

Capítulo 2

Las operaciones unitarias

2.1 Clasificación de las operaciones unitarias

Los procesos químicos en general, y cada operación unitaria en particular, tienen como objetivo el modificar las condiciones de una determinada cantidad de materia en forma más útil a nuestros fines. Este cambio puede hacerse principalmente por tres caminos:

- Modificando su masa o composición (separación de fases, mezcla, reacción química,...).
- Modificando el nivel o calidad de la energía que posee (enfriamiento, vaporización, aumento de presión,...).
- Modificando sus condiciones de movimiento (aumentando o disminuyendo su velocidad o su dirección).

Estos tres son los únicos cambios posibles que un cuerpo puede sufrir. En efecto, el estado total de un cuerpo está absolutamente definido cuando están especificadas su cantidad de materia y composición, su energía total (interna, eléctrica, magnética, potencial, cinética, etc.), y las componentes de la velocidad de que está animado. Esta afirmación, que es experimental, tiene su expresión matemática en las tres leyes de conservación siguientes:

- ley de conservación de la materia
- ley de conservación de la energía
- ley de conservación de la cantidad de movimiento.

Leyes de conservación.

De acuerdo con las ideas indicadas, se conviene normalmente en clasificar el conjunto de operaciones unitarias existentes según la *propiedad* —materia, energía o cantidad de movimiento— que se transfiera en la operación y sea más relevante en la misma. Se analizarán a continuación cuatro

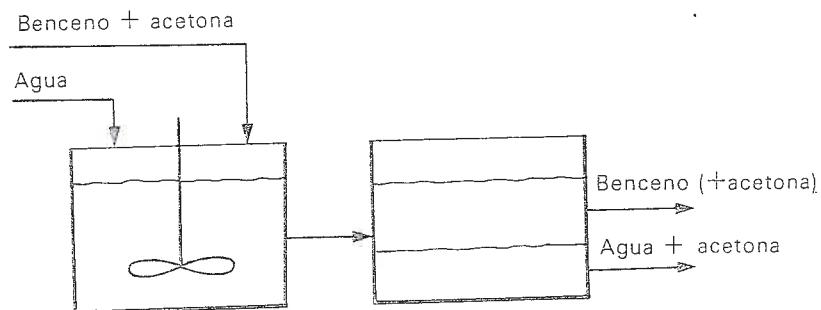


FIGURA 2.1. Sistema extractor.

ejemplos de operaciones unitarias en los que se pondrá de manifiesto cuál es la propiedad que se transfiere y por qué tiene lugar tal transferencia.

La figura 2.1 representa un sistema de *extracción* compuesto por un *tanque agitado* y un *decantador*. Llegan al tanque dos corrientes líquidas: una contiene agua y otra benceno con acetona.

La acetona es soluble en agua, y como la concentración de acetona en la corriente acuosa de entrada, que es cero, no está en equilibrio con la concentración de acetona en la fase bencénica según la ley de reparto

$$y = m \cdot x \quad (2.1)$$

donde y es la fracción molar de acetona en agua; x es la fracción molar de acetona en benceno, y m , la constante de reparto, la acetona se transfiere desde la fase bencénica a la fase acuosa. Éstas salen del decantador en equilibrio o cerca de él, con una cierta fracción molar de acetona en cada una de las fases. Esta operación unitaria, llamada *extracción líquido-líquido*, es un ejemplo de *operación de transferencia de materia*, pues la causa de que se realice la transferencia es la yuxtaposición de dos fases que no están en equilibrio.

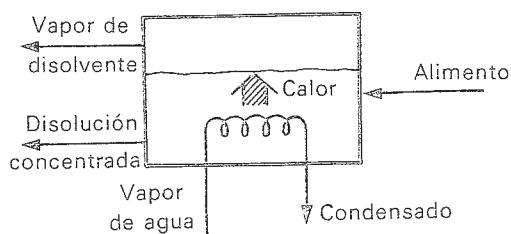
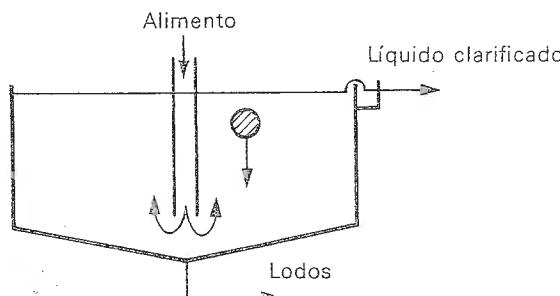


FIGURA 2.2. Esquema de un evaporador.

La figura 2.2 representa un *evaporador*. El alimento se calienta y se vaporiza el disolvente volátil que contiene, mediante la acción del vapor calefactor del serpentín, que condensa y cede su energía al líquido del tanque. El vapor calefactor debe condensar a una temperatura superior a la del punto de ebullición de la disolución. En este sentido, la causa de la evaporación es la diferencia de temperaturas entre ambas corrientes: la operación unitaria de *evaporación* es una *operación de transmisión de calor*. Naturalmente hay simultáneamente una transferencia de materia: la alimentación, que está en fase líquida, se transforma en dos fases, una vapor y otra líquida, más concentrada; pero esto no tendría lugar de forma espontánea. Requiere un aporte de calor, y es este transporte de energía el que determina la operación. Las dos fases, líquido concentrado y vapor, están en equilibrio. Su separación no

Extracción líquido-líquido: operación unitaria de transferencia de materia.

Evaporación: operación unitaria de transmisión de calor.



Sedimentación: operación unitaria de transporte de cantidad de movimiento.

FIGURA 2.3. Esquema de un sedimentador.

tendría lugar de no existir una diferencia de temperatura entre ellas y el vapor de calefacción.

Para separar partículas sólidas de un líquido en el que estén dispersas puede emplearse un *sedimentador*. Este dispositivo consiste en un recipiente de anchura considerable que se alimenta por su fondo. La diferencia de densidades entre las partículas sólidas y el líquido hace que, aunque este último tenga un movimiento ascendente, las partículas sólidas sedimenten, depositándose en el fondo de donde son eliminadas en continuo en forma de lodos. La viscosidad del líquido frena las partículas sólidas, que deben vencer el rozamiento con el líquido en el movimiento de caída.

En este proceso las partículas sólidas ceden parte de su cantidad de movimiento a las moléculas del líquido de su alrededor. Cuanto mayor sea la viscosidad del líquido, tanto más se frena el movimiento de las partículas. Las moléculas del líquido aceleradas por contacto con el sólido transmiten su movimiento a capas de líquido más alejadas debido a las interacciones intermoleculares, de las que la viscosidad es una medida. La operación de *sedimentación* está, pues, controlada por el *transporte de cantidad de movimiento*.

Hay operaciones en las que se transfieren simultáneamente dos propiedades, energía y materia, estando controladas estas operaciones por dos gradientes simultáneamente. Si se pone aire seco frío en contacto con agua caliente se transfiere vapor de agua desde el líquido al aire, debido a que la presión parcial del vapor de agua en el aire es menor que la que le corresponde en la saturación. Pero esta evaporación de agua se hace a costa de la propia energía del agua, con lo cual ésta se enfria. El caudal de agua y el de energía transmitidos depende tanto del gradiente de humedad — o presión parcial de vapor de agua — como del de temperatura. La *humidificación* es, pues, una *operación de transmisión simultánea de energía y materia*.

El número de operaciones unitarias que en la actualidad existe y su clasificación dependen de los criterios de definición y del propio avance tecnológico. Además, determinadas operaciones unitarias pueden englobarse en otras; como ejemplo cabe citar el *intercambio iónico*, que es posible enfocar como una *adsorción* (§ 2.2.4 y § 2.2.5).

En otros casos se tratará de procedimientos industriales recientes todavía no bien clasificados o muy poco usados. Actualmente, y con el objetivo de una mayor sistematización, se acepta considerar a la *reacción química* como operación unitaria.

La clasificación del conjunto de operaciones unitarias se hará de acuerdo con la propiedad transferida y, así, aparecerán seis grandes grupos de operaciones:

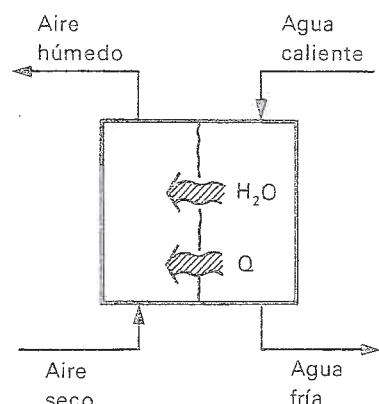


FIGURA 2.4. Humidificación.

Humidificación: operación unitaria de transmisión simultánea de materia y calor.

Operaciones unitarias físicas

de transferencia de materia (§ 2.2)
 de transmisión de energía (§ 2.3)
 de transmisión simultánea de materia y energía (§ 2.4)
 de transporte de cantidad de movimiento (§ 2.5)
 complementarias (§ 2.6)

Operación unitaria química (§ 2.7).

Común a todas las operaciones unitarias es el concepto de *fuerza impulsora* que a continuación se desarrollará.

En el ejemplo del sistema extractor considerado al principio, cabe intuir que cuanto mayor sea la diferencia entre la concentración de acetona en la fase acuosa y la concentración correspondiente al equilibrio, tanta más cantidad de acetona atravesará la interfase por unidad de área y por unidad de tiempo.

Cuantitativamente puede expresarse este fenómeno como sigue:

$$N = k \cdot (C - C_e)_m \quad (2.2)$$

donde N es la densidad de flujo de materia, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; k , el coeficiente de transferencia de materia, m/s , y $C - C_e$, la diferencia entre la concentración existente y la de equilibrio, kg/m^3 .

A la diferencia de concentración $C - C_e$ se le denomina *fuerza impulsora* de la extracción, pues cuanto mayor sea más transferencia se produce; y, si se anula, la transferencia cesa.

Nótese que la forma de la ecuación anterior no es otra que la de la ley de Ohm, que en su forma generalizada puede escribirse:

Ley de velocidad de transferencia.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{propiedad trans-} \\ \text{ferida por unidad de} \\ \text{área y de tiempo} \end{array} \right\} = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza} \\ \text{impulsora} \end{array} \right\}}{\left\{ \begin{array}{l} \text{Resistencia} \end{array} \right\}} \quad (2.3)$$

$$N = \frac{(C - C_e)_m}{1/k} \quad (2.4)$$

Según cuál sea la propiedad transferida será la fuerza impulsora. Así, en la transferencia de materia la fuerza impulsora es una *diferencia de concentraciones*, fracciones molares o presiones parciales; en la transmisión de energía calorífica la fuerza impulsora es una *diferencia de temperaturas*; y en el transporte de cantidad de movimiento, la fuerza impulsora es una *diferencia de velocidades* entre dos zonas de un fluido. En el caso de la operación unitaria química deben distinguirse dos aspectos, el termodinámico y el cinético. Desde la perspectiva termodinámica, la condición necesaria para que la reacción tenga lugar es que $\Delta G \leq 0$. Cuanto más negativo sea, tanto más podrá avanzar la reacción. La velocidad con la cual la reacción tiene lugar, no obstante, no incumbe a la termodinámica, sino a la cinética, y no es directamente dependiente del valor de ΔG . La velocidad de la reacción dependerá, por regla general, de las concentraciones de los reactantes y de los

productos, según una expresión más o menos compleja. Sólo en algunos casos muy sencillos será posible escribir una expresión análoga a la ecuación (2.4). Éste sería el caso de una reacción del tipo reversible y de primer orden en ambos sentidos $A \rightleftharpoons B$.

Debe notarse que en cualquier operación, por lo común se transferirá simultáneamente materia, energía y cantidad de movimiento, pues las dos últimas propiedades están asociadas a la materia, por el hecho de existir. No obstante, la operación no vendrá controlada necesariamente por las tres transferencias, sino sólo por una o a lo sumo por dos. Es de acuerdo con el criterio de cuál es la transferencia más relevante como se han clasificado aquí.

2.2 Operaciones unitarias físicas controladas por la transferencia de materia

Estas operaciones se basan en la existencia del fenómeno llamado *difusión*, por el que un componente de una mezcla se desplaza en el interior de la misma debido a un gradiente de concentración.*

Cuando se colocan yuxtapuestas dos fases que no están en equilibrio desde el punto de vista de un determinado componente, éste se transfiere de una fase a otra, tendiendo al equilibrio. Aprovechando esta difusión entre fases se pueden diseñar distintos tipos de aparatos que pongan en íntimo contacto dos fases distintas, con el objetivo general de conseguir la separación de uno de los componentes de una fase, mediante la acción de la otra. Estas operaciones son abundantísimas en la industria química, pues es normal tener que separar un componente de una mezcla homogénea, bien sea porque interesa obtenerlo con un cierto grado de pureza, o bien porque su presencia en la mezcla no es conveniente.

Es posible también realizar la separación de componentes de una mezcla basándose en su distinta velocidad de difusión a través de una barrera porosa. El $U^{235}F_6$ y el $U^{238}F_6$ pueden separarse de este modo. La fuerza impulsora —diferencia de concentraciones entre las caras de la barrera— actúa para ambos componentes, y si se deja transcurrir suficiente tiempo, la concentración a ambos lados de la barrera se igualará. Pero, debido a su diferente difusividad, fluye más rápidamente el $U^{235}F_6$ con lo que en los momentos iniciales de la difusión se produce una cierta separación. Aprovechando repetidamente este fenómeno puede llegarse a la separación deseada.

Este tipo de operaciones están *controladas por la cinética del proceso*, a diferencia de las operaciones de transferencia entre fases, que normalmente están *controladas por el equilibrio*. En las operaciones controladas por la cinética la existencia de una fuerza impulsora, o situación de no equilibrio, es condición necesaria, pero el grado de separación está determinado por la cinética del proceso.

Existen operaciones unitarias de transferencia de materia en las que se puede suponer que se alcanza el equilibrio, y otras cuyo rendimiento está controlado por la cinética del proceso.

* También un gradiente de temperatura puede provocar la difusión de un componente de una mezcla. Este fenómeno, llamado *difusión térmica*, no se estudia aquí si bien tiene importancia industrial en algunos casos muy específicos (por ejemplo, la separación de isótopos) (§ 6.2.2).

2.2.1 Destilación. Rectificación

(i) Definición

La *destilación* es una operación unitaria —de las de transferencia de materia es la más utilizada en ingeniería química— que consiste en separar dos o más componentes de una mezcla líquida aprovechando las diferencias en sus presiones de vapor. La mezcla líquida a su punto de ebullición desprenderá vapores más ricos en componentes volátiles que el líquido. Los vapores se condensarán aparte constituyendo el *destilado*. Cuando la mezcla a destilar contiene sólo dos componentes se habla de *destilación binaria*, y si contiene más recibe el nombre de *destilación multicomponente*.

(ii) Modos de operación

La destilación puede llevarse a cabo de muchos modos distintos. Hay dos tipos básicos de operación: destilación *sin reflujo* o *destilación simple* y destilación *con reflujo*, comúnmente llamada *rectificación* (fig. 2.5).

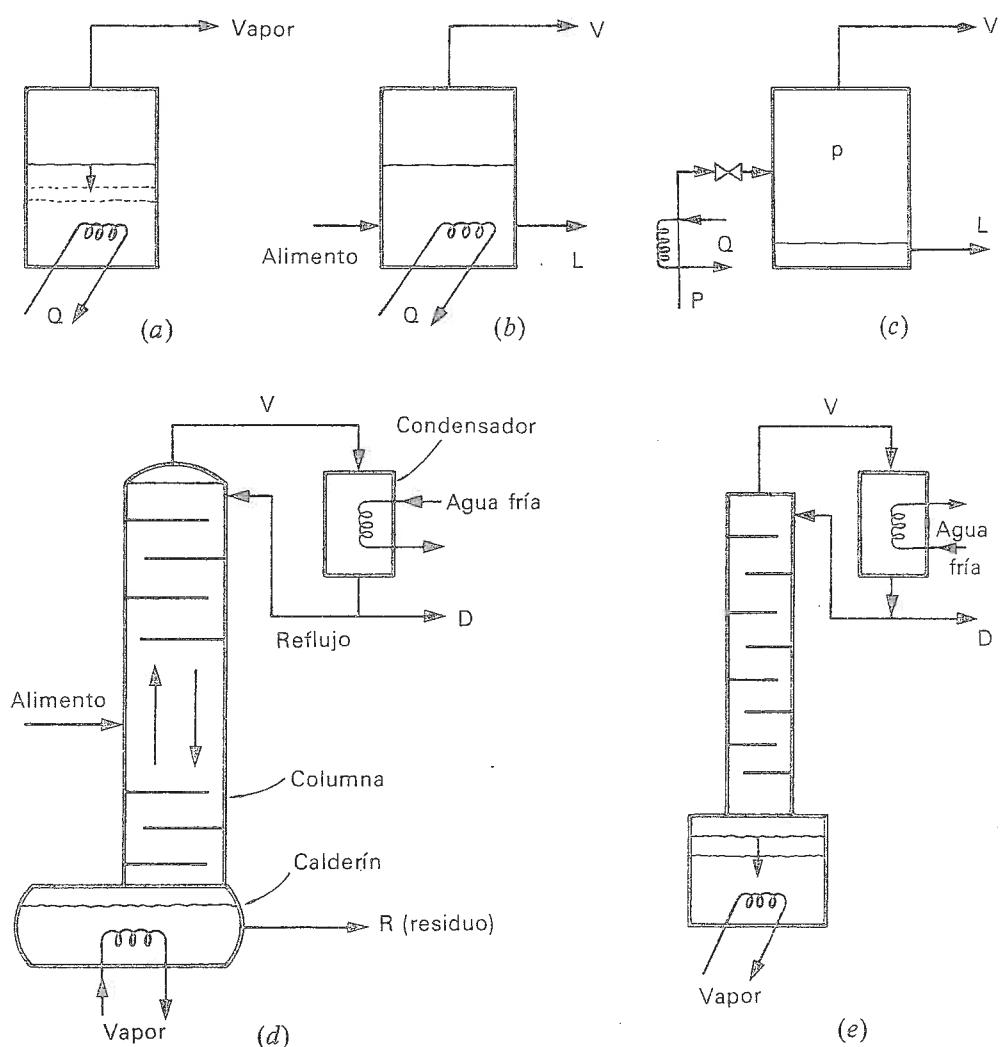


FIGURA 2.5. Diversos tipos de destilación: (a) simple discontinua, (b) simple continua, (c) súbita, (d) rectificación continua, (e) rectificación discontinua.

La destilación simple es la operación de hervir el líquido de un recipiente —la caldera— condensándose aparte los vapores que constituirán el destilado, quedando en la caldera el residuo. Esta operación puede llevarse a cabo de forma continua —alimentando la caldera y extrayendo residuo continuamente— o de forma discontinua, con lo que las composiciones de vapor y líquido van cambiando con el tiempo. Realmente no es una operación de transferencia de materia, pues el vapor y el líquido están en equilibrio. Se describe mejor como operación de transmisión de calor, exactamente igual que el evaporador de la figura 2.2 ya comentado.

La destilación súbita (destilación «flash») es una forma de destilación simple en la que se calienta el alimento a temperatura elevada, pero manteniendo una elevada presión de manera que no hierva. A continuación se expande el líquido recalentado en una columna hasta una presión menor, con lo que vaporizarán en parte los componentes más volátiles. Abandonarán la columna una fase vapor, rica en volátiles, y una fase líquida, rica en no volátiles, y ambas fases estarán en equilibrio a las condiciones de presión y temperatura de la columna. No hay caldera, pues el alimento ya está a una temperatura superior a la de ebullición a la presión de la columna.

La destilación con reflujo o rectificación es uno de los tipos más importantes de destilación. El vapor que abandona la cabeza de la columna se condensa, y una fracción del líquido condensado se devuelve a la columna, lo que constituye el reflujo; el resto se retira como producto destilado. La condensación se suele hacer con un serpentín de agua fría o con otras corrientes de proceso más frías (fig. 1.9).

En el interior de la columna se ponen en contacto el vapor ascendente con el líquido descendente. En un nivel dado de la columna estas dos corrientes no están en equilibrio entre sí, por lo que hay una transferencia de materia: pasan los componentes más volátiles del líquido al vapor, y los componentes menos volátiles del vapor al líquido, con lo que el vapor se enriquece en componentes volátiles a medida que asciende por la columna.

La destilación extractiva y la destilación azeotrópica son destilaciones en las que se añade un tercer componente a una mezcla binaria de separación difícil. Este componente modifica la volatilidad relativa de los componentes. De este modo en la destilación extractiva se separa por la cabeza de la columna un componente, y como residuo la mezcla del otro componente y el disolvente añadido. En la destilación azeotrópica el tercer componente forma un azeótropo con uno de los componentes de la mezcla a separar. Se separan así los dos componentes de la mezcla binaria. El azeótropo puede después romperse con diversos procedimientos.

La destilación por arrastre de vapor consiste en la inyección directa de vapor de agua recalentado a la mezcla a destilar. La presencia de este nuevo componente reduce la presión parcial de los componentes a destilar con lo que la temperatura de vaporización puede ser inferior, lo que es útil cuando determinados componentes de la mezcla son sensibles al calor. En las operaciones habituales el vapor de agua no llega a condensar, por lo que abandona la columna con el destilado, separándose posteriormente del mismo.

(iii) Aparatos

Los distintos tipos de destilación se suelen llevar a cabo en las columnas de destilación. Son recipientes cilíndricos verticales con una entrada de la corriente de alimentación a destilar por un punto dado de la columna —su localización se discutirá en los capítulos 3 y 4—, y con una salida por la parte super-

Razón de reflujo: cantidad de destilado devuelto a la columna respecto al que se extrae por cabeza de la misma.

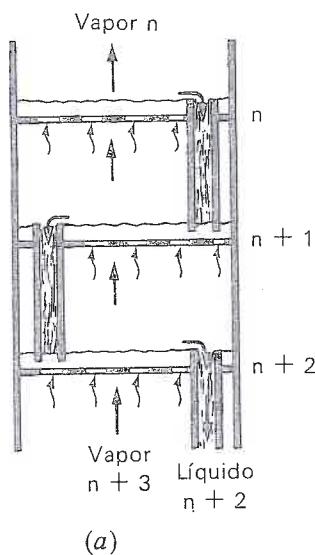
La volatilidad relativa es una medida de la facilidad con que una mezcla binaria puede separarse por destilación (§ Cap. 3).

rior o *cabeza* para extraer los vapores a condensar. Estos pueden volver en parte a la columna como *reflujo* a través de otra entrada por *cabeza*. Se dispone asimismo una salida inferior en la base de la columna o *cola*, para retirar los residuos de la destilación. Pueden existir asimismo entradas o salidas laterales en diversos niveles de la columna. La calefacción de la columna se realiza por la base, bien por calefacción directa o mediante un serpentín o un cambiador de calor alimentado con vapor a alta temperatura. A su vez el alimento puede ser precalentado previamente en intercambiadores de calor o en hornos.

Para asegurar un adecuado contacto entre el vapor y el líquido—esencial en la transferencia de materia—se han diseñado varios dispositivos de laboratorio o industriales, basados principalmente en dos criterios distintos: las columnas de contacto continuo entre el vapor y el líquido, o columnas de *relleno*, y las columnas de contacto por etapas, o columnas de *platos* o *pisos*.

a) columnas de platos

Los platos son superficies planas que dividen la columna en una serie de etapas. Tienen por objeto retener una cierta cantidad de líquido en su superficie, a través del cual se hace burbujeante el vapor que asciende de la caldera, consiguiéndose así un buen contacto entre el vapor y el líquido. El líquido de un plato cae al plato siguiente por un rebosadero situado en un extremo del plato. Según la forma del dispositivo que permite el paso del vapor a través del líquido, se distingue entre *platos perforados*—simples agujeros—, *platos de campanas*, *de válvulas* y otros (fig. 2.6).



(a)

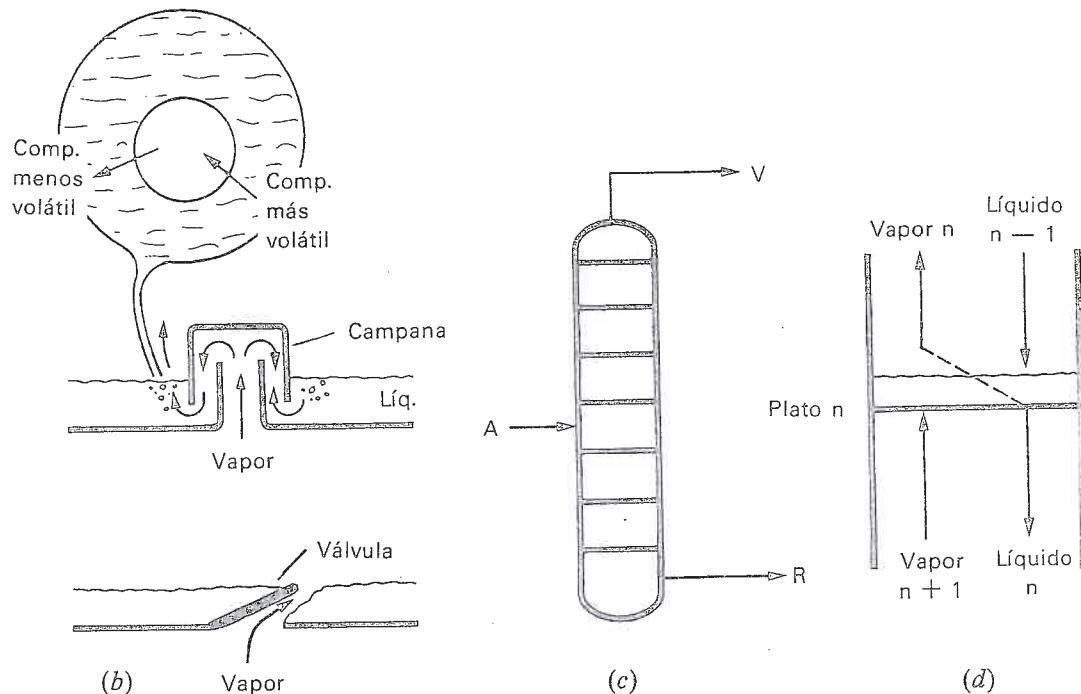


FIGURA 2.6. *Columnas de platos:* (a) *disposición relativa de los platos, el líquido descendente y el vapor ascendente;* (b) *dos tipos de borbotadores;* (c) *representación esquemática de una columna de platos;* (d) *equilibrio en un plato ideal. El vapor que abandona el plato n (vapor n) y el líquido que abandona el plato n (líquido n) están en equilibrio teóricamente.*

El vapor que llega a un plato por debajo, y el líquido que le llega por encima, no están en equilibrio. En el plato tiene lugar la mezcla íntima de ambas corrientes, produciéndose allí la transferencia de materia. El vapor que abandona el plato hacia arriba es más rico en componente más volátil, y el líquido que cae del plato es más rico en componente menos volátil. La fuerza impulsora en esta operación unitaria es precisamente la diferencia entre presiones de vapor del componente más volátil en el líquido y en el vapor.

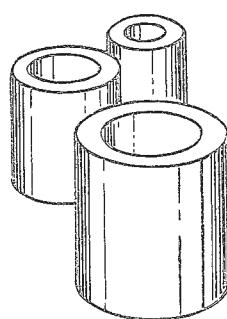
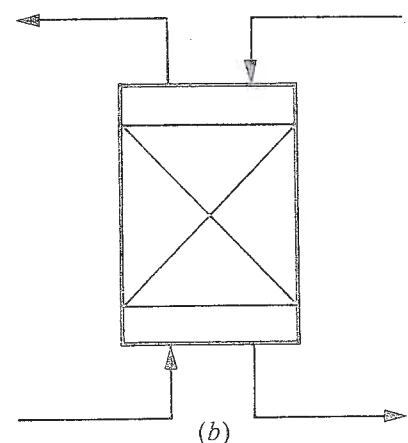
En los platos de columnas normalmente no se llega a alcanzar el equilibrio entre el líquido y el vapor que abandonan el plato, esto es, la *eficacia* de un plato no es del 100% sino menor (§ capítulos 3 y 4). Un *plato ideal o teórico* sería aquél en el que se alcanzara el equilibrio entre las corrientes que salen del plato.

El diseño de las columnas de platos se basa en suponer, en primera aproximación, que se logra el equilibrio entre fases.

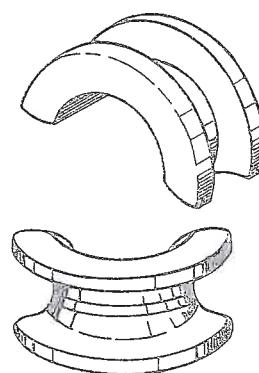
b) columnas de relleno

Una forma alternativa de poner en contacto un vapor y un líquido es mediante las columnas de relleno.

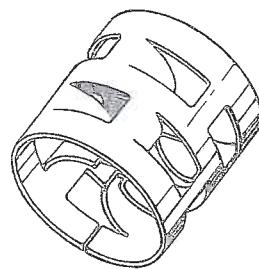
Las *columnas de relleno* («packing towers») son columnas de relación diámetro-altura normalmente baja, llenas en su interior de elementos sólidos pequeños (en relación con el diámetro de la columna). Estos *elementos de relleno* son inertes a las fases circulantes y están distribuidos al azar u ordenadamente. La corriente de líquido al caer sobre ellos se rompe en pequeñas corrientes, se dispersa resbalando por su superficie en forma de películas o gotas, y se pone en contacto íntimo con el vapor que circula en sentido contrario («contracorriente»). Hay muchos tipos distintos de rellenos comerciales, y entre otras características se persigue que tenga una elevada área superficial por unidad de volumen, poco peso, buena resistencia mecánica y que los elementos constituyentes no se compacten entre sí (véase figura 2.7).



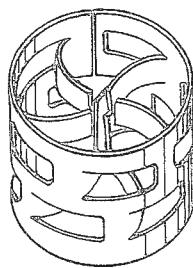
Anillo Raschig



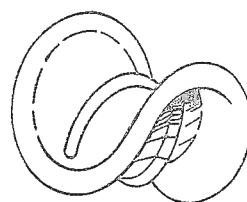
Silla Intalox



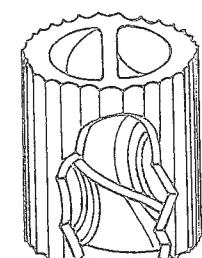
Anillos Pall



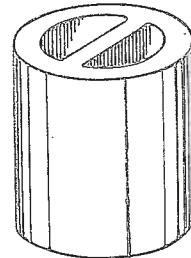
Anillo de partición



Silla Berl



Anillo con helicoidal



Anillo Lessing

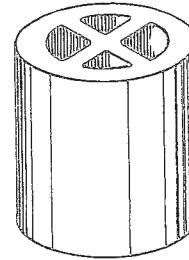


FIGURA 2.7. Columnas de relleno: (a) diversos tipos de rellenos comerciales comunes; (b) representación esquemática de una columna de relleno.

En una sección determinada de la columna el líquido descendente y el vapor ascendente no estarán en equilibrio, por lo que se transferirán los componentes menos volátiles y más volátiles, en sentidos opuestos. Pero como el tiempo de contacto en cada sección de columna es muy corto, no se llega al equilibrio en ningún punto de la columna. La fuerza impulsora actúa a lo largo de toda la columna.

La figura 2.8 muestra un esquema de una columna de rectificación —de platos o de relleno— en la que se muestran además los sistemas de regulación de caudales (válvulas, indicadas por el símbolo V) y los sistemas de control de caudal (FC), de control de nivel (LC), y de control de temperatura (TC). Este tipo de esquema es más completo que los anteriormente presentados y suministra información imprescindible para la correcta operación de la columna. El sistema de control mostrado es sólo uno de los muchos posibles. En el capítulo 10 se amplían estos conceptos sobre control de procesos.

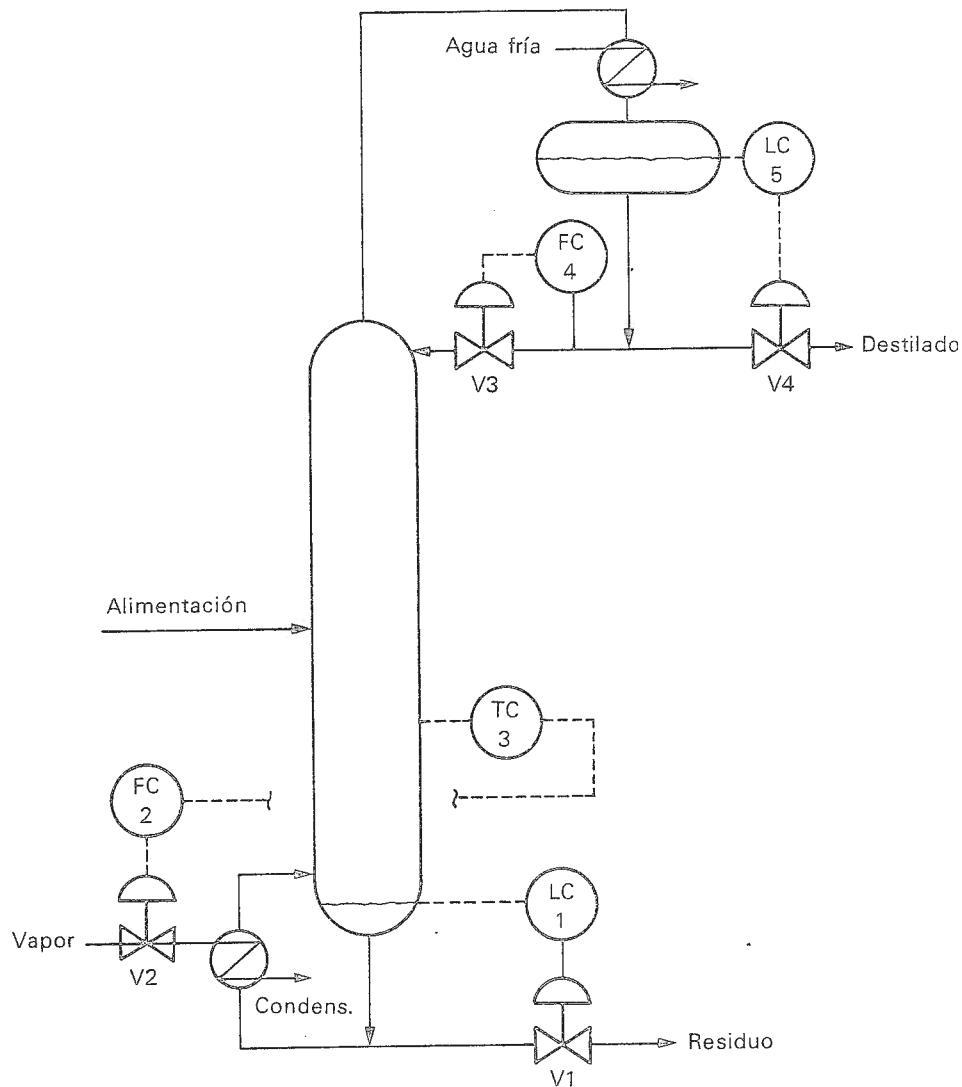


FIGURA 2.8. Una de las formas de control de una columna de rectificación. El nivel del fondo de la columna se controla abriendo o cerrando la válvula V_1 , según la señal que reciba del controlador $LC-1$. El nivel del calderín, análogamente, se controla con $LC-5$ y V_4 . El caudal de reflujo se mide y controla en $FC-4$, que abre o cierra la válvula V_3 . La temperatura en $TC-3$ origina una señal que actúa sobre el controlador de caudal $FC-2$, que acciona la válvula V_2 y suministra más o menos vapor del hervidor de la columna.

(iv) Ejemplos

A nivel doméstico se tiene un ejemplo del uso de la destilación simple en la preparación de «cremats», «queimadas» y similares. A nivel industrial la destilación en general es una operación con innumerables aplicaciones, especialmente en la separación de componentes del petróleo, recuperación de disolventes, industria petroquímica en general, fabricación de licores, etc.

2.2.2 Absorción. Desorción

(i) Definición

La *absorción* es una operación unitaria de transferencia de materia que consiste en poner un gas en contacto con un líquido para que éste disuelva determinados componentes del gas, que queda libre de los mismos. La absorción puede ser física o química, según que el gas se disuelva en el líquido absorbente o reaccione con él dando un nuevo compuesto químico. La *desorción* («stripping») es la operación unitaria contraria a la absorción. En ella un gas disuelto en un líquido es arrastrado por un gas inerte siendo eliminado del líquido. A veces se llama también desorción a la destilación súbita en la que una fracción volátil se elimina de una mezcla líquida. Esta acepción no es rigurosa pero está muy generalizada.

En una sección cualquiera de la columna están en contacto un gas y un líquido que no están en equilibrio, por lo que se realiza una transferencia de materia. La fuerza impulsora actuante es la diferencia entre la presión parcial en el gas del componente que se transfiere y la presión parcial que tendría el componente en un gas que estuviera en equilibrio con el líquido del punto considerado. O bien, observando el fenómeno en la fase líquida la fuerza impulsora es la diferencia entre la concentración del soluto en el líquido y la concentración que estaría en equilibrio con el gas del punto considerado. El sentido de la transferencia será función del signo de las fuerzas impulsoras.

El diseño de las columnas de relleno se basa en la cinética del proceso (§ Cap. 7).

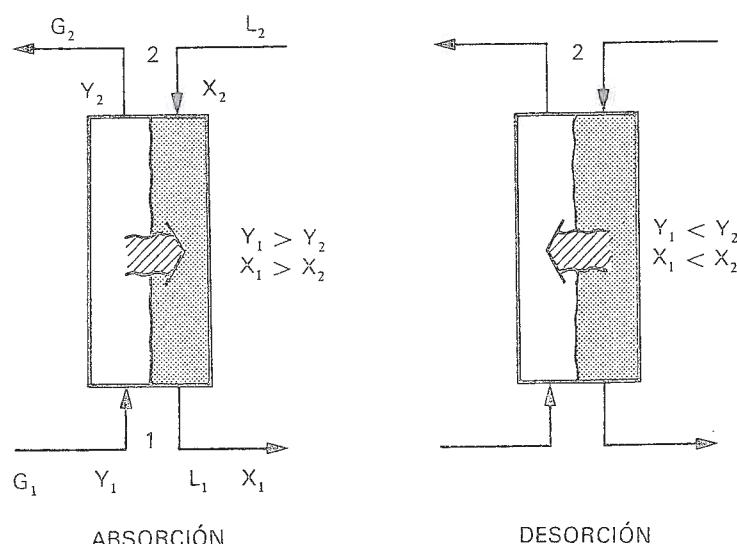


FIGURA 2.9. Esquemas de las operaciones de absorción y desorción. L_1 , L_2 , G_1 y G_2 son los caudales de líquido y gas a la entrada y salida de la columna. Y_1 , Y_2 , X_1 y X_2 son las razones molares de soluto en el gas y en el líquido.

(ii) Aparatos

Pueden utilizarse para la absorción los mismos tipos de aparatos descritos en la destilación, pues las fases en contacto serán también un líquido y un gas. Las columnas no necesitarán, obviamente, caldera ni condensador de cabeza. Se usan normalmente columnas de platos —contacto discontinuo o por etapas— o de relleno —contacto continuo—. Ambas emplean la fuerza gravitatoria para la circulación del líquido.

Algunos dispositivos emplean medios mecánicos para facilitar el contacto entre las fases. Las *torres de pulverización* son columnas vacías en las que el líquido entra a presión por un sistema de ducha, circulando el gas en sentido contrario. Los *absorbedores centrífugos* se basan en forzar el contacto gas-líquido dando energía cinética de rotación al líquido y haciendo circular al gas a su través.

(iii) Ejemplos

Como aplicaciones de la absorción pueden citarse la eliminación de gases ácidos (H_2S , CO_2 , SO_2) de los gases mediante distintas corrientes (agua a presión, solución de $NaOH$, o soluciones de etanolaminas), la preparación de agua de Seltz, etc. Un sistema típico de absorción-desorción se presenta en la figura 2.10. En ella un gas con H_2S se trata con monoetanolamina (M.E.A.) fría, con la que el H_2S reacciona dando el bisulfuro de amina (absorción con reacción química). La reacción es reversible, por lo que en una columna de desorción anexa el vapor de agua hace que la reacción vaya en sentido contrario, desorbiéndose el H_2S . La M.E.A. caliente se recircula a la columna de absorción, enfriándose la corriente de amina con la corriente del sulfuro de amina en el intercambiador de calor central.

Otro ejemplo se tiene en el secado del cloro mediante la absorción del agua con H_2SO_4 concentrado (§ 1.4.1).

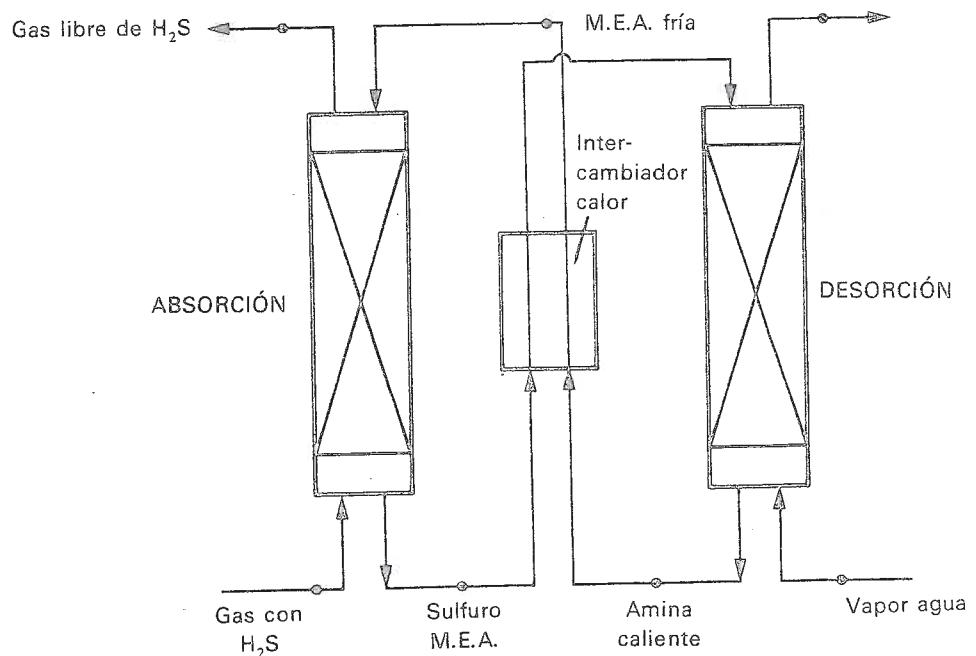


FIGURA 2.10. Sistema de eliminación de H_2S de un gas por absorción con reacción química con solución de monoetanolamina (M.E.A.) y posterior desorción con vapor.

2.2.3 Extracción

(i) Definición

La extracción es una operación unitaria de transferencia de materia basada en la disolución de uno o varios de los componentes de una mezcla (líquida o que formen parte de un sólido) en un disolvente selectivo. Se hace la distinción entre la extracción sólido-líquido y la extracción líquido-líquido según que la materia a extraer esté en un sólido o en un líquido, respectivamente. En este último caso, obviamente, el disolvente ha de ser inmiscible con la fase líquida que contiene el soluto.

a) Extracción líquido-líquido

La extracción de un componente de una mezcla líquida mediante un disolvente presenta en ocasiones ventajas respecto a efectuar la separación por destilación:

- las instalaciones son más sencillas
- hay la posibilidad de extracción de componentes sensibles al calor sin necesidad de realizar una destilación a vacío
- la selectividad del disolvente para componentes de naturaleza química similar permite separaciones de grupos de componentes, imposibles de lograr basándose sólo en el punto de ebullición.

Al igual que en la absorción, el número mínimo de componentes presentes en la extracción es tres. Un problema importante lo constituye la selección del disolvente extractor.

b) Extracción sólido-líquido

Esta operación se conoce también por *lixiviación*, *percolación* o *lavado*, según las aplicaciones a las que se la destine. Si se pretende eliminar un componente no deseado de un sólido, se habla de *lavado*. Si el componente extraído es el valioso se denomina *lixiviación*. La palabra *percolación* se refiere más bien a la forma de operación —vertido de un líquido sobre un sólido— que al objetivo perseguido.

(ii) Modos de operación

Son muy variadas las formas en las que se lleva a cabo la extracción líquido-líquido. Normalmente se trabaja en continuo, y cabe distinguir, como en la destilación y la absorción, dos modos básicos de contacto: contacto *por etapas* y contacto *continuo*. El *contacto por etapas* puede realizarse de distintas maneras según la forma como el disolvente extractor se mezcle con el líquido-alimento. En la figura 2.11 se muestran dos de estas formas, denominadas *contacto simple* y *contacto en contracorriente*. En la primera el disolvente extractor se reparte en partes iguales a cada una de las etapas, mientras que en la segunda el disolvente extractor pasa de etapa a etapa en sentido contrario al líquido que está siendo refinado.

Nótese que en cada etapa se realizan dos operaciones sucesivas: la mezcla del disolvente extractor y el alimento, y a continuación la separación por decantación de los dos líquidos inmiscibles.

En la misma figura 2.11 puede observarse la denominación que comúnmente se da a las distintas corrientes. El *extracto* es la corriente de disolvente extractor una vez ha recibido el soluto contenido en la alimentación. El *refinado* es la corriente de alimentación una vez se le ha extraído el soluto.

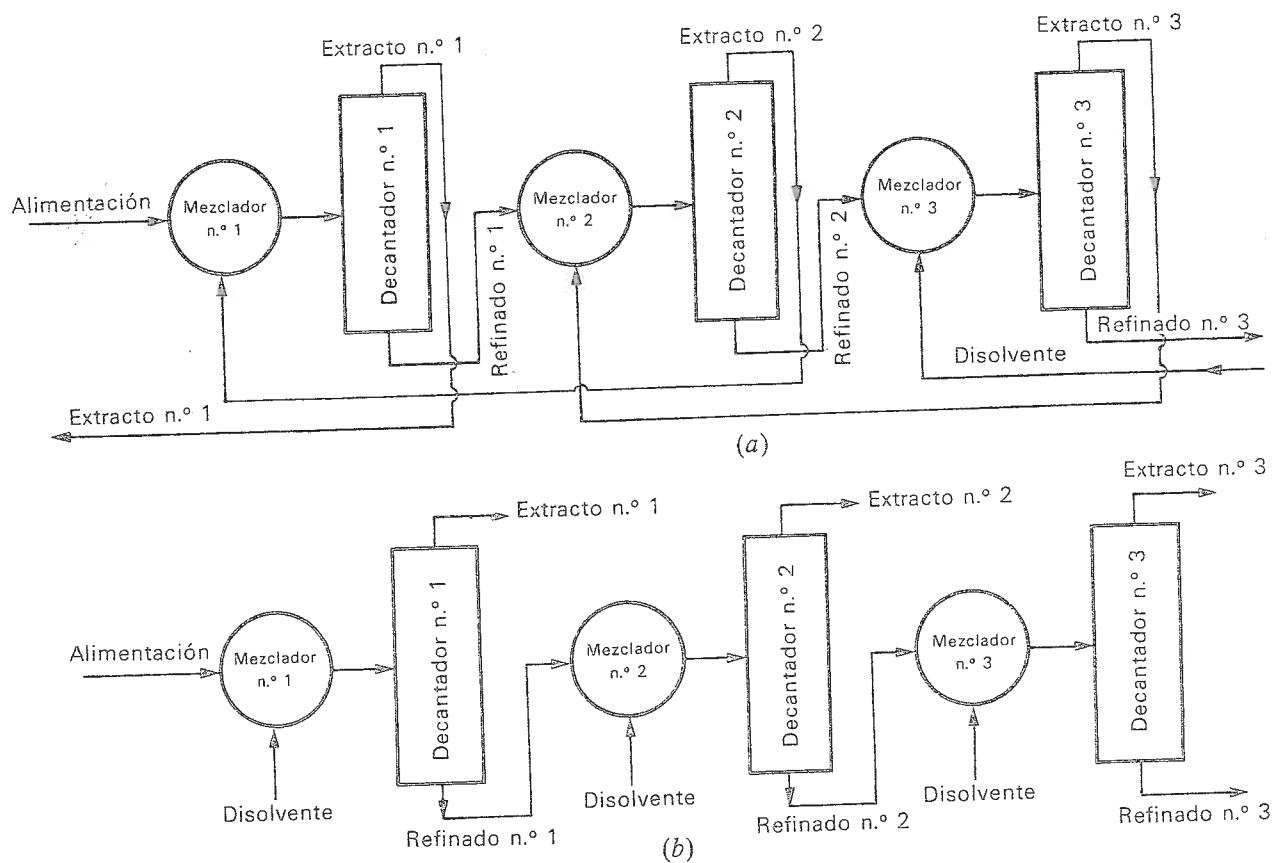


FIGURA 2.11. Extracción líquido-líquido por etapas: (a) contacto en contracorriente, (b) contacto simple.

El *contacto continuo* en extracción líquido-líquido es análogo a la operación de absorción, y su diagrama de flujo se tiene en la figura 2.12. El disolvente contenido en las corrientes de extracto y refinado debe separarse y recircularse, para la economía de la operación; ello se consigue generalmente por destilación.

En la extracción sólido-líquido se acostumbra a trabajar por cargas o en semicontinuo, por la dificultad de manipulación del sólido que hay que someter a extracción.

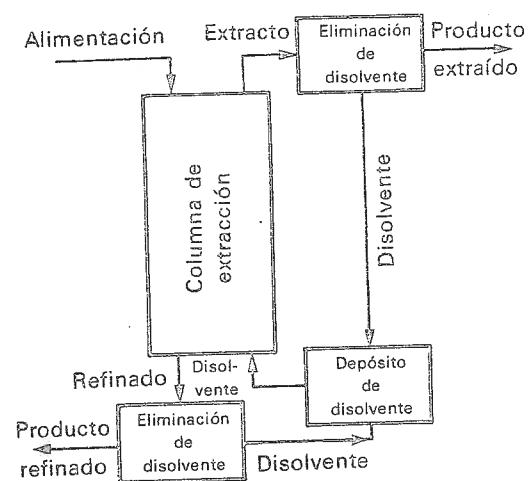


FIGURA 2.12. Extracción líquido-líquido por contacto continuo, con recuperación del disolvente.

(iii) Aparatos

Los aparatos en los que se lleva a cabo la extracción líquido-líquido deberán poner en adecuado contacto las fases inmiscibles. Pueden emplearse columnas de relleno en contracorriente, y mejor si son pulsadas (dotadas de un movimiento de agitación a lo largo de la columna) o columnas horizontales pulsadas con placas perforadas (véase figura 2.13).

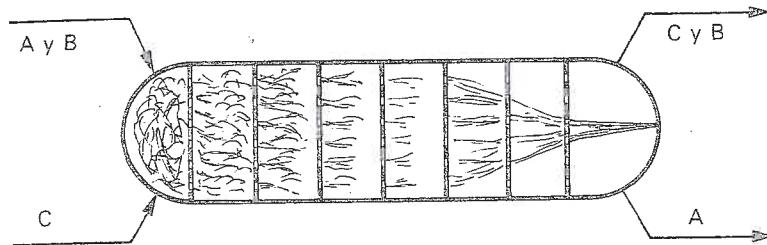


FIGURA 2.13. Extractor separador horizontal con placas perforadas.

Se emplean también, para el contacto por etapas, tanques agitados combinados con decantadores colocados a continuación de los mismos (§ 2.5.3).

Existen grandes diferencias en el diseño y la construcción de los extractores sólido-líquido según que el disolvente sea o no volátil y que interese o no su recuperación. Uno de los extractores más usados a escala de laboratorio es el llamado extractor Soxhlet que se presenta en la figura 2.14. El disolvente extractor hierva en la caldera y, después de condensarse con agua fría, cae sobre el recipiente que contiene el sólido con el soluto a extraer. Se realiza la extracción y, a través de un sifón, sale del recipiente el disolvente con el soluto extraído. La mezcla se devuelve a la caldera, donde se va concentrando el soluto a medida que se repite el ciclo.

(iv) Ejemplos

La extracción líquido-líquido se usa mucho a escala industrial, especialmente en la industria del petróleo. Así, por ejemplo, la separación de los asfaltos del petróleo se realiza mediante un proceso de extracción con propano líquido a baja temperatura. Pueden citarse como ejemplo de extracción sólido-líquido la extracción de aceites y grasas animales y vegetales, la lixiviación de minerales, el lavado de precipitados, la obtención de extractos de materias vegetales o animales, el proceso de disolución en la obtención del azúcar de remolacha, etc. A escala doméstica se tienen ejemplos como la preparación de café, té u otras infusiones, o como el lavado de ropa o de vajilla.

2.2.4 Adsorción

(i) Definición

La *adsorción* —a veces llamada simplemente *sorción*— consiste en la eliminación de algunos componentes de una fase fluida mediante un sólido que lo retiene. Si la fase fluida es un líquido, la operación se denomina a veces

Al no consumir energía calorífica, la extracción l-l es una operación en auge.

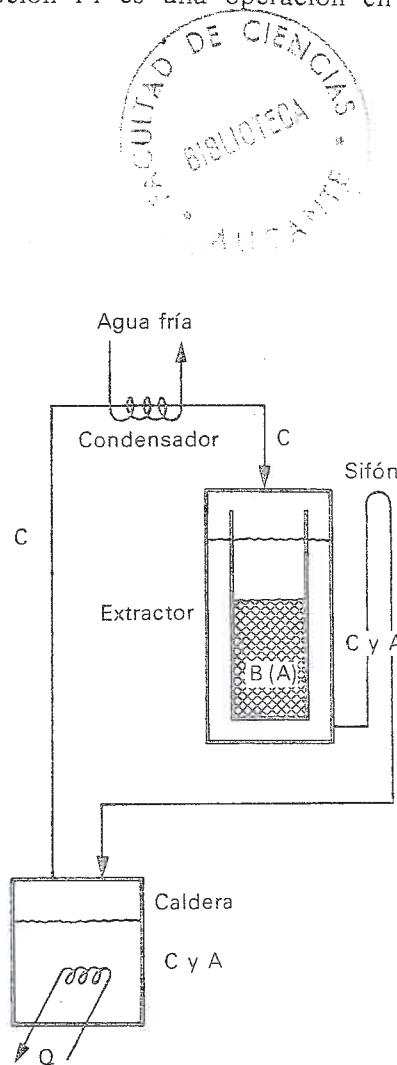


FIGURA 2.14. Extractor Soxhlet.

percolación, como la operación de extracción sólido-líquido descrita anteriormente (véase § 2.2.3).

La adsorción es un fenómeno de superficie: las moléculas, átomos o iones adsorbidos están confinados en la superficie de los poros del sólido, unidos por fuerzas de Van der Waals, o por verdaderos enlaces químicos. En este último caso se habla a veces de *quimisorción*. Solamente los sólidos que posean una superficie específica elevada serán adsorbentes de interés: carbón activo, gel de sílice, alúmina activada, etc. Como ejemplo se puede indicar que en un solo gramo de carbón activo se dispone de una superficie de adsorción de más de 1000 m².

El aula del Departamento de los autores, capaz para 90 alumnos sentados, tiene una superficie de 100 m².

La operación contraria a la adsorción se llama *desorción*. Ello introduce una confusión en la terminología pues se usa la misma palabra para designar la operación inversa a la adsorción. Esta operación de desorción se realiza comúnmente para la regeneración del lecho sólido colmatado de soluto, y para la recuperación del soluto adsorbido, si éste es económicamente interesante.

(ii) Modo de operación

El sólido adsorbente rellena normalmente el interior de una columna, formando un lecho fijo. A medida que se hace circular el gas o el líquido que contiene el soluto a adsorber, se va colmatando el sólido adsorbente, por lo que al cabo de un tiempo debe ser regenerado. La operación, que sería discontinua, se realiza en forma semicontinua colocando dos lechos adsorbentes en paralelo; en un momento dado uno de ellos está en operación y el otro se está regenerando por la circulación a su través de vapor de agua, aire o un gas inerte (véase fig. 2.15). De esta forma el gas a depurar circula en continuo, mientras la operación de cada lecho es discontinua. Esta disposición es muy común en diversas operaciones de ingeniería química.

Un ejemplo peculiar de la operación de adsorción en lecho fijo, aunque en

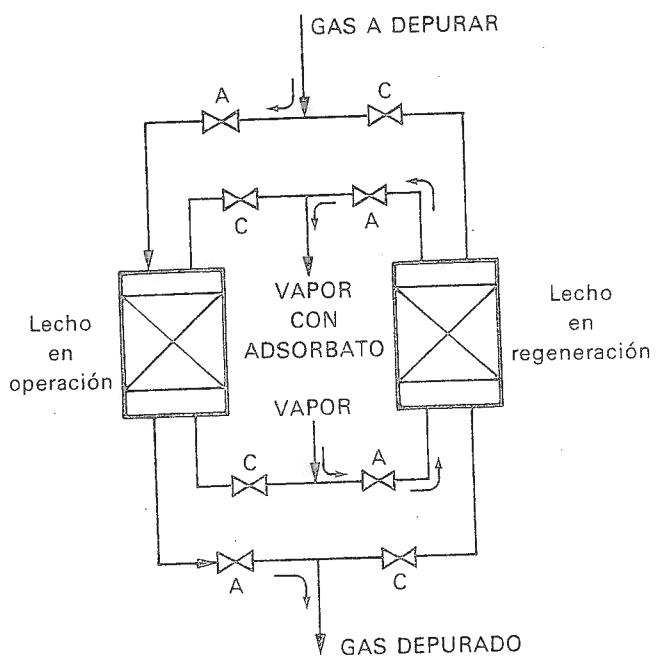


FIGURA 2.15. Sistema de dos lechos adsorbentes en paralelo. A: válvula abierta. C: válvula cerrada.

otro contexto, es la *cromatografía* (cromatografía líquida o chromatografía de gases). Está basada en la distinta adsorción de los componentes de una mezcla sobre un sólido adsorbente o un líquido sostenido por un sólido. Los componentes de la mezcla a separar quedarán retenidos con mayor o menor facilidad, y la adición de un eluyente permitirá recuperar por separado los distintos componentes de la mezcla (véase fig. 2.16). Hay también otros procedimientos operativos.

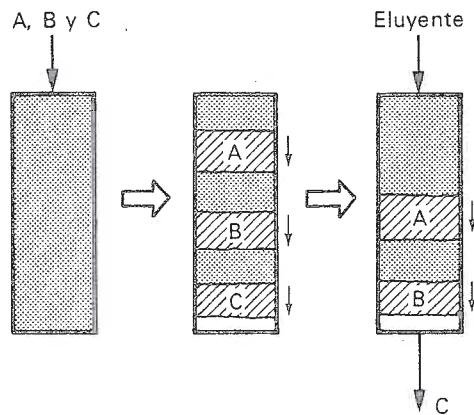


FIGURA 2.16. *Cromatografía líquido-líquido.*

(iii) Ejemplos

La adsorción se aplica industrialmente en muchos casos: para secar corrientes de gas por adsorción de su humedad sobre lecho de gel de silice, para eliminar olores de una corriente por adsorción sobre el carbón activo, para decolorar líquidos, recuperar disolventes del aire ambiente evitando la contaminación por vapores orgánicos, etc.

A escala doméstica se emplea para eliminar sabores del agua con filtros (en realidad adsorbedores) de carbón activo.

2.2.5. Intercambio iónico

El *intercambio iónico* es una operación unitaria que consiste en la sustitución de uno o varios iones de una disolución por otros que forman inicialmente parte de la estructura de un sólido (resina de intercambio iónico). En esencia es una operación unitaria con reacción química, pero operativamente se estudia entre las operaciones de transferencia de materia. La causa es que el fenómeno que controla la operación y determina la velocidad a que se desarrollará el proceso, es la transferencia de materia por difusión y no la reacción química, que es intrínsecamente rápida.

Los poros de una resina contienen iones positivos y negativos formando una sal. En estado seco los iones mantienen su posición media en la estructura, pero cuando se sumergen en un líquido polar, por ejemplo agua, uno o ambos iones quedan libres para desplazarse hacia el seno del líquido mientras otros iones de carga equivalente pasan del líquido al sólido, de modo que la resina permanece eléctricamente neutra.

La figura 2.17 muestra el esquema de la estructura de una resina que contiene iones negativos fijos. Tal resina se llama resina catiónica pues puede intercambiar cationes.

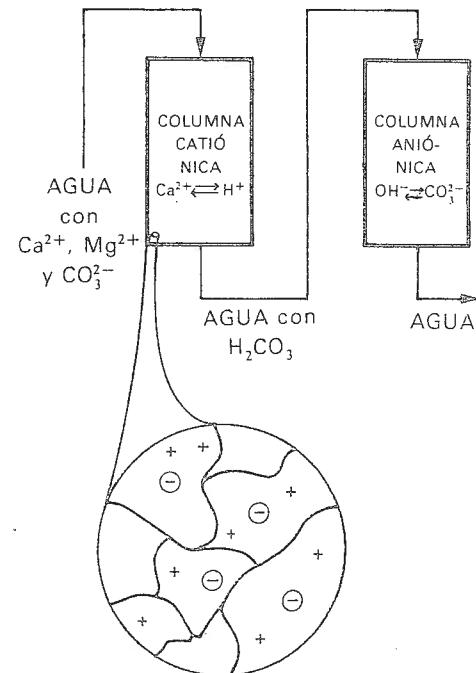


FIGURA 2.17. *Instalación de desmineralización de agua, y detalle de una resina catiónica.*

Las resinas de intercambio iónico se emplean también como catalizadores en algunas reacciones químicas.

Esta operación se aplica sobre todo en procesos de acondicionamiento de agua a nivel industrial (por ejemplo agua para calderas) o doméstico (por ejemplo en lavavajillas). El *ablandamiento de agua* es la eliminación de los cationes divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} del agua, con lo que disminuye su dureza. Se realiza el intercambio en una columna catiónica, donde se sustituyen los iones indicados por Na^+ , que no forma sales insolubles, y se evitan así las incrustaciones. Las resinas, con el paso de agua dura, se agotan y deben regenerarse con la operación inversa, esto es, haciendo circular a su través una disolución concentrada de NaCl .

La *desmineralización* o desionización del agua es la eliminación (por sustitución o intercambio) de los cationes y aniones que contenga. Ello se lleva a cabo normalmente con dos columnas consecutivas, una catiónica y otra aniónica. En la primera se sustituyen los cationes por H^+ y en la segunda los aniones por OH^- . El agua queda en principio neutra. Las resinas se regeneran, respectivamente con HCl y NaOH (fig. 2.17). Se suele añadir una columna tampón para ajustar el pH.

2.3 Operaciones unitarias físicas controladas por la transmisión de calor

2.3.1 Introducción

Las operaciones unitarias controladas por la transmisión de calor son sólo una parte de las operaciones en las que se desea un intercambio de energía. En efecto, son dos las formas por las que puede intercambiarse energía entre un sistema y sus alrededores: en forma de *calor* y en forma de *trabajo*. Las operaciones en las que se intercambia trabajo son normalmente operaciones controladas por la transferencia de cantidad de movimiento: como se verá más adelante el transporte de cantidad de movimiento y el transporte de energía mecánica (compuesta por el flujo de trabajo mecánico, de energía cinética y de energía potencial) están íntimamente relacionados. Como ejemplos de operaciones de transmisión de energía no estudiadas en el presente apartado pueden citarse la impulsión de fluidos por bombeo o compresión, la agitación, y la trituración y molienda de sólidos. En todas ellas el trabajo mecánico es la única forma de energía relevante en el sistema.

Las operaciones unitarias en las que la velocidad de transmisión de calor desempeña el papel fundamental y controlante son las siguientes:

- *aislamiento térmico*
- *calentamiento* (o refrigeración) de fluidos: *intercambio de calor sin cambio de fase*
- evaporación, condensación, sublimación y solidificación: *intercambio de calor con cambio de fase*.

Como puede observarse en la clasificación anterior, ha prevalecido el criterio de la finalidad de la operación, del «para qué»: ceder o no ceder calor, cederlo sólo para aumentar la temperatura, o para producir un cambio de fase. Además, en el tercer apartado se han incluido cuatro operaciones de las que sólo las dos primeras son estrictamente de transmisión de calor, pues las otras dos están ligadas respectivamente a las operaciones unitarias de liofilización y de cristalización, ambas de transferencia simultánea de calor y materia, y se estudiarán en el apartado 2.4.

2.3.2 Mecanismos de transmisión de calor

Una sistematización de las operaciones unitarias hace más hincapié en los mecanismos por los que se realiza la transmisión de calor, y en función de ellos describe y analiza las operaciones. Tales mecanismos reciben los nombres de *conducción*, *convección* y *radiación*, y tienen de común sólo que el flujo neto de calor siempre va en sentido de las temperaturas decrecientes. Esto implica que la fuerza impulsora de la transmisión de calor será una función de la temperatura, o mejor, del gradiente de temperaturas (ley de Fourier) o del gradiente de alguna función de la temperatura (ley de Stefan-Boltzmann).

Observando el fenómeno de transmisión de calor desde el nivel de descripción atómico-molecular, es evidente que un conjunto de partículas aumentará su energía media —su temperatura— cuando reciba energía mediante choques elásticos de otras partículas o con las paredes, o bien cuando reciba la incidencia de radiación electromagnética, explicable a su vez como haces de fotones que chocan con las partículas consideradas.

Desde esta perspectiva, pues, son sólo dos —o uno— los mecanismos de transmisión de calor. No obstante, es más común considerar que son tres los mecanismos de transmisión, pues a efectos prácticos operativos el diseño de los aparatos en los que se pretende la transmisión de calor se hace en base a considerar por separado la conducción, la convección y la radiación.

Conducción. Si en un medio material continuo y no vacío existe un gradiente de temperatura, el calor fluye en el sentido de la temperatura decreciente sin que exista simultáneamente ningún desplazamiento de materia a nivel macroscópico. Este fenómeno recibe el nombre de conducción molecular de calor. La transmisión de energía se realiza a nivel molecular por desplazamiento de las moléculas individuales libremente —en gases y líquidos— o de los electrones libres —en los metales— o por vibración de las moléculas o iones de los sólidos.

Convección. Un volumen de fluido que circula por un punto dado, por el hecho de que está a una temperatura dada, lleva consigo una cierta cantidad de entalpía. A este flujo de entalpía asociado al movimiento de un fluido se le denomina *flujo convectivo de calor*, en terminología algo ambigua (capítulos 6 y 9).

La convección puede ser *natural* o *forzada* según sea el tipo de fuerzas que actúan sobre el fluido. En el primer caso actúan sólo las fuerzas de flotación generadas únicamente por las diferencias de densidad que aparecen en el seno de un fluido, las cuales son, a su vez, debidas a gradientes de temperatura. En el segundo caso actúan dispositivos mecánicos (bombas, agitadores, etc.) que comunican energía al fluido poniéndolo en movimiento.

De lo dicho hasta ahora puede comprenderse que en un fluido puede transmitirse calor por conducción y convección, mientras que en un sólido sólo por conducción.

Así pues, la conducción de calor se diferencia de la convección de calor en que en la primera hay un intercambio de energía entre moléculas, mientras que la segunda se basa en el movimiento de masas de fluido, de grandes grupos de moléculas. En la convección no se observa si unas partes individualizadas de fluido reciben energía o no, sino si ha llegado energía calorífica —con el fluido— a un punto dado del sistema.

Radiación. La transmisión de energía mediante ondas electromagnéticas recibe el nombre de radiación. Si la radiación se efectúa a través del vacío no se transforma en calor ni en ninguna otra forma de energía. Sin embargo, al llegar a un medio material la radiación puede ser transmitida, reflejada o

La transmisión de calor por conducción y convección requiere un soporte material; no así la transmisión de calor por radiación.

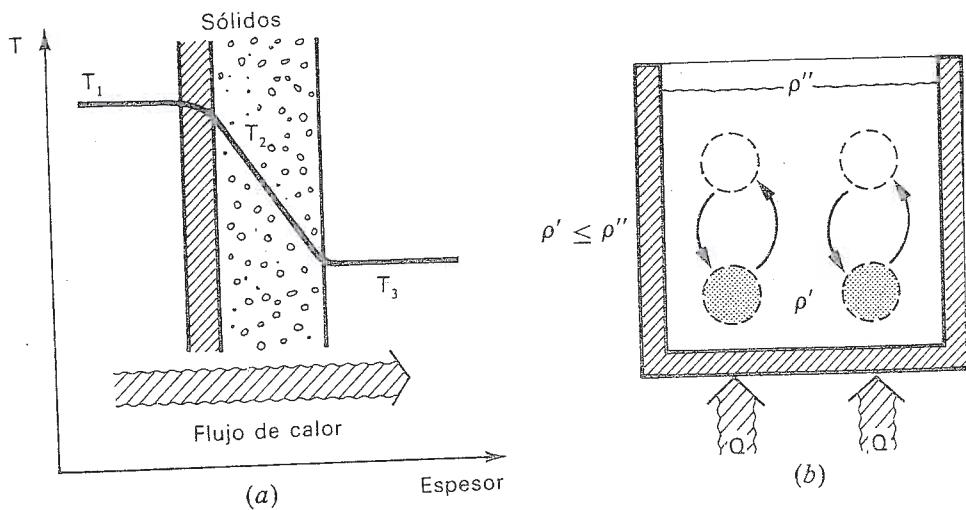


FIGURA 2.18. Dos mecanismos de transmisión de calor. (a) Perfiles de temperatura en la transmisión de calor por conducción en dos materiales de distinta conductividad térmica. (b) Movimiento de masas de fluido por convección debido a su distintiva densidad. El calor entra por la parte inferior.

absorbida, transformándose esta última en calor, o actúa como energía capaz de activar reacciones, fotoquímicas o no.

El fenómeno de la radiación puede esudiarse separadamente de los fenómenos de conducción-convección, sumando a posteriori las contribuciones de cada uno de ellos. El fenómeno de radiación tiene importancia desde el punto de vista de la transmisión de calor sólo a elevadas temperaturas, pues la cantidad de calor transmitida por este mecanismo es función de la temperatura elevada a la cuarta potencia, según la ley de Stefan-Boltzmann. A bajo gradientes de temperatura, si bien hay también radiación, es muy poco el calor intercambiado.

2.3.3 Aparatos para el intercambio de calor

Son muchos y muy diversos los aparatos diseñados para suministrar o eliminar calor, y pueden basarse simultáneamente en varios de los mecanismos de transmisión citados. Se describen a continuación los principales tipos de aparatos, que se encuentran reunidos en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Operaciones, mecanismos y aparatos para el intercambio de calor.

Operación	Mecanismo		
	Conducción	Convección	Radiación
Aislamiento térmico	Aislantes refractarios	Camisas de vacío	Espejos de radiación
Calefacción o refrigeración de fluidos	Intercambiadores de calor		Hornos
		Placas solares	
Evaporación	Evaporadores		
Condensación	Condensadores		

Intercambiadores de calor. Son aparatos cuyo objetivo es el de llevar una corriente de fluido a una temperatura determinada, calentándola o refrigerándola mediante otra corriente de fluido calentador o refrigerante. Los fluidos circulan separados por una superficie, metálica o no, a través de la cual intercambian el calor. Se emplean muchísimo en la industria química y petroquímica para situar las distintas corrientes de fluido a su nivel térmico adecuado y además para conseguir el máximo ahorro de energía posible. Para ello se *integran* las distintas corrientes de fluido entre sí enlazando corrientes a calentar con corrientes a enfriar, de modo que el consumo de energía adicional sea mínimo. En el capítulo 1 se ha presentado un esquema de refinería con diversos intercambiadores de calor combinados entre sí.

Los factores principales a tener en cuenta en la elección de un tipo dado de intercambiador para un servicio concreto son los siguientes:

- Temperaturas de trabajo, y estado (líquido o vapor) de los fluidos.
- Presiones de las corrientes, y pérdidas de presión admisibles.
- Caudales de los fluidos.
- Posibilidad de ensuciamiento del aparato: las incrustaciones o depósitos de suciedad actúan como una resistencia al paso del calor, dificultándolo.
- Acción corrosiva de los fluidos.
- Espacio disponible para la instalación del aparato.

De acuerdo con las informaciones anteriores se escogerá un intercambiador de entre los tipos que a continuación se describen:

(i) *Intercambiadores de calor de doble tubo.* Constituidos por dos tubos concéntricos, por los que circula un fluido por el interior del tubo interior y otro fluido por el espacio anular. Intercambian calor a través de la pared que separa los dos fluidos. Se usan para intercambiar pequeños caudales de calor (véase fig. 2.19-a).

(ii) *Intercambiadores 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 pared exterior. Es un tipo de dispositivo frecuentísimo en la industria y se presenta en varios modelos distintos según las aplicaciones. En los extremos del haz de tubos se disponen los *cabezales* del intercambiador que, mediante unas placas apropiadamente dispuestas, obligan al fluido que circula por el interior de los tubos a recorrer un camino sinuoso por el haz de tubos (véase fig. 2.19-b). Asimismo, diversos tabiques deflectores colocados en la carcasa hacen que el fluido externo circule en dirección lo más perpendicular posible al haz de tubos, mejorándose la transmisión de calor. Un intercambiador de este tipo se denomina intercambiador *m-n*, siendo *m* el número de *pasos* o cambios de dirección del fluido de la carcasa, y *n* el número de pasos del fluido del interior de los tubos.

Los cabezales pueden retirarse con cierta facilidad para proceder a la limpieza del intercambiador y a su reparación, en su caso. Si el ensuciamiento del aparato es muy improbable, pueden usarse tubos en forma de U, con un solo cabezal. Son más baratos, pero más difíciles de limpiar.

Hasta hace relativamente poco tiempo estos intercambiadores estaban constituidos principalmente con materiales metálicos, pero actualmente pueden construirse en diversos materiales plásticos, como el politetrafluoroetileno, mucho más caro pero resistente a fluidos muy agresivos.

«Intercambiador 2-4»: 2 pasos en carcasa, 4 pasos en tubos.

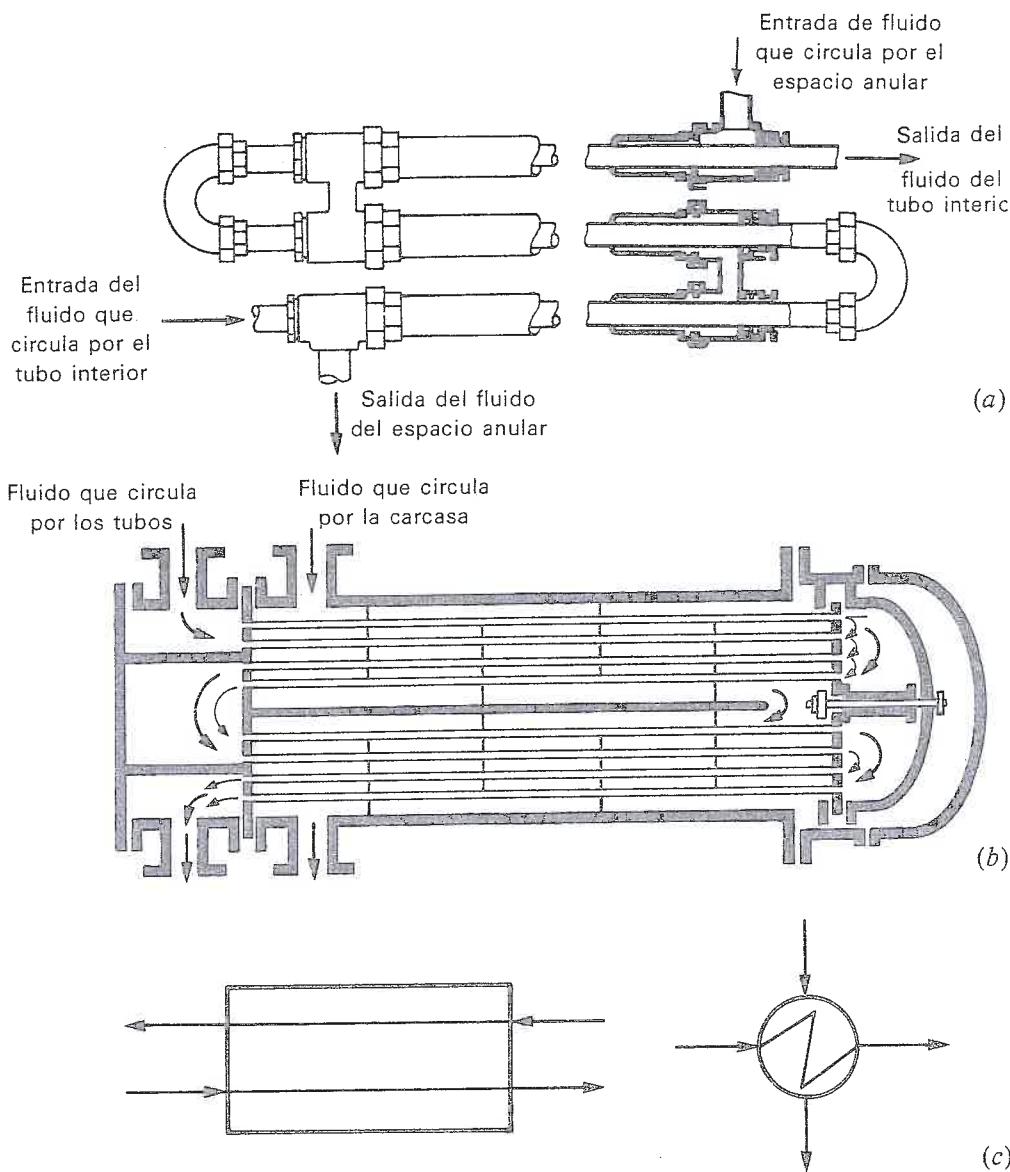


FIGURA 2.19. (a) Intercambiador de calor de doble tubo, seccionado. (b) Esquema de la disposición interna de un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Es de tipo 2-4 pues el fluido exterior pasa en dos sentidos por la carcasa, y el fluido interior en cuatro sentidos por los tubos. (c) Representaciones esquemáticas de los intercambiadores de calor en los diagramas de flujo.

(iii) *Intercambiadores de calor de placas*. Su diseño está basado en sustituir las superficies tubulares por superficies planas con ciertas rugosidades. Estos intercambiadores pueden desmontarse con facilidad para su limpieza, y tienen poco volumen, aunque su precio es normalmente elevado (véase figs. 2.20-a y 2.20-b).

(iv) *Intercambiadores de calor de grafito*. En ellos no hay superficies metálicas de intercambio de calor, y el fluido circula por agujeros taladrados en una masa de grafito prensada. Se usan para líquidos muy corrosivos.

(v) *Hornos*. Son dispositivos de intercambio de calor en los que sólido o un fluido se calienta básicamente por radiación, gracias a la combustión en un recinto cerrado de un combustible cualquiera, sólido (carbón), líquido

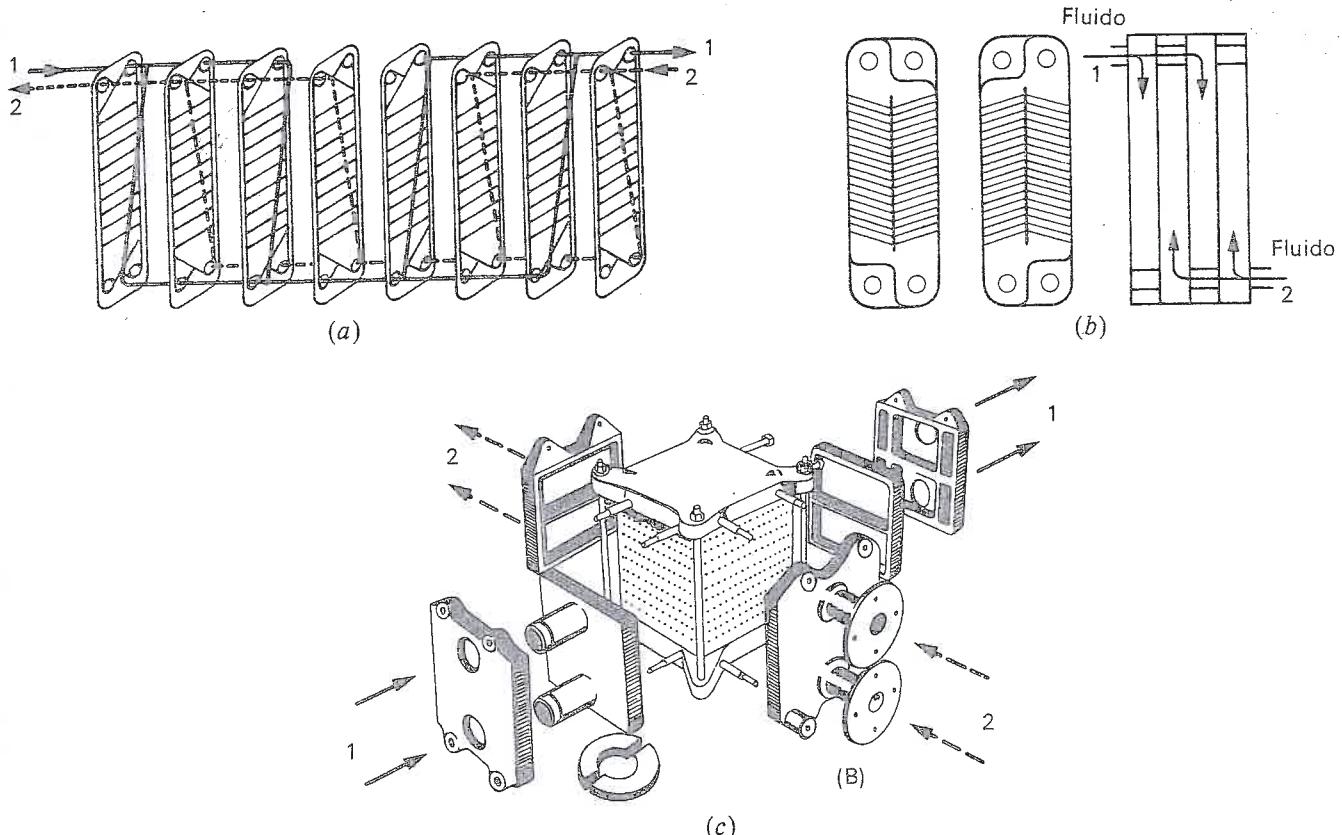


FIGURA 2.20. (a) Esquema de la circulación de los fluidos en un intercambiador de calor de placas. (b) Dos placas consecutivas, y modelo de la circulación paralela de fluidos en contracorriente. (c) Un intercambiador de calor de grafito, desmontado.

(fueloil), o gas (gas natural o gas de refinería). En la figura 2.21 se presenta un esquema simplificado de un horno empleado para craquear naftas en una refinería, con lo que se reduce la longitud de las cadenas carbonadas.

(vi) *Aerorrefrigerantes*. Constituyen un tipo especial de intercambiadores de calor en los que un fluido se enfria intercambiando calor con el aire ambiente. Éste circula impulsado por ventiladores colocados encima o debajo del haz de tubos (*tiro inducido* o *tiro forzado*, respectivamente). Se usan cuando no se dispone de caudales suficientes de agua de refrigeración, ésta es muy cara, o corroe las instalaciones.

(vii) *Evaporadores*. Son intercambiadores de calor cuyo objetivo es el de concentrar una disolución obteniéndose vapor del disolvente. Es una operación muy empleada en diversas industrias, bien sea para aprovechar la disolución concentrada (por ejemplo la concentración de la leche), o para aprovechar el vapor del disolvente (por ejemplo la obtención de agua desalinizada por ebullición del agua de mar y posterior condensación del vapor de agua). Normalmente se disponen varios evaporadores combinados, en los que se emplea el vapor generado en un evaporador como medio de calefacción del siguiente: se denominan *evaporadores de múltiple efecto* (véase fig. 2.22).

Hay muchos tipos de evaporadores, parecidos en su concepción a los intercambiadores de calor, con la peculiaridad de tener que separar las dos

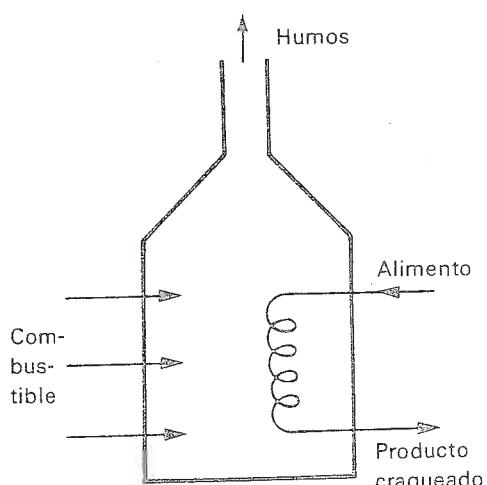


FIGURA 2.21. Esquema de un horno de craqueo.

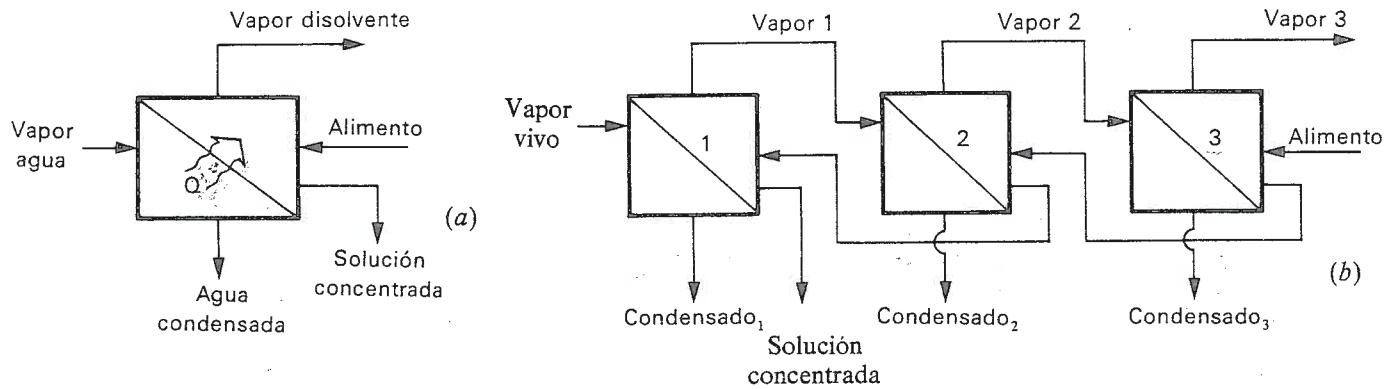


FIGURA 2.22. Evaporadores. (a) Representación esquemática de un evaporador. (b) Evaporador de triple efecto en contracorriente: la solución concentrada sigue el camino opuesto al de los vapores.

fases formadas. En la figura 2.23 se muestra un evaporador de película ascendente. El vapor de calefacción circula por la camisa exterior, cediendo calor al líquido que se quiere concentrar, que circula por el tubo interior. Por este tubo asciende una mezcla líquido-vapor que se separa en el recipiente superior. Se puede recircular el líquido separándose y condensándose el vapor.

En muchas ocasiones se trabaja a vacío para reducir el punto de ebullición y así evitar que una alta temperatura altere las características del soluto.

No deben confundirse los términos «vaporización» y «evaporación». El primero designa el hecho de obtenerse un vapor a partir de un líquido, sea en las condiciones y circunstancias que sea; mientras que el segundo término se restringe a la operación descrita anteriormente. En toda evaporación se da la vaporización del disolvente, pero la afirmación inversa no es cierta, no todas las vaporizaciones son evaporaciones.

Algunos textos consideran que la *evaporación* tiene entidad suficiente como para ser considerada una operación unitaria específica. No obstante,

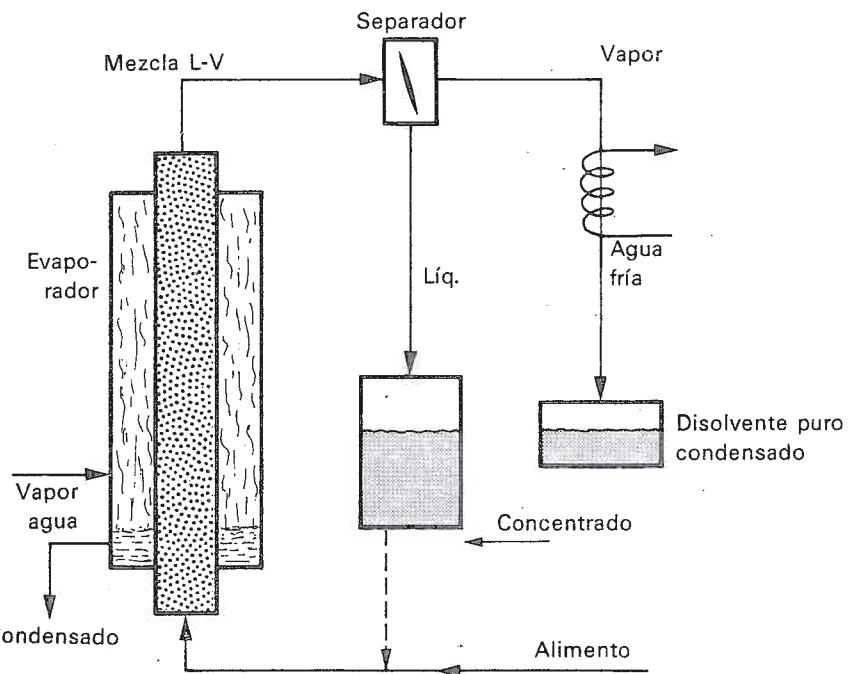


FIGURA 2.23. Evaporador de película ascendente.

«Vaporización» no es sinónimo de «evaporación».

debe notarse que esta operación es análoga conceptualmente a la *destilación simple*, descrita en el apartado 2.2.1. Se diferencian en que en la evaporación el alimento contiene un soluto cuyo punto de ebullición está muy por encima del del disolvente, con lo que los vapores obtenidos en la operación son de disolvente puro. Por otro lado, en un caso (destilación simple) es la transferencia de materia el criterio importante de cálculo y en el otro (vaporización) es el transporte de calor el fenómeno controlante del diseño.

(viii) *Condensadores*. Son intercambiadores de calor que tienen por objetivo la condensación de un vapor mediante un líquido frío. Se pueden utilizar los intercambiadores de calor descritos anteriormente, o bien una pulverización con agua fría cayendo en forma de ducha sobre los tubos. En la figura 2.24 se presenta el esquema de un condensador de carcasa y tubos.

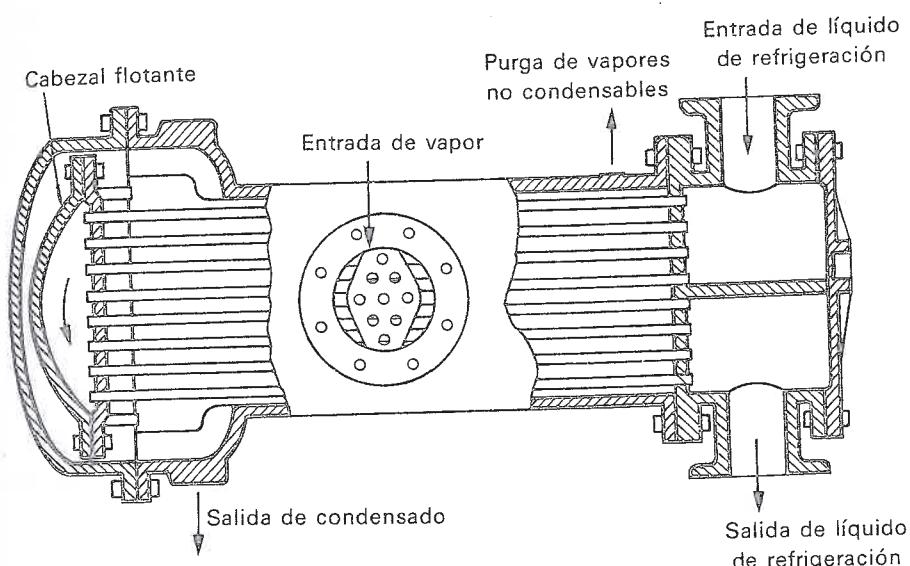


FIGURA 2.24. Condensador de dos pasos con cabezal flotante (que no está fijado a la carcasa, sino libre, para impedir deformaciones por dilatación).

(ix) *Acumuladores de calor*. Son dispositivos empleados con fines de aprovechamiento energético, para recuperar el calor sensible de corrientes gaseosas. Consisten normalmente en apilamientos de materiales de elevada capacidad calorífica —ladrillos, piedras o virutas metálicas— dispuestos por parejas en paralelo. Mientras la corriente gaseosa caliente de salida —por ejemplo los humos de salida de un horno— va calentando *uno* de los apilamientos, el *otro*, ya caliente, va cediendo su calor acumulado a otra corriente —por ejemplo el aire a precalentar para la combustión—, con lo que intercambian calor sin mezclarse. La operación es, obviamente, semicontinua. Se usan, por ejemplo en hornos de fabricación de vidrio, con apilamientos cerámicos, y para aprovechar el frío de las corrientes en el proceso de destilación del aire líquido, con apilamientos metálicos.

(x) *Placas solares*. Aprovechan el calor del sol calentando agua con una combinación de efectos de transmisión de energía (véase fig. 2.25). La *radiación solar* atraviesa el cristal superior sin ningún efecto, pues el cristal es transparente a dicha radiación. Ésta incide sobre el serpentín de cobre pintado de negro, que absorbe la radiación y, por tanto, se calienta. Emite entonces radiación infrarroja a baja temperatura, que no es capaz de atravesar el cristal, calentando por consiguiente el aire del recinto, y el cristal. Éste es el denominado «*efecto invernadero*». El agua del interior del ser-

Aprovechamiento de la energía solar.

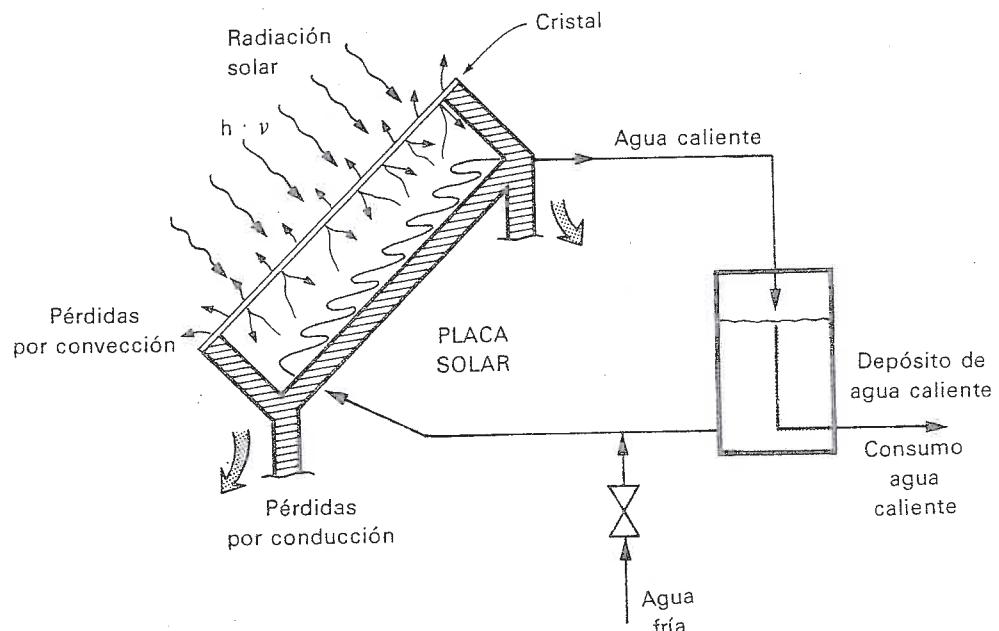


FIGURA 2.25. Placa solar.

pentín se calienta por *conducción-convección* y circula hacia el depósito, donde se almacena. Se pierde parte del calor a través del cristal —*conducción*— hacia el aire exterior —*convección*— y por los soportes de la instalación —*conducción*—.

A escala doméstica hay numerosos tipos de aparatos basados en el intercambio de calor:

- Basados principalmente en la conducción: termos eléctricos, planchas, cocinas eléctricas de placas, fabricación de cubitos de hielo, etc.
- Basados principalmente en la convección: cocinas de gas, calentadores de agua, «radiadores» de calefacción, serpentines de los refrigeradores, estufas de gas catalíticas, etc.
- Basados principalmente en la radiación: hornos de microondas, hornos y lámparas de infrarrojos, estufas de infrarrojos, etc.

2.4 Operaciones unitarias físicas de transferencia simultánea de calor y materia por contacto directo entre fases

En la clasificación de las operaciones unitarias descrita en el apartado 2.1 se ha visto ya que existen operaciones en las que se da simultáneamente una transferencia de materia y una transmisión de calor, siendo ambos transportes controlantes del proceso de la operación. Hay simultáneamente separadoras impulsoras separadas, que pueden ir en el mismo sentido o incluso en sentidos opuestos. Estas son operaciones generalmente de separación, en las que hay siempre dos fases en *íntimo contacto*, y a través de la interfase separadora se producen los fenómenos de transporte mencionados. A continuación se describirán las siguientes operaciones: acondicionamiento de gases o enfriamiento de líquidos (fases presentes: líquido-gas), cristalización (sólido-líquido), secado (sólido o líquido-gas) y liofilización (sólido-gas).

2.4.1 Acondicionamiento de gases. Enfriamiento de líquidos

Si bien los conceptos e ideas que se introducirán en este apartado son válidos para todo tipo de líquidos y gases, la operación es mucho más frecuente para la pareja agua-aire que para cualquier otro sistema. De ahí que a partir de este momento sólo haga referencia sólo al sistema agua-aire.

(i) Definición

El *acondicionamiento de aire* es la operación unitaria que tiene como objetivo modificar las condiciones de humedad y temperatura de una corriente de aire, por interacción con una corriente de agua. Se transfiere agua y energía calorífica de una a otra corriente. Esta operación recibe también otros nombres: interacción aire-agua, humidificación-deshumidificación, e incluso *enfriamiento de agua*. Esta última denominación se emplea sólo cuando el objetivo de la operación es el enfriamiento de una corriente de agua por interacción con el aire ambiente. Este enfriamiento podría llevarse a cabo también por otros medios, como se ha visto ya en el apartado 2.3.3.

En la tabla 2.1 se recuerdan algunas definiciones previas necesarias para

ALGUNAS DEFINICIONES PREVIAS PARA LAS OPERACIONES DE ACONDICIONAMIENTO DE GASES, ENFRIAMIENTO DE UN LÍQUIDO Y SECADO

- *Humedad absoluta* es la masa de vapor de líquido (por ejemplo agua) contenidos en la unidad de masa de gas (por ejemplo aire) libre de vapor.
- *Humedad relativa* es la razón entre la presión parcial de vapor del líquido y la presión de vapor de dicho líquido a la temperatura del gas.
- *Gas saturado* es aquél en el que la presión parcial del vapor del líquido es igual a la presión de vapor de dicho líquido a la temperatura del gas. Su humedad relativa será de 100% y su humedad absoluta recibe el nombre de *humedad de saturación*. Se denomina *punto de rocío* a la temperatura a la que es preciso enfriar un gas para que alcance su saturación.

La *temperatura húmeda* es la temperatura estacionaria que alcanza una pequeña masa de líquido sumergida en una corriente continua de gas. Esta definición se comprenderá mejor atendiendo al método empleado para la medición de la temperatura húmeda (fig. 2.26). Considerese que la temperatura inicial del líquido que moja la muselina que envuelve el bulbo del termómetro es igual a la temperatura del gas. Si el gas no está saturado, evaporará líquido, y, al ser el sistema en conjunto adiabático, la cesión por parte del líquido del calor latente que dicha evaporación implica originará una disminución de la temperatura del líquido. Como consecuencia de ello, se produce a su vez una transmisión de calor sensible del gas al líquido. Se alcanza al final un estado estacionario tal que la energía que se necesita para evaporar el líquido y calentar el vapor a la temperatura del gas es la energía que éste es capaz de ceder por estar a mayor temperatura. La temperatura del líquido a la cual se produce esta situación estacionaria cuando el gas tiene una determinada humedad se denomina *temperatura húmeda*. La temperatura húmeda es, pues, la medida de la temperatura a que transcurre el equilibrio dinámico entre la convección y la evaporación sobre el bulbo del termómetro, para una humedad dada del gas.

La temperatura del gas antes de pasar por el termómetro húmedo se denomina *temperatura seca*, que puede medirse con un termómetro cualquiera. Coinciden ambas temperaturas sólo si el gas está saturado de humedad y entra a la temperatura del líquido: no se evaporaría líquido.

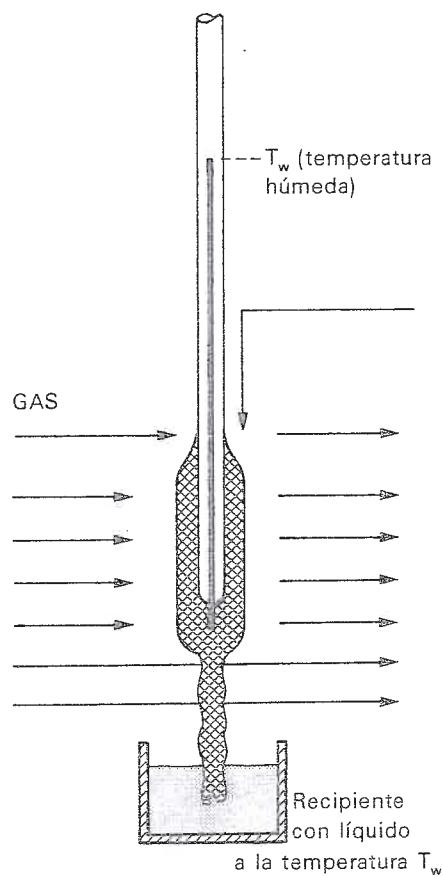


FIGURA 2.26. Termómetro húmedo. Consiste en un termómetro convencional envuelto por una gasa o muselina empapada en un líquido a la temperatura de equilibrio T_w . Esta temperatura recibe la denominación de temperatura húmeda.

el estudio de las operaciones unitarias de acondicionamiento de gases, enfriamiento de agua y secado principalmente.

(ii) Modos de operación

Como se ha dicho antes, esta operación unitaria puede tener varios objetivos:

- humidificar aire
- deshumidificar aire
- enfriar agua

La *humidificación de aire* se consigue al poner en contacto el aire no saturado con agua, a unas temperaturas tales que el aire aumenta su contenido de humedad. La *deshumidificación del aire* se conseguirá siempre que se ponga en contacto aire húmedo con un líquido más frío, de modo que la temperatura del gas disminuya por debajo del punto de rocío y condense agua, disminuyendo la humedad absoluta del aire hasta el valor deseado. El aire puede calentarse luego hasta una temperatura tal que su humedad relativa tenga el valor deseado. Los acondicionadores de aire domésticos siguen esta disposición.

El *enfriamiento de agua* es quizá la faceta industrialmente más importante de esta operación unitaria. El agua caliente procedente de la refrigeración de las unidades de una planta puede enfriarse si se pone en contacto con un gas más frío no saturado. Esta saturación puede ser análoga a la de humidificación del aire. El caudal de la corriente de agua se reduce en una cierta cantidad por la evaporación del agua. Esta cantidad, del orden de un 10% del total, deberá reponerse a la corriente.

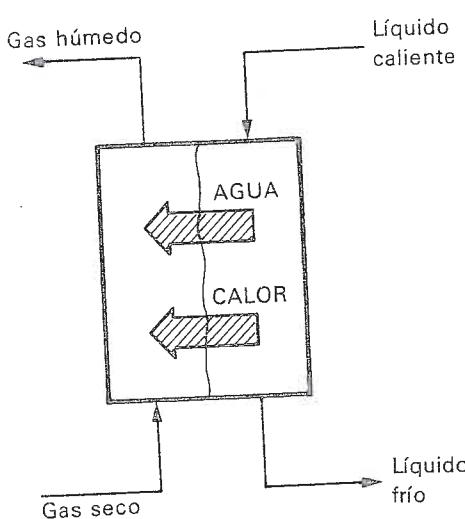


FIGURA 2.27. Acondicionamiento de aire: disposición para enfriamiento de agua.

(iii) Aparatos

Los dispositivos más empleados para el enfriamiento de líquidos y más concretamente de agua son las denominadas *torres de enfriamiento*, que son pilas de relleno de madera o de material plástico provistos en su parte superior de distribuidores de agua. Ofrecen una gran superficie interfacial. El aire asciende por la torre por tiro natural o forzado. En la figura 2.28 se muestra una torre de enfriamiento y en la figura 2.29 la situación de una torre de enfriamiento, en un circuito cerrado, como refrigeradora de una central térmica o nuclear.

2.4.2 Cristalización

(i) Definición

Se denomina cristalización a la formación de partículas sólidas cristalinas en el seno de una fase homogénea. Desde el punto de vista industrial la cristalización más importante es la que conlleva la formación de sólidos cristalizados en el seno de disoluciones líquidas sobresaturadas, y es la que aquí se tratará.

La finalidad de esta operación unitaria es doble: por una parte, una amplia gama de productos se obtiene en forma cristalina; por otra parte, es una forma de obtener adecuados grados de pureza de determinadas sustancias, reiterando el proceso varias veces consecutivas.

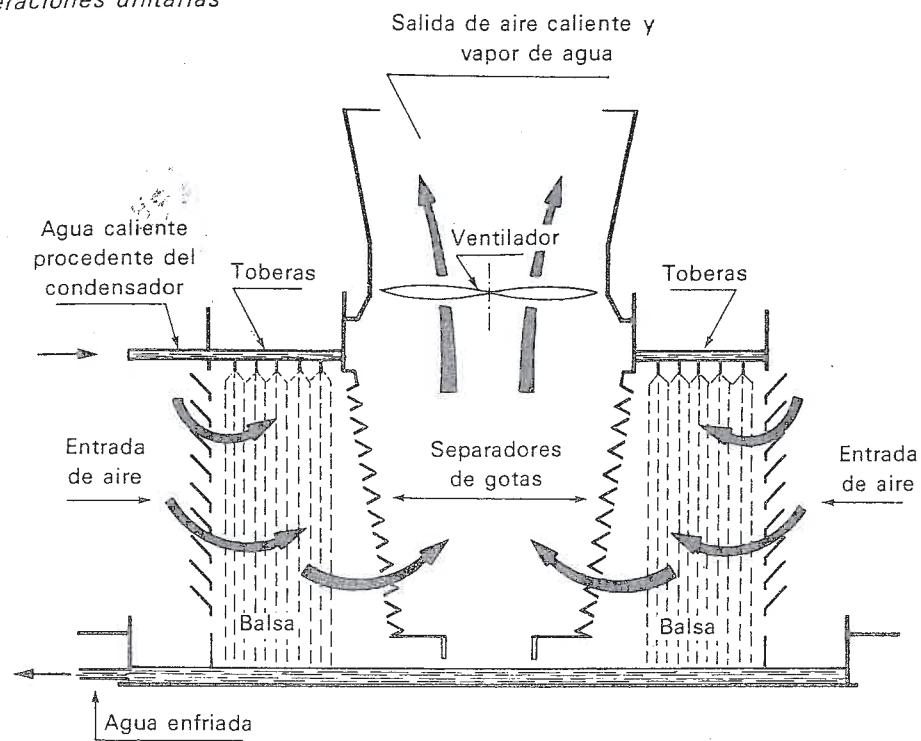


FIGURA 2.28. Esquema de una torre de refrigeración de tiro forzado.

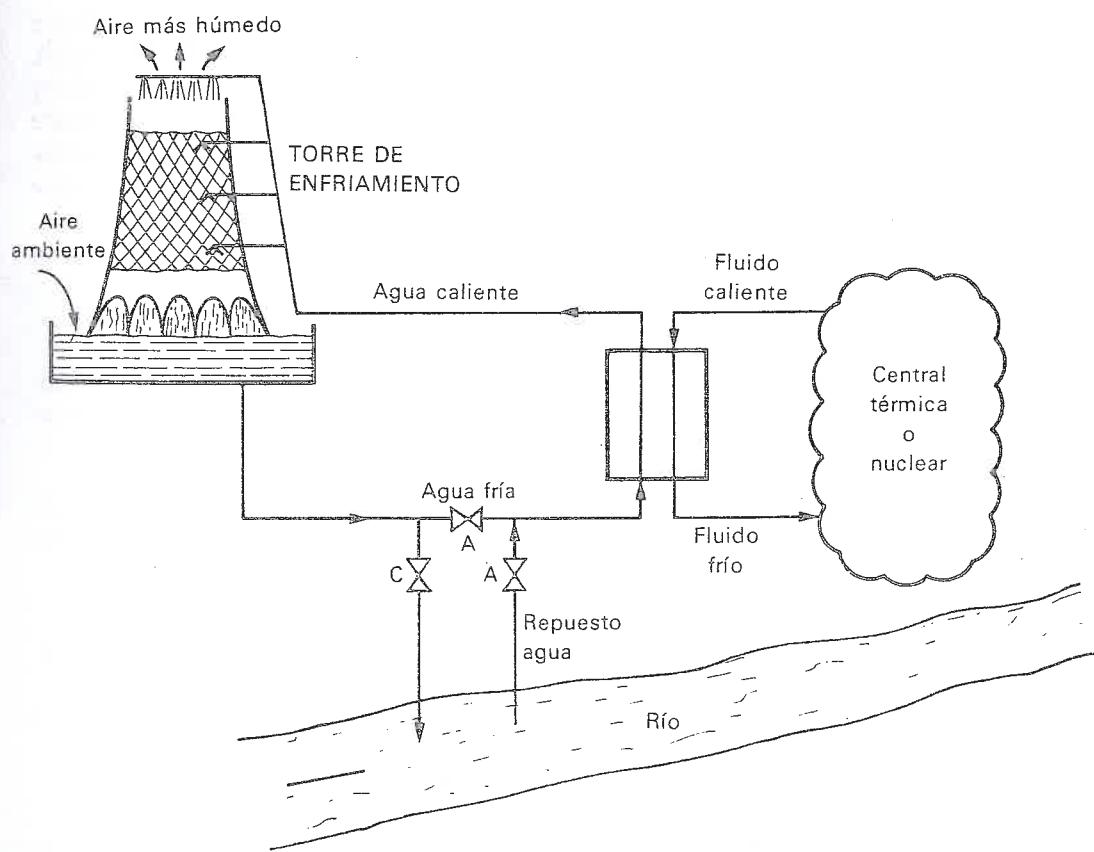


FIGURA 2.29. Torre de enfriamiento de central de producción de energía. Disposición en circuito cerrado.

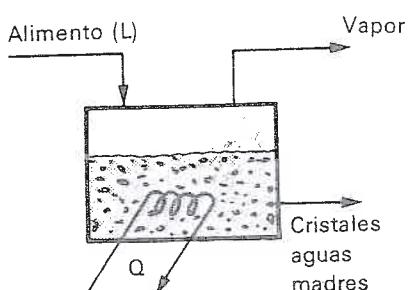


FIGURA 2.30. Esquema de un cristalizador.

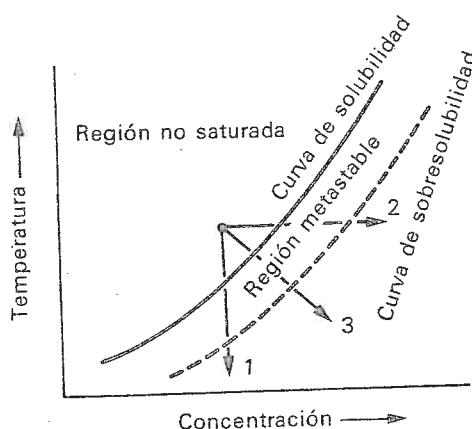


FIGURA 2.31. Diagrama temperatura-concentración de una solución.

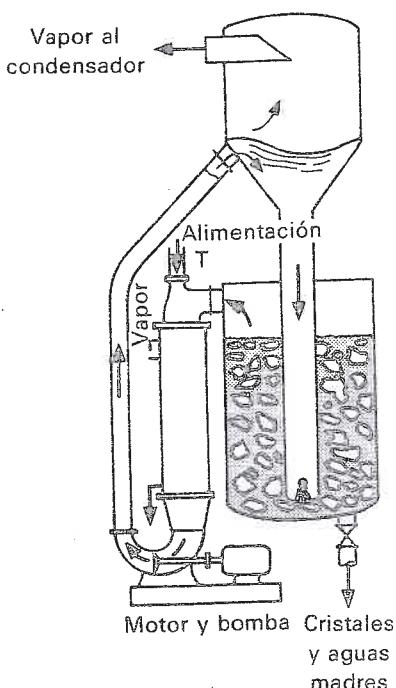


FIGURA 2.32. Cristalizador-evaporador.

La solución líquida inicial recibe el nombre de *magma*. A partir de ella se obtendrá la *cosecha de cristales*, y el resto de la solución, las *aguas madres*, se desechará o se recircula.

Las características más importantes de una cosecha de cristales son: el *tamaño* y la *forma* de los cristales, la *uniformidad* de los mismos, y su *pureza*. Las tres primeras dependen de la operación unitaria entre sí, pero la pureza depende sobre todo de las sucesivas recristalizaciones, filtraciones y lavados con disolvente puro. Esta purificación requiere un tamaño y uniformidad de los cristales adecuada, para su fácil manipulación.

El proceso de formación de cristales consta de dos etapas: la *nucleación* y el *crecimiento*. La *nucleación* es la formación, a partir de los iones o moléculas de soluto, de *núcleos* cristalinos de tamaño suficiente para mantenerse sin solubilizarse en la solución. El *crecimiento* es el proceso de aumento de tamaño de un núcleo cristalino, por adición de nuevos iones o moléculas.

Si se considera el comportamiento de una solución al variar la concentración y la temperatura se observa (fig. 2.31) que existen tres zonas de comportamiento. A una temperatura dada se tiene a bajas concentraciones la *región no saturada*: cualquier cristal en esta zona se disolvería espontáneamente. Al aumentar la concentración se atraviesa la curva de solubilidad, y se entra en la *zona metastable* en la que cualquier núcleo o cristal ya formado tiende a crecer, pero sin formarse nuevos núcleos. Y a sobresaturaciones altas se llega a la *región lábil*, en que se forman gran cantidad de núcleos. La *región metastable* y la *lábil* están separadas por la *curva de sobresolubilidad*, no muy bien definida en muchos casos.

El conseguir una cosecha de cristales de tamaño y uniformidad adecuados implica trabajar en la zona metastable y cerca de la *región lábil*.

Las fuerzas impulsoras en esta operación, en ambas etapas (nucleación y crecimiento) son las mismas: la *sobresaturación*, es decir, la diferencia entre la concentración de soluto en la solución y la concentración que tendría la solución saturada en el equilibrio; y la posible *diferencia de temperatura* entre el cristal y el líquido, originada en el cambio de fase.

(ii) Modos de operación y aparatos

La forma de la curva de solubilidad y la naturaleza de la solución determinan el modo de operación y el tipo de cristalizador adecuado correspondiente. Cabe distinguir tres tipos de cristalizador:

- Cristalizadores del tanque, en los que la sobresaturación se produce por enfriamiento sin evaporación apreciable (línea 1 de la figura 2.31). Se emplean cuando la solubilidad varía mucho con la temperatura.
- Cristalizadores-evaporadores (véase fig. 2.32), en los que la sobresaturación se produce por evaporación (concentración) sin enfriamiento apreciable (línea 2 de la figura 2.31). Son útiles cuando la solubilidad no varía con la temperatura.
- Cristalizadores de vacío, en donde se combina la evaporación y el enfriamiento adiabático (línea 3 de la figura 2.31). Se utilizan cuando se quiere operar con rapidez, como en los cristalizadores-evaporadores, pero a baja temperatura.

2.4.3 Secado

(i) Definición

Secar un sólido es reducir su contenido en agua, o en general, de cualquier otro líquido. El secado es muchas veces la operación final de un proceso, dejándose el producto sólido listo para su envasado.

La fase previa a todo secado es la eliminación mecánica de agua mediante filtros-prensa o centrifugas, reduciéndose después por vía térmica la humedad que quede. Esta última fase es propiamente la operación de secado. Como en la mayoría de casos el líquido en cuestión es el agua, se centrará en ella la exposición que sigue.

El término *secado* es relativo, indicándose con él que hay una disminución del *agua libre* o *humedad libre* del sólido. Se define como agua libre la diferencia entre el contenido total de agua del sólido y el contenido de agua en el equilibrio, dadas una temperatura y humedad relativa ambiental.

Si un sólido tiene una cantidad de agua inferior al valor de equilibrio correspondiente a una humedad relativa del aire del 100%, dicha agua se denomina *agua ligada*, y posee una presión de vapor inferior a la presión del vapor de agua líquida a la temperatura correspondiente. Sin embargo, si tiene una cantidad de agua superior al valor de equilibrio citado, el exceso se denomina *agua no ligada*, y en tales condiciones la presión de vapor del agua en el sólido es igual a la presión del agua líquida a la temperatura correspondiente. Cuanto más higroscópica sea una sustancia, más cantidad de agua ligada tiene (Fig. 2.33).

Cuando se estudia la velocidad de secado de un sólido en condiciones constantes (temperatura, humedad ambiental y velocidad del aire) y se representa en función de la humedad libre del sólido (determinada por pesada), se puede apreciar un período de velocidad constante y un período de velocidad decreciente (fig. 2.34).

El período de velocidad constante corresponde a la situación en que el agua del sólido es capaz de formar una película continua sobre la superficie

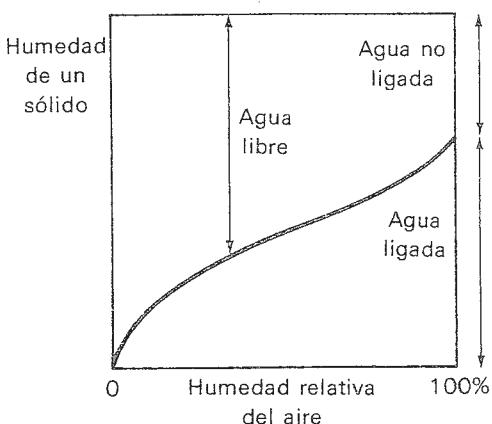
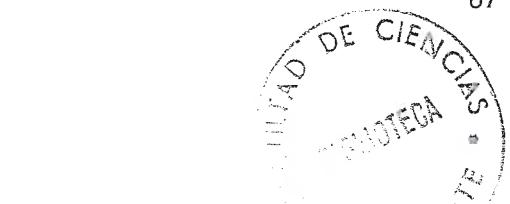


FIGURA 2.33. Curva de equilibrio de humedades, trazada para un sólido a una temperatura determinada. La zona por dibujo de la curva corresponde a la cantidad de agua que no puede ser eliminada por contacto con aire ambiente.

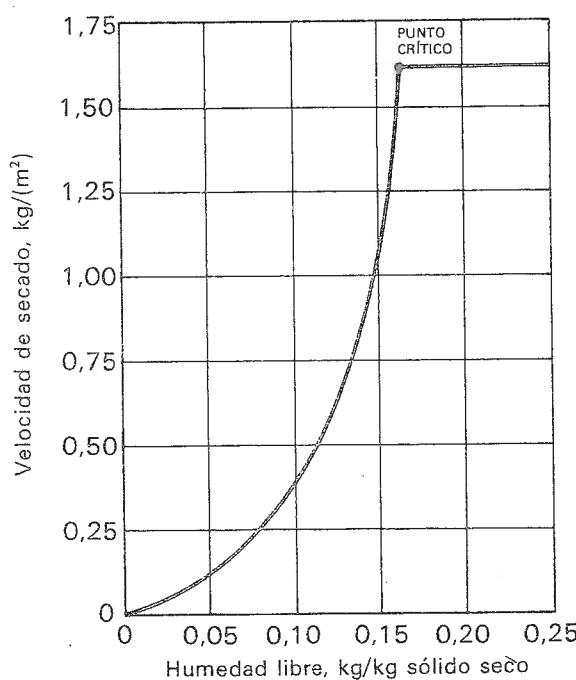


FIGURA 2.34. Ejemplo de curva de secado: secado de láminas de arcilla no porosa.

del sólido, de tal forma que se comporta como si el sólido no existiera. El mecanismo de secado en estas condiciones es análogo a la situación del termómetro húmedo.

El período de velocidad decreciente empieza en el momento en que el agua contenida por el sólido no es suficiente para formar una película continua (*punto crítico*). A partir de este momento la velocidad de secado es función de la humedad libre.

La forma de la curva de velocidad decreciente varía de unos materiales a otros según su porosidad e higroscopidad. No existe todavía un modelo teórico que explique con detalle la forma de la curva, suponiéndose que tienen mucha importancia los fenómenos de capilaridad y de difusión.

(ii) Modos de operación y aparatos

Hay muchos tipos de aparatos secaderos, denominados genéricamente *secaderos*. Casi todos ellos están basados en poner en contacto el sólido húmedo pulverulento con una corriente de aire caliente no saturado: se produce simultáneamente la transferencia de calor sensible y de agua debido a las dos fuerzas impulsoras (de calor y de materia) que aparecen. Este es el proceso por *contacto directo*. Existen también aparatos en los que el secado se produce sin contacto de la fuente de calor con el sólido. La operación, que es análoga a una evaporación, es de *contacto indirecto* (fig. 2.35).

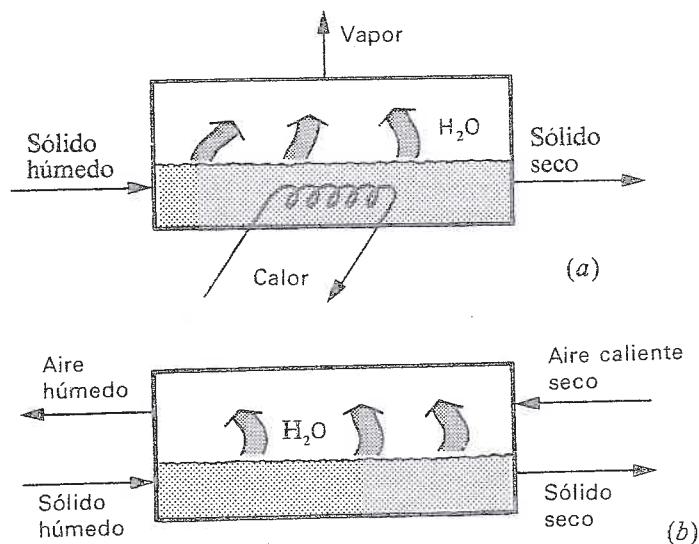


FIGURA 2.35. Dos tipos de contacto en los secaderos. (a) Contacto indirecto. (b) Contacto directo.

Los secaderos comerciales más comunes son:

- *Secaderos de bandejas* en los que el sólido se deposita en capas de poca profundidad, y el aire caliente circula por la superficie o a través del sólido.
- *Secaderos rotativos*. En ellos el sólido desciende a lo largo de un cilindro rotatorio inclinado, secándose por acción del aire caliente que circula en contracorriente (véase fig. 2.36).
- *Secaderos de evaporación súbita o atomizadores*. En este tipo de secadero la suspensión de sólido, en forma de gotas, se pone en contacto

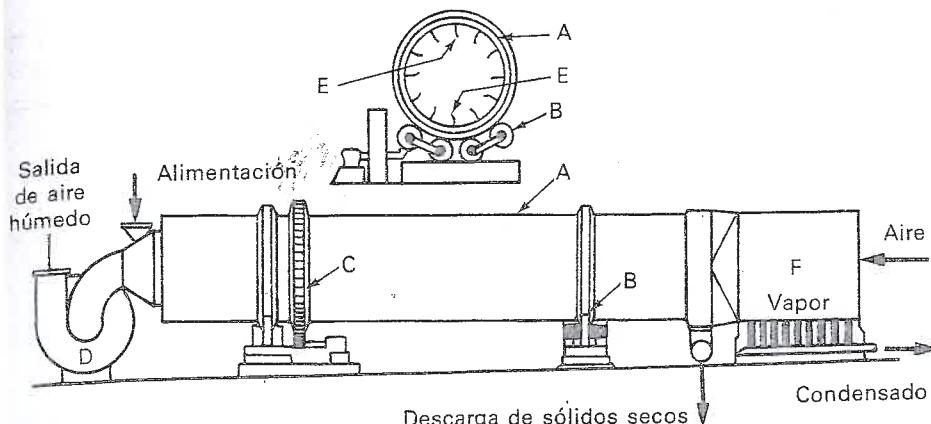


FIGURA 2.36. Secadero rotativo. A, carcasa rotatoria. B, rodillos. C, engranaje impulsor. D, soplante de aire. E, placas deflectoras. F, calentador de aire.

brusco con aire caliente a elevada temperatura, en un dispositivo de ciclón (véase § 2.5.3). El agua del sólido se vaporiza bruscamente obteniéndose un sólido de elevada porosidad.

2.4.4 Liofilización

La liofilización o criodeshidratación es una peculiar modalidad de secado que consiste en la eliminación del agua de un sólido por sublimación de la misma. Debe trabajarse, por tanto, por debajo del punto triple del agua, pasando el agua previamente congelada del sólido directamente a vapor.

Las ventajas que presenta este procedimiento de secado en la industria de la alimentación, preparación de fármacos y medicinas son:

- La congelación provoca la detención de los fenómenos bioquímicos.
- El vacío o la presencia de inertes y las bajas temperaturas evitan la alteración de las propiedades bioquímicas, fisiológicas o terapéuticas.
- Se conservan gran cantidad de aromas y se mantiene el volumen inicial del sólido, originando con ello una gran porosidad y fácil solubilidad de los productos finales.

Un ejemplo de producto liofilizado muy común es el café soluble. La liofilización se lleva a cabo normalmente a alto vacío y a temperaturas por debajo del punto de fusión del agua. El calor de sublimación es suministrado por conducción o radiación con placas planas calientes situadas entre las bandejas que contienen el material a liofilizar. El vapor de agua se hace condensar en forma de hielo sobre un serpentín refrigerador. Esta operación es normalmente discontinua (fig. 2.37).

El punto triple del agua tiene las siguientes condiciones: 273,16 K exactamente y 6,105 kPa. Es el punto fijo fundamental del Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

2.5 Operaciones unitarias físicas controladas por el transporte de cantidad de movimiento

Se presenta el transporte de cantidad de movimiento cuando se ponen en contacto dos fases, o dos zonas de un fluido, animadas de distinta velocidad. La interacción entre las moléculas —la viscosidad— tiende a hacer que las velocidades se igualen. Este fenómeno, descrito comúnmente como roza-

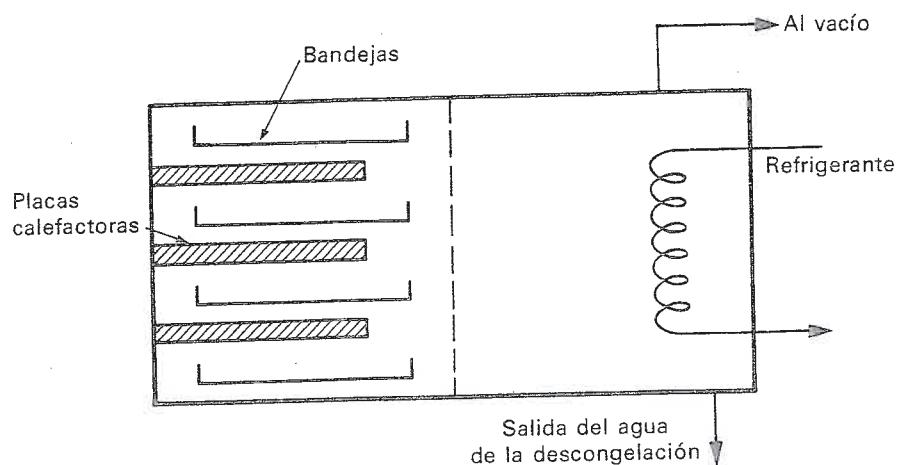


FIGURA 2.37. Esquema de un liofilizador discontinuo.

Transporte de cantidad de movimiento y transferencia de energía mecánica se dan simultáneamente, pero no son sinnónimos, ni conceptualmente ni en dimensiones.

miento, es aprovechado en muchas operaciones de separación, entre sólidos y fluidos, generalmente. El rozamiento va acompañado necesariamente de una degradación de energía mecánica que se manifiesta en forma de calor. Ello hace que para conseguir la circulación de un fluido por el interior de una conducción sea necesario suministrar más energía cuanto mayor sea el rozamiento, por lo que éste es determinante en el diseño de conducciones (cap. 8).

Las operaciones cuyo diseño debe hacerse basándose en el criterio del rozamiento entre dos zonas o dos fases se suelen subdividir en tres grupos:

- Operaciones en las que el fluido circula contenido por un sólido: circulación «interna» de fluidos por conducciones.
- Operaciones en las que el fluido circula a través de un lecho de sólido, llamadas comúnmente de circulación «externa» de fluidos: por ejemplo la filtración.
- Operaciones en las que las partículas de un sólido se mueven en el seno de un fluido: por ejemplo, sedimentación.

Las diferencias entre ellas son sólo de matiz desde el punto de vista conceptual.

Su importancia económica es muy grande, y no sólo en la industria química. En efecto, en todo tipo de actividad industrial se deben transportar líquidos o gases, y la necesidad de separar partículas sólidas del seno de un fluido es también muy común.

2.5.1 Circulación interna de fluidos

(i) Conducciones

En todo proceso en que se manejen fluidos es necesario transportarlos hasta y desde las distintas operaciones del mismo, y este transporte se realiza normalmente mediante conducciones. Éstas pueden ser abiertas, o *canales*, para transportar relativamente grandes caudales de agua entre puntos sensiblemente al mismo nivel; pero lo común es disponer conducciones cerradas. Su sección es normalmente circular, denominándose entonces *tuberías*, si bien en algunos casos se construyen por motivos de realización

práctica de sección cuadrada, etc.; por ejemplo, para el transporte de grandes caudales de gases a baja presión, como en la evacuación de humos de centrales térmicas.

Las tuberías tienen dimensiones normalizadas, y se construyen en diversos materiales, como hierro, acero, cobre, hormigón o plásticos. La elección de un material se hace en base a distintos factores: corrosión, conductividad térmica, resistencia mecánica, precio, etc.

(ii) Dispositivos que suministran energía mecánica al fluido

Debido al rozamiento entre el fluido y las paredes que lo contienen, debe suministrarse energía mecánica al fluido, en forma de trabajo. Ello se consigue mediante dispositivos llamados *bombas*, si impulsan líquidos, y *compresores, soplantes, ventiladores* y *eyectores*, para impulsar gases.

Hay muchos tipos de bombas, cuyo empleo es función del líquido a impulsar, y de las condiciones del proceso. Son características importantes de una bomba su *capacidad* o caudal que es capaz de impulsar, y su *carga*, o altura a que puede impulsar el líquido. Pueden distinguirse dos grandes grupos de bombas, las bombas *centrífugas* y las bombas *volumétricas*.

Las bombas *centrífugas* están basadas en suministrar al líquido energía cinética de rotación mediante unas paletas giratorias. Esta energía es capaz de impulsar el fluido a elevadas capacidades de circulación, pero con una carga limitada. Este tipo de bomba es muy empleado en la industria química y se construye en una amplia gama de caudales y materiales de fabricación.

Las bombas *volumétricas* se basan en impulsar el líquido por acción de unas palas que empujan porciones del fluido, a relativamente baja capacidad, pero pueden llegar a cargas muy elevadas. Entre otros tipos, cabe citar las siguientes:

- Bombas *alternativas o de pistón*. Suministran un caudal pulsante de líquido. Permiten llegar a muy altas presiones.
- Bombas *rotatorias de engranajes, de aletas o excéntricas*. Impulsan relativamente pequeños caudales de líquido a flujo constante.
- Bombas *peristálticas*. Se emplean a escala de laboratorio y se basan en la acción de succión producida por un tubo flexible al que se somete a compresión a lo largo de su longitud. Suministran caudales pequeños pulsantes, pero muy estables.

Las bombas *de tornillo de Arquímedes* se usan para elevar a pequeñas alturas caudales de líquidos conteniendo sólidos grandes en suspensión, pues resisten bien la abrasión y no pueden obturarse. Se emplean en especial en el bombeo de aguas residuales (cap. 1). La misma idea se aplica para el bombeo de pastas.

Los *compresores* son dispositivos que se emplean para aumentar la presión de un gas, mientras que las *soplantes* y *ventiladores* se usan para hacerlo circular sin aumentar sensiblemente su presión. Estos dos últimos aparatos vienen a ser compresores de baja *relación de compresión* (razón entre la presión de salida y la presión de entrada).

La consecución de muy altas presiones se suele hacer mediante el empleo de compresores de varias *etapas* o efectos, con refrigeración del gas intercalada entre cada dos etapas. Esta refrigeración puede llevarse a cabo con intercambiadores de calor con agua fría, con aerorrefrigerantes o con ciclos frigoríficos (véase fig. 2.39). Los dispositivos indicados son de tipos similares a los

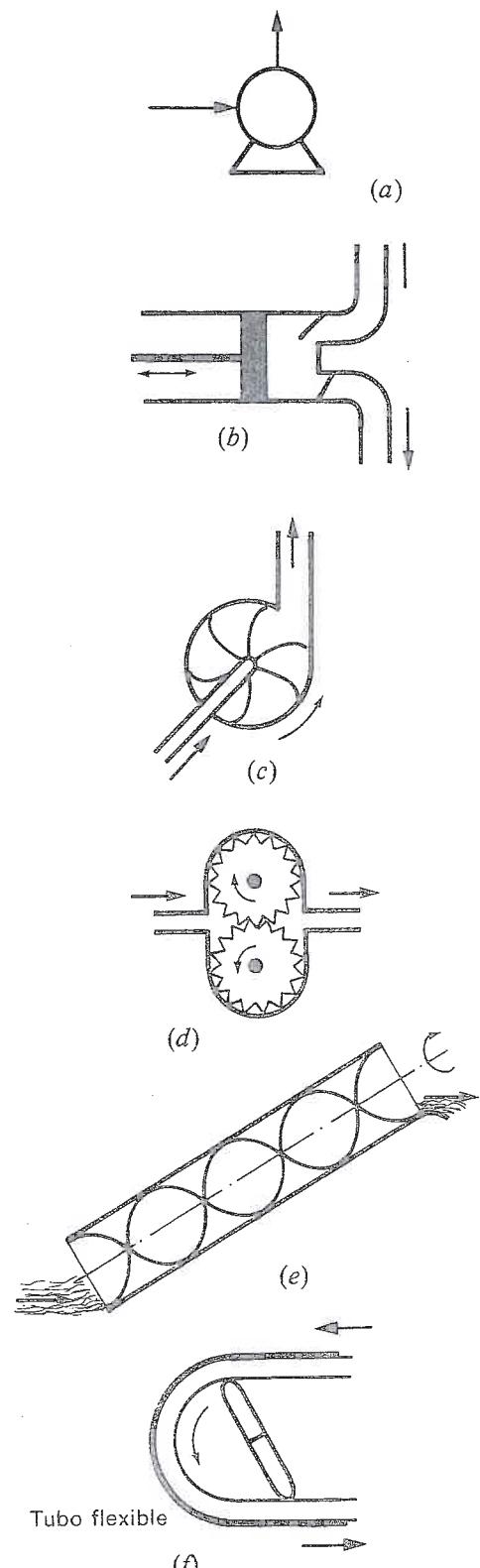


FIGURA 2.38. (a) Representación esquemática de una bomba. (b) Bomba de desplazamiento positivo. (c) Bomba centrífuga. (d) Bomba de engranajes. (e) Tornillo de Arquímedes. (f) Bomba peristáltica de laboratorio.

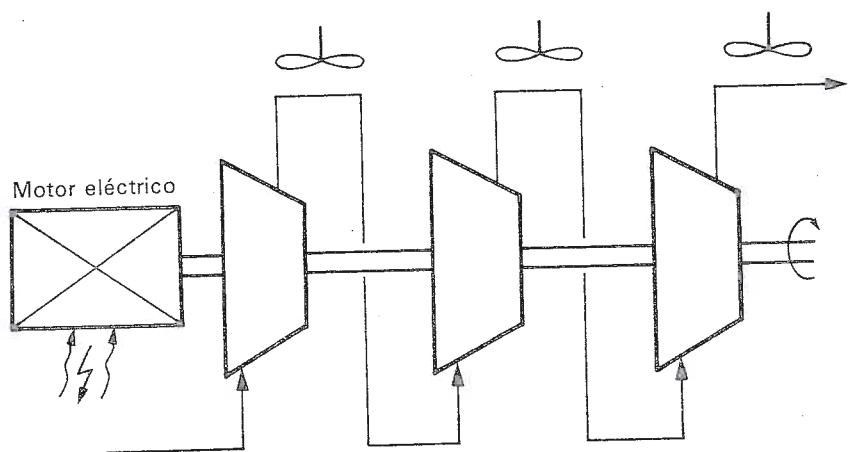


FIGURA 2.39. Representación de un compresor de tres etapas con aerorrefrigerantes, e impulsión por motor eléctrico.

descritos para impulsión de líquidos. Los compresores centrífugos son los más usados actualmente, sustituyendo a los compresores de pistón.

Un *eyector* es un dispositivo que aumenta la presión de un gas al ser mezclado con una pequeña cantidad de otro —comúnmente vapor de agua— a presión elevada. El transporte de cantidad de movimiento de un fluido a otro hace que la mezcla alcance una presión superior a la del primer gas, y ello sin ingenio mecánico alguno. Su rendimiento es bajo, pero los costes de operación y de mantenimiento son escasos. Son empleados especialmente para conseguir el vacío en una instalación, por aspiración del gas que contiene (véase fig. 2.40).

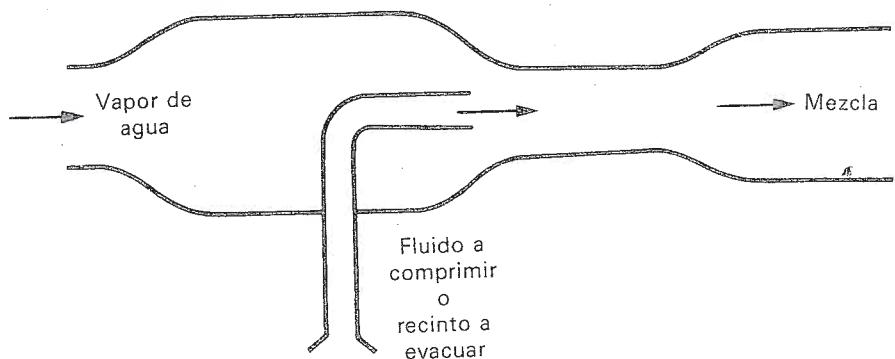


FIGURA 2.40. Esquema de un eyector.

Al pasar por un compresor o bomba un fluido gana presión. Al pasar por un turbina un fluido pierde presión.

Ejemplos domésticos de los aparatos descritos hasta ahora se tienen en los aspiradores, secadores de cabello, ventiladores, extractores de aire, bombas de agua de lavadoras y lavavajillas, etc.

Por último, se citarán aquí las *turbinas* por su relación con las máquinas descritas anteriormente. Una turbina es una máquina que extrae la energía mecánica contenida en un fluido para cederla en forma de trabajo de rotación en su eje.

Se emplean para la fabricación de energía eléctrica en centrales hidroeléctricas (turbinas de agua) o centrales térmicas convencionales o nucleares.

res (turbinas de vapor de agua). Son también usadas como sistemas impulsores de bombas y compresores, sustituyendo a los motores eléctricos, en las industrias químicas o petroquímicas. Su fluido de impulsión es vapor de agua a presión, que no presenta problemas de incendios por chispas, posibles si se emplea corriente eléctrica (véase fig. 2.41).

(iii) Válvulas

Para conseguir que por una conducción circule un caudal determinado de fluido debe regularse éste mediante *válvulas*. Estas son dispositivos que introducen un rozamiento adicional en el sistema, lo que restringe el caudal que circula. Hay muchos tipos de válvulas, de los que en la figura 2.42 están representados los principales. Se describen a continuación brevemente.

- *Válvulas de compuerta*. Sirven para interrumpir el paso del fluido.
- *Válvulas de asiento*. Sirven para regular el caudal de circulación.
- *Válvulas de retención*. Sirven para impedir que el fluido circule en sentido contrario al deseado.
- *Válvulas de bola*. Se emplean para regular el caudal en aplicaciones especiales (por ejemplo, a alta presión), o cuando interesa que la válvula en posición abierta no presente resistencia al paso del líquido.
- *Válvulas de mariposa*. Se usan para regulaciones rápidas de caudal, aunque con relativamente poca precisión.

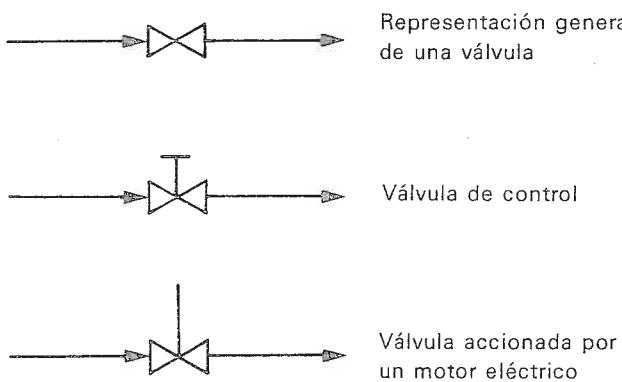


FIGURA 2.43. Representación esquemática de algunas válvulas.

(iv) Medidores de caudal

Para controlar los procesos industriales es necesario conocer la cantidad de materia que entra y sale de los distintos aparatos y operaciones. Para ello existen diversos procedimientos de *medición de caudales*.

- *Métodos directos*. Se basan en pesar o medir el volumen de la cantidad de fluido que ha pasado por la instalación en un cierto tiempo. Son de este tipo los contadores de paletas de gases o de agua.
- *Medidores indirectos*. Los más utilizados se basan en la pérdida de presión que experimenta un fluido al atravesar un obstáculo en la conducción. Los dispositivos deben calibrarse previamente con un medidor directo. Hay básicamente dos tipos de medidores indirectos: de sección

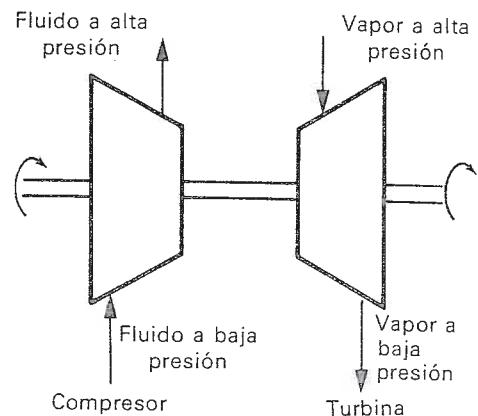


FIGURA 2.41. Representación esquemática de un compresor y una turbina de vapor que suministra la energía para la compresión.

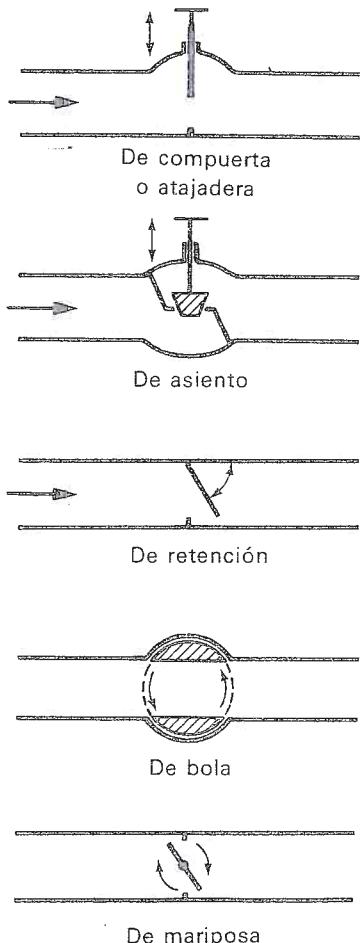


FIGURA 2.42. Principio de funcionamiento de los tipos básicos de válvulas.

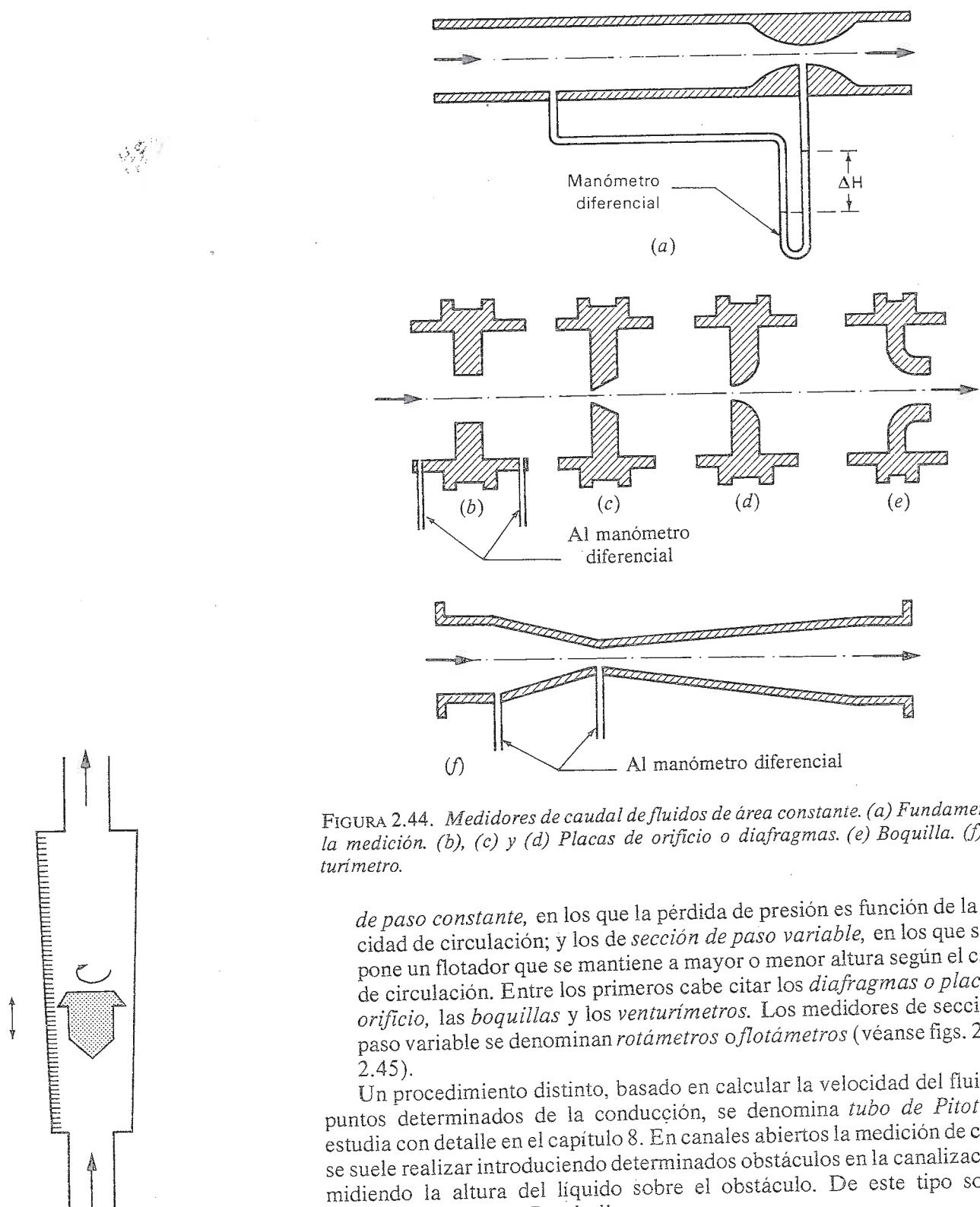


FIGURA 2.44. Medidores de caudal de fluidos de área constante. (a) Fundamento de la medición. (b), (c) y (d) Placas de orificio o diafragmas. (e) Boquilla. (f) Venturímetro.

de paso constante, en los que la pérdida de presión es función de la velocidad de circulación; y los de sección de paso variable, en los que se dispone un flotador que se mantiene a mayor o menor altura según el caudal de circulación. Entre los primeros cabe citar los diafragmas o placas de orificio, las boquillas y los venturímetros. Los medidores de sección de paso variable se denominan rotámetros o flotámetros (véanse figs. 2.44 y 2.45).

Un procedimiento distinto, basado en calcular la velocidad del fluido en puntos determinados de la conducción, se denomina *tubo de Pitot* y se estudia con detalle en el capítulo 8. En canales abiertos la medición de caudal se suele realizar introduciendo determinados obstáculos en la canalización, y midiendo la altura del líquido sobre el obstáculo. De este tipo son los llamados *medidores Parshall*.

FIGURA 2.45. Rotámetro. El flotador tiene determinadas estrías que le obligan a girar sobre su eje y así conseguir mayor estabilidad.

2.5.2. Circulación de fluidos a través de un lecho de sólidos

(i) Fluidización y transporte neumático

Al circular una corriente de fluido a través de un lecho de partículas la corriente pierde presión. Cuando el sentido de circulación es vertical

ascendente y la velocidad del fluido es baja las partículas se mantienen quietas constituyendo un *lecho fijo*. Esta disposición se emplea para homogeneizar mezclas de gases, o también en los reactores catalíticos en los que el alimento gasesoso atraviesa una masa de partículas de catalizador, reaccionando al circular a su través.

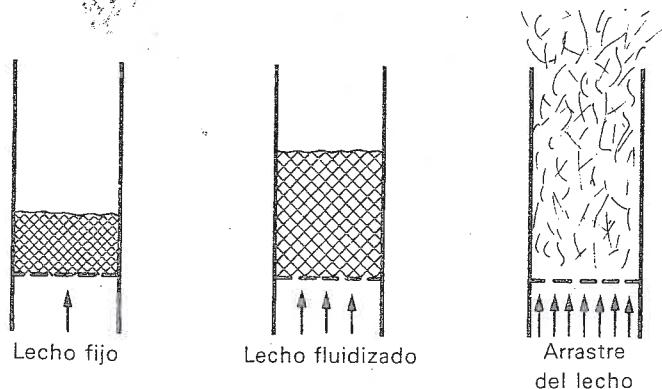


FIGURA 2.46. Evolución del lecho de partículas al aumentar el caudal de gas.

Si el caudal de fluido aumenta, el creciente rozamiento entre las partículas y el gas hace que a partir de un determinado caudal las partículas del lecho se mantengan suspendidas en el aire no descansando unas sobre otras. El lecho ocupa entonces mayor volumen. En estas condiciones se dice que el lecho está *fluidizado*, puesto que las partículas sólidas se comportan entre sí como las de un gas, moviéndose aleatoriamente. Este modo de operación se denomina *fluidización*, y tiene como característica principal que la temperatura de todos los puntos del lecho es constante, con lo que la transmisión de calor y el control de la temperatura son muy buenos. La fluidización se aplica habitualmente en los reactores químicos con catalizadores sólidos finamente divididos (§ 2.7). Se emplea también en la combustión de carbón

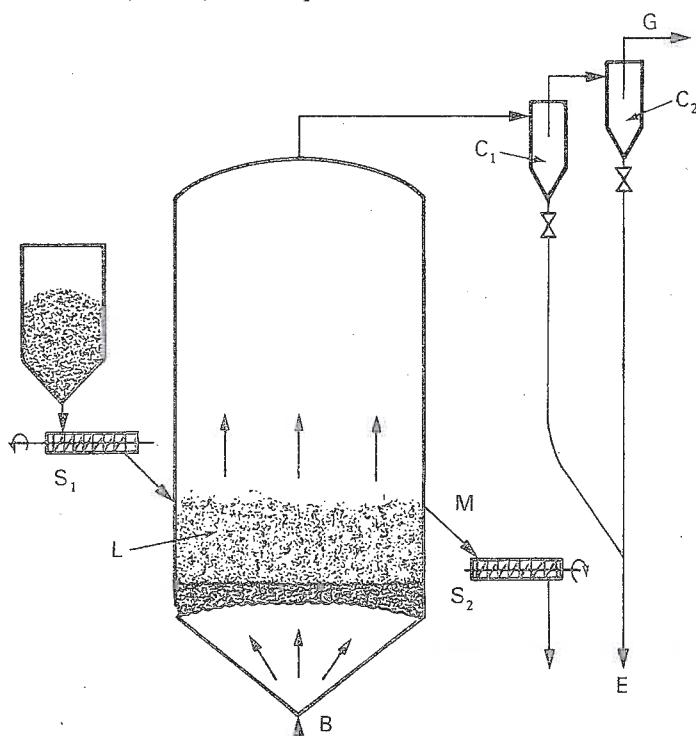


FIGURA 2.47. Instalación de fluidización. Ver descripción en el texto.

en centrales térmicas, en la tostación de minerales, el secado de sólidos y otras aplicaciones.

En la figura 2.47 se representa una instalación típica de fluidización. En ella el lecho de catalizador L se mantiene fluidizado por acción de la corriente de gas B. Las partículas de catalizador que se van ensuciando se eliminan por M a través del tornillo S₂, añadiéndose una cantidad equivalente de catalizador limpio por S₁. El gas que abandona el lecho puede arrastrar pequeñas partículas de catalizador por lo que se colocan dos *cicloones* (ver apartado 2.5.3) que separan las partículas sólidas por E, saliendo el gas por la parte superior G.

Si se aumenta el caudal de gas que mantiene el lecho fluidizado, el rozamiento puede lograr que el gas arrastre las partículas de sólido. Esta es la base de la operación denominada *transporte neumático*, en la que por arrastre con aire se hace circular un sólido granulado o pulverulento. Industrialmente se aplica al transporte de materiales muy variados. Un ejemplo doméstico se tiene en los aspiradores (véase figura 2.48).

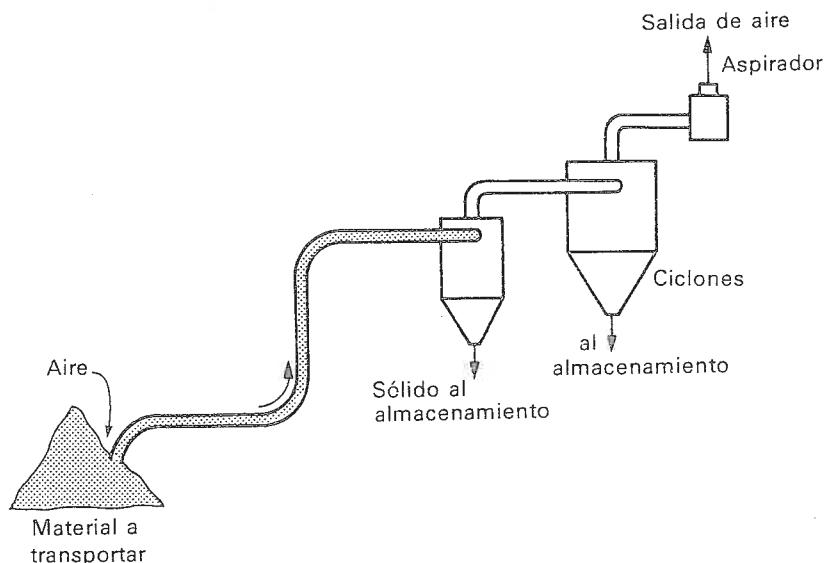


FIGURA 2.48. Instalación completa de transporte neumático.

(ii) Filtración

La filtración es una operación de separación sólido-fluido basada en la retención de las partículas de un tamaño superior a un valor dado por una malla filtrante. Se utiliza tanto para aprovechar el sólido presente en la suspensión a filtrar como para disminuir la turbidez de un líquido o eliminar las partículas suspendidas en un gas. El tamaño de las partículas retenidas por un filtro es muchas veces muy inferior al del paso de la malla filtrante, pues las propias partículas retenidas en bloque por la malla actúan como elemento filtrante.

Para la filtración de un sólido suspendido en un líquido se emplea alguno de los siguientes tipos de filtros:

- *Filtros-prensa o filtros de placas*. Están compuestos por un conjunto de placas y marcos que sostienen unas bolsas de tela filtrante. La mezcla entra en cada marco por la parte central de la bolsa, saliendo a través de sus paredes el líquido, y quedando el sólido retenido sobre la malla del tejido. Cuando la pérdida de presión a través del filtro aumente mucho debe vaciarse el filtro.

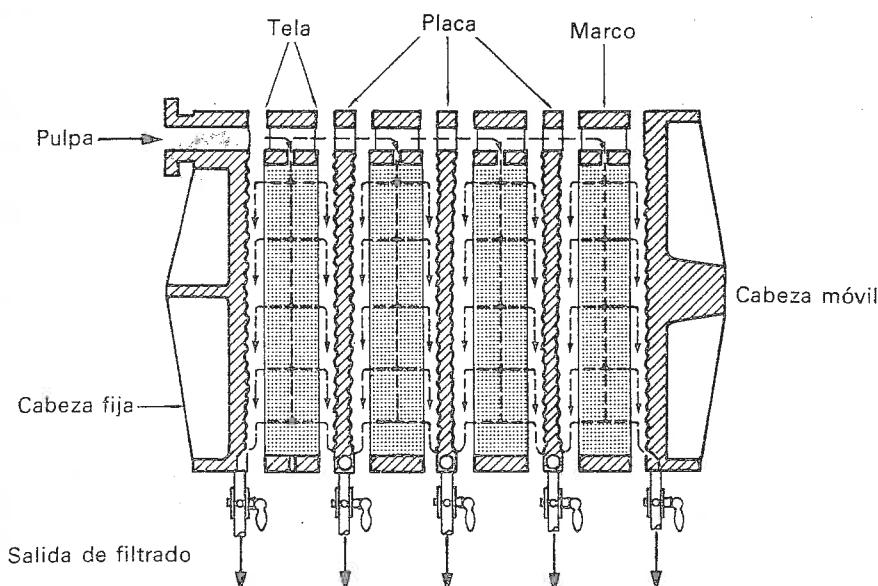


FIGURA 2.49. Sección de un filtro-prensa.

Para ello, se desmontan, se vacían y se lavan los marcos y las bolsas. La operación es, pues, semicontinua (véase fig. 2.49).

- **Filtros rotatorios.** La placa filtrante tiene forma cilíndrica y constituye la parte exterior de un armazón rotativo. Por el eje del cilindro se va succionando a través de la placa el líquido contenido en el recipiente donde está parcialmente sumergido el cilindro. El sólido —la *torta*— se queda en la superficie de la placa filtrante, en donde puede lavarse con una ducha y se elimina mediante un raspador. Estos filtros trabajan en continuo y se emplean básicamente cuando se desea aprovechar el sólido (véase fig. 2.50).
- **Filtros centrífugos.** Son filtros en los que el proceso de filtración se acelera por centrifugación, al ejercerse una mayor presión sobre la tela filtrante.

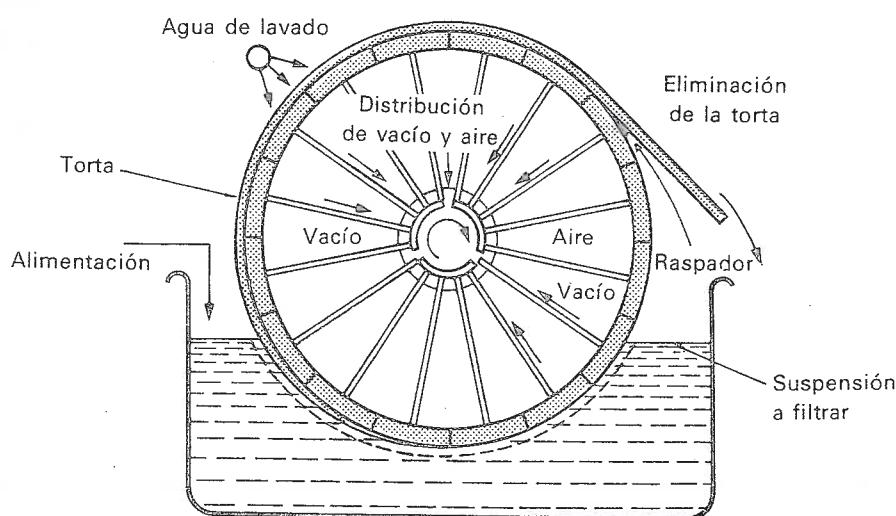


FIGURA 2.50. Sección de un filtro rotatorio.

La separación por filtración de un sólido contenido en un gas se lleva a cabo en alguno de los dispositivos siguientes:

- *Filtros de mangas.* Consisten en un haz de mangas textiles —cilindros abiertos por un extremo— mantenido en posición vertical mediante un armazón adecuado. El gas a filtrar se hace circular hacia el interior de las mangas quedando el sólido retenido en las caras exteriores, de las que se desprende por vibración. Puede darse también la filtración del exterior al interior, en otros modelos.
- *Electrofiltros.* El empleo de estos dispositivos no constituye propiamente una operación de transporte de cantidad de movimiento y se cita aquí sólo por el objetivo perseguido de eliminación de partículas. Las partículas sólidas suspendidas en un gas están cargadas eléctricamente. Se coloca entonces en el curso del gas un recinto con multitud de electrodos —placas de condensador— a un potencial de algunos miles de voltios. Las partículas van hacia el electrodo de signo contrario al de su carga. Se desprenden del electrodo por vibración, con un sistema mecánico adecuado.

Este es uno de los escasos ejemplos de aplicación en Ingeniería Química de un campo electrostático. Otro ejemplo se tiene en la separación de películas plásticas de los residuos sólidos urbanos.

Algunas boquillas de cigarrillos están provistas de diminutos filtros de impacto.

La presión osmótica de un agua de mar con 35 g/l de sales es de unos 2430 kPa (unas 24 atm).

La separación de polvo o nieblas de un gas puede realizarse asimismo en los llamados *filtros de impacto*. Se basan en colocar en el curso de la circulación del gas un obstáculo —una tupida malla inerte— contra el que choca el gas. Las partículas sólidas se depositan en la superficie de la malla, y las gotitas de la niebla coalescen sobre la misma. En este último caso el dispositivo recibe el nombre de *separador de gotas*, pues se van desprendiendo de la malla gotas mucho mayores que las constituyentes de la niebla, y por su tamaño ya no son arrastradas por el gas, por lo que es sencilla su separación. En un sentido estricto, estos dispositivos no constituyen propiamente filtros.

- *Ósmosis inversa.* La operación unitaria de *ósmosis inversa* es en cierto modo una filtración a nivel atómico-molecular. La aplicación de una presión —superior a la presión osmótica— a una solución consigue que el disolvente atraviese una membrana semipermeable, obteniéndose a un lado de la membrana disolvente puro, y en el otro lado se concentra la disolución, ya que las otras moléculas, comportándose como auténticas partículas «sólidas» ante una placa filtrante, no pueden atravesar la membrana (véase figura 2.51). Existen distintos modelos de aparatos de ósmosis inversa, siendo actualmente los más difundidos los de difusión radial, como el que se muestra en sección en la figura 2.52.

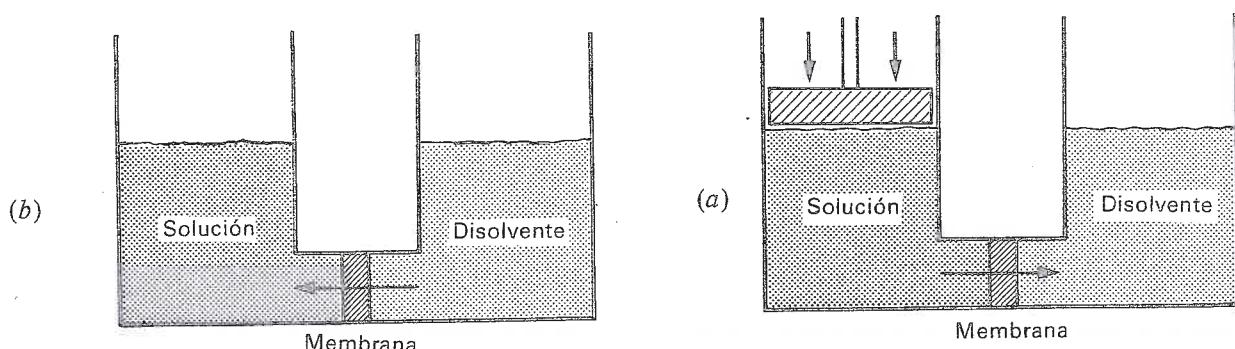


FIGURA 2.51. (a) Ósmosis. Proceso espontáneo. (b) Ósmosis inversa. La aplicación de presión a la solución obliga al disolvente a atravesar la membrana semipermeable en sentido contrario al del proceso espontáneo.

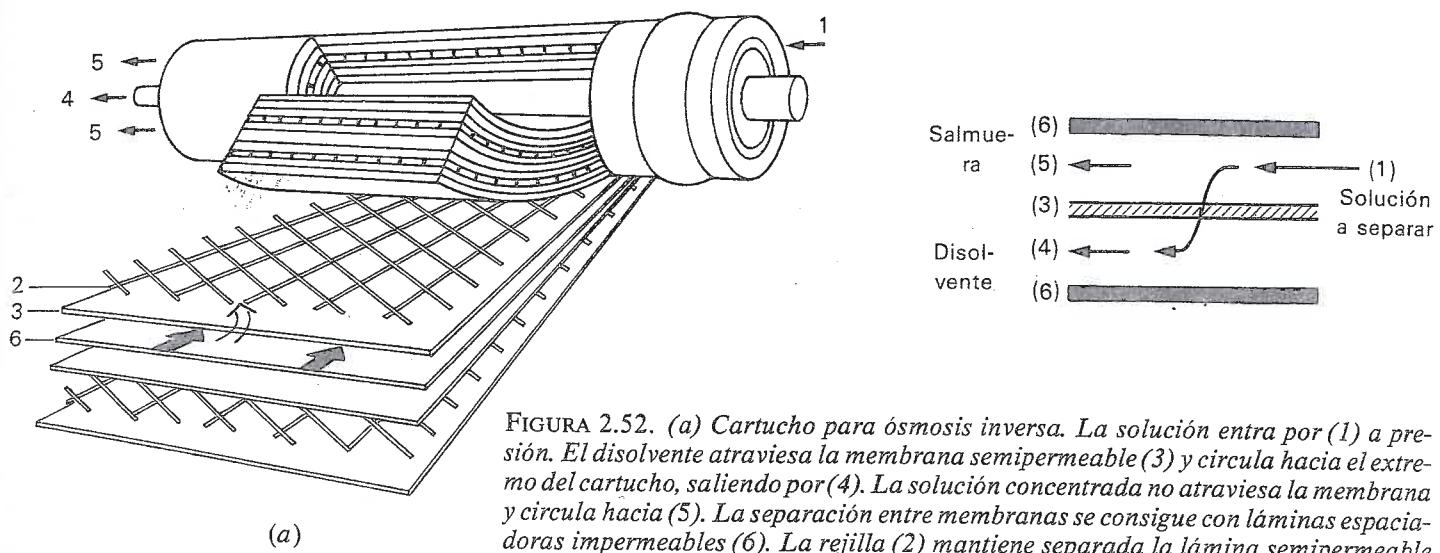


FIGURA 2.52. (a) Cartucho para ósmosis inversa. La solución entra por (1) a presión. El disolvente atraviesa la membrana semipermeable (3) y circula hacia el extremo del cartucho, saliendo por (4). La solución concentrada no atraviesa la membrana y circula hacia (5). La separación entre membranas se consigue con láminas espaciadoras impermeables (6). La rejilla (2) mantiene separada la lámina semipermeable (3) de la espaciadora (6).

2.5.3 Movimiento de sólidos en el seno de fluidos

El conjunto de operaciones que a continuación se describirá tiene como objetivo común, junto con la filtración descrita en el apartado anterior, la separación de un sólido del seno de un fluido, y tiene una gran importancia industrial pues es una necesidad muy común en todos los campos de actividad.

(i) Sedimentación

La *sedimentación* es una operación de separación sólido-líquido en la que las partículas sólidas se separan debido a la diferencia de densidad entre las dos fases presentes (véase apartado 5.2.1).

En la figura 2.53 se presenta el esquema de un sedimentador, y en la figura 2.54 un *espesador, decantador o sedimentador tipo Dorr* para la separación de fango del seno del agua. El dispositivo de la parte inferior es un conjunto de rascadores que conduce el fango o lodo sedimentado hacia el centro del sedimentador, donde se evacúa.

Se usan con el objetivo de concentrar las partículas sólidas —espesadores de fangos para el tratamiento de aguas residuales— o bien para obtener agua sin partículas sólidas —decantadores de las plantas potabilizadoras de agua—.

Basados en la separación por diferencia de densidades entre líquidos existen también los *separadores de grasas y aceites* empleados en la depuración de aguas residuales (fig. 2.53).

Se aprovecha el mismo efecto en la separación de las fases líquidas, extracto y refinado, en la operación de extracción líquido-líquido (fig. 2.1).

(ii) Clasificación hidráulica

La *clasificación hidráulica* es una operación de separación de una mezcla de sólidos en distintas fracciones, basada en la diferente forma, tamaño y densidad de las partículas que constituyen la mezcla. Su velocidad de

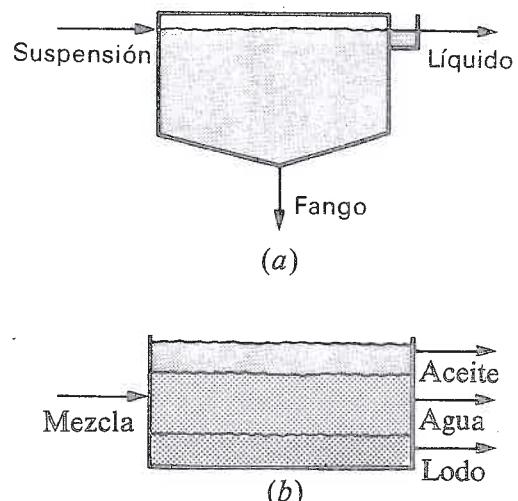


FIGURA 2.53. Esquema de un sedimentador (a) y de un separador de grasas y aceites (b).

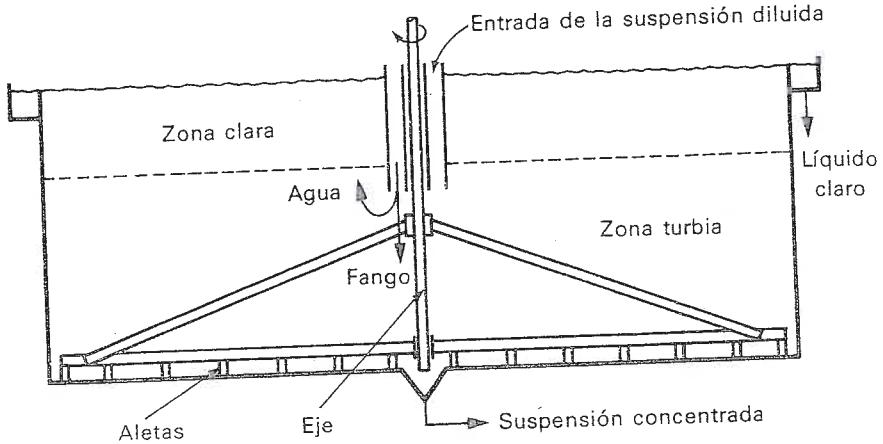


FIGURA 2.54. Espesador o sedimentador DORR.

sedimentación es función de las tres variables indicadas. Aunque, como su nombre indica, esta operación de separación se efectúa en medio acuoso, se puede realizar también en corriente de aire, denominándose entonces *separación neumática*.

En la figura 2.55 se muestra el esquema de un clasificador hidráulico en el que en cada tanque sedimenta un tipo de partícula. Ello se consigue variando los caudales de agua que se hacen circular en contracorriente.

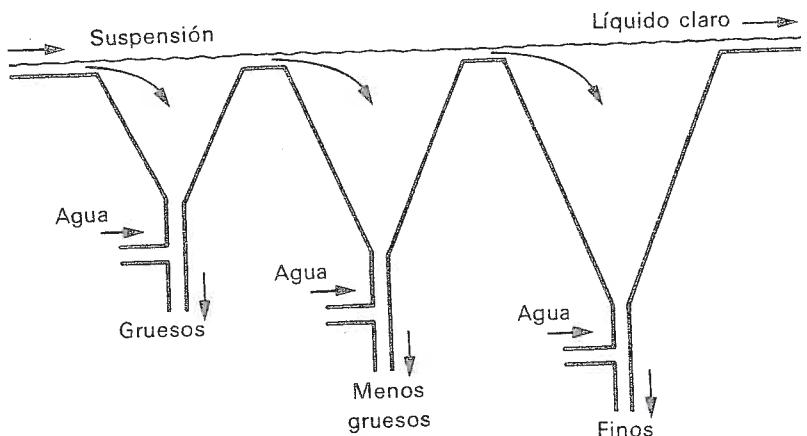


FIGURA 2.55. Separación hidráulica.

(iii) Flotación

La *flotación* es una operación unitaria de separación basada en la diferencia de densidades entre un líquido y una partícula sólida recubierta de burbujas de aire.

Una superficie sólida puede ser más o menos mojada por un líquido según cuál sea la naturaleza de ambos. En la conjunción de las fases sólida, líquida y gaseosa se forma un menisco, y la medida del *ángulo de contacto* —considerado en la fase líquida— da una idea del grado de mojado de la superficie. Si el ángulo de contacto es menor de 90° se dice que el líquido moja al sólido: una gota de líquido se extenderá bien sobre la superficie y, por contra, una burbuja de gas tiene tendencia a desprenderse. Si el ángulo de contacto es mayor de 90° el líquido no moja al sólido, y es el gas el que se extiende en amplias burbujas por el sólido (véase fig. 2.56).

Una elevada proporción de minerales metalúrgicos son tratados por flotación.

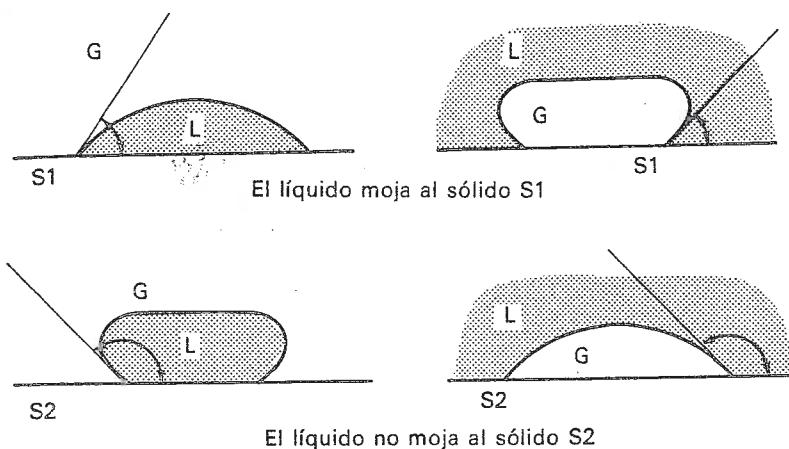


FIGURA 2.56. Diferente mojabilidad de dos sólidos. Forma de las gotas de líquido y de las burbujas de gas sobre dos superficies distintas.

Para un determinado tamaño de partículas puede conseguirse que, con los aditivos adecuados y en presencia de burbujas de aire, las partículas de sólido se recubran de burbujas de aire, siendo la densidad aparente del conjunto menor que la densidad del líquido. El conjunto, pues, flota y queda como espuma en la superficie del líquido, de donde se puede retirar. Normalmente las menas de minerales, en presencia de determinados agentes de flotación, son aerófilas, es decir, se deja mojar mejor por el aire que por el agua, y en cambio la ganga es hidrófila. Al crear espuma (mediante la adición, a veces, de algún producto tensioactivo) en el seno de la suspensión o *pulpa* la mena es arrastrada por la espuma y se retira por la parte superior, constituyendo el mineral concentrado. La ganga se retira por la parte inferior de la *celda de flotación* (véase fig. 2.57).

En determinados casos se emplea también este procedimiento para la separación de partículas sólidas de su suspensión en agua (§ 1.4.2).

(iv) Centrifugación

La *centrifugación* consiste en la separación de dos fases de densidad bastante parecida creando un campo de fuerza centrífuga mediante un sistema mecánico de rotación. La fuerza centrífuga creada es varias veces superior a la de la gravedad, y el proceso es, en consecuencia, mucho más rápido que si se efectuase una separación por gravedad [§ 2.5.3 (i)].

Basados en la centrifugación, existen distintos aparatos para efectuar separaciones específicas. Se describen a continuación algunos de los principales:

- *Centrífugas*. Las centrífugas para separación de sólidos de un líquido son realmente filtros centrífugos. Consisten en una cesta filtrante cilíndrica sometida a un rápido giro, sobre cuyas paredes interiores se lanza la suspensión. El líquido atraviesa la pared, retirándose el sólido de la pared en forma manual o automática. La separación de dos líquidos de distinta densidad e inmiscibles puede llevarse a cabo asimismo en otras centrífugas de diseño apropiado.
- *Ciclones*. Los ciclones son dispositivos estáticos en los que una mezcla de partículas suspendidas en un gas es sometida, por acción de su propia energía cinética, a una fuerza centrífuga (véase fig. 2.58).

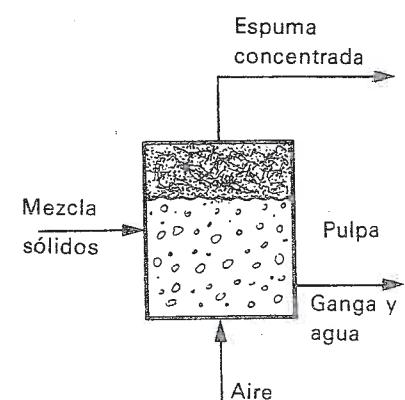


FIGURA 2.57. Esquema de una celda de flotación.

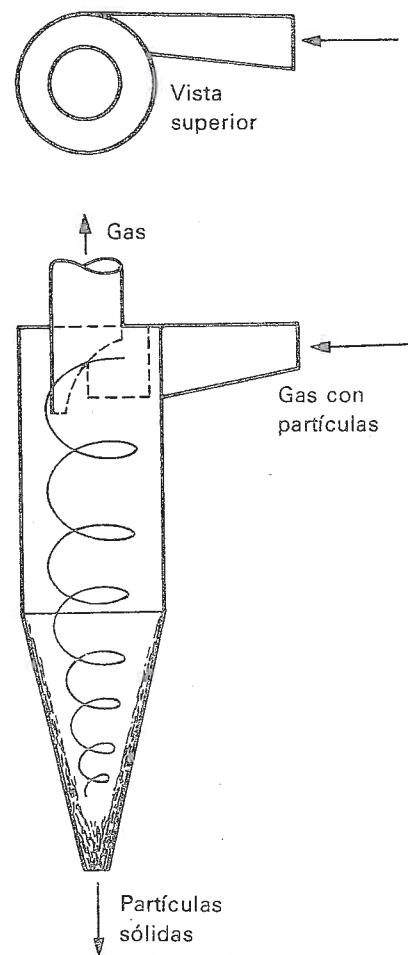


FIGURA 2.58. Dos vistas de un ciclón.

Un ciclón es económico por no tener en su diseño elementos mecánicos móviles.

Las partículas, al tener mayor densidad que el gas en el que están suspendidas, salen despedidas hacia la pared, donde por rozamiento quedan frenadas, y caen al fondo del ciclón. El gas asciende en espiral por la parte central del ciclón y sale por la parte superior. Son dispositivos económicos, altamente eficaces para la separación de polvo y partículas de los gases de combustión, de reactores de lecho fluidizado, de regeneración de catalizadores, etc. (véanse figs. 2.47, 2.48 y 2.66). Suelen colocarse varios en serie, de tamaños distintos, para una retención mejor de partículas de distintos tamaños.

El ciclón es un aparato ampliamente usado en la industria, especialmente en las secciones de depuración de humos. Basados en el mismo principio que el ciclón, se han descrito los *atomizadores* (§ 2.4.3), y existe en el mercado un dispositivo para separar líquidos inmiscibles —agua de mar y petróleo— fundado en el mismo diseño del ciclón.

Los *hidrociclos* son ciclones destinados a la separación de un sólido de una suspensión en un líquido.

(v) Agitación y mezcla de líquidos

El buen funcionamiento y adecuado rendimiento de un proceso depende en muchos casos del grado de mezcla de los materiales. Muchas reacciones químicas, que desde el punto de vista estrictamente químico-físico son instantáneas —por ejemplo, una neutralización— están limitadas en su velocidad por la posibilidad de encuentro de las especies reaccionantes (§ 3.2.2).

La agitación se realiza fundamentalmente en tanques, agitándose los líquidos mediante paletas accionadas por motor. La forma de las paletas es muy variable, dependiendo sobre todo del *comportamiento reológico* (§ 8.2.3) del material a dispersar (su viscosidad, elasticidad, variación de ambas con la temperatura, etc.). En la figura 2.59 se presentan algunas formas de agitadores.

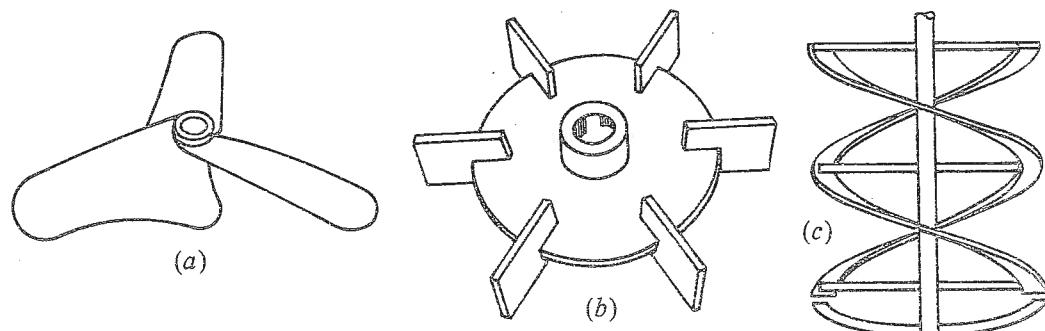


FIGURA 2.59. Diversos modelos de agitadores: (a) de hélice, (b) de turbina y flujo radial, (c) helicoidal.

En la tabla 2.2 se muestra un resumen de las operaciones unitarias de separación basadas en el transporte de cantidad de movimiento.

2.6 Operaciones unitarias físicas complementarias

Se describen en este apartado algunas operaciones auxiliares cuyo obje-

Tabla 2.2. Operaciones unitarias de separación basadas en el transporte de cantidad de movimiento

Operación unitaria	Medio de separación	Principio de separación	Fases a separar
Sedimentación	Acción gravitatoria	Diferencia de densidad	S-L o L-L
Clasificación hidráulica	Acción gravitatoria y flujo de líquido	Diferencia de densidad y de tamaño	S ₁ -S ₂
Flotación	Acción gravitatoria y flujo de aire	Diferencia de densidades y mojabilidad	S ₁ -S ₂ o S-L
Filtración	Placa filtrante	Diferencia de presiones	S-L o S-G
Centrifugación	Fuerza centrífuga	Diferencia de densidad	S-L o L-L
Ósmosis inversa	Difusión en membrana semipermeable	Diferencia de presiones	L-soluto

tivo es el acondicionamiento de las materias primas y productos sólidos, para que tengan el tamaño y presentación adecuados para posteriores tratamientos. Las principales son *trituración* y *molienda*, *tamizado* y *mezcla de sólidos y pastas*.

Se describirán además, aunque no constituyen estrictamente hablando una operación unitaria, los distintos procedimientos de almacenaje de sólidos, líquidos y gases.

2.6.1 Trituración y molienda

Son operaciones cuyo objetivo es reducir el tamaño de los elementos en que se presenta un sólido. La reducción de tamaño se basa en someter los trozos de material a esfuerzos de compresión, impacto, cortado, cizalladura y fricción.

Las *trituradoras* tratan los grandes trozos de material y se basan en esfuerzos de compresión. Los principales tipos, por orden de mayor a menor tamaño de partícula aceptada, son (véase fig. 2.60):

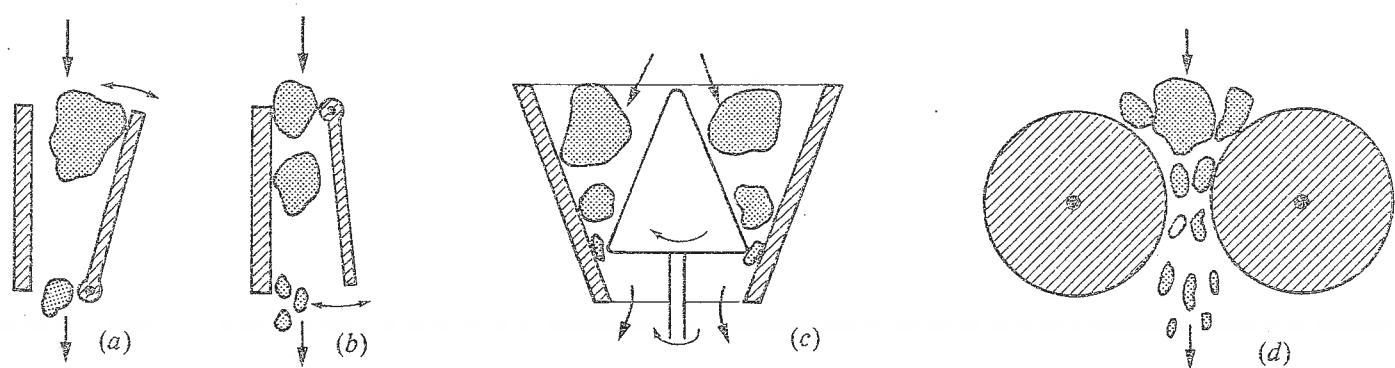


FIGURA 2.60. Distintos modelos de trituradoras. (a) y (b) trituradoras de mandíbulas. (c) Trituradora rotacional. (d) Trituradora de rodillos lisos.

- Trituradora de mandíbulas: constan de una placa fija y otra móvil oscilante.
- Trituradoras rotatorias.
- Trituradoras de rodillos lisos.
- Trituradoras de rodillos dentados.

Los *molinos* son aparatos que reducen el tamaño de los trozos de material por fricción e impacto con elementos móviles del interior del molino. Consiguen tamaños de partícula del orden de 1 mm. Los principales modelos son:

- *Molinos de bolas*. Contienen una cierta cantidad de bolas de un material muy duro —cerámica, acero— que trituran el material al girar el cuerpo del molino. Son de uso muy general.
- *Molinos de barras*. Son largos cilindros horizontales con rotación axial, que contienen barras de acero de longitud igual a la del molino. Dan una fracción de partículas finas muy baja.
- *Molinos de martillos*. Contienen en su interior martillos oscilantes que golpean al material al girar el molino.
- *Molinos de chorro*. No contienen rellenos: la molienda se lleva a cabo al introducir las partículas en una fuerte corriente de aire y chocar entre sí. Se usan para obtener una elevada proporción de partículas finas sin contaminar el material con restos de los elementos trituradores de relleno.

2.6.2 Tamizado

Es una operación unitaria destinada a la separación por tamaños de las partículas de una mezcla sólida. Se basa en hacer pasar las partículas de menor tamaño a través de una malla de paso definido (*luz* de la malla). Las partículas se clasifican así en *cernido* o partículas que atraviesan la malla, y *rechazo*, que quedan retenidas.

Las *mallas* de los tamices están construidas con materiales metálicos o plásticos y sus dimensiones están normalizadas (normas ASTM, DIN, Tyler).

A los *tamices* se les comunica un movimiento de vaivén o vibración para asegurar una separación correcta.

Las instalaciones de tamizado suelen ir precedidas por las de trituración y molienda. En la figura 2.61 se muestra un tamiz industrial continuo de vaivén.

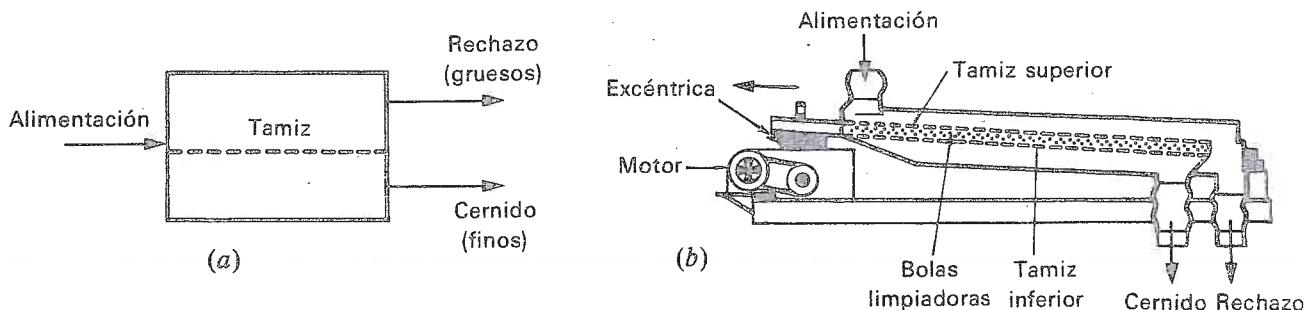


FIGURA 2.61. (a) Esquema de un tamiz. (b) Tamiz oscilante continuo.

2.6.3 Mezclado de sólidos y pastas

Hay en el mercado dispositivos muy diversos para conseguir el mezclado de sólidos y de pastas. Todos ellos se basan en alguno de los dos modelos siguientes: para el mezclado de pastas, unos agitadores o paletas que, a modo de batidora, remueve la mezcla contenida en un tanque; y para el mezclado de partículas sólidas, unos dispositivos mezcladores que agitan el recipiente en su conjunto, o mecanismos de vaivén en el interior de la masa sólida.

2.6.4 Almacenaje de materiales

Ésta es una etapa importante en la fabricación de productos químicos, tanto para disponer en continuo de las materias primas que se reciban en forma discontinua, como para guardar productos intermedios o finales antes de su procesado o venta.

a) *Almacenaje de sólidos*. Si el sólido tiene precio unitario bajo y es inalterable a la acción de los agentes atmosféricos locales, y se procesa en grandes cantidades, se suele almacenar en grandes pilas a la intemperie o en hangares sin mucha protección: como ejemplo de tales sólidos cabe citar el carbón, el azufre, las piritas, la caliza, la arena, la sal común. Los sólidos alterables a la acción atmosférica se almacenan en grandes hangares cerrados o en *silos*. Estos son recipientes cilíndricos con descarga por transporte neumático o cuchara mecánica. La carga de materiales sólidos a los servicios de expedición o a otras operaciones del proceso, se suele hacer mediante *tolvas*, que son recipientes contenedores con descarga por gravedad por su parte inferior. El transporte de sólidos en continuo se realiza mediante *cintas transportadoras* y *elevadores de cangilones* (fig. 1.8) o *elevadores de cadena*.

b) *Almacenaje de líquidos*. Los líquidos en grandes cantidades se almacenan en tanques cilíndricos de base ancha y no mucha altura. Los productos volátiles o inflamables se suelen almacenar en tanques de *techo flotante*. En ellos el techo metálico descansa directamente sobre el líquido a través de un acoplamiento flexible. Así se reduce al máximo la cámara de vapor y el riesgo de explosión e incendio baja considerablemente (figura 2.62-c y d).

Los líquidos en pequeña cantidad pueden también almacenarse en depósitos cilíndricos horizontales, más caros pero de más fácil transporte y montaje.

c) *Almacenaje de gases*. Los gases se almacenan de muy distintas maneras según las condiciones en las que se encuentren.

Los *gasómetros* son grandes recipientes metálicos de techo móvil, cuya finalidad es almacenar gas a baja presión para su suministro. Tienen normalmente cierre hidráulico y están a la presión dada por el cociente entre el peso del techo y la sección transversal del recipiente. Se almacena así el gas ciudad, y el hidrógeno para combustión en algunas industrias. El almacenaje de gas en cantidades muy grandes debe hacerse en condiciones de presión y/o temperatura distintas a las normales para evitar tener que disponer de volúmenes enormes.

Los gases fácilmente licuables se almacenan como líquidos a temperatura ambiente (por ejemplo butano, propano, CO₂, Cl₂) en tanques esféricos (presentan mejor resistencia a la presión por su forma simétrica). Los gases que requerirían presiones muy altas y temperaturas bajas para licuar se suelen almacenar en forma líquida a muy baja temperatura y presión ambiental.

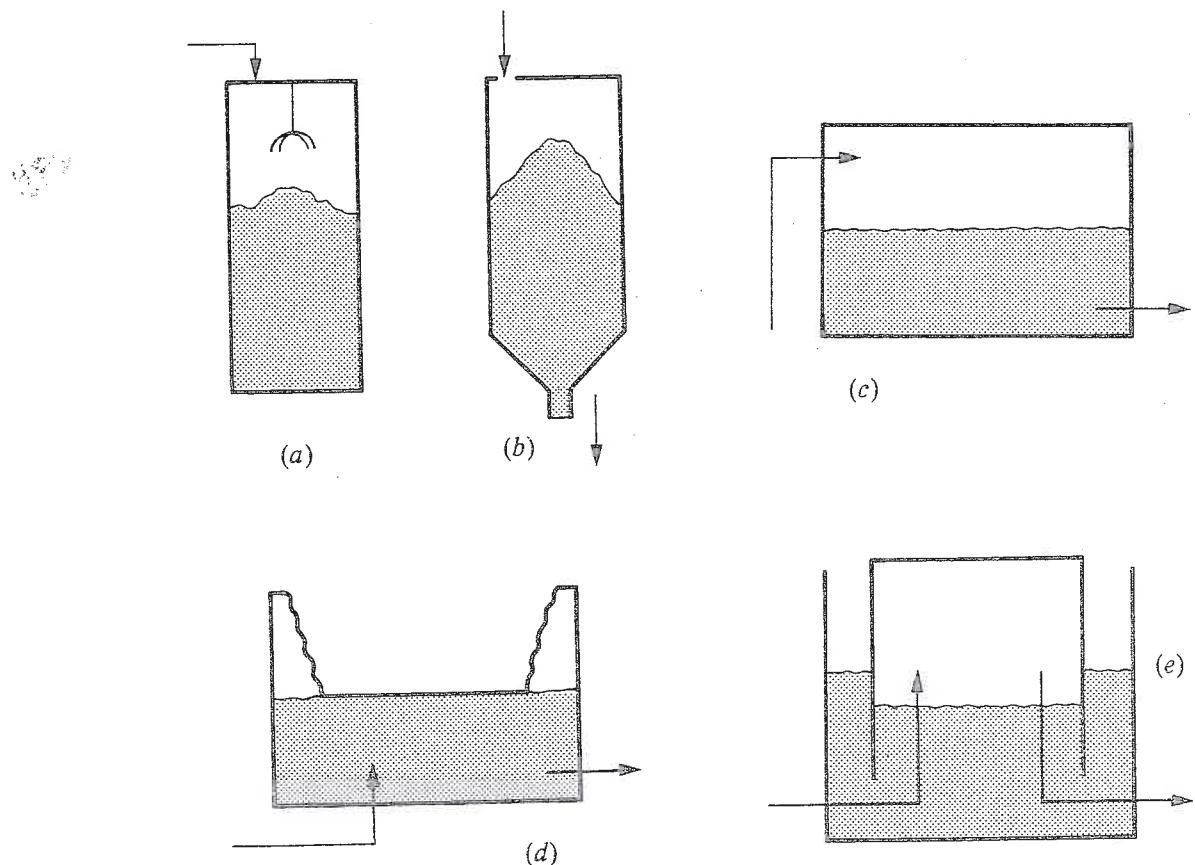


FIGURA 2.62. (a) Silo. (b) Tolva. (c) y (d) Tanques de techo fijo y flotante. (e) Gasómetro con cierre hidráulico.

tal, en depósitos muy bien aislados; por ejemplo gas natural licuado (GNL), el O₂ líquido, el N₂ líquido. Otras veces los gases que se deben emplear en cantidades no muy grandes se usan comprimidos en fase gaseosa a temperatura ambiental, en depósitos esféricos o cilíndricos de forma alargada (botellas), resistentes a la presión. Por ejemplo, así se expenden aire comprimido, O₂, N₂, gases nobles y H₂.

La relación altura-diámetro en los tanques de líquido es distinta según la característica del almacenaje. Así, los tanques cuya superficie tenga un precio unitario alto —con aislantes sofisticados, aleaciones especiales, etc.— serán más altos para minimizar la superficie total del recipiente. Los tanques de GNL son un buen ejemplo. En cambio, los tanques de crudo de petróleo son más achatados, con lo que se evita el empleo de chapas gruesas, pues la presión hidrostática en el fondo será menor.

El transporte de productos químicos es un tema de excepcional importancia, para el que existe copiosa legislación local, estatal e internacional.

2.7 La operación unitaria química: la reacción química

2.7.1 Definición

La *reacción química* es la operación unitaria que tiene por objeto distribuir de una forma distinta los átomos de unas moléculas (compuestos reaccionantes o reactantes) para formar otras nuevas (productos). Los aparatos en los que se llevan a cabo las reacciones químicas se denominan lógicamente *reactores químicos*. Su diseño debe realizarse atendiendo a las carac-

terísticas de la reacción que se desea conseguir. Más concretamente, deberán tenerse en cuenta las condiciones en que la reacción es posible y en qué grado —aspecto termodinámico—, a qué velocidad transcurrirá —aspecto cinético— y qué fases se encontrarán presentes en la reacción.

Los reactores químicos tendrán, pues, como funciones primordiales las siguientes:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir los reactantes en el interior del aparato, para conseguir la mezcla deseada de las fases presentes.
- Proporcionar el tiempo de contacto suficiente entre las sustancias y con el catalizador, en su caso, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir las condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseadas, atendiendo a los aspectos termodinámico y cinético de la reacción.

2.7.2 Modelos de flujo

Hay dos tipos básicos de contacto o *modelos de flujo* que corresponden a los dos grados extremos de mezcla entre los compuestos reaccionantes y productos. Si la mezcla es total en el interior del reactor el modelo de flujo se denomina *modelo de mezcla perfecta*. En él se considera que el contenido del recipiente está perfectamente homogeneizado y a la misma temperatura en todos sus puntos. La materia que se extraiga del recipiente tendrá exactamente las condiciones que hay en el seno de la mezcla.

El otro modelo de flujo supone que no hay mezcla en absoluto. Las materias en reacción se mueven por el interior del reactor sin que haya mezcla por difusión ni convección en la dirección del flujo. Dos puntos vecinos de la mezcla en la dirección del flujo tienen condiciones distintas. No hay acumulación de materia en ningún punto del sistema. Éstas son las condiciones del *modelo de flujo en pistón*, denominado así porque todo ocurre como si una porción del fluido avanzara por el interior del reactor como movido por un pistón, sin mezclas laterales ni axiales (véase figura 2.63).

Los reactores existentes en la realidad están diseñados para que su comportamiento se acerque en lo posible a uno de los dos modelos de flujo descritos, para así poder predecir su comportamiento en la fase de diseño.

Los reactores en que se tiende a conseguir el mayor grado de mezcla posible se denominan *reactores tanque agitado*. Los reactores que trabajan en condiciones que se aproximan al flujo de pistón son los *reactores tubulares*. Debe destacarse, de todos modos, que cualquier reactor real presenta características parciales de los dos modelos: es muy difícil evitar las difusiones axiales y radiales en los reactores tubulares, así como evitar las segregaciones y caminos preferentes en los reactores tanque agitado. Además de estos dos tipos básicos de reactor se emplean muchos otros modelos para aplicaciones específicas.

2.7.3 Tipos principales de reactores químicos

(i) Reactor tanque agitado

Los *reactores tipo tanque agitado* son muy comunes en la industria y en el laboratorio, pues permiten trabajar perfectamente de forma continua o discontinua, a velocidades de producción pequeñas o medianas, dentro de un

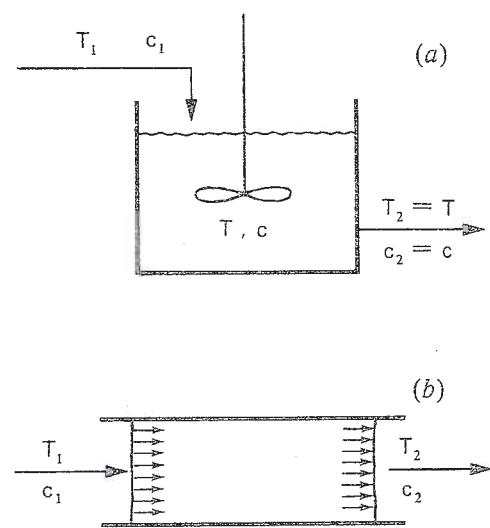


FIGURA 2.63. Reactor tanque agitado (a) y tubular (b) correspondientes a los modelos de mezcla perfecta y flujo de pistón, respectivamente.

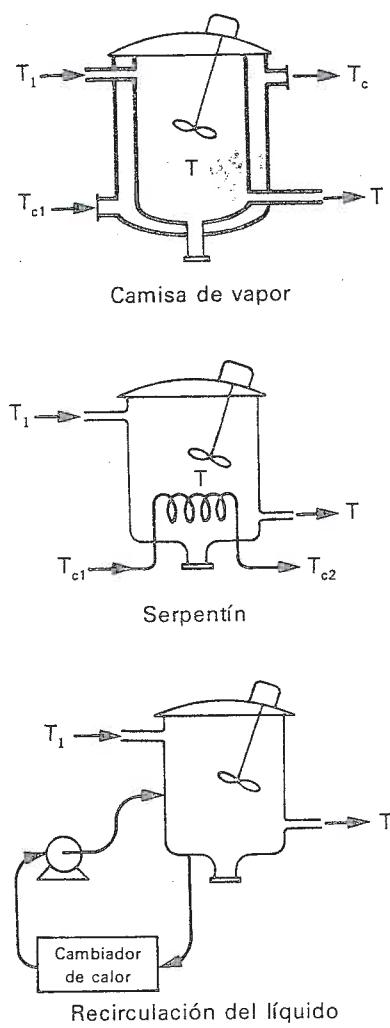


FIGURA 2.64. Tres formas de suministro de calor a un tanque agitado.

muy amplio intervalo de temperatura, a presión elevada, moderada o baja, y con o sin reflujo.

Un reactor tanque agitado no es más que un recipiente donde permanece una considerable masa de fluido reaccionante. Pueden añadirse y eliminarse del sistema de forma continua reactantes y productos. El sistema está perfectamente agitado, para favorecer una buena mezcla del fluido reaccionante. En la figura 2.64 se muestran los principales procedimientos para suministrar o eliminar calor en los tanques agitados, y en la figura 2.65 se presenta un dibujo detallado de un tanque agitado de tamaño medio (450 l), con camisa de vapor, que puede trabajar a una presión media.

Los tanques agitados se emplean básicamente para reacciones homogéneas entre líquidos, por reacciones en fase líquida que den lugar a algún producto sólido, y reacciones entre líquidos y gases que borbotan en la mezcla.

(ii) Reactor tubular

El reactor tubular se emplea principalmente para reacciones en fase gaseosa. Se presenta en la práctica con una multiplicidad de diseños, según

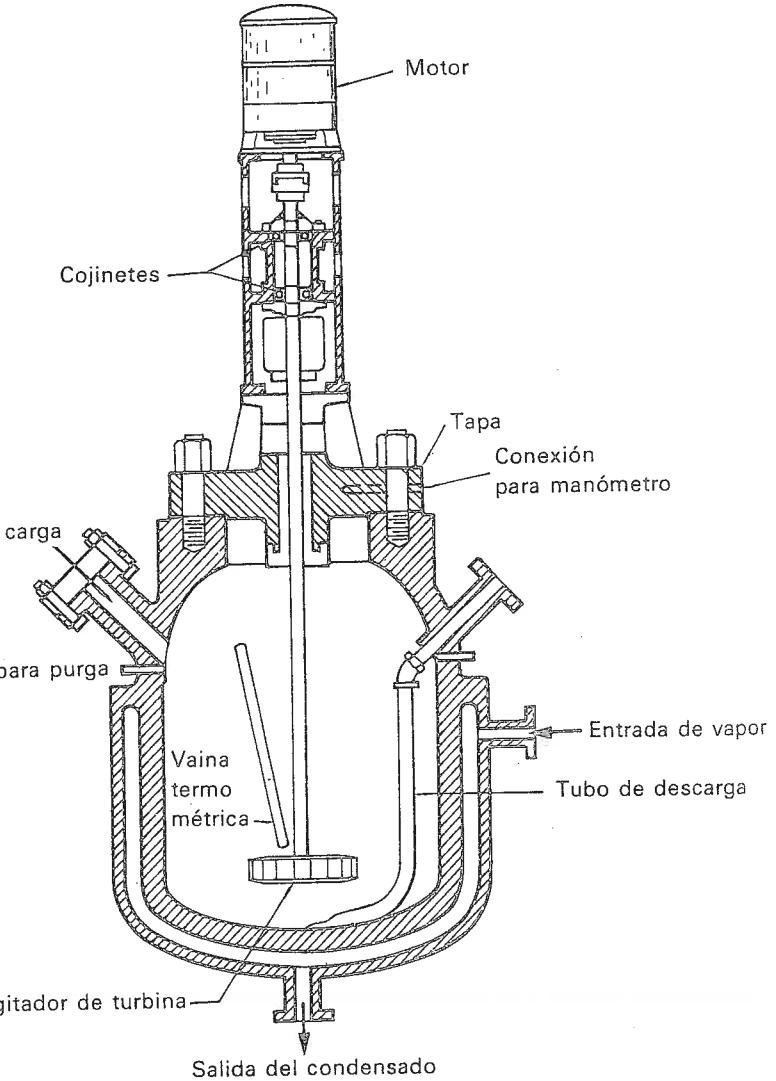


FIGURA 2.65. Reactor tanque agitado con camisa de vapor.

que se requiera la presencia de un catalizador sólido o no, según sea la exotermicidad de la reacción, y según el tiempo de residencia requerida.

Los principales diseños de reactores tubulares son:

- *Reactor tubular calentado a fuego directo.* Consiste en un simple tubo que está colocado en el interior de un horno. En el interior del tubo tiene lugar la reacción, que puede ser activada por catalizador colocado en el tubo.
- *Reactor tubular de carcasa y tubos.* Es análogo al intercambiador de calor del mismo nombre. La reacción se puede llevar a cabo en el interior o el exterior de los tubos, circulando por el lado contrario el refrigerante o el calefactor. Los tubos pueden contener catalizador.

(iii) Reactor de lecho fijo

Es un reactor tubular que contiene una masa de partículas, catalíticas o inertes, a través de las que circulan los gases reaccionantes.

(iv) Reactor de lecho móvil, catalítico o no

El lecho de partículas se mueve continuamente del reactor a un recipiente anexo donde se limpia y se regenera el catalizador, en su caso. Es un diseño útil para procesos en los que hay un gran desprendimiento de calor o reacciones en que se formen productos no deseados que ensucien el catalizador, como por ejemplo coque.

(v) Reactor de lecho fluidizado

Es análogo al de lecho móvil, con un caudal de gas suficiente para fluidizar el lecho catalítico. Su empleo es cada vez mayor, especialmente en la industria petroquímica. En la figura 2.66 se muestra un reactor de craqueo catalítico para transformar gasóleo en gasolina.

Los reactores tubulares de lecho fijo o fluidizado suelen tener en muchos casos varios lechos o etapas, con refrigeraciones intermedias, para aumentar el rendimiento de la reacción. La figura 2.67 representa un convertidor de cuatro etapas para la obtención de SO_3 a partir de SO_2 . Es un reactor catalítico de lecho fijo, con refrigeración del gas.

(vi) Otros tipos de reactores

La variedad de tipos de reactores químicos diseñados es enorme, pues enorme es la gama de reacciones químicas que se llevan a cabo industrialmente. Los tipos mencionados son los más importantes, conceptual y tecnológicamente hablando, pero no los únicos. Cada campo industrial ha desarrollado sus propios modelos donde llevar a cabo sus reacciones, con las peculiaridades propias de cada sistema de reacción. Se enumeran a continuación algunos tipos de reactores usuales destacables.

En la industria del cemento son típicos los *hornos rotatorios*, que pueden ser considerados una variante de los reactores tubulares. Los sólidos alimentados van avanzando a lo largo de los mismos gracias a una ligera inclinación y a una rotación axial. La calefacción se realiza por fuego directo. Este reactor es un ejemplo de sistema de reacción entre sólidos.

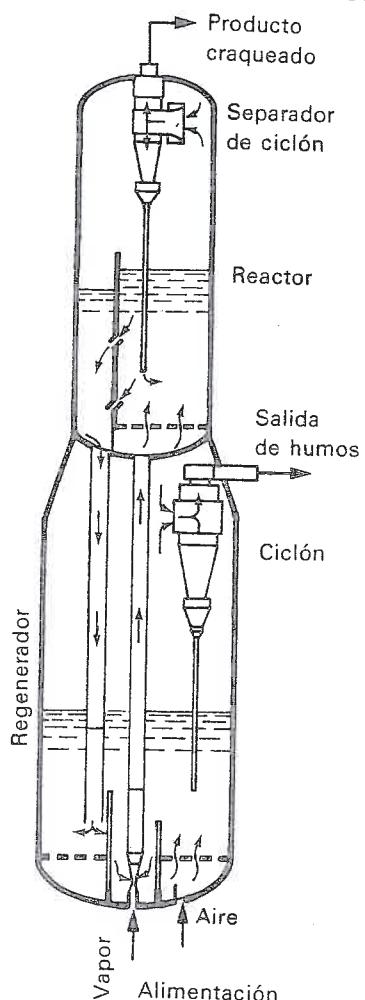


FIGURA 2.66. Reactor catalítico de lecho fluidizado, con regeneración del catalizador.

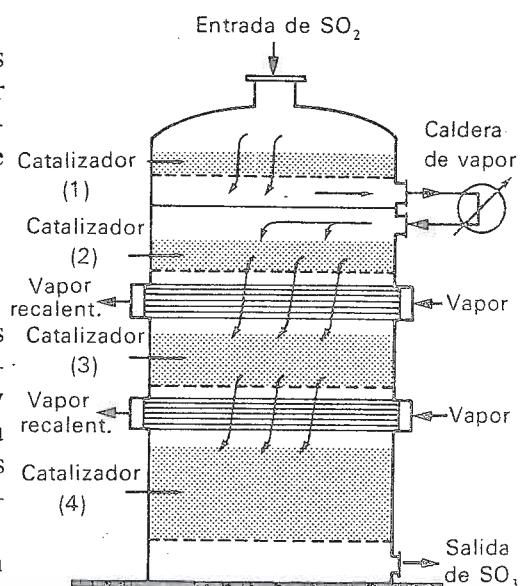


FIGURA 2.67. Convertidor de SO_2 a SO_3 , de cuatro lechos catalíticos fijos con refrigeraciones intermedias.

Las reacciones biológicas tecnológicamente interesantes presentan características especiales en cuanto a la cinética de reacción, por involucrar organismos vivos en los procesos. La *biotecnología* es un campo con un futuro halagüeño, tanto en su aspecto de preparación de sustancias químicas por vía biológica, como en el aprovechamiento de los organismos generados para alimentación, depuración y otras aplicaciones. Reactores propios de este campo científico son los *fermentadores* y *autoclaves*, que en esencia son tanques agitados con controles de temperatura, presión, etc., y los *reactores de fangos activados*, empleados en la depuración de agua, tal como se ha descrito en el capítulo 1.

Los reactores *fotoquímicos* presentan como característica específica que en ellos las reacciones se activan mediante energía en forma de fotones de una longitud de onda determinada. Ello permite realizar determinadas reacciones selectivamente, activando especies individuales. Por lo demás, los reactores fotoquímicos son asimilables a tanques agitados o a reactores tubulares, según su modo de flujo.

Hay reacciones químicas entre un líquido y un gas que se llevan a cabo en *reactores de película descendente*. En ellos una delgada capa de líquido resbala por las paredes de un tubo, reaccionando con un gas que fluye a contracorriente o en paralelo. Este tipo de reactor se emplea cuando se desea controlar con gran precisión la temperatura del líquido, porque éste puede alterarse por el calor —determinadas sustancias alimenticias— y/o dar subproductos indeseables —caso de la fabricación de detergentes sulfonados—.

Finalmente, cabe citar los *reactores electroquímicos*. En ellos la energía se les suministra en forma de corriente eléctrica continua, obteniéndose los productos de la reacción en los electrodos (§ 1.4.1). Deben distinguirse los reactores electroquímicos de los *hornos eléctricos*. Estos son reactores químicos en los que se lleva a cabo una reacción no electrolítica, y en los que la energía —térmica— se suministra en forma de energía eléctrica aprovechándose el efecto Joule en el seno de la masa en reacción.

2.8 El modelo matemático de una operación unitaria

Llegados a este punto puede darse, y ser comprendida, una definición del campo de actuación de la Química Técnica. Una clásica definición, convenientemente modificada, dice que «...la Química Técnica es la parte de la ciencia química cuyo objetivo es concebir, calcular, diseñar, hacer construir y hacer funcionar la mejor instalación donde llevar a cabo un proceso químico cualquiera».

En el capítulo 1 ha aparecido el concepto de *proceso químico* y su descomposición en una serie ordenada de operaciones unitarias: se han concebido procesos. Cuando se desea calcular o diseñar un aparato donde realizar una determinada operación unitaria, se deben conocer a fondo las bases sobre las cuales trabaja el aparato, se debe conocer el mecanismo de la operación unitaria.

Tratar-de-conocer pasa por tener que postular un *modelo* y éste se debe, mediante experimentación, contrastar con la realidad. El camino a seguir tiene su punto de partida en el planteamiento de modelos muy sencillos, que resumen en unas simples ecuaciones las observaciones experimentales (relaciones causa-efecto) y donde se definen unos parámetros del modelo, pocos y fácilmente medibles. Más adelante se construirán modelos más complejos, que tratarán de predecir el comportamiento del sistema en condiciones que van más allá de las estrictamente ensayadas.

El diseño de un determinado aparato para llevar a cabo una operación unitaria de un proceso requiere cuantificar una serie de variables del sistema: caudales, concentraciones, temperaturas, tamaños de partículas, presiones, humedades, etc. Con esta información se podrá entonces decidir qué dimensiones habrá de tener el equipo, qué materiales deberán escogerse para su construcción, qué necesidades de calefacción, refrigeración, compresión, etc., se tendrán, y otras cosas más.

A este nivel del diseño se deberá decidir cuál va a ser la *escala de la operación*, basándose en consideraciones sobre la cantidad de producto a fabricar, las especificaciones de seguridad, y otros aspectos. Se podrá trabajar a escala de *laboratorio*, a escala de *planta piloto*, a escala *semiindustrial* o a escala *industrial*, por orden progresivamente creciente de tamaños. Esta clasificación no está correlacionada con una cantidad de producto determinada: una planta piloto para fabricar fenol puede producir muchísima más cantidad de sustancia que una planta industrial para fabricar penicilina.

Corresponde también a esta etapa la decisión sobre la *forma de operación*: *continua*, *discontinua* o *semicontinua*. Puede afirmarse que, en general, cuanta mayor sea la capacidad de producción, más conviene trabajar en continuo. La fabricación continua requiere automatizaciones y controles y reduce al mismo tiempo la mano de obra no especializada. La calidad del producto es normalmente más uniforme, por reducirse las puestas en marcha y paros de la planta. A lo largo del presente capítulo han ido apareciendo distintas operaciones unitarias que trabajan casi siempre en continuo —rectificación, absorción, extracción, intercambio de calor, ciclones, trituración a escala industrial, filtros rotativos— y otros que trabajan en discontinuo —filtros prensa, liofilizadores, intercambio iónico, adsorción— aunque en estas últimas se puedan disponer en paralelo dos o más unidades de operación para conseguir que el proceso sea semicontinuo. Las unidades que trabajan en continuo se disponen de tal modo que sus condiciones tiendan a variar lo menos posible con el tiempo; no obstante, las variaciones de materia prima, las progresivas desactivación de un catalizador, el cambio de la temperatura ambiente, la imprecisión inherente a muchos aparatos de medida y control, y otras varias circunstancias, hacen que en un proceso haya fluctuaciones y oscilaciones, y desvíos de las condiciones deseadas. Los períodos de puesta en marcha y paro son otros momentos en los que las condiciones del proceso varían con el tiempo. En estos casos se dice que el proceso está en *estado no estacionario*. El proceso está en *estado estacionario* cuando se considera que sus condiciones no varían a lo largo del tiempo en un período determinado.

El cálculo de caudales, temperaturas, velocidades y otras variables del proceso se realizará basándose en una serie de leyes, relaciones generales, y relaciones específicas semiempíricas aplicables al sistema considerado. Las leyes generales a aplicar son las de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento, ya citadas en el apartado 2.1..

En forma general, pueden representarse mediante la siguiente ecuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{propiedad} \\ \quad - \text{materia} \\ \quad - \text{energía} \\ \quad - \text{cantidad de} \\ \quad \text{movimiento} \\ \text{que se acumula en el} \\ \text{sistema por unidad} \\ \text{de tiempo} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Caudal de} \\ \text{entrada neta} \\ \text{de propiedad} \\ (\text{entradas totales} \\ \text{menos} \\ \text{salidas totales}) \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{generación} \\ \text{de propiedad} \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Escala de operación.

Forma de operación.

Estado estacionario y estado no estacionario.

El término de generación es cero si la ecuación se aplica a toda la materia, energía o cantidad de movimiento de un sistema, pero puede no ser cero si la ecuación se refiere a un solo componente material o a una forma determinada de energía.

Se dispone, además, de otras ecuaciones que relacionan entre sí las variables del sistema. Estas son:

- Las ecuaciones de estado de las sustancias del sistema.
- Las leyes de equilibrio físico o químico (relaciones entre fases, constantes de equilibrio químico, etc.). Aplicables cuando el sistema esté en equilibrio.
- Las leyes cinéticas o de velocidad. Aplicables cuando el sistema no se encuentra en equilibrio. Relacionan la velocidad con que una propiedad se transfiere o se genera, con la magnitud de alguna variable intensiva del sistema (concentración, temperatura o velocidad). Un ejemplo se tiene en las ecuaciones cinéticas de reacciones químicas. Existen también leyes cinéticas físicas, como la ecuación (2.4) vista anteriormente.

Las ecuaciones de estado son de carácter general para cualquier sistema, pero las leyes de equilibrio y cinéticas, si bien son generales en la forma de las ecuaciones, contienen parámetros o constantes específicas del sistema considerado.

El conjunto de todas estas ecuaciones constituye el *modelo matemático* del sistema. La resolución del mismo permitirá conocer los valores de todas las variables que en él intervienen, y así poder especificar con detalle los equipos en los que deberá llevarse a cabo el proceso químico.

Los capítulos que siguen tienen por objeto el suministrar la información necesaria para la elaboración del modelo matemático de un sistema. Más específicamente, los capítulos 3, 4 y 5 están dedicados al estudio de los balances de materia, energía y cantidad de movimiento en un primer nivel de descripción. Se considera que el sistema es como una *caja negra* de la que no preocupa o no se sabe el funcionamiento interno. Sólo se puede hablar de globalidades o valores medios cuando se haga preferencia a entradas y salidas, al contenido y a lo generado en el sistema. En cambio, en los capítulos 7, 8 y 9 se realiza una descripción más profunda del sistema. Se trabaja con variables puntuales de concentración, temperatura y velocidad, y se intenta predecir cómo varían estas variables dentro del sistema, a partir de las mismas leyes de conservación pero planteadas microscópicamente.

Estos dos niveles de descripción se denominan *nivel macroscópico* y *nivel microscópico*, respectivamente, y ambos dan información necesaria para el ingeniero químico, por lo que deben estudiarse con detalle. La complejidad matemática del nivel microscópico es mayor que la del nivel macroscópico y por ello es preferible su estudio según el orden indicado.

Ejercicios

- 2.1 Comentar las diferencias y las analogías entre las operaciones de evaporación y destilación simple. ¿Por qué se clasifica esta última entre las operaciones de transmisión de calor?
- 2.2. Sugerir las operaciones que pueden emplearse para obtener la denominada «agua destilada» ¿Es correcta tal denominación?
- 2.3. Señalar las diferencias y los puntos comunes fundamentales entre las operaciones de humidificación y absorción.

Niveles de descripción.

- 2.4. ¿Qué variables de proceso se pueden modificar, y en qué sentido, para favorecer la eliminación, por absorción con un líquido, de un soluto presente en un gas?
- 2.5. Comparar las operaciones unitarias de rectificación y extracción.
- 2.6. La adsorción y el intercambio iónico son operaciones unitarias análogas, aunque los fenómenos fisicoquímicos implicados difieren notablemente. Discútase esta afirmación.
- 2.7. En un intercambiador de calor ¿hay transporte de cantidad de movimiento?, ¿y transmisión de calor?, ¿y transferencia de materia? ¿Por qué se estudia como operación unitaria de transmisión de calor?
- 2.8. ¿Por qué en los días fríos se siente más el frío si hace viento? ¿Por qué los cristales de las casas suelen aparecer empañados por las mañanas de los días fríos?
- 2.9. Se desea secar un gas inerte saturado de humedad. Indicar qué operaciones unitarias podrían emplearse, y en qué orden deberían colocarse.
- 2.10. Comparar los distintos procedimientos de cristalización, indicando ventajas e inconvenientes. ¿Por qué suele clasificarse la cristalización como operación unitaria de transporte simultáneo de calor y materia?
- 2.11. Describir cuáles son las fuerzas que pueden oponerse a que un fluido circule por una conducción.
- 2.12. Identificar las operaciones unitarias en que puede desglosarse una nevera eléctrica de ciclo de compresión.
- 2.13. Enumerar las distintas situaciones domésticas en las que se emplea el transporte de fluidos en una vivienda.
- 2.14. Indicar por qué mecanismo tiene lugar la transmisión de calor en los diferentes aparatos domésticos siguientes: calentador de gas, calentador eléctrico, horno eléctrico, cocina a gas, «radiador» por agua caliente, estufa de infrarrojos, ventilador, acondicionador de aire, cocina eléctrica, horno de microondas, plancha, secador de cabello.
- 2.15. ¿Qué distintos tipos de «reactores» podría considerarse en una vivienda actual?
- 2.16. Enumerar las distintas «operaciones unitarias» que pueden considerarse en un automóvil de motor de combustión interna.
- 2.17. El agua del mar puede desalinizarse por congelación, posterior lavado y fusión del hielo limpio obtenido. Sugerir un diagrama de flujo para este proceso, e indicar las operaciones unitarias involucradas. Procurar el máximo aprovechamiento del calor.

