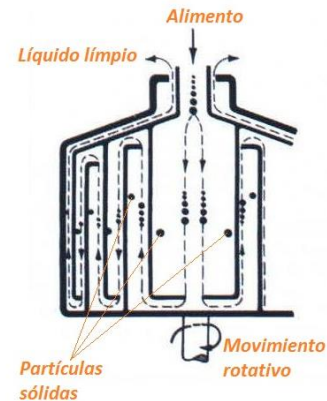
Se basan en la diferencia de densidades entre las dos fases.

Sedimentación o Decantación: Separación de las partículas sólidas o líquidas de un fluido mediante la actuación de la gravedad.

Centrifugación: Separación de partículas sólidas o líquidas de un fluido aplicando una fuerza superior a la de la gravedad, acelerando el fluido mediante un movimiento giratorio; se trata en realidad de un proceso de sedimentación forzada.



*Sedimentación*



*Centrifugadora*

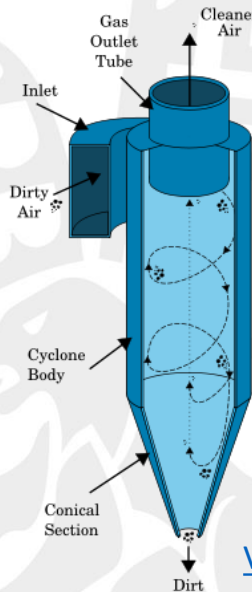
**Aplicaciones:** Separación de la levadura en exceso en la fermentación de la cerveza, separación de la nata de la leche



## Centrifugación ciclónica

### Gas-Sólido/Líquido-sólido (hidrociclones)

Para separar partículas sólidas suspendidas en el aire, gas o flujo de un líquido, sin necesidad de usar un filtro de aire, se utiliza un **separador ciclónico**. Los efectos de rotación y la gravedad son usados para separar mezclas de sólidos y fluidos. El método también puede separar pequeñas gotas de un líquido de un flujo gaseoso.



[Ver video](#)



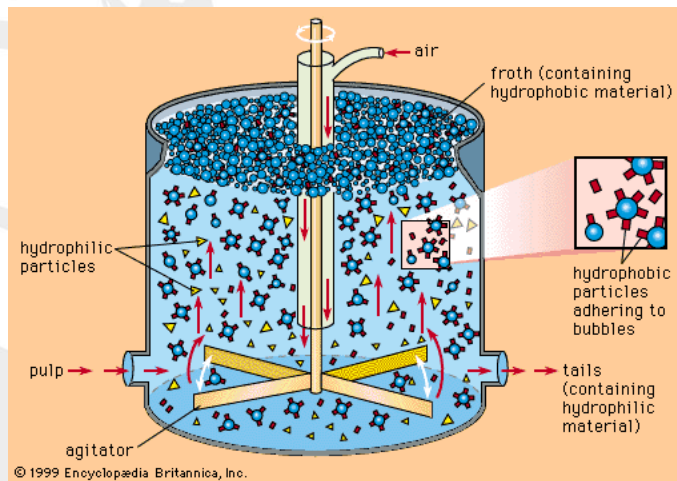
**Aplicaciones:** En cualquier proceso de producción que genere partículas sólidas de pequeño tamaño de grano, aserraderos, refinerías, cementeras, etc.

## Flotación

### Líquido-sólido

Se trata de una técnica de separación de diferentes sólidos que se efectúa mediante burbujas de gas gracias a sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas.

Se basa en el diferente comportamiento de los sólidos frente al agua. Determinados sólidos (metales puros, sulfuros de metales, grafito...) son hidrofóbicos, lo que permite la adherencia de las burbujas de aire a las partículas sólidas, al no ser afines al agua. Mientras que los hidrofílicos (óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos...) tienen afinidad por la fase acuosa



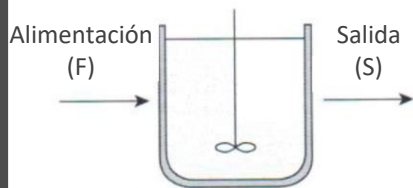
**Aplicaciones:** Separación de grasas minerales durante el tratamiento primario de las aguas residuales

## 3.2 Operaciones continuas y discontinuas

En la mayoría de los procesos se manejan **flujos o corrientes de gases y de líquidos**, aunque en alguna de las etapas se traten **materiales sólidos** también.

Según estos flujos las operaciones se pueden clasificar en:

<b>Régimen</b>	Estacionario No estacionario
<b>Operaciones</b>	Continua Discontinua Semicontinua

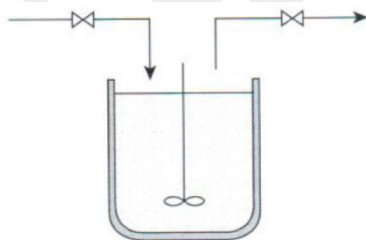


### A) Operación continua

- Entrada y salida continua de las corrientes
- El tiempo no es una variable



Régimen estacionario



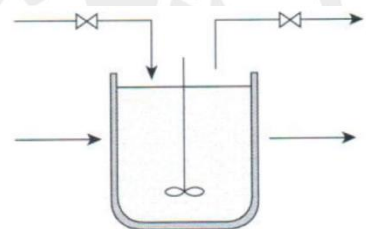
### B) Operación discontinua

- No hay entrada y salida continua de las corrientes
- Periodos:
  - Carga
  - Transformación
  - Descarga
- El tiempo es una variable



Procesos por lotes o batch y los arranques tras parada de planta

Régimen no estacionario



### C) Operación semicontinua

- Entrada y salida continua de alguna corriente
- Periodos de carga, transformación y descarga para el resto
- El tiempo es una variable



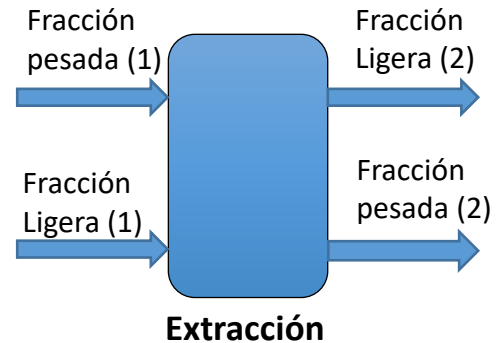
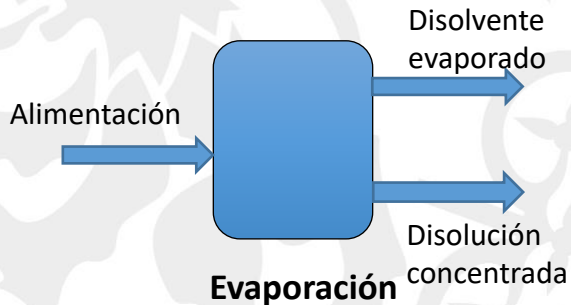
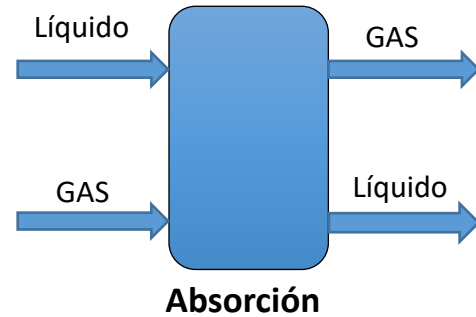
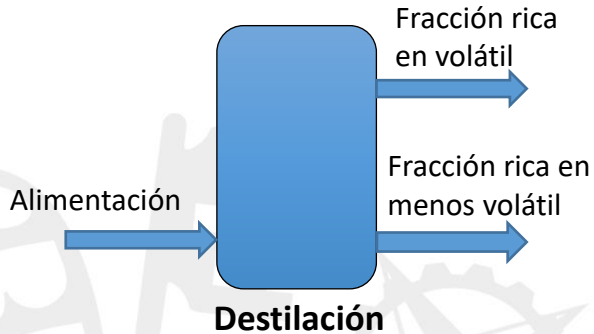
Régimen no estacionario

## 3.3 Diagramas de flujo: Representación e interpretación

### Consideraciones generales en la representación de diagramas de flujo

- Han de aparecer **correctamente representadas todas las corrientes** implicadas en el proceso: posición, dirección de entrada y salida, etc.
- Se han de indicar los **componentes** que van por cada una de las corrientes.
- Deben aparecer representadas todas aquellas **corrientes auxiliares** que se utilicen para calentar, enfriar, etc., o aquellas corrientes que no se nombran pero que se entienden necesarias para el correcto funcionamiento en continuo del proceso.
- Es necesario indicar en el diagrama de bloques el **nombre de cada una de las operaciones unitarias** que intervienen.
- Se han de representar las **purgas, corrientes de salida o de entrada** necesarias para que el proceso funcione en estado estacionario (no haya acumulación).

## Ejemplos de algunas operaciones unitarias

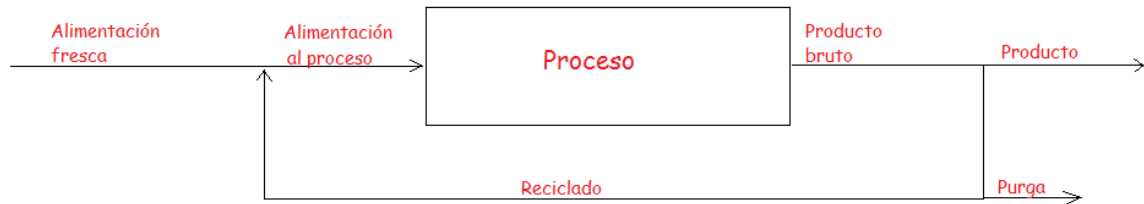


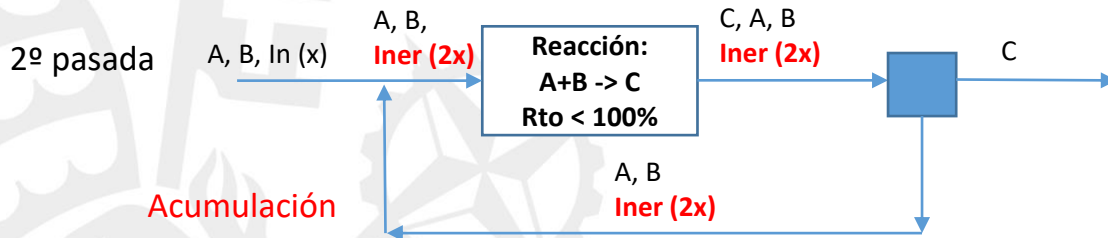
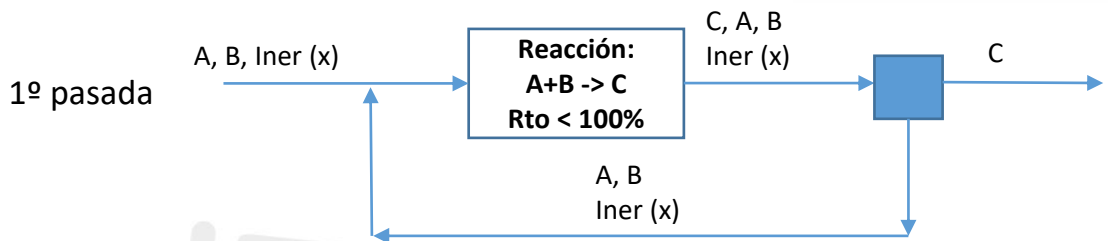
## RECIRCULACIÓN

- Se utilizan para aumentar el aprovechamiento energético y de reactivos en las plantas químicas.

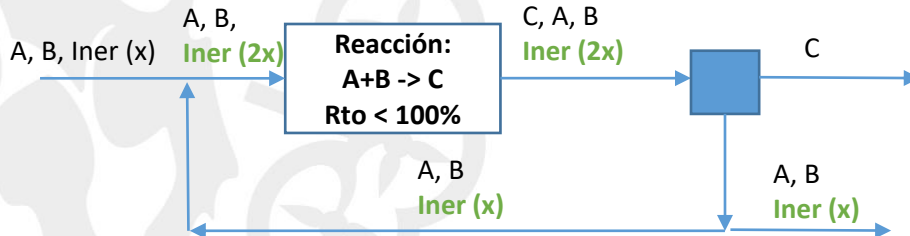
## PURGAS

- Las purgas son necesarias para asegurar que un proceso funciona en estado estacionario y que no se produce acumulación de ningún componente.
- Por una purga pueden sacarse del proceso tanto sustancias inertes, como reactivos o productos
- Para la resolución de los problemas de este tema, se considerará que una purga está mal situada si esta disminuye el rendimiento del proceso.





Estado estacionario: EVITAR ACUMULACIONES





# Bibliografía

- Calleja, G. y otros; “Introducción a la Ingeniería Química”, Ed. Síntesis, Madrid (1999)
- Ingeniería química. Mario Grau Rios, Eugenio Muñoz Camacho. UNED
- Ingeniería química básica. Francisco Jarabo Friedich, Francisco J. García Álvarez
- Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. (8ª edición). David H. Himmelblau. Pearson. Agosto 2012