

TEMA 5: INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES BÁSICAS

5.1 Conceptos de operación básica y operación de separación

Operación básica (operación unitaria): Cada una de las operaciones o etapas individuales con una función específica diferenciada que, coordinadas, permiten llevar a cabo un proceso químico; se basan en principios científicos comunes y tienen técnicas de cálculo semejantes.

Operaciones de separación: Conjunto de operaciones básicas en las que se produce una transferencia de materia; actúan sobre una corriente formada por una mezcla de componentes y separan éstos en diferentes corrientes.

Componentes **en una sola fase**: Se necesita una segunda fase inmiscible para separar algunos componentes; la segunda fase se forma a partir de la primera (cambiando P y T) o añadiendo una nueva fase, independiente de la original.

Componentes **en varias fases**: Al estar las fases dispersas, es necesario cambiar las condiciones para que se separen las fases y, con ellas, los componentes.

Aplicación de **barreras**: Métodos actuales de separación en una sola fase, aplicando barreras o campos para que los componentes migren selectivamente a través de ellas.

Otras operaciones básicas que **no** son de separación (pero muy importantes): **flujo de fluidos** y **transmisión de calor**.

5.2 Tipos de operaciones

Tres tipos de operaciones (**Figura 5.1**): continuas, discontinuas o semicontinuas.

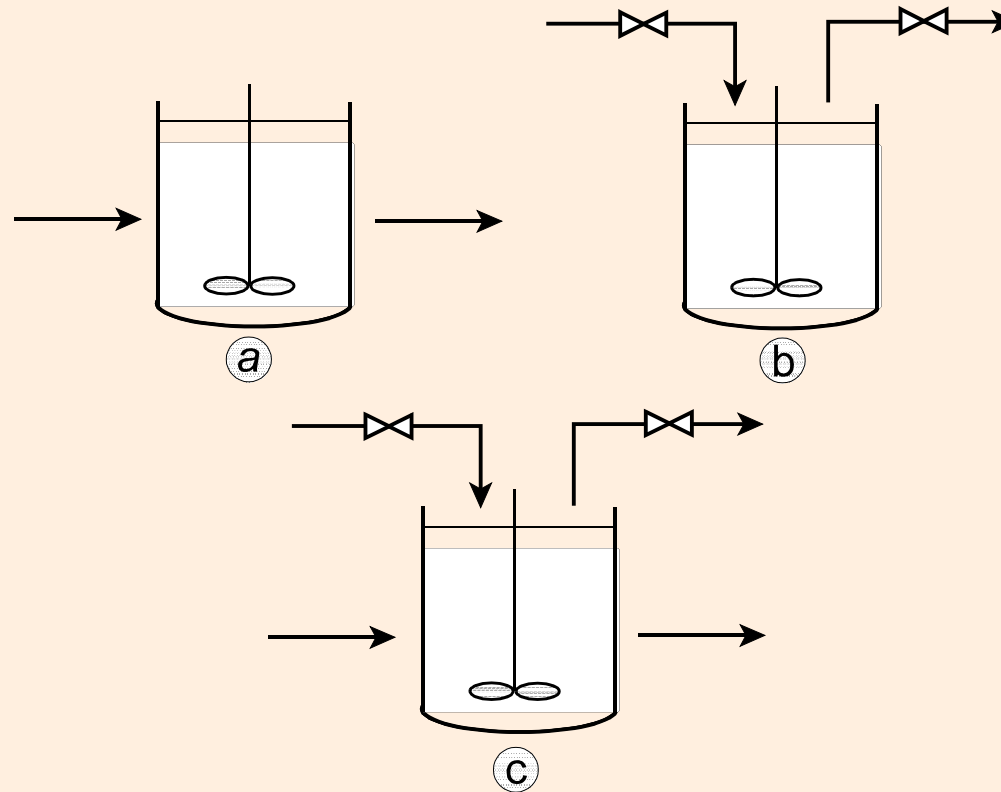


Figura 5.1: Esquemas de tipos de operaciones:

- a) Continua.
- b) Discontinua.
- c) Semicontinua.

- **Operaciones continuas:** Las corrientes de entrada fluyen permanentemente al equipo y las corrientes de salida fluyen de la misma forma; el tamaño del equipo viene determinado por el caudal y la velocidad de la operación; el tiempo no influye y se opera en *régimen estacionario*.
- **Operaciones discontinuas:** El producto se carga en el equipo, se procesa y finalmente se descarga; el tamaño del equipo viene determinado por el tiempo necesario para alcanzar las características deseadas; el funcionamiento es en *régimen no estacionario*.
- **Operaciones semicontinuas:** Una corriente entra y sale continuamente del equipo, mientras que otras se cargan y descargan de forma discontinua; se opera en *régimen no estacionario*.

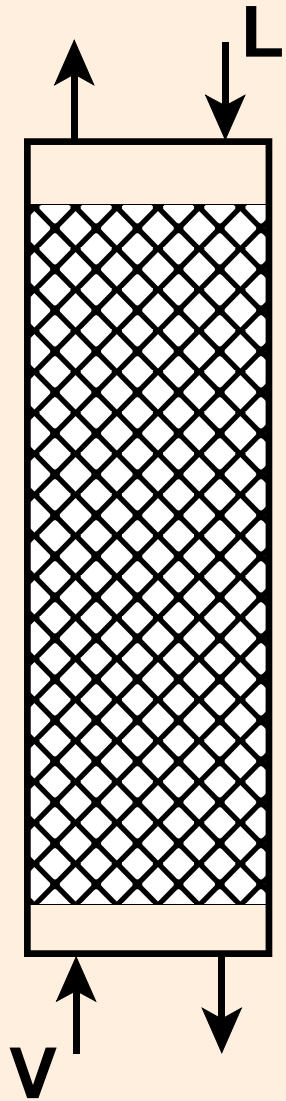
Diferentes **escalas de operación** o tamaño de la planta:

- Escala de **laboratorio**: Usada para estudiar detalles, empleando pequeñas cantidades de materias primas; económica.
- Escala de **planta piloto**: Usada para estudiar restricciones del proceso industrial; las cantidades procesadas varían mucho.
- Escala **semiindustrial** (demostración): Instalación industrial de menor tamaño (10%) que sólo se utiliza en ocasiones específicas; muy costosa.
- Escala **industrial**: Tamaño final de la planta comercial que ha de reproducir los resultados de laboratorio.

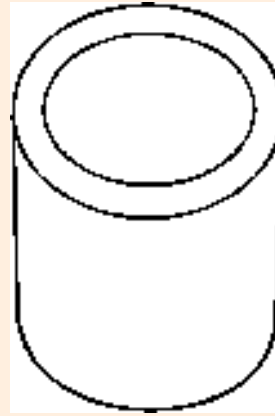
5.3 Modos de contacto entre fases

Dos modos de contacto: continuo o intermitente.

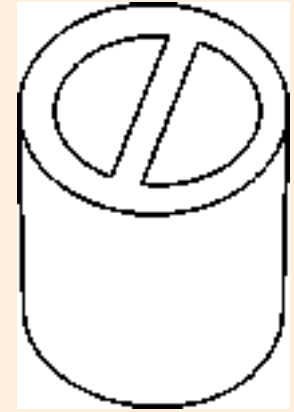
- **Contacto continuo (Figura 5.2):** Cada una de las fases fluye sobre la otra sin interrupción y ambas están permanentemente en contacto; los componentes se transfieren de fase a lo largo de todo el aparato; las dimensiones dependen de los caudales de transferencia; los equipos son las *columnas de relleno*, cilindros que encierran cuerpos sólidos de distintas características que intentan proporcionar máxima superficie con mínima pérdida de presión.



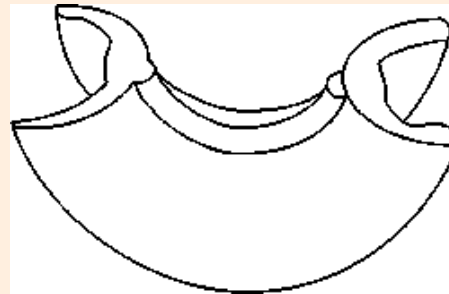
Columna
de
Relleno



Anillo Raschig



Anillo Lessing



Silla Intalox



Silla Berl

Figura 5.2: Contacto continuo en columna de relleno.

- **Contacto intermitente (Figura [5.3](#)):** Las fases se mezclan durante cierto tiempo, se separan y se vuelven a mezclar en intervalos sucesivos (etapas de contacto múltiple); si la mezcla es tan efectiva que las fases salen en equilibrio se habla de “*etapa ideal*”; las dimensiones dependen del número de etapas y de su eficacia; los equipos en las *columnas de platos*, cilindros divididos en pisos, a cada uno de los cuáles acceden las fases y se ponen en contacto mediante los dispositivos adecuados.

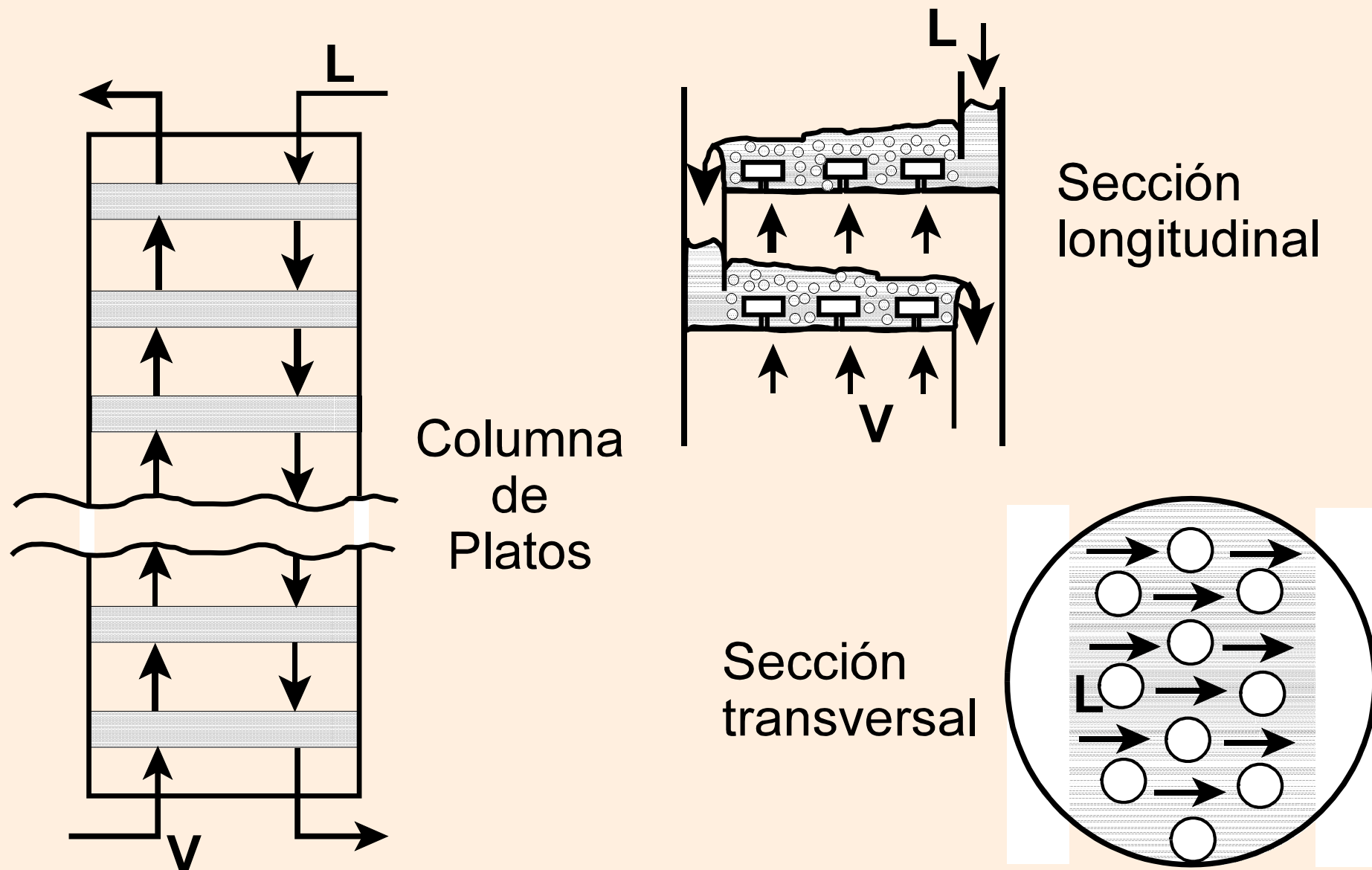


Figura 5.3: Contacto intermitente en columna de platos.

5.4 Tipos de flujo

Tres tipos de flujo o características de circulación de las fases a través del equipo: en paralelo, en contracorriente o cruzado.

- **Flujo en paralelo (Figura 5.4):** Las corrientes se mueven en la misma dirección y sentido a través del equipo; el transporte máximo entre las corrientes está limitado por el equilibrio entre las fases a la salida del equipo; baja eficacia.

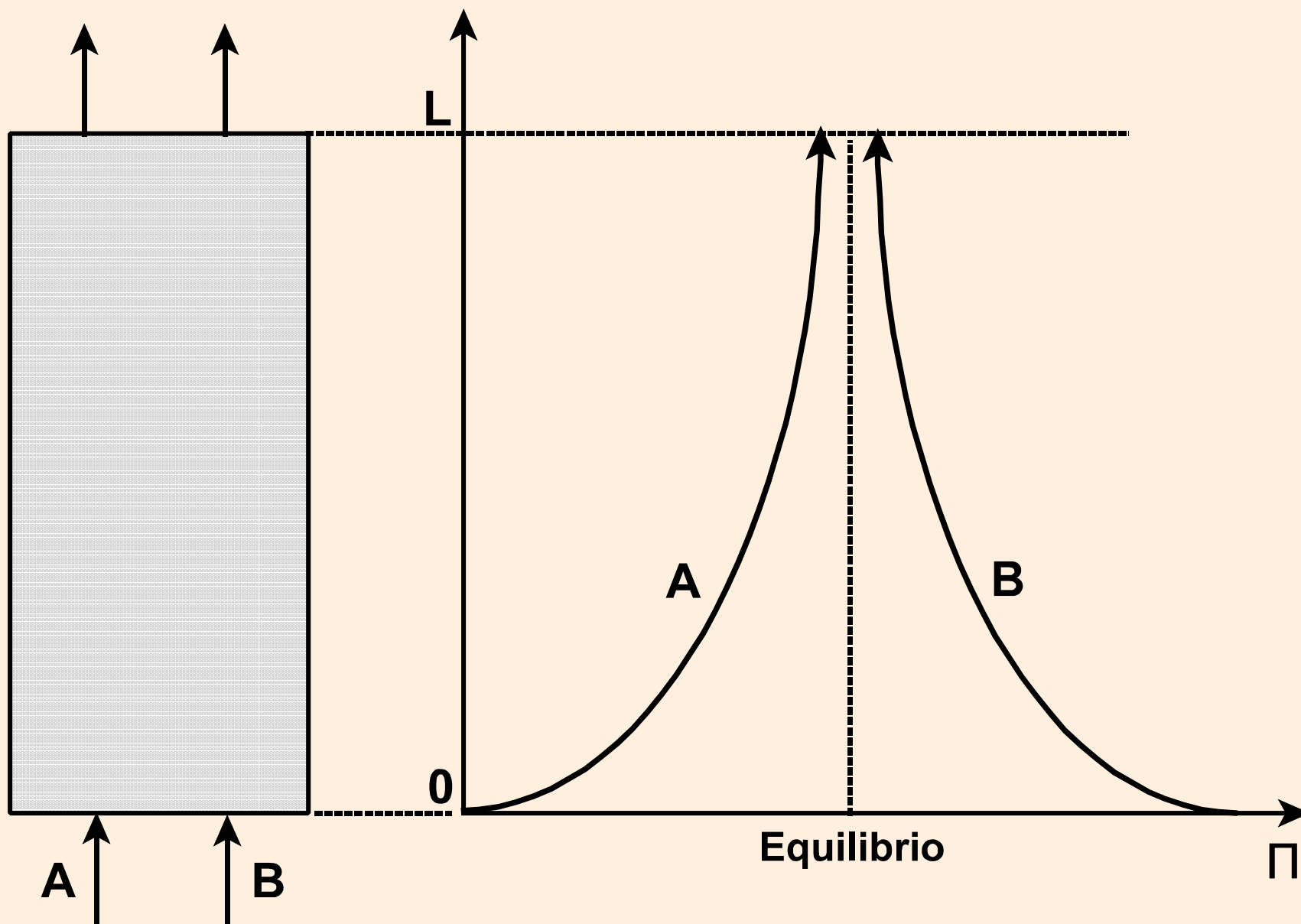
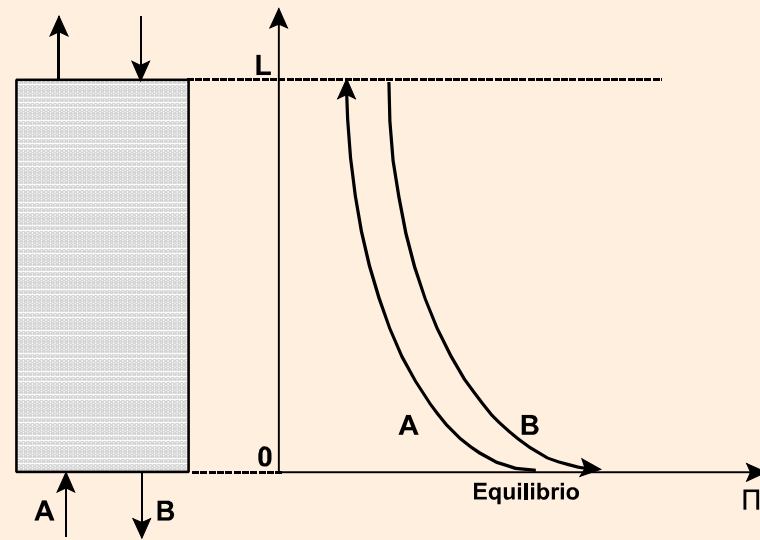
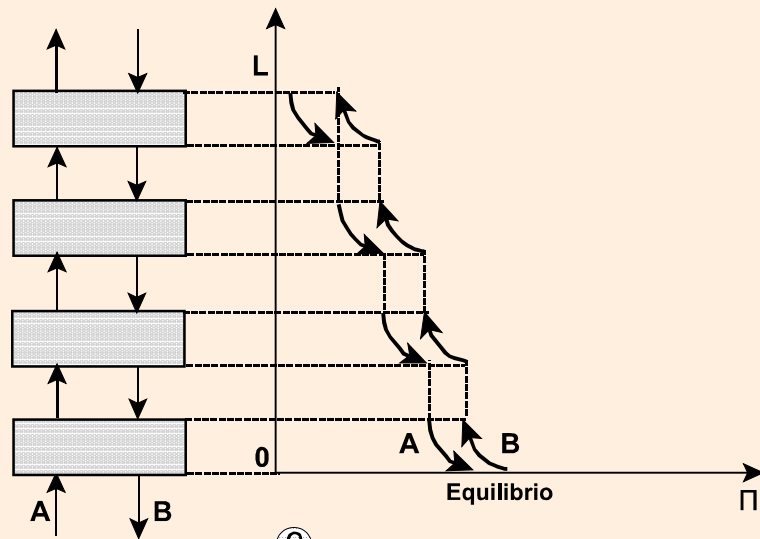


Figura 5.4: Flujo en paralelo.

- **Flujo en contracorriente (Figura [5.5](#)):** Las corrientes se mueven en la misma dirección pero en sentidos opuestos a través del equipo; el equilibrio puede alcanzarse en cualquiera de los extremos del equipo, por lo que la operación es equivalente a varias etapas ideales; mayor eficacia.



1



2

Figura 5.5: Flujo en contracorriente:
 1) Contacto continuo
 2) Contacto intermitente

- **Flujo cruzado (Figura 5.6):** Las corrientes se mueven en direcciones perpendiculares entre sí a través del equipo; el transporte está limitado por las condiciones de salida, pero en cada zona del equipo, por lo que es equivalente a varias etapas de equilibrio; puede llevarse a cabo un *contacto repetido*, una de las salidas de una etapa es un producto y otra se pone de nuevo en contacto con alimento fresco.

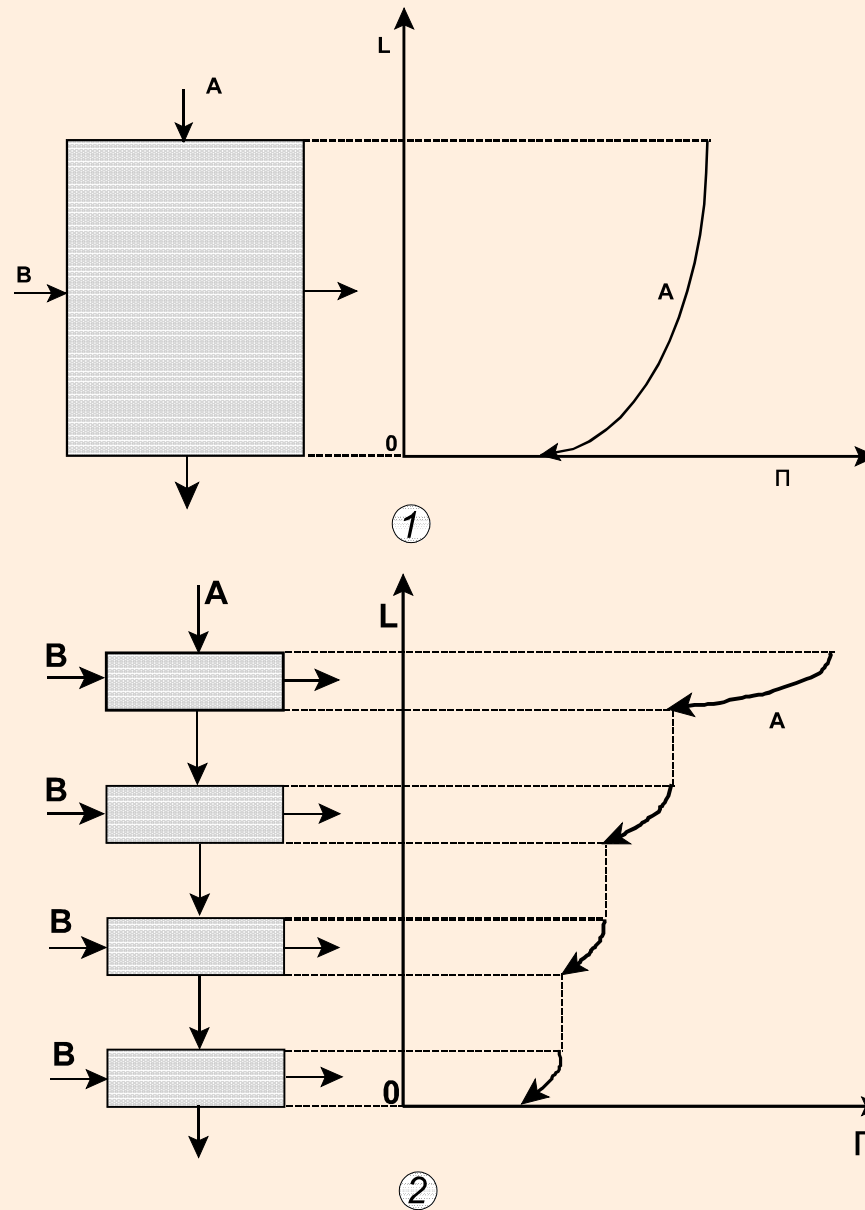


Figura 5.6: Flujo cruzado:
 1) Contacto continuo
 2) Contacto repetido

- **Reflujo (Figura [5.7](#)):** Corriente procedente del producto de salida que se vuelve a introducir en el equipo para conseguir una separación más completa.

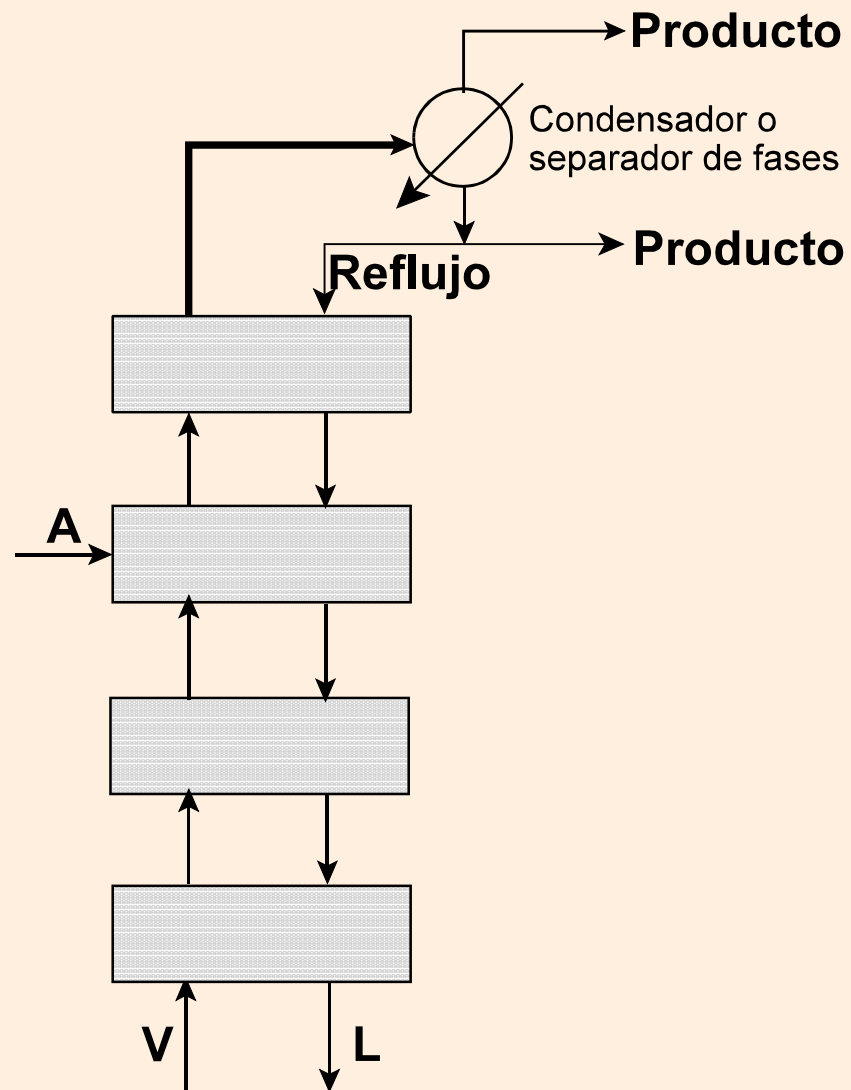


Figura 5.7: Reflujo.

5.5 Clasificación de las operaciones de separación

Criterios de clasificación de las operaciones de separación: superficie interfacial y mecanismo controlante:

- **Superficie interfacial:** Superficie que se forma entre las dos fases entre las que se produce el transporte de materia; la segunda fase puede generarse con un **agente energético de separación** (cambio de estado), o con un **agente material de separación** (fase ajena); en la migración selectiva de componentes la interfase es una membrana.
- **Mecanismo controlante:** Fenómeno mucho más lento que los demás y que determina la velocidad con que transcurre un proceso global; la transferencia de materia va acompañada de transporte de energía y cantidad de movimiento que pueden influir de modo decisivo.

La siguiente tabla muestra una relación de las operaciones de separación más habituales, clasificadas según los dos criterios mencionados.

OPERACIONES		Mecanismo controlante			
Fases		Materia	Energía	Materia + Energía	Momento
Sólido	Fluido (Gas o Líquido)	● Adsorción / Desorción			● Filtración ● Sedimentación / Centrifugación
Sólido	Gas			● Secado / Liofilización ● Sublimación	
Sólido	Líquido	● Lixiviación ● Intercambio iónico		● Cristalización	● Flotación
Líquido	Líquido	● Extracción			
Líquido	Vapor	● Destilación / Rectificación	● Evaporación		
Líquido	Gas	● Absorción / Desabsorción		● Interacción aire - agua (Deshumidificación de aire, Humidificación de aire, Enfriamiento de agua)	
Membranas		● Difusión de gases ● Permeación de gases ● Diálisis ● Ósmosis inversa ● Ultrafiltración			

5.6 Objetivos de las operaciones de separación

Se presentan en forma esquemática cada una de las operaciones de separación relacionadas en la tabla anterior. Se ofrece en cada caso la siguiente información:

- Denominación.
- Mecanismo controlante y superficie interfacial.
- Descripción del objetivo.
- Ejemplo de aplicación.

Adsorción (Materia; sólido - fluido):

Separación de uno o varios componentes de una mezcla fluida mediante un sólido adsorbente ajeno a la misma.

Separación de compuestos fenólicos en disolución acuosa mediante carbón activo.

Desorción (Materia; sólido - fluido):

Separación de las sustancias adsorbidas sobre un sólido mediante un disolvente líquido o gaseoso; operación inversa a la adsorción.

Recuperación de olefinas, previamente adsorbidas sobre zeolitas, mediante vapor de agua.

Lixiviación (Materia; sólido - líquido):

Separación de uno o varios componentes contenidos en una mezcla sólida mediante un disolvente líquido ajeno a la misma.

Separación del aceite de las semillas del cacahuete por tratamiento con n-hexano.

Intercambio iónico (Materia; sólido -líquido):

Separación de algunos de los iones de una disolución líquida mediante un sólido iónico con el que intercambia ciertos iones del mismo tipo de carga.

Ablandamiento de aguas duras (eliminación de iones Ca^{+2} y Mg^{+2}) utilizando resinas naturales (zeolitas) o sintéticas de intercambio catiónico, que liberan iones H^+ contenidos en su matriz.

Extracción (Materia; líquido - líquido):

Separación de los componentes de una mezcla líquida mediante un disolvente inmiscible con ella y ajeno a la misma.

Desparafinado (separación de hidrocarburos parafínicos) de aceites lubricantes mediante propano líquido.

Destilación (Materia; líquido - vapor):

Separación de los componentes de una mezcla líquida por vaporización parcial de la misma y condensación del vapor generado.

Obtención de etanol comercial a partir de mezclas hidroalcohólicas resultantes de fermentaciones artesanales.

Rectificación (Materia; líquido - vapor):

Separación de uno o varios componentes de una mezcla líquida por vaporizaciones y condensaciones parciales sucesivas para enriquecer el vapor en el componente más volátil.

Producción de aguardientes industriales a partir de residuos de fermentación.

Absorción (Materia; gas -líquido):

Separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa mediante su disolución selectiva en un líquido ajeno a la misma.

Separación del SO_2 de un gas de combustión mediante agua.

Agotamiento (Materia; líquido - gas):

Separación de uno o varios componentes de una mezcla líquida mediante un gas ajeno a la misma; operación inversa de la absorción.

Depuración de aguas contaminadas por compuestos volátiles mediante arrastre con aire.

Procesos con membranas (Materia; membranas):

Estos procesos no se fundamentan en el equilibrio entre fases, existiendo un medio ajeno al sistema que actúa como barrera de separación y que es atravesado por el componente que se separa, pero no por los demás. La separación se efectúa aprovechando algunos efectos especiales.

- ***Difusión de gases:***

- Separación de gases basada en la diferencia de difusividades efectivas de los componentes de la mezcla, que dependen del peso molecular del gas y del tamaño de los poros de la membrana.
- *Separación de los isótopos del uranio.*

- ***Permeación de gases:***

- Separación de gases basada en la diferencia de difusividad y solubilidad de los componentes de la mezcla a través de una membrana sólida no porosa.
- *Separación de helio del gas natural.*

- **Diálisis:**

- Separación de moléculas de distinto tamaño contenidas en líquidos a través de membranas porosas.
- *Reducción del contenido alcohólico de la cerveza.*

- **Ósmosis inversa:**

- Separación de disolventes a través de membranas semipermeables que permiten su paso, pero no el de solutos de bajo peso molecular, aplicando gradientes de presión superiores e inversos a la presión osmótica de la disolución.
- *Separación del agua de las sales en la potabilización del agua de mar.*

- **Ultrafiltración:**

- Separación de compuestos basada en su tamaño, forma o estructura química de su molécula, propiedades que son discriminadas por ciertas membranas poliméricas semipermeables.
- *Separación de sustancias coloidales en procesos de producción de vinos.*

Evaporación (Energía; líquido - vapor):

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.

Concentración de zumos de fruta por eliminación del agua.

Secado (Materia + energía; sólido - gas):

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

Eliminación del agua de forrajes para su ensilado.

Liofilización (Materia + energía; sólido - gas):

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

Deshidratación de extracto de café para la obtención de café instantáneo sólido.

Sublimación (Materia + energía; sólido - gas):

Separación de un componente de una mezcla sólida mediante su vaporización directa (sin pasar por estado líquido) por calefacción en el seno de una corriente gaseosa (frecuentemente aire) ajena a aquélla; cuando se trata de la operación inversa, es decir, se condensa directamente a sólido un componente de un vapor, recibe el mismo nombre.

*Separación del yodo contenido en las algas marinas (sólido a vapor);
purificación de azufre (vapor a sólido).*

Cristalización (Materia + energía; sólido - líquido):

Separación de un componente de una disolución líquida mediante contacto con una fase sólida generada a partir de aquélla.

Obtención de cloruro sólido a partir del agua del mar.

Interacción aire - agua (Materia + energía; líquido - gas):

La operación de separación incluida en las operaciones de interacción aire - agua es la deshumidificación de aire, es decir, la separación parcial del vapor de agua contenido en un aire húmedo mediante agua a una temperatura suficientemente baja. El proceso inverso, la humidificación de aire (incorporación de vapor de agua a un aire de baja humedad mediante agua a una temperatura suficientemente elevada), lleva aparejado un enfriamiento del agua; por ello, generalmente se estudia el proceso global de interacción aire - agua en conjunto.

Acondicionamiento de aire.

Filtración (Momento; sólido -fluido):

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

Clarificación de aguas residuales mediante lechos de arena.

Sedimentación (Momento; sólido -fluido):

Separación de partículas sólidas o líquidas de un fluido mediante la actuación de la gravedad.

Separación de la levadura en exceso en la fermentación de cerveza.

Centrifugación (Momento; sólido -fluido):

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.

Separación de la nata de la leche.

Flotación (Momento; sólido -líquido):

Separación de los componentes sólidos de una suspensión líquida por su diferencia de densidad y propiedades superficiales, que generalmente se potencian añadiendo “agentes de flotación”, como aire o agentes tensoactivos.

Separación de grasas minerales durante el tratamiento primario de las aguas residuales.

5.7 Las operaciones básicas de flujo de fluidos

Transporte de cantidad de movimiento debido a diferencias de velocidad. El rozamiento provocado por la viscosidad del fluido tiende a igualar las velocidades y produce una degradación de la energía mecánica.

Es necesario suministrar energía para conseguir la circulación del fluido; determinante en las operaciones, que se clasifican en dos grupos:

- **Operaciones de flujo interno:** El fluido circula por conducciones; se diseñan las tuberías, los dispositivos de impulsión, los de regulación del flujo y los de extracción de la energía mecánica contenida en el fluido.
- **Operaciones de flujo externo:** El fluido circula alrededor de partículas sólidas, en lechos; las operaciones más importantes son la **fluidización** (suspensión de partículas sólidas en el seno de un fluido ascendente), y el **transporte neumático** (arrastre de partículas sólidas por un gas).

5.8 Las operaciones básicas de transmisión de calor

Transporte de energía no mecánica, que se clasifica en dos grupos:

- **Aislamiento térmico:** Diseño de paredes con materiales de baja conductividad teórica para lograr condiciones adiabáticas.
- **Intercambio de calor sin cambio de fase:** **Calentamiento o enfriamiento de sólidos** a lo largo del tiempo, **diseño de cambiadores de calor**, dispositivos en los que se intercambia calor entre un fluido frío y otro caliente; **diseño de hornos**, en los que el calor generado por un combustible se transmite por radiación a un fluido que circula por tubos.

5.9 Otras operaciones básicas

Otras operaciones básicas que no encajan en las clasificaciones anteriores pero que pueden tener importancia:

- **Trituración y molienda:** Reducción de tamaño de materiales sólidos por compresión (trituración) o por fricción e impacto (molienda).
- **Tamizado:** Separación por tamaños de las partículas de un sólido a través de una malla (tamiz) de paso definido (luz).
- **Mezclado:** Puesta en contacto de diversos componentes para la obtención de una fase lo más homogénea posible; generalmente los líquidos se mezclan mediante un dispositivo de paletas introducido en el recipiente de mezcla, mientras que para mezclar sólidos se suele agitar el recipiente en su conjunto.
- **Almacenamiento:** Disposición de las materias primas o los productos en recipientes, principalmente para permitir la mejor interacción entre operaciones continuas y discontinuas; los sólidos suelen almacenarse a la intemperie o en silos, los líquidos en tanques y los gases en gasómetros o esferas (presión).

5.10 La selección del equipo

El equipo utilizado en la industria química puede ser clasificado en dos categorías:

- El **equipo genérico** (“proprietary”) es diseñado y construido por empresas especializadas: bombas, compresores, filtros, centrífugas.
- El **equipo específico** (“non-proprietary”) se diseña de forma especial y única para procesos particulares: cambiadores de calor, columnas de destilación, reactores.

El ingeniero químico ha de elegir y especificar el equipo necesario para una función particular:

- Consultar a los proveedores las especificaciones del equipo.
- Colaborar en la modificación de equipo normalizado.

Como la utilización de equipo normalizado reduce los costes, el ingeniero químico generalmente selecciona y escala el equipo.

Se presentan esquemáticamente los equipos más utilizados, ofreciendo la siguiente estructura:

- Denominación de la operación y referencia al esquema gráfico.
- Mención al equipo.
- Forma de operación
- Esquema gráfico.

5.11 Equipos para operaciones de separación

Adsorción / Desorción (Figura [5.8](#)):

La adsorción normalmente se lleva a cabo en el interior de una columna rellena con el sólido adsorbente formando un lecho fijo, que una vez ha alcanzado su capacidad máxima de adsorción ha de ser sometido a la operación inversa de la desorción (regeneración del sólido).

En la mayoría de las ocasiones esta operación, que sería discontinua, se realiza en forma continua colocando dos lechos adsorbentes en paralelo; en un momento dado uno de ellos está en operación y el otro está siendo regenerado (calentando el lecho y/o por arrastre con un gas inerte), con lo que la alimentación puede circular de forma continua a pesar de que la operación en cada lecho es discontinua.

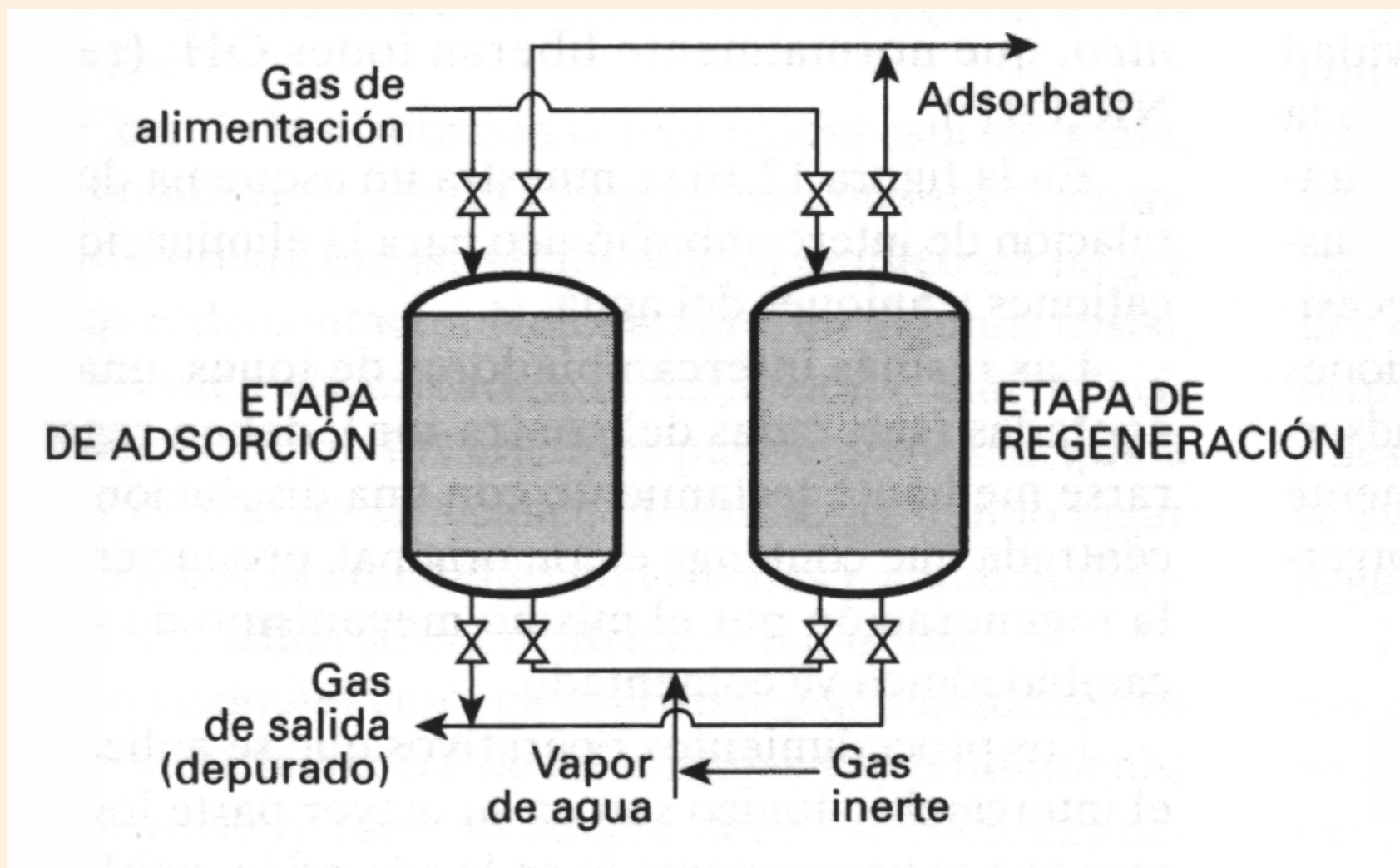


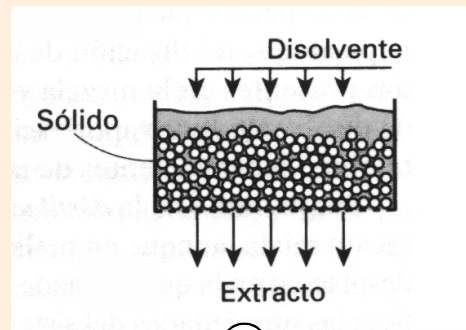
Figura 5.8: Adsorción por ciclos.

Lixiviación(Figura [5.9](#)):

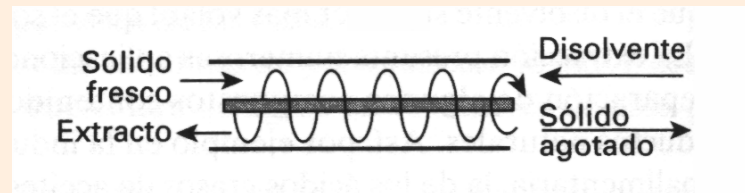
El equipo que se utiliza en lixiviación es muy variado, ya que la operación puede llevarse a cabo por cargas, en semicontinuo o en continuo, en función del sistema involucrado en la separación.

Si se atiende a la forma de manipular la fase sólida, la lixiviación puede realizarse en:

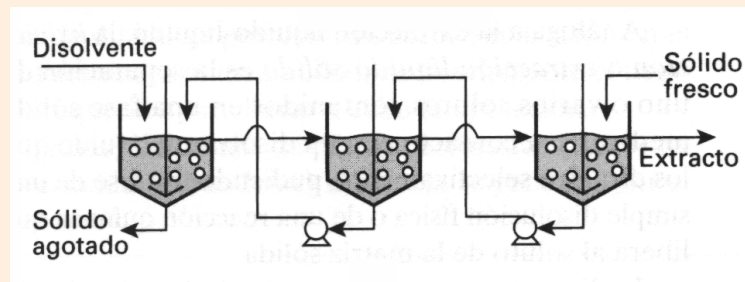
- **Lechos fijos**, a veces denominados “lechos percoladores”, sobre los que se vierte el disolvente líquido.
- **Lechos móviles**, en los que el disolvente se desplaza en contracorriente con el sólido, que se mueve mediante tornillos sinfín, cangilones, etc.
- **Tanques agitados**, en los que el sólido (generalmente si sus partículas son pequeñas) se suspende en el disolvente por agitación y luego se separa por sedimentación.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9: Lixiviación:

- a) Lecho fijo.
- b) Lecho móvil.
- c) Tanques agitados.

Intercambio iónico (Figura [5.10](#)):

El intercambio iónico se aplica principalmente al tratamiento de aguas, utilizando de forma consecutiva resinas de intercambio catiónico y de intercambio aniónico.

La operación se lleva a cabo haciendo pasar la alimentación por sendos lechos fijos de resinas catiónica y aniónica dispuestos en el interior de columnas. Una vez agotadas las resinas, deben regenerarse mediante tratamiento con una disolución concentrada que contenga el ion original.

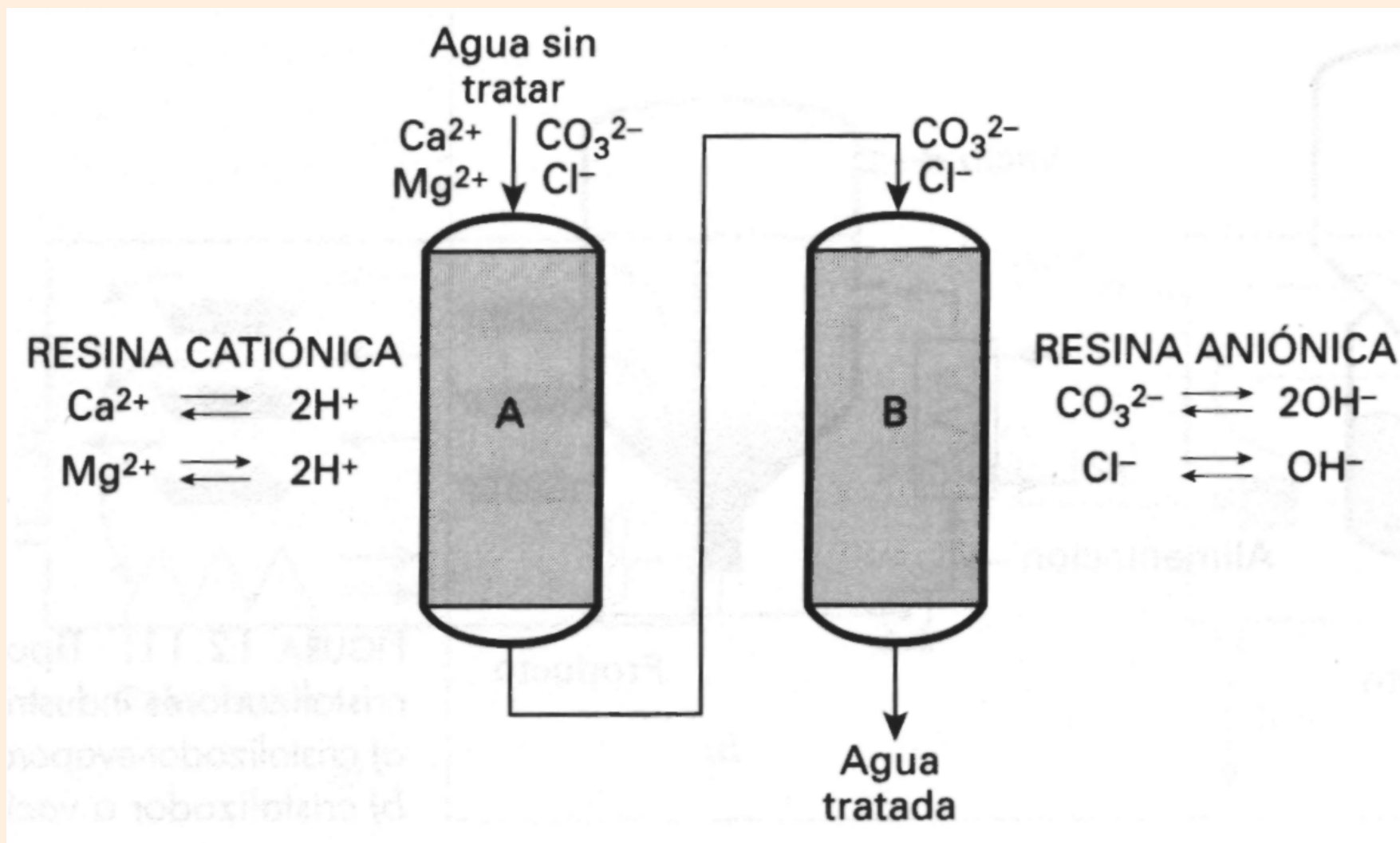


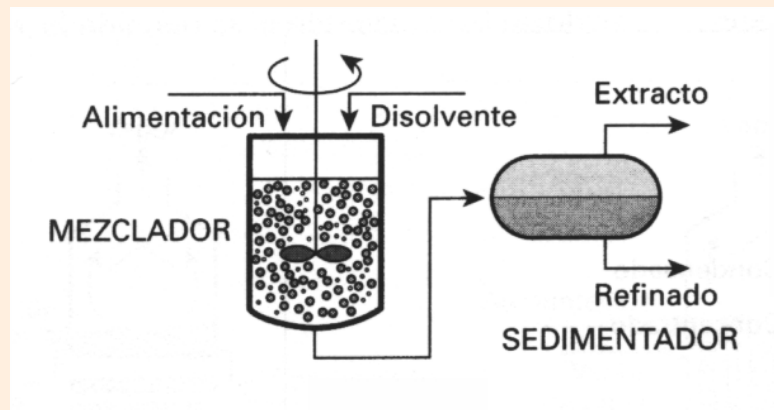
Figura 5.10: Intercambio iónico.

Extracción (Figura [5.11](#)):

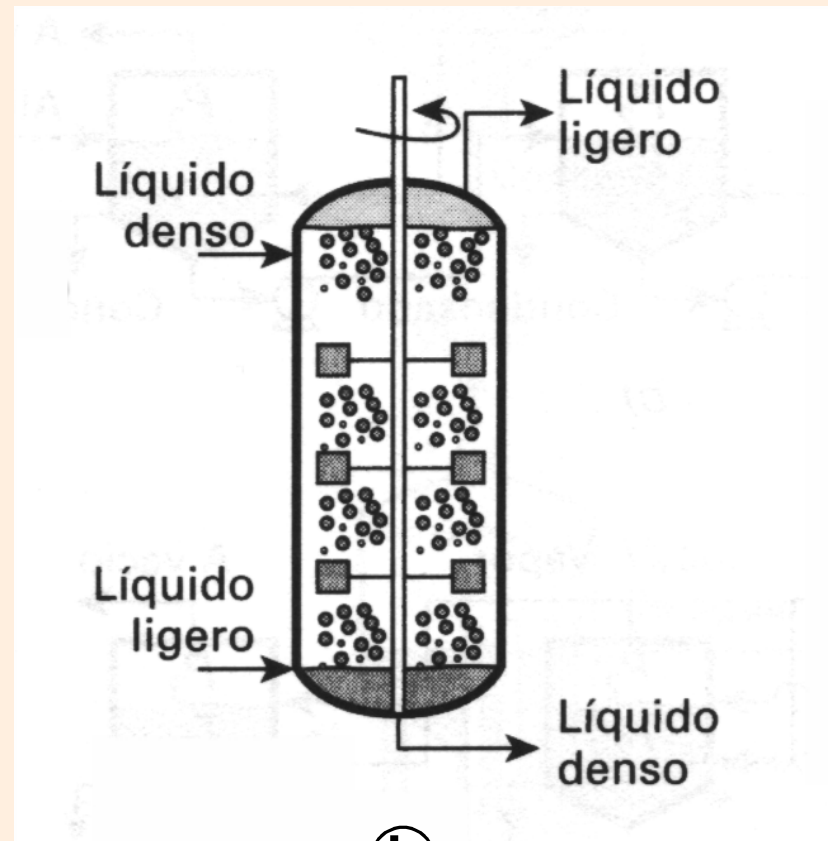
La extracción tiene lugar en **extractores**, en los que puede utilizarse agitación mecánica o en los que la agitación se puede producir por la propia circulación de los fluidos; una vez puestas en contacto íntimo las fases para conseguir la transferencia de materia, se procede a su separación.

Entre los equipos más utilizados se encuentran los de contacto discontinuo, dentro de los que se distinguen dos grandes grupos:

- En los **mezcladores-sedimentadores** los fluidos son agitados mecánicamente en el mezclador, dispersándose una de las dos fases en el seno de la otra. La dispersión resultante se lleva al sedimentador para separar de nuevo las dos fases.
- En las **columnas de extracción** (de platos o agitadas) la mezcla se produce por el propio movimiento de los fluidos, las gotas de la fase que ascienden dispersas coalescen entre las discontinuidades (platos o paletas) y vuelven a formarse cuando las atraviesan de nuevo. Por su parte, la fase pesada recorre las etapas en contacto con las gotas ascendentes y desciende como fase continua a la etapa inferior.



a



b

Figura 5.11: Extractores de contacto discontinuo:
a) Mezclador-sedimentador.
b) Columna de extracción (agitada).

Destilación / Rectificación (Figura [5.12](#)):

La destilación o la rectificación se llevan a cabo habitualmente en **columnas de platos**, aunque también pueden utilizarse columnas de relleno (véase Absorción / Desabsorción)

Las columnas de platos contienen superficies planas que dividen la columna en etapas y retienen una cierta cantidad de líquido en su superficie, a través del cual se hace burbujear la fase vapor que asciende por la columna, consiguiéndose así un buen contacto entre ambas fases. El líquido de un plato cae al plato siguiente por un rebosadero situado en un extremo. Según la forma del dispositivo que dispersa la fase vapor a través del líquido se distingue entre *platos perforados* (simples orificios con tapas que hacen de válvulas) o *platos de campanas* (más sofisticados y, por tanto, más costosos).

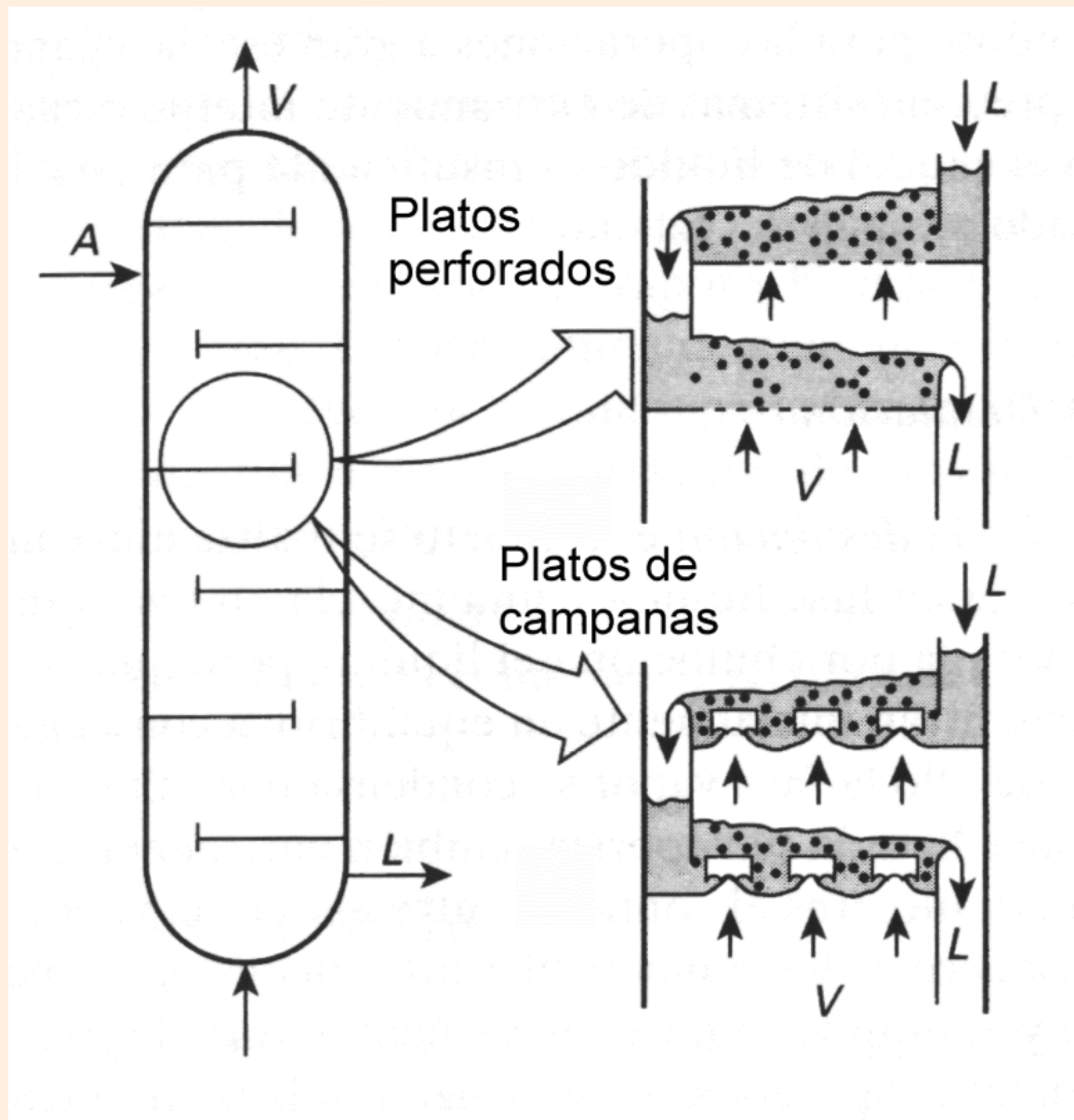


Figura 5.12: Columna de platos.

Absorción / Desabsorción (Figura [5.13](#)):

La absorción o la desabsorción se llevan a cabo habitualmente en **columnas de relleno**, aunque también pueden utilizarse columnas de platos (véase Destilación / Rectificación).

Las columnas de relleno suelen ser cilindros de relación altura/diámetro elevada (alrededor de 10), llenas en su interior de elementos sólidos pequeños (menores que la octava parte del diámetro) distribuidos al azar o empaquetados e inertes a las fases circulantes. La corriente de líquido se rompe en pequeñas corrientes al caer sobre los elementos de relleno y se dispersa resbalando por su superficie en forma de película o gotas, lo que permite un íntimo contacto con la fase gaseosa que circula en sentido contrario. En el diseño de los rellenos se persigue el objetivo principal de lograr una elevada superficie por unidad de volumen, baja densidad y alta resistencia mecánica.

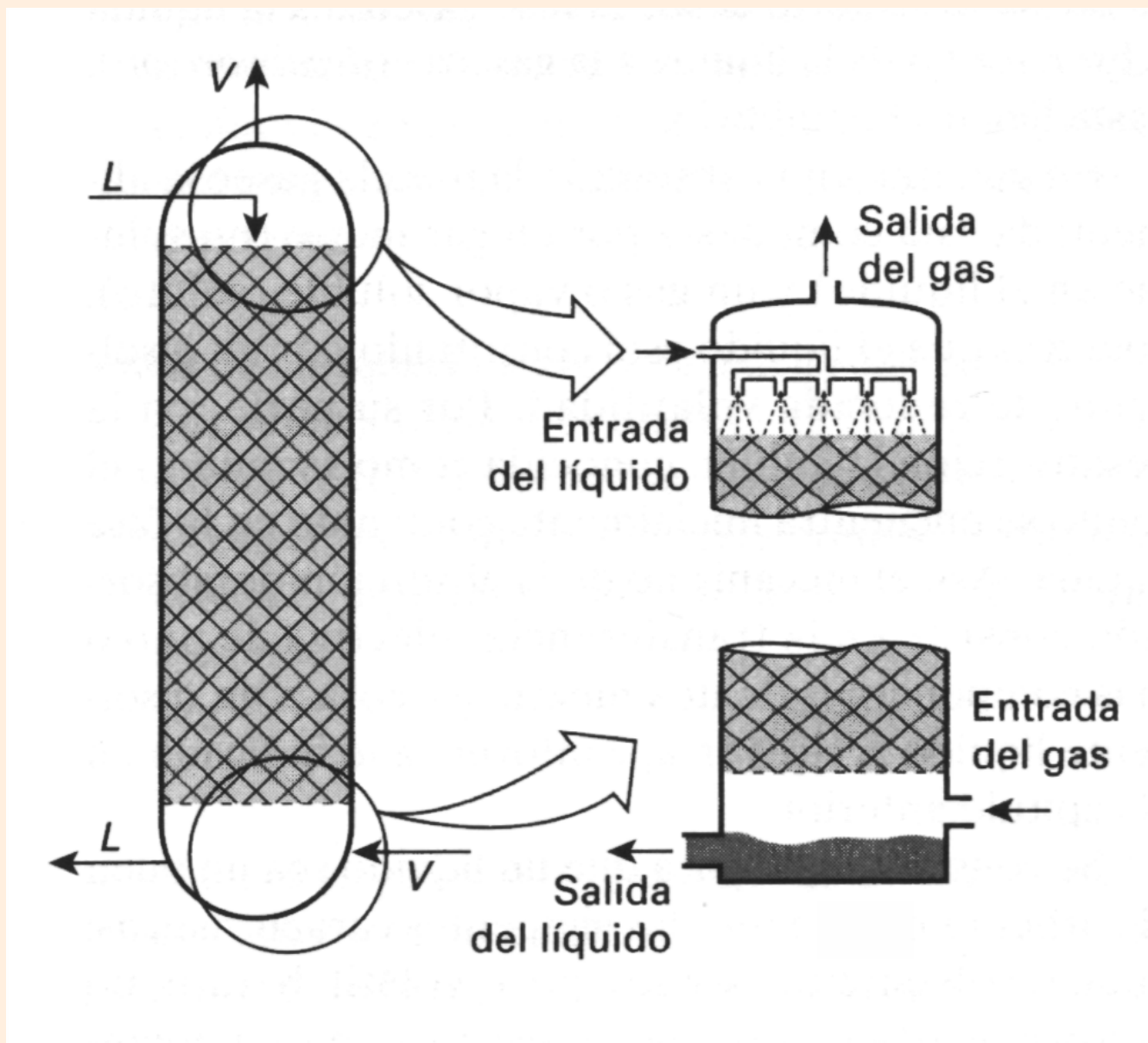


Figura 5.13: Columna de relleno.

Procesos con membranas (Figura [5.14](#)):

Existen diversos modelos de aparatos para llevar a cabo los procesos con membranas (de los cuáles el más utilizado es la ósmosis inversa), siendo los más extendidos los de difusión radial o cartuchos, ya que están formados por membranas planas, fáciles de fabricar, arrolladas en espiral formando un cilindro, lo que incrementa su relación superficie/volumen.

La disolución que se va a separar entra por la periferia de uno de los extremos del cilindro y va circulando hacia el otro extremo. Durante su recorrido el disolvente atraviesa las membranas semipermeables migrando hacia el centro, por donde sale, mientras que la disolución concentrada no atraviesa las membranas y sale por la periferia. La separación entre las membranas que forman el cartucho se consigue con láminas espaciadoras impermeables y una rejilla.

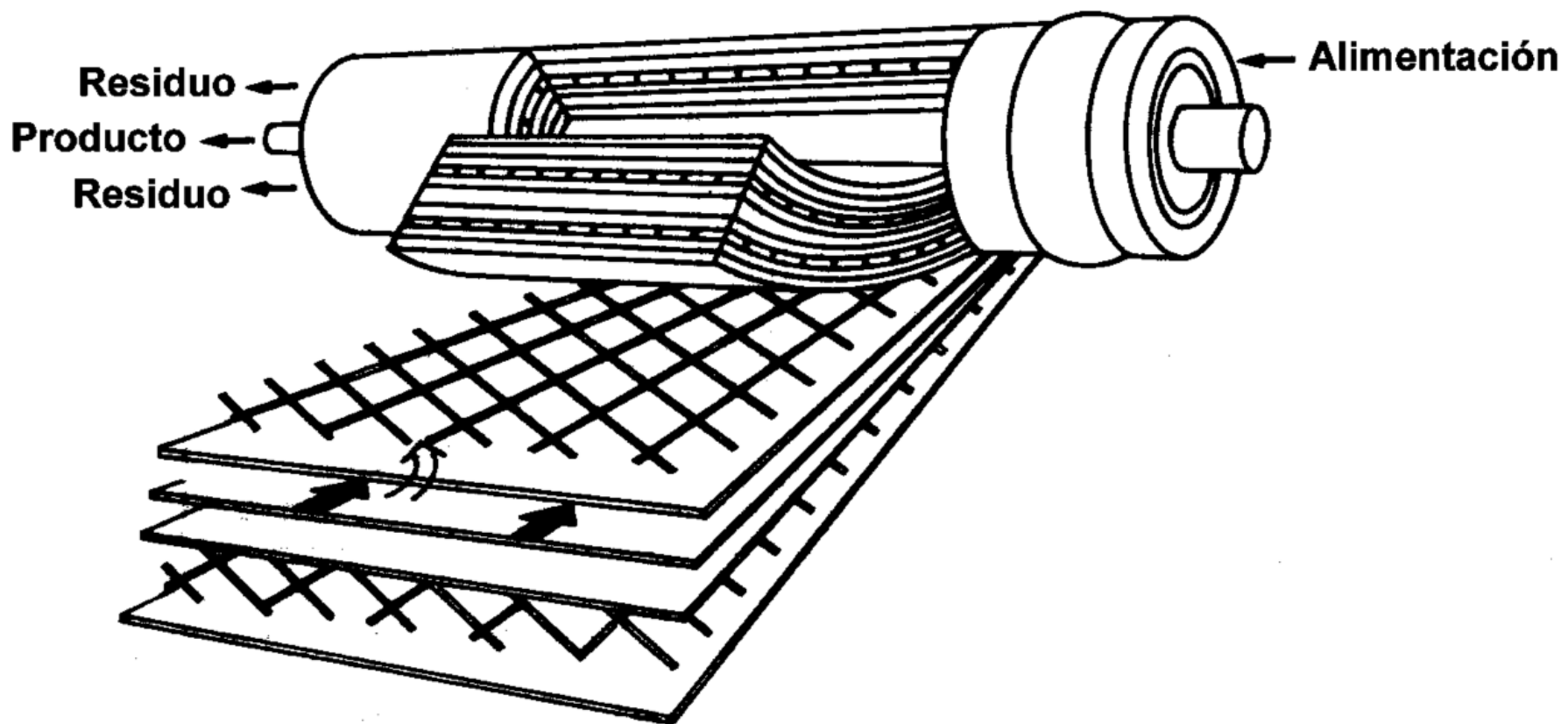


Figura 5.14: Cartucho para ósmosis inversa.

Evaporación (Figura [5.15](#)):

Esta operación se lleva a cabo en aparatos denominados **evaporadores**, cuyos tipos y condiciones de operación dependen de la disolución que se va a tratar.

El calor, que controla el proceso, se suministra generalmente en forma de vapor de agua condensante en el interior de tubos sumergidos en la disolución. Generalmente la evaporación se lleva a cabo en varias etapas para mejorar el aprovechamiento energético (*“múltiple efecto”*): el vapor generado en un efecto se aprovecha en otro como medio de calefacción.

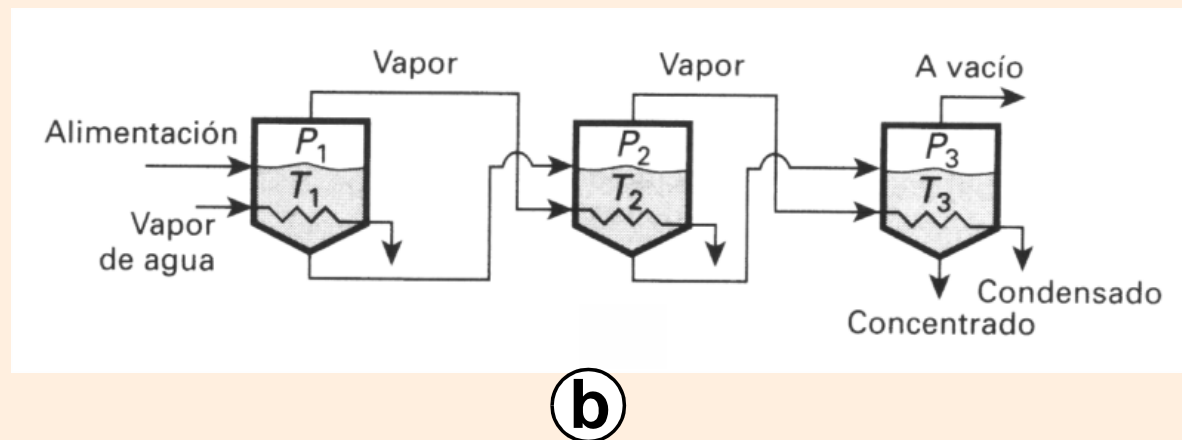
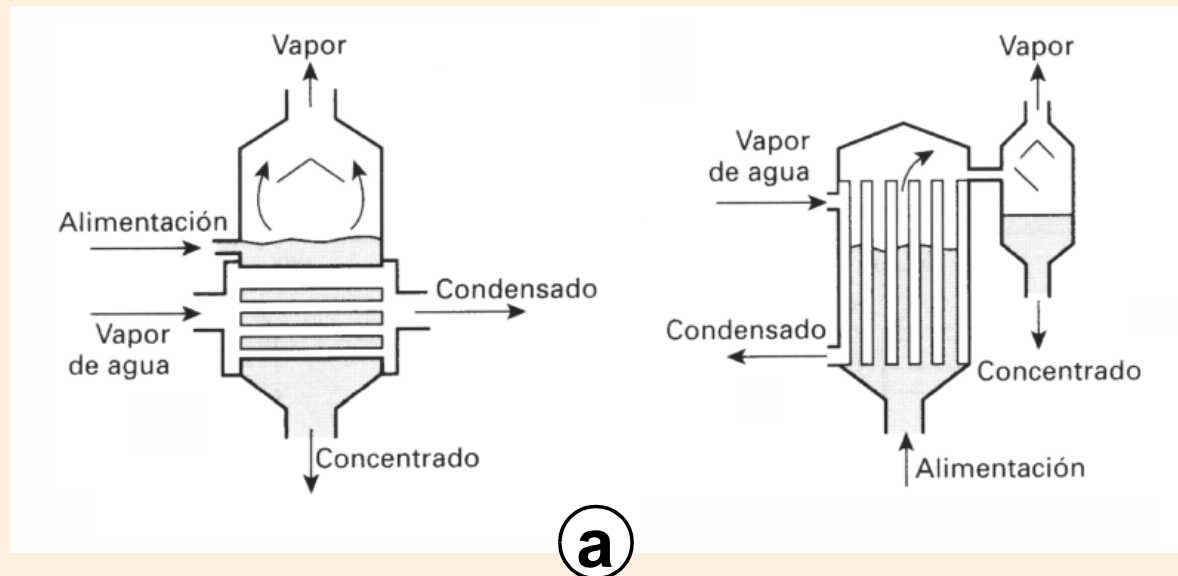


Figura 5.15:

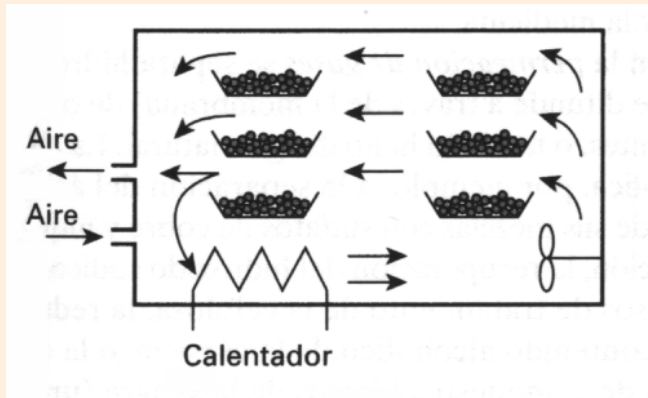
- a) Evaporadores de tubos.
- b) Evaporación en múltiple efecto.

Secado / Liofilización / Sublimación (Figura [5.16](#)):

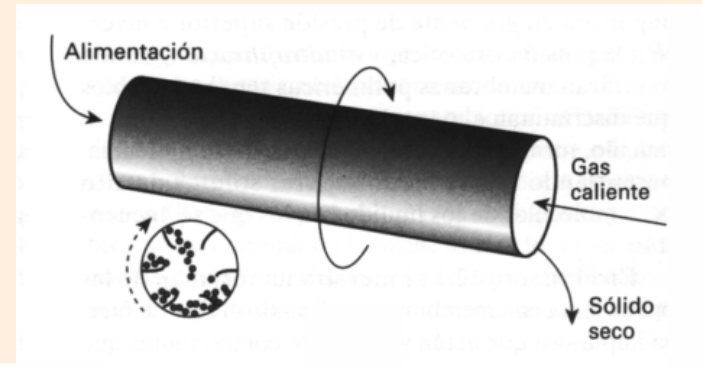
Hay muchos tipos de aparatos secadores, denominados genéricamente **secaderos**. Casi todos ellos están basados en poner en contacto el sólido húmedo finamente dividido con una corriente de aire caliente no saturado. Para la liofilización se congela previamente el sólido húmedo y posteriormente se somete a vacío para producir una sublimación.

Los secaderos comerciales más comunes son:

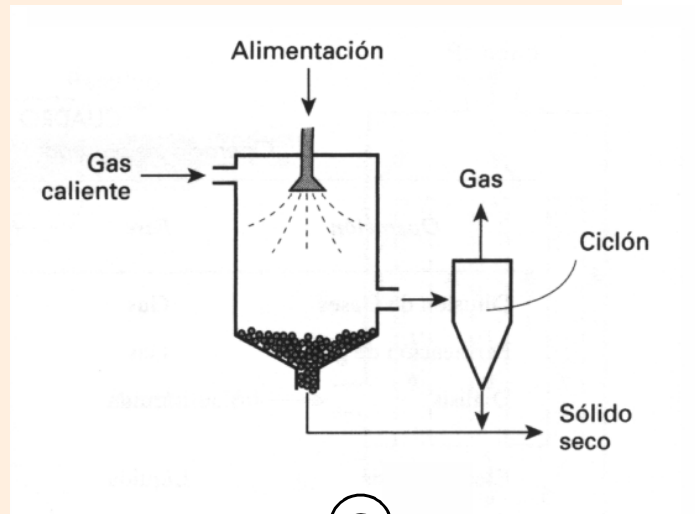
- Los **secaderos de bandejas**, en los que el sólido se deposita en capas de poca profundidad y el aire circula por la superficie del sólido.
- Los **secaderos rotativos**, en los que el sólido desciende a lo largo de un cilindro rotatorio inclinado, secándose por acción del aire caliente que circula en contracorriente.
- Los **secaderos de pulverización**, en los que la suspensión de sólido, en forma de gotas, se pone en contacto brusco con aire caliente a elevada temperatura.



a



b



c

Figura 5.16: Secaderos:

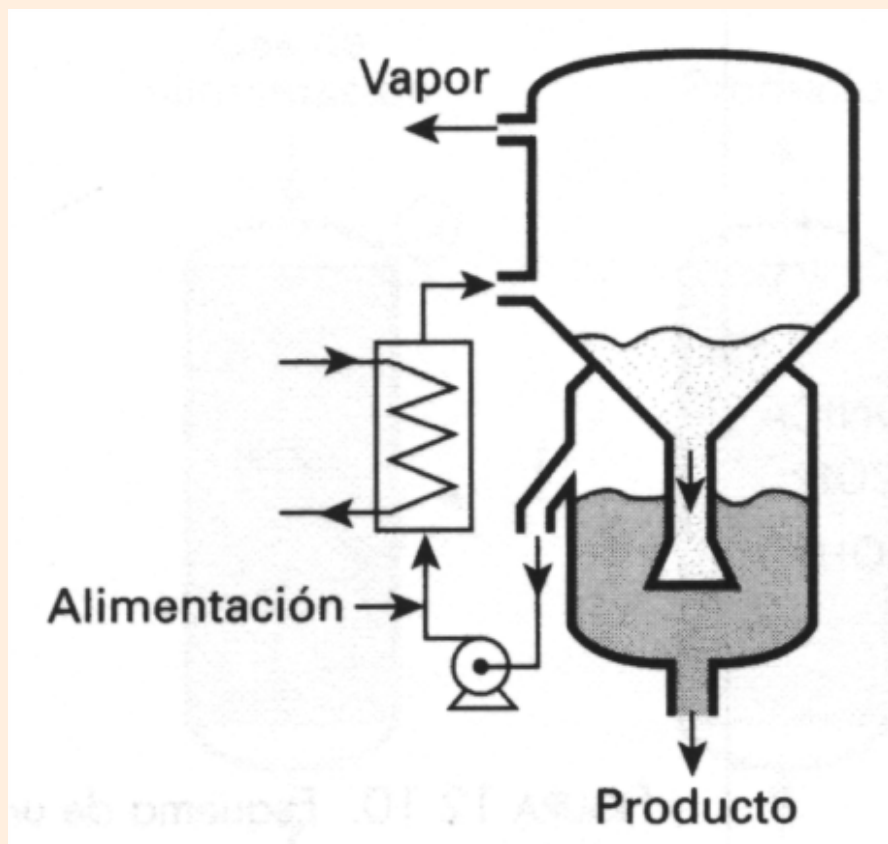
- a) De bandejas.
- b) Rotativo.
- c) De pulverización.

Cristalización (Figura [5.17](#)):

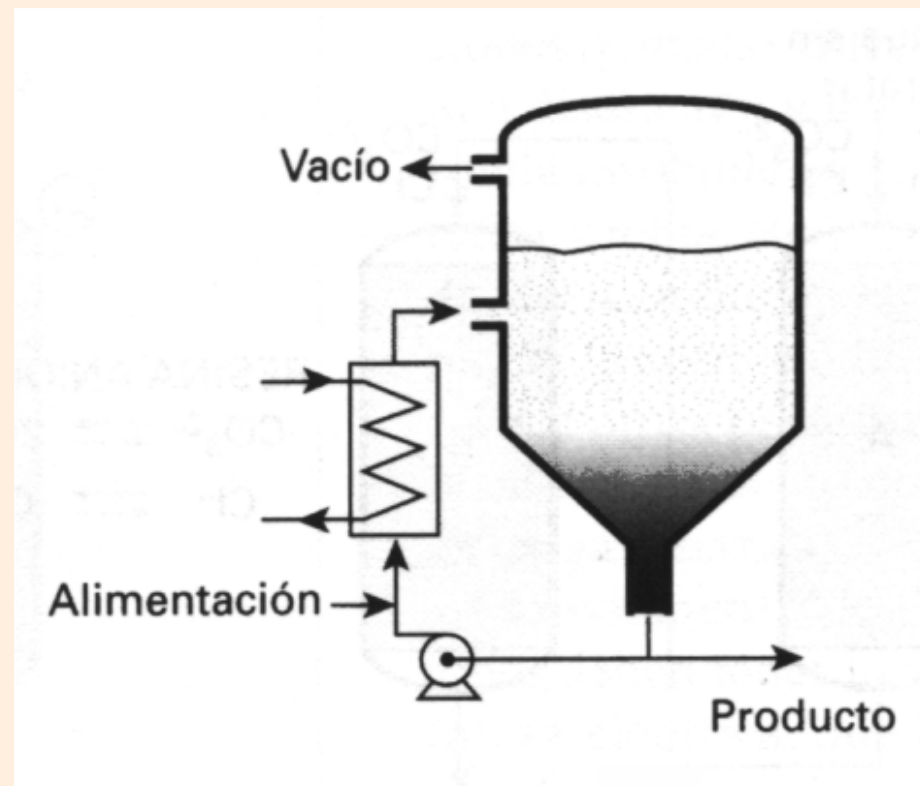
La cristalización se lleva a cabo en dispositivos denominados **cristalizadores**, cuyo tipo y modo de operación dependen de la forma de la curva de solubilidad y de la naturaleza de la disolución. Si bien en algunas aplicaciones se emplea la operación por cargas, en general los cristalizadores operan de modo continuo.

Según el modo en que se produce la sobresaturación de la disolución, los cristalizadores pueden ser:

- **Cristalizadores de tanque** (por cargas), en los que la sobre saturación se produce por enfriamiento, sin evaporación apreciable (útiles cuando la solubilidad varía mucho con la temperatura).
- **Cristalizadores-evaporadores**, en los que la sobresaturación se produce por evaporación, sin enfriamiento apreciable (útiles cuando la solubilidad no varía con la temperatura).
- **Cristalizadores de vacío**, en los que se combina el enfriamiento adiabático y la evaporación (útiles a bajas temperaturas).



a



b

Figura 5.17: Cristalizadores continuos:
a) Cristalizador-evaporador.
b) Cristalizador de vacío.

Interacción aire - agua (Figura [5.18](#)):

Bajo el punto de vista de los procesos industriales, la faceta más importante de las operaciones de interacción aire-agua es el enfriamiento de agua, que se lleva a cabo en **torres de enfriamiento** y se utiliza para enfriar grandes volúmenes de agua caliente procedentes de cambiadores de calor.

En las torres de enfriamiento, el agua caliente, que se introduce mediante pulverizadores por la parte superior, desciende atravesando el relleno dispuesto en su interior en contracorriente con el aire ascendente y abandona el sistema por su parte inferior. A su vez, el aire asciende por convección natural o forzada (impulsado por una soplante o un ventilador).

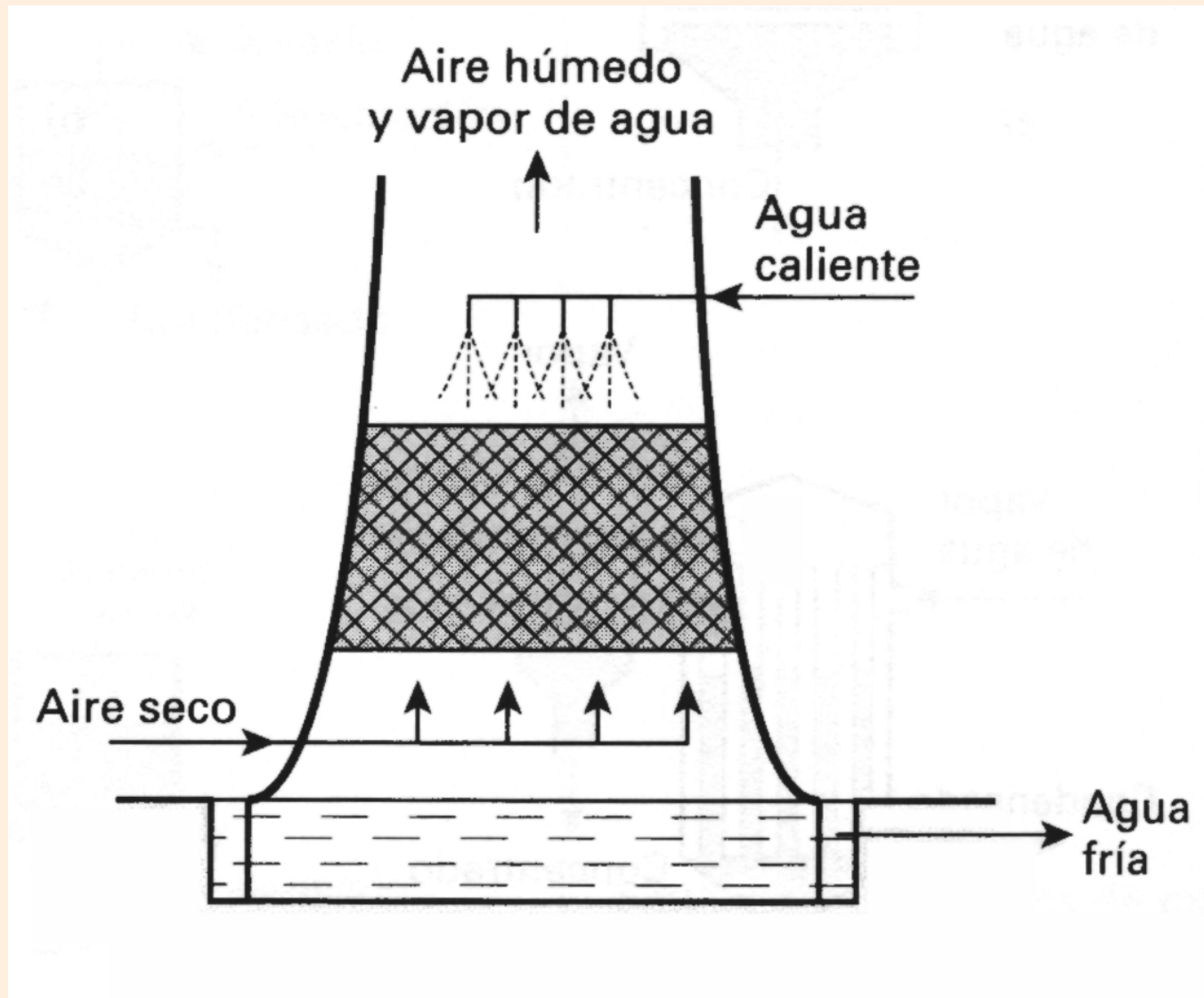


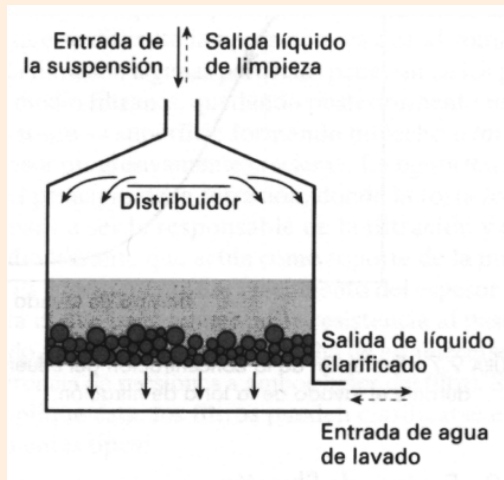
Figura 5.18: Torre de enfriamiento de agua.

Filtración (Figura [5.19](#)):

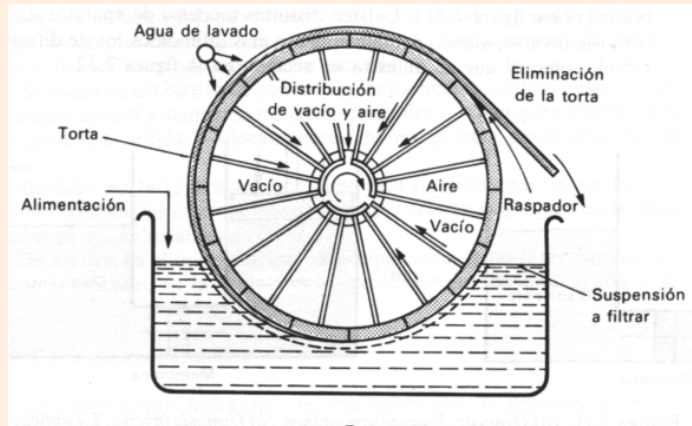
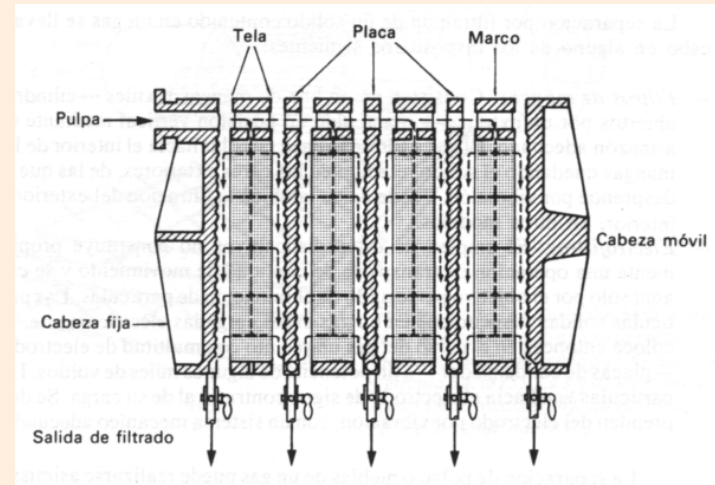
Los dispositivos en los que se lleva a cabo la filtración se denominan **filtros** y el factor más importante en su elección es la resistencia de la torta, ya que el crecimiento de su espesor hace que esa resistencia aumente y, por tanto, ha de establecerse una diferencia de presiones a ambos lados del filtro.

Según se aplique la diferencia de presión, los filtros de sólidos suspendidos en líquidos se clasifican en:

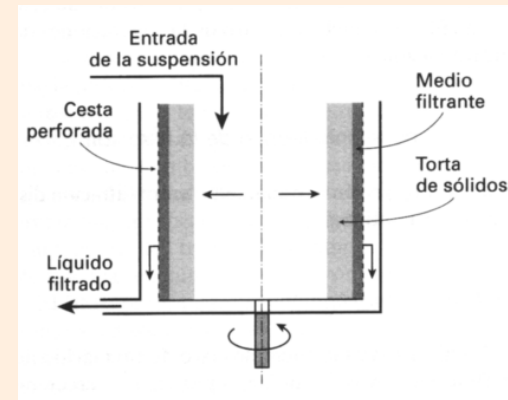
- **Filtros de presión**, en los que el filtrado se encuentra a presión atmosférica y la suspensión alimentada a una presión superior, lo que puede conseguirse mediante la simple aplicación de la fuerza de la gravedad (*filtros de gravedad*) o aplicando fuerza de impulsión mediante una bomba (*filtros prensa*).
- **Filtros de vacío**, en los que la alimentación está a presión atmosférica y el filtrado a una presión inferior, lo que se consigue haciendo vacío en *tambores* o *discos* rotatorios.
- **Filtros centrífugos**, en los que la diferencia de presiones se aumenta por centrifugación, haciendo girar un tambor sobre un eje a velocidad elevada.



a



b



c

Figura 5.19: Filtros:

- a) De presión.
- b) De vacío.
- c) Centrífugo.

Sedimentación (Figura [5.20](#)):

La sedimentación se lleva a cabo en dispositivos denominados **sedimentadores**, **decantadores** (si el producto valioso es el líquido) o **espesadores** (si el producto valioso es el sólido).

Un sedimentador continuo consiste en un depósito cilíndrico que suele tener fondo cónico de poca inclinación. La suspensión se alimenta por el centro del sedimentador, a una cierta profundidad por debajo del nivel del líquido y el líquido claro se retira por la parte superior a través de un rebosadero. Para facilitar la separación, estos equipos están dotados de unos rastrillos que giran lentamente, desplazando los sólidos hacia la parte central del fondo, desde donde se retiran mediante una bomba de lodos.

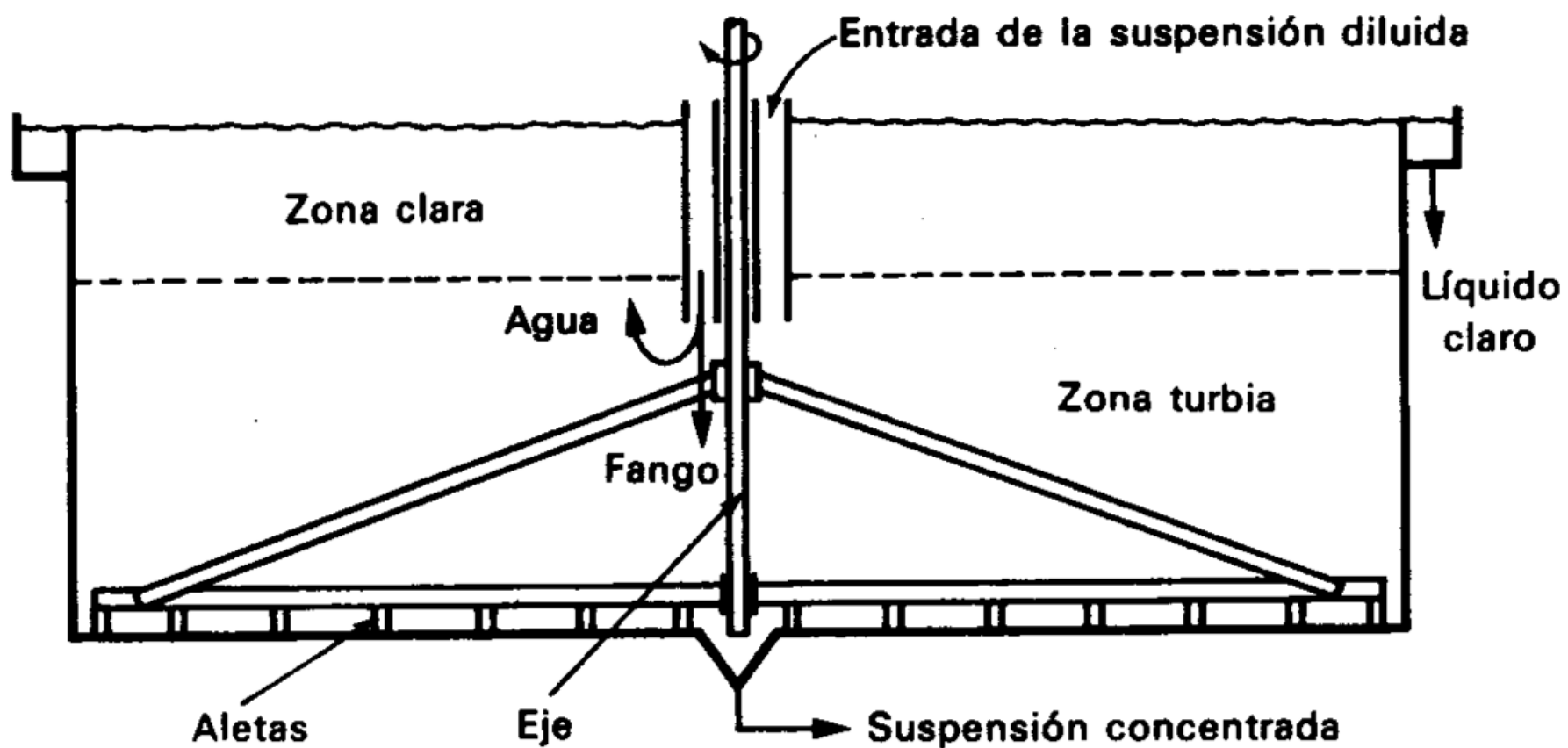


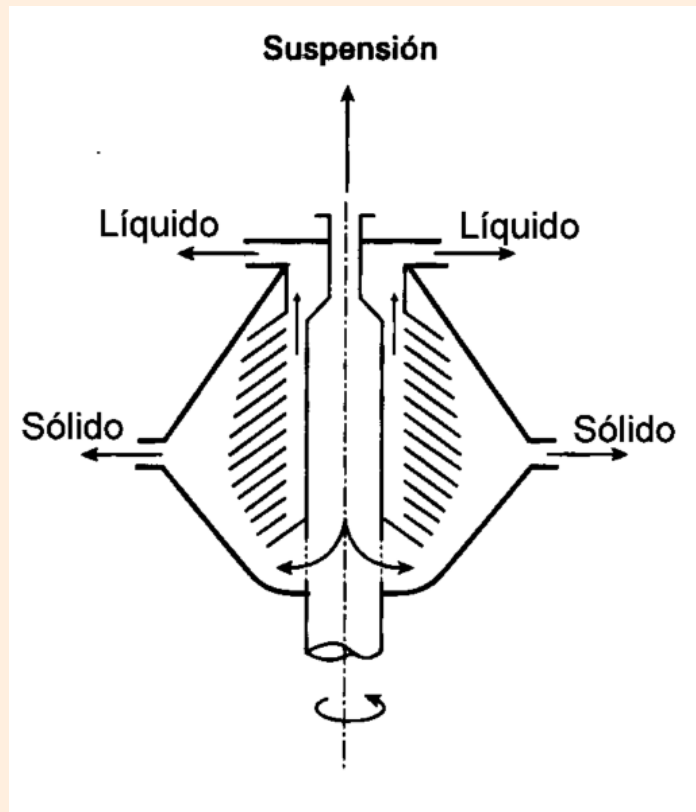
Figura 5.20: Sedimentador

Centrifugación (Figura [5.21](#)):

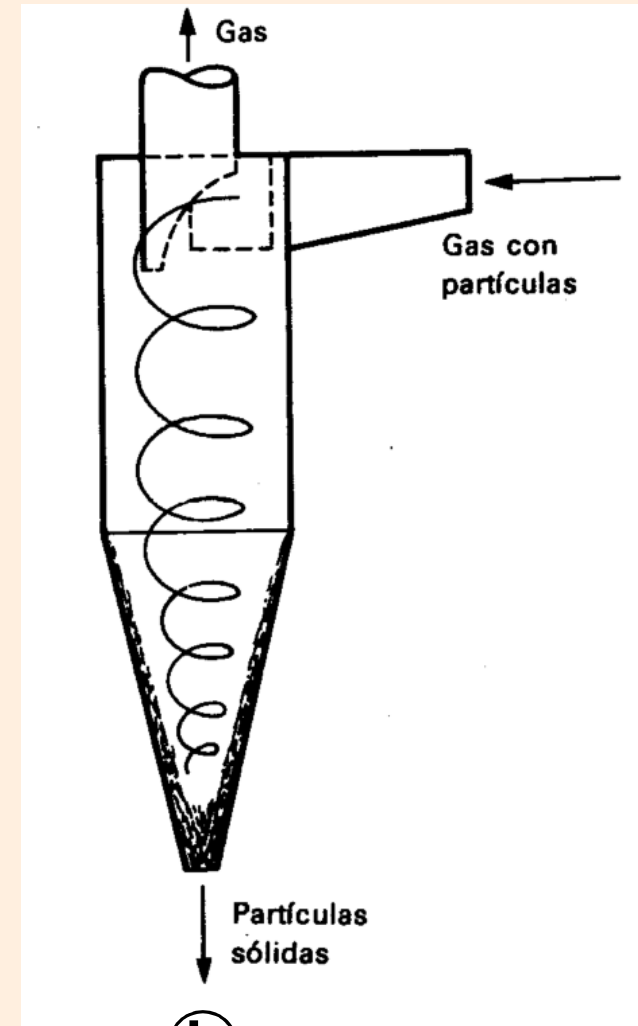
La centrifugación para la separación de sólidos de un líquido se desarrolla en aparatos denominados sedimentadores centrífugos, o simplemente, **centrífugas**; la centrifugación para la separación de sólidos de un gas se desarrolla en aparatos denominados separadores ciclónicos, o simplemente, **ciclones**.

Las centrífugas más habituales operan de forma continua y disponen de una parte móvil giratoria (rotor), que proporciona la energía de rotación a la suspensión y una parte fija diseñada para guiar y separar las dos fases, densa y ligera, que constituyen las dos corrientes de salida.

Los ciclones no tienen partes móviles y se basan en aprovechar la energía cinética de la corriente gaseosa que entra tangencialmente, haciendo que ésta recorra una trayectoria en espiral o hélice, donde la inercia hace desplazarse hacia el exterior a las partículas más densas; en la parte cónica inferior se recogen los sólidos y el gas sale por la parte superior.



a



b

Figura 5.21: Aparatos de centrifugación:
a) Centrífuga de discos.
b) Ciclón.

Flotación (Figura [5.22](#)):

La flotación se lleva a cabo en grandes recipientes abiertos denominados **células de flotación**, en los que penetra por su parte inferior una corriente de aire muy subdividida. La entrada de la suspensión es continua y en la mayoría de los casos el aire se inyecta a presión (células neumáticas).

En las células neumáticas de flotación la suspensión penetra por un extremo del tanque, atravesándolo longitudinalmente; en su recorrido la suspensión encuentra una corriente ascendente de burbujas de aire que arrastra las partículas, formando la espuma, que se retira por la parte superior, y mantiene el baño en continua agitación.

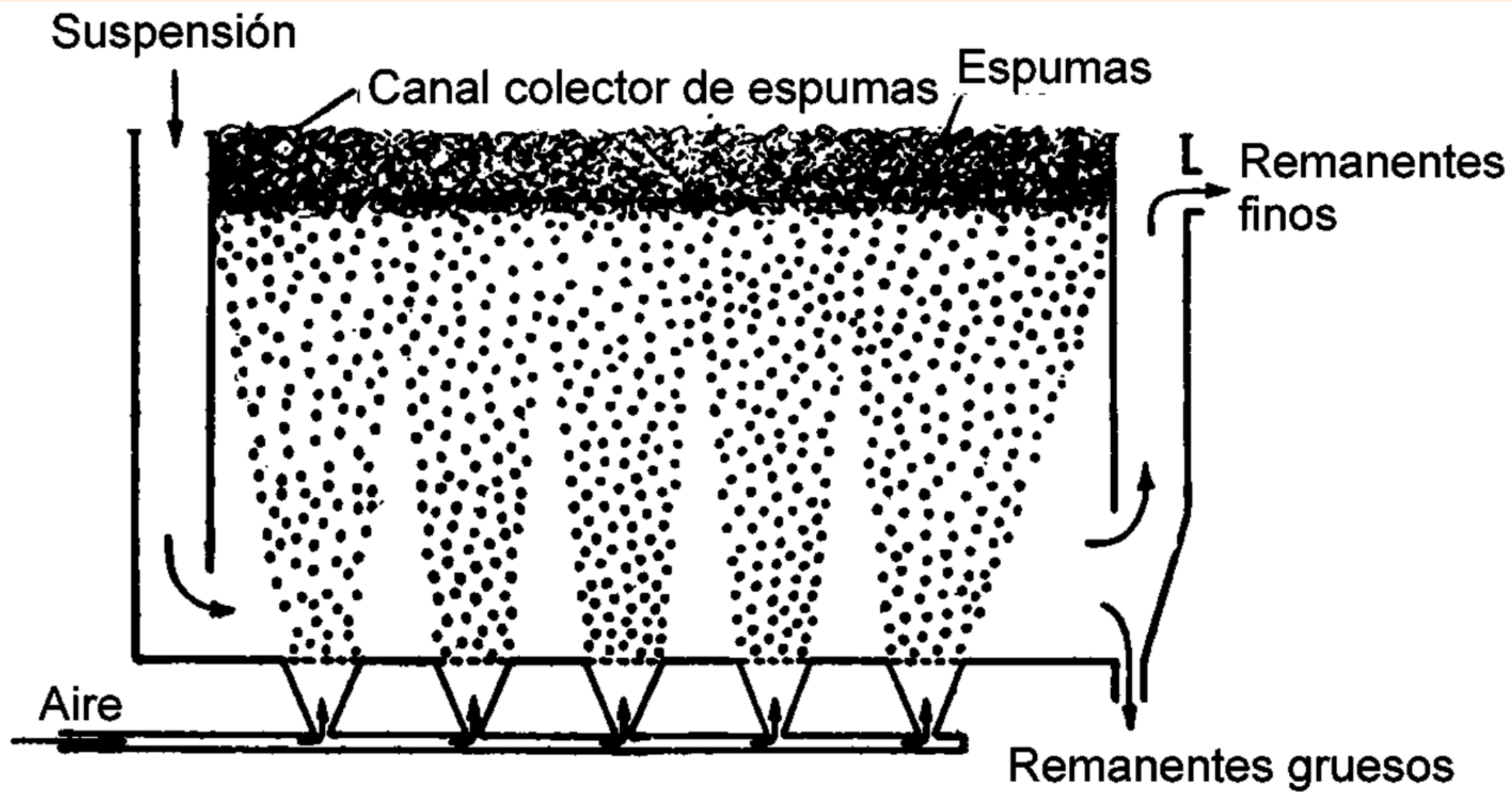


Figura 5.22: Célula neumática de flotación.

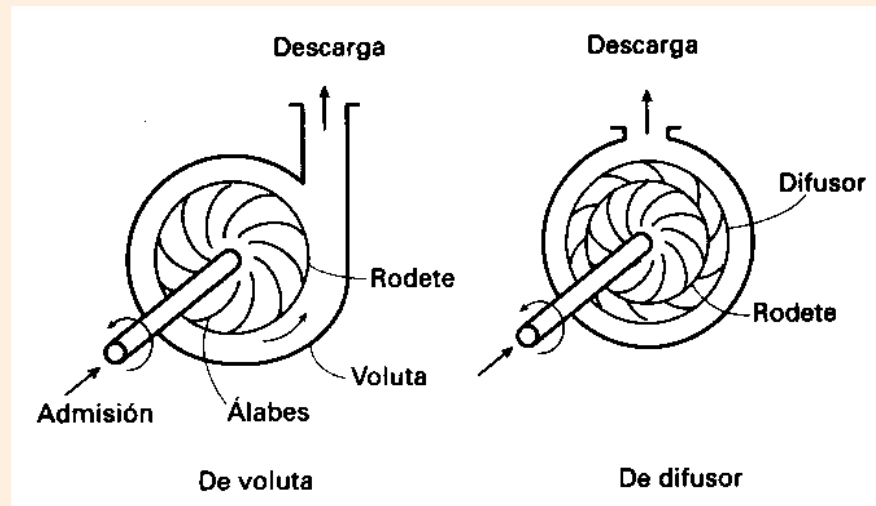
5.12 Equipos para flujo de fluidos

Impulsión de líquidos (Figura [5.23](#)):

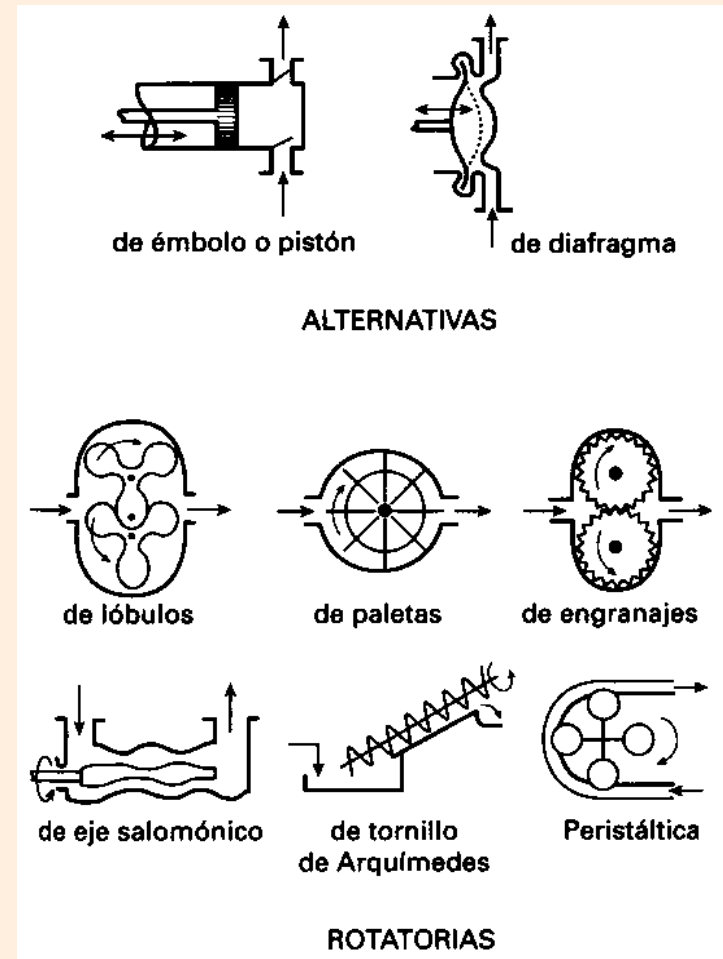
Los aparatos utilizados para la impulsión de líquidos se denominan **bombas**, que presentan en cada caso unas características determinadas, como su *capacidad* (caudal que pueden suministrar) y su *carga* (altura a la que pueden impulsar un líquido).

Pueden distinguirse dos tipos principales de bombas:

- Las **bombas centrífugas** están basadas en suministrar al líquido energía cinética de rotación mediante unas paletas o álabes giratorios, lo que proporciona elevadas capacidades de circulación pero con una carga limitada.
- Las **bombas volumétricas** se basan en impulsar el líquido por acción de unas palas que empujan porciones del líquido, a una capacidad relativamente baja, pero pudiendo conseguir cargas muy elevadas.



a



b

Figura 5.23: Bombas:

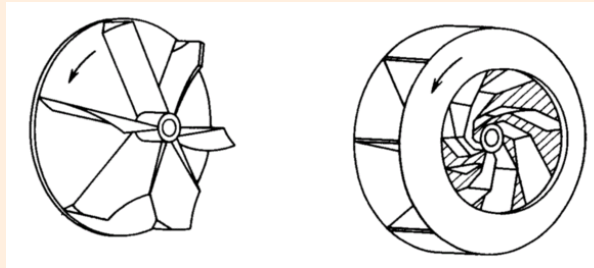
- a) Centrífugas.
- b) Volumétricas.

Impulsión de gases (Figura [5.24](#)):

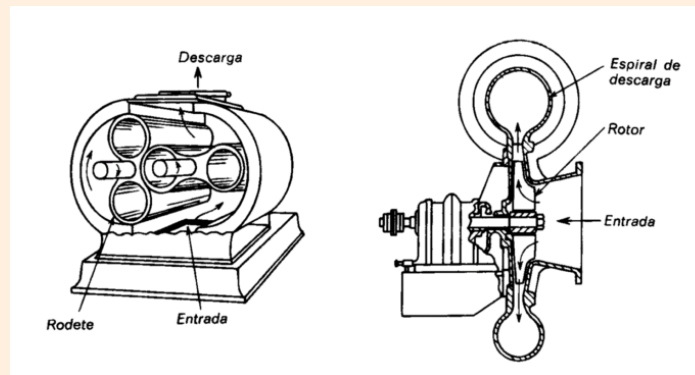
Los aparatos utilizados para impulsar gases se clasifican según el intervalo de aumento de presión que pueden producir; las presiones más altas pueden conseguirse con más de una etapa de operación.

Cabe distinguir entre los tres tipos principales de dispositivos:

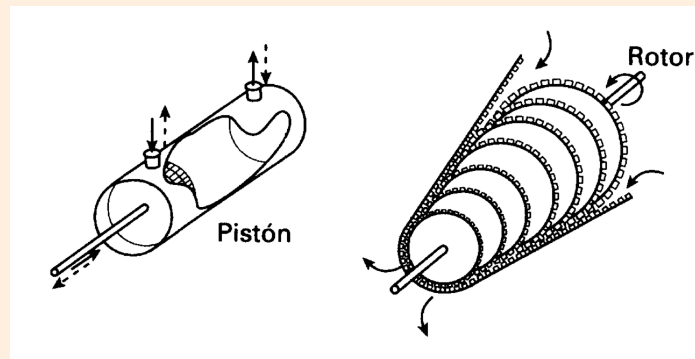
- Los **ventiladores** proporcionan normalmente caudales elevados de gas, con un pequeño aumento de presión; los gases son impulsados, no comprimidos. Generalmente son centrífugos.
- Las **soplantes** son dispositivos que pueden proporcionar caudales medianos, con aumento de presión intermedio. Pueden ser de desplazamiento positivo o centrífugas (turbosoplantes)
- Los **compresores** pueden suministrar caudales variables con aumentos de presión muy elevados. Los alternativos están formados por uno o varios cilindros en serie, refrigerados, mientras que los centrífugos (turbocompresores) son similares a las bombas centrífugas.



a



b



c

Figura 5.24: Aparatos de impulsión de gases:

a) Rodetes de ventiladores.

b) Soplantes.

c) Compresores.

Regulación de flujo (Figura [5.25](#)):

Para conseguir que por una conducción circule una cantidad determinada de fluido se regula su caudal mediante **válvulas**, dispositivos que introducen un rozamiento adicional en el sistema que restringe el caudal que circula.

Aunque hay muchos tipos de válvulas, los dos más característicos son los siguientes:

- La **válvula de compuerta** tiene como objetivo principal interrumpir el paso del fluido introduciendo un disco en su trayectoria, siendo la más adecuada para abrir o cerrar completamente la conducción; cuando está completamente abierta introduce muy pequeñas pérdidas de presión.
- La **válvula de asiento** se utiliza principalmente para regular el caudal de circulación, lo que se logra haciendo cambiar varias veces de dirección el fluido a través de una pequeña abertura; la caída de presión es, por tanto, relativamente grande en este tipo de válvula.

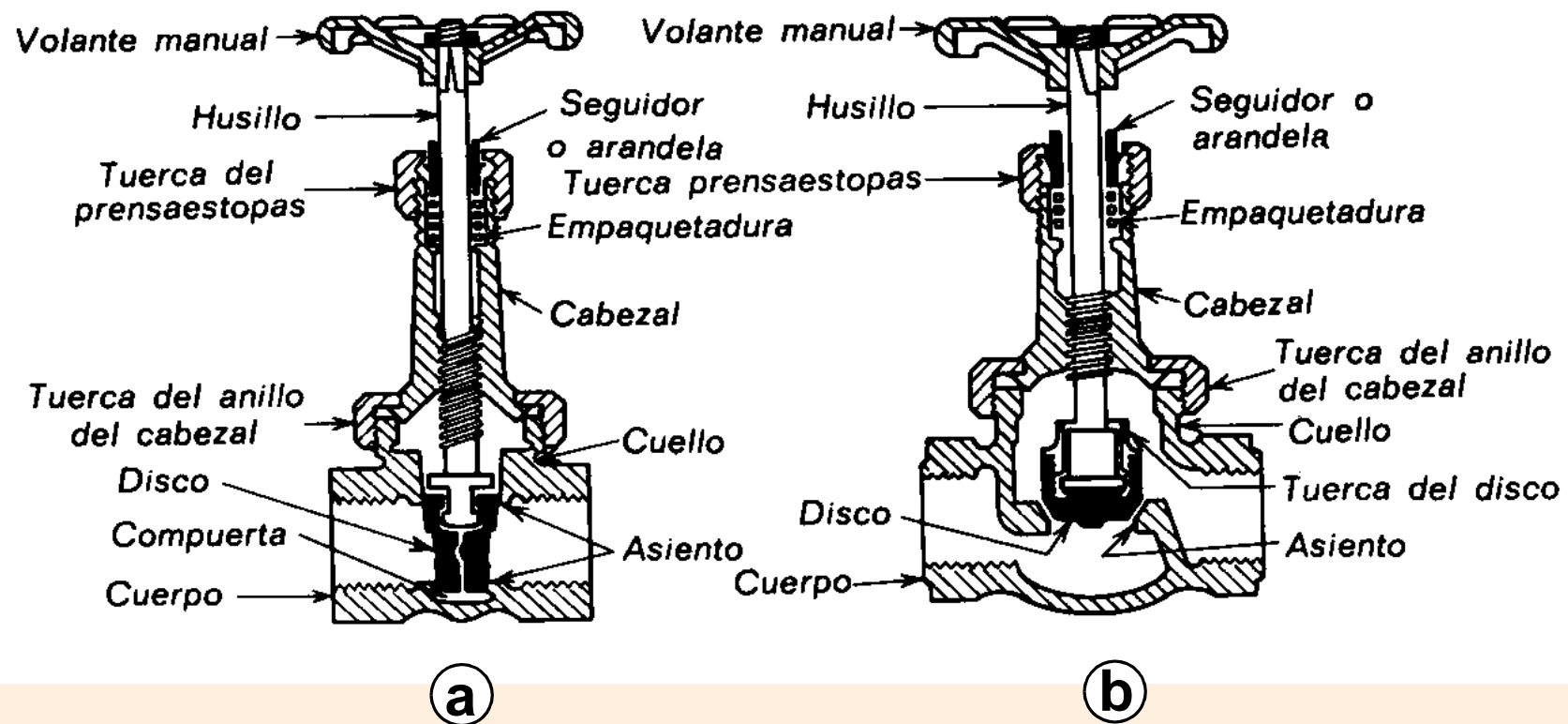


Figura 5.25: Válvulas:

- a) De compuerta.
- b) De asiento.

Fluidización (Figura [5.26](#)):

La fluidización se aplica a escala industrial a numerosos procesos, ya que la utilización de lechos fluidizados permite un elevado grado de mezcla, mayor facilidad de operación en continuo y un volumen más reducido para una capacidad de tratamiento determinada

En una instalación típica que opera en lecho fluidizado, las condiciones de fluidización se mantienen por acción de una corriente de gas. Las partículas que se van degradando se eliminan y son sustituidas simultáneamente por partículas nuevas. El gas que abandona el lecho puede arrastrar pequeñas partículas que se separan mediante sedimentadores (ciclones).

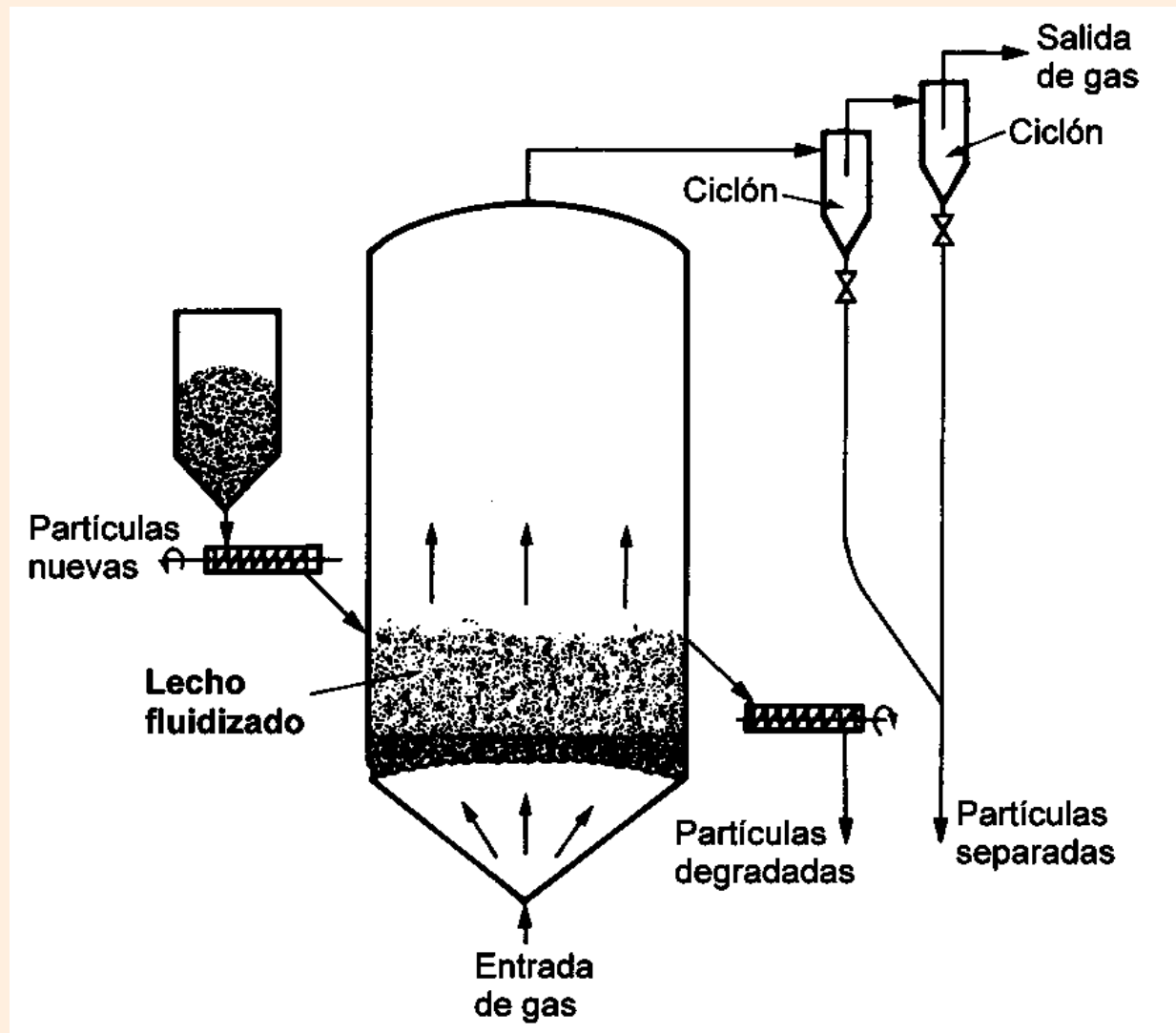


Figura 5.26: Fluidización.

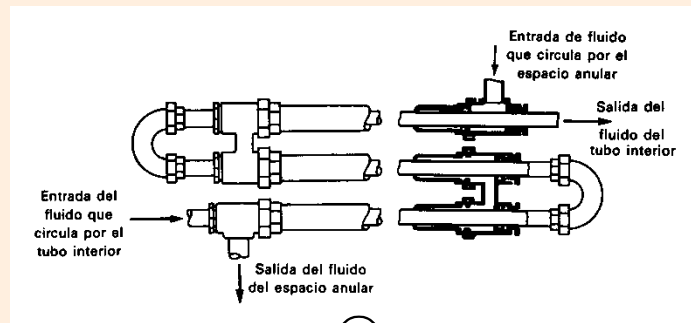
5.13 Equipos para transmisión de calor

Intercambio de calor sin cambio de fase (Figura [5.27](#)):

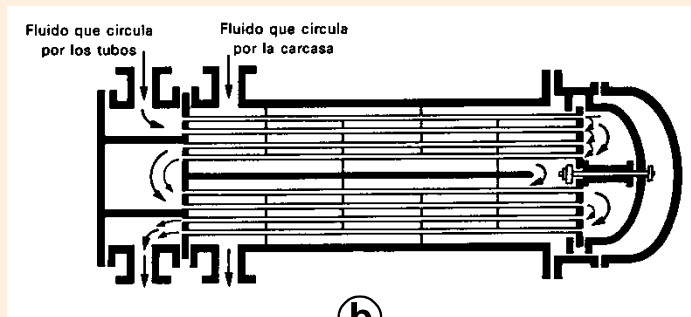
Los equipos donde se intercambia calor entre fluidos sin que se produzca cambio de fase se denominan **cambiadores de calor** y son unos de los dispositivos más utilizados en los procesos químicos, donde siempre es necesario proporcionar a las distintas corrientes sus niveles térmicos adecuados, además de intentar conseguir el máximo ahorro de energía.

Los tipos de cambiadores de calor mas utilizados son los siguientes:

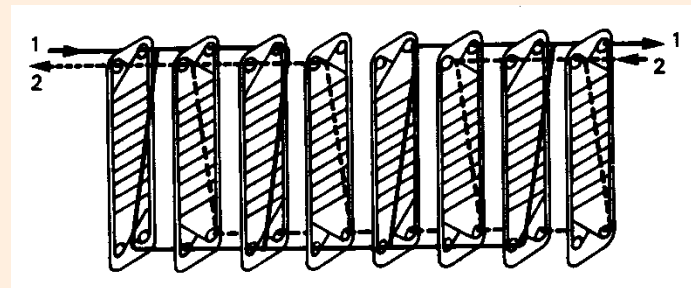
- Los **cambiadores de calor de doble tubo** están constituidos por dos tubos concéntricos, por los que circula un fluido por el interior del tubo interno y otro fluido por el espacio anular; intercambian calor a través de la pared que separa ambos fluidos.
- Los **cambiadores de calor de carcasa y tubos** están compuestos por una carcasa cilíndrica en cuyo interior se dispone un haz de tubos de pequeño diámetro, paralelamente al eje del cilindro. Un fluido se hace circular por el interior de los tubos, mientras que el segundo fluido circula por el interior de la carcasa, bañando los tubos del haz por su parte exterior. Uno o los dos fluidos pueden realizar múltiples recorridos o *pasos* por el cambiador, $m-n$, siendo m el número de pasos por la carcasa y n el número de pasos por los tubos.
- Los **cambiadores de calor de placas** están basados en la sustitución de las superficies tubulares por superficies planas con ciertas rugosidades, muy fácilmente desmontables para su limpieza.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.27: Cambiadores de calor:

- a) De doble tubo.
- b) De carcasa y tubos (2-4).
- c) De placas.

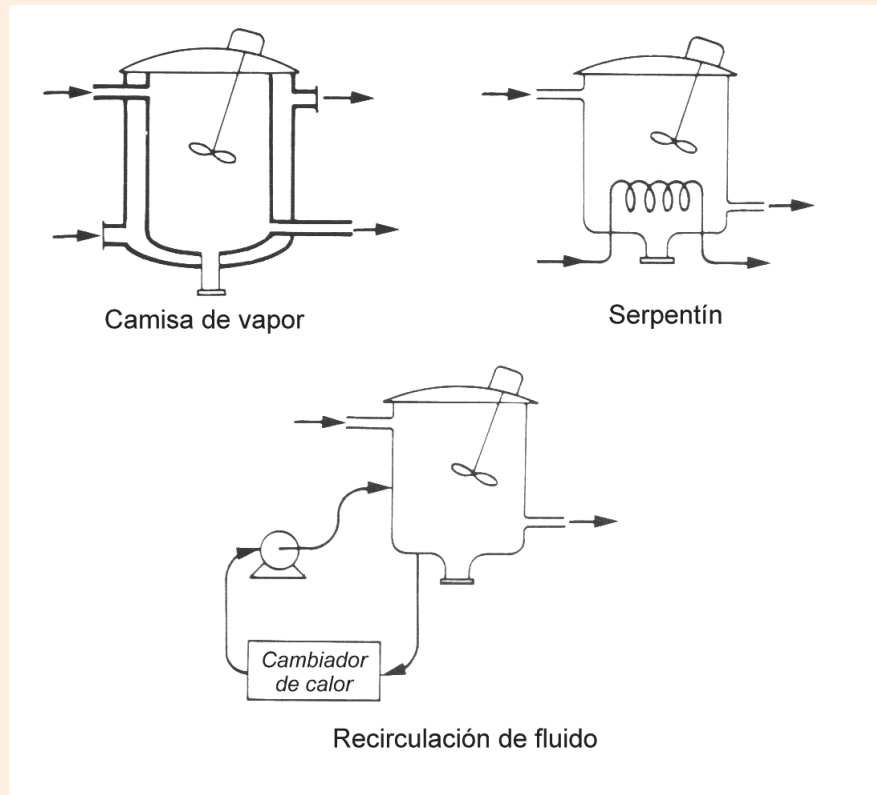
5.14 Equipos para reacciones químicas

Reacciones homogéneas (Figura 5.28):

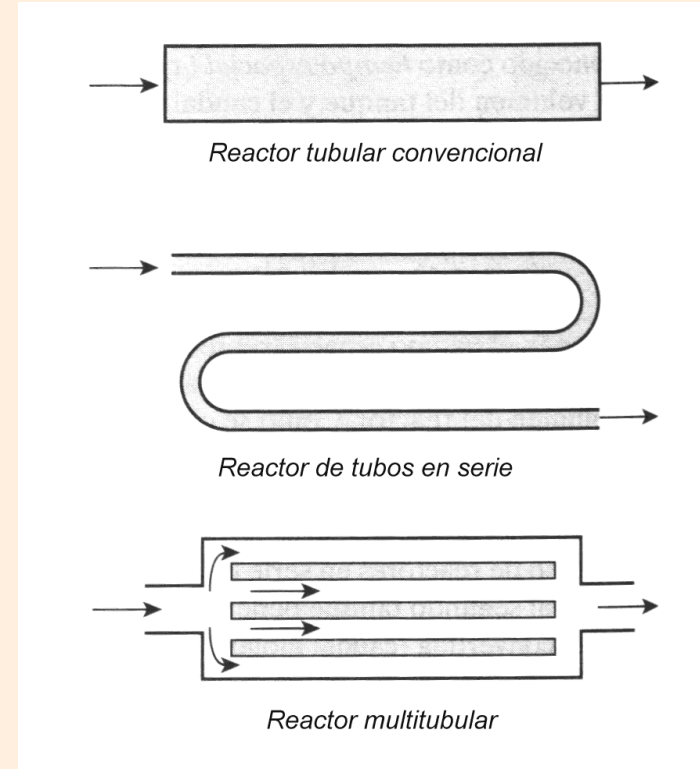
Las reacciones homogéneas transcurren en una sola fase y para conseguir las condiciones que permitan a la reacción transcurrir con la velocidad y en el grado deseados se suelen diseñar los dispositivos para que su comportamiento se acerque lo más posible a los modelos ideales de flujo: mezcla perfecta y flujo en pistón.

Los reactores que mejor se ajustan a los modelos de flujo mencionados son:

- **Reactores tipo tanque agitado**, que no son más que recipientes donde permanece la masa del fluido reaccionante, perfectamente agitados para favorecer una buena mezcla; permiten operar de forma continua o discontinua en un amplio rango de caudales, temperaturas y presiones.
- **Reactores tubulares**, consistentes en simples tubos o haces de tubos, por los que circula la masa de fluido reaccionante sin mezclarse.



a



b

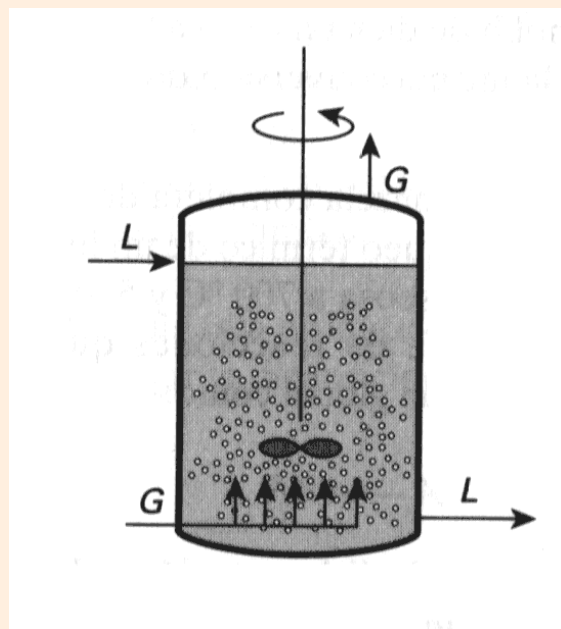
Figura 5.28: Reactores homogéneos:
a) Tipo tanque agitado.
b) Tubulares.

Reacciones heterogéneas (Figura [5.29](#)):

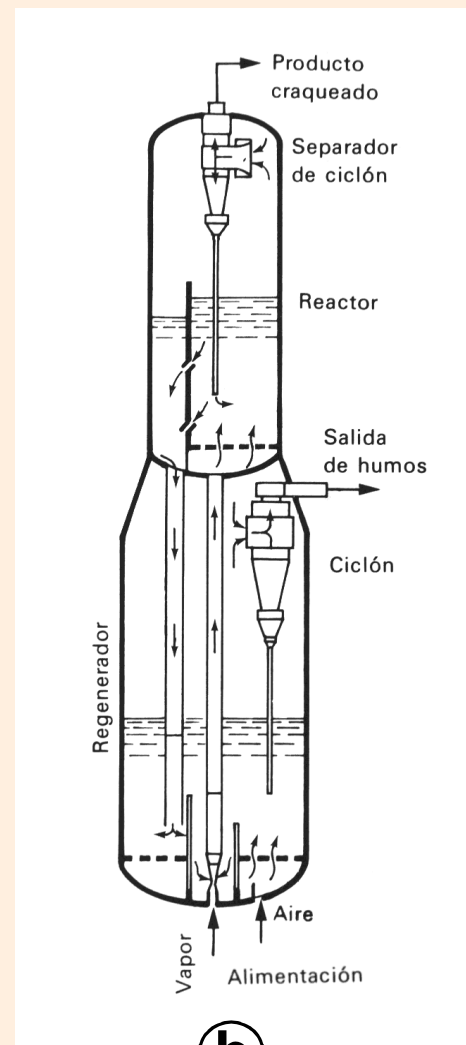
Los reactores heterogéneos (catalíticos o no) se caracterizan por la presencia de más de una fase, lo que hace del modo de contacto entre las fases el principal factor que se ha de considerar.

Según el tipo de reacción que se lleve a cabo, pueden distinguirse dos grupos principales de reactores:

- **Reactores gas-líquido**, usándose generalmente como tales las *torres de absorción*, de platos o relleno, o diferentes *contactores de burbujeo*.
- **Reactores gas-sólido**, entre los que destacan aquéllos en los que el sólido es un catalizador, dispuesto en *lecho fijo* en el interior de una estructura tubular, o como un *lecho fluidizado*, cada vez más empleado en la industria por sus ventajas respecto a la transmisión de calor y al mezclado.



a)



b)

Figura 5.29: Reactores heterogéneos:
a) Contactor de burbujeo.
b) Lecho fluidizado.