

Operaciones de Transferencia de Masa

Cuando se ponen en contacto dos fases que tienen diferente composición es posible que ocurra la transferencia de algunos de los componentes presentes de una fase hacia la otra y viceversa. Esto constituye la base física de las operaciones de transferencia de masa. Si se permite que estas dos fases permanezcan en contacto durante un tiempo suficiente, se alcanzará una condición de equilibrio bajo la cual no habrá ya transferencia neta de componentes entre las fases. En la mayor parte de los casos de interés que se presentan en las operaciones de transferencia de masa, las dos fases tienen una miscibilidad limitada, de tal forma que en el equilibrio existen dos fases que pueden separarse una de la otra. Con frecuencia, estas fases tienen composiciones diferentes entre sí y distintas también de la composición que tenía cada fase antes de ponerse en contacto con la otra. Como resultado de lo anterior, las cantidades relativas de cada uno de los componentes que han sido transferidas entre las fases, son distintas, lográndose de esta forma una separación. Bajo condiciones adecuadas, la acción repetida de poner las fases en contacto y separarlas a continuación, puede conducir a la separación casi completa de los componentes. Las diferencias en composición que presentan las fases en equilibrio, constituyen la base física para los procesos de separación que utilizan equipos con etapas múltiples, como las que se aprecian en la Fig. 2-1.

Procesos de separación

Cuando se plantea el problema de separar los componentes que forman una mezcla homogénea, el ingeniero aprovecha las diferencias que existen en las propiedades de los constituyentes que forman la mezcla para efectuar su separación. Se analizan las diversas propiedades químicas y físicas de los constituyentes, con el objeto de determinar en cuáles de esas propiedades se

observa una mayor diferencia entre los componentes y que por lo general, cuanto mayor sea la diferencia de alguna propiedad, más fácil y económica será la separación deseada. Resulta evidente que el ingeniero debe tomar en consideración muchos otros factores al seleccionar una ruta de separación para un proceso. Los requerimientos de energía, el costo y disponibilidad de los materiales de construcción y de proceso, así como la integración con el resto del proceso químico, son factores que contribuyen para determinar cuál proceso de separación ofrece un mayor atractivo desde el punto de vista económico.

Las operaciones unitarias se relacionan con los procesos de separación que se basan en las diferencias que existen en las propiedades físicas, más que en las químicas. Tales procesos dependen de la diferencia de composición que presentan las fases en equilibrio o bien, en la diferencia de *velocidad* de transferencia de masa que tienen los constituyentes de una mezcla. En el análisis que se presenta a continuación, se comentan procesos de separación que utilizan dichas bases físicas. Esta sección está dedicada a los procesos de separación basados en las diferencias de composición de las fases en equilibrio. Los principios de separaciones basadas en la velocidad de transferencia se tratan con mayor amplitud en la Parte III.

Destilación

El proceso de separación más utilizado en la industria química es la destilación. Esta operación unitaria también es conocida como fraccionamiento o destilación fraccionada. La separación de los constituyentes se basa en las diferencias de volatilidad. En la destilación, una fase vapor se pone en contacto con una fase líquida, transfiriéndose masa del líquido al vapor y del vapor al líquido. Por lo general, el líquido y el vapor contienen los mis-



Fig. 2-1 Procesos de separación en una refinería de petróleo. El furfural, un líquido orgánico hecho a partir de la cascarrilla de avena, disuelve selectivamente los componentes indeseables del aceite lubricante. En el proceso ilustrado, el aceite lubricante fluye a través del gran ducto (lado izquierdo de la fotografía) que entra a la columna de extracción, la cual se encuentra entre las dos columnas de destilación más altas, en la parte central izquierda. El furfural se alimenta por la parte superior de la columna y sale por el fondo con los componentes indeseables. El aceite lubricante así purificado sale por el domo. El resto de las columnas que se presentan en la fotografía se utilizan para destilación y agotamiento, para recuperar el furfural y para la purificación posterior del producto —el aceite lubricante deseado—. (Cortesía de Foster Wheeler Energy Corp.)

mos componentes aunque en distintas proporciones. El líquido se encuentra a su temperatura de burbuja,* mientras que el vapor en equilibrio está a su temperatura de rocío.* En forma simultánea, se transfiere masa desde el líquido por evaporación y desde el vapor por condensación. El efecto neto es un incremento en la concentración de los componentes más volátiles en la fase vapor y de los menos volátiles en el líquido. La evaporación y condensación involucran calores latentes de vaporización de cada componente y por ello, al calcular una destilación deben considerarse los efectos del

calor. En una solución ideal (por ejemplo; una mezcla de benceno y tolueno), la volatilidad puede relacionarse directamente con la presión de vapor que tiene cada componente puro. En las soluciones no ideales (tales como una mezcla de etanol y agua) no existen relaciones simples. Esto se analiza con mayor amplitud en el Cap. 3. La destilación se utiliza mucho para separar mezclas líquidas en componentes más o menos puros. Debido a que la destilación implica evaporación y condensación de la mezcla, es una operación que necesita grandes cantidades de energía.

Una gran ventaja de la destilación es que no es necesario añadir componente a la mezcla para efectuar la separación. Como se puede apreciar en el siguiente análisis, muchos otros procesos de separación requieren de la adición de otro componente, el cual, a su vez, deberá eliminarse en otra etapa de separación. La temperatura y el volumen de los materiales sometidos a ebullición dependen de la presión. Puede utilizarse una presión elevada para disminuir el volumen y/o incrementar la temperatura con objeto de facilitar la condensación; en otros casos será necesario disminuir la presión para llevar al punto de ebullición por debajo de la temperatura de descomposición térmica.

Las aplicaciones de la destilación son muy diversas. El oxígeno puro que se utiliza en la fabricación de acero, en las naves espaciales y en aplicaciones medicinales, se produce por destilación del aire previamente licuado. Las fracciones del petróleo (tales como gases ligeros, nafta, gasolina, queroseno, combustóleo, aceite lubricantes y asfalto) se obtienen en grandes columnas de destilación a las que se alimenta el crudo. Estas fracciones se procesan después para obtener los productos finales y, con frecuencia, la destilación también interviene en las etapas intermedias de este proceso.

A menudo la destilación se lleva a cabo en equipo de etapas múltiples aunque también se utiliza equipo de contacto continuo.

Absorción y desorción de gases

La *absorción de gases* involucra la transferencia de un componente soluble, presente en una fase gaseosa, hacia un líquido absorbente de baja volatilidad. La *desorción* es el proceso inverso, es decir, eliminación de un componente de la fase líquida por contacto con una fase gaseosa.

En el caso más simple de absorción de gases, no existe vaporización del líquido absorbente y el gas contiene sólo un constituyente soluble. Por ejemplo, al poner en contacto una mezcla de aire y amoníaco con agua líquida a temperatura ambiente, el agua absorbe amoníaco. Este es soluble en agua, mientras que el aire es poco soluble en ella. A su vez, el agua no se evapora en cantidades apreciables a temperatura ambiente. Como resultado, la única masa que se transfiere es la del amoníaco, que pasa de la fase gaseosa a la líquida. El amoníaco, al

* Definidas en el Cap. 3.

transferirse al líquido, va aumentando su concentración en este medio hasta que el amoníaco disuelto se encuentra en equilibrio con el que está presente en la fase gaseosa. En el momento en que se alcanza este equilibrio cesa la transferencia neta de masa.

En los casos de absorción más complejos, pueden absorberse muchos componentes así como vaporizarse una parte del líquido absorbente. En el Cap. 8 se describen algunos de estos casos.

En los equipos de absorción, el líquido absorbente se encuentra a una temperatura inferior a su punto de burbuja, mientras que la fase gaseosa está muy por encima de su temperatura de rocío. Otra diferencia entre la destilación y la absorción de gases es que en esta última, las fases líquida y gaseosa no contienen por lo general exactamente los mismos componentes. En la absorción, los efectos caloríficos se deben al calor de disolución del gas absorbido, a diferencia de los calores de vaporización y condensación involucrados en la destilación.

En las operaciones de absorción, es necesario añadir un componente al sistema (esto es, el líquido absorbente). En muchos casos, el soluto deberá separarse del absorbente, para lo cual se requerirá una columna de destilación, un desabsorbedor o algún otro proceso de separación.

La *desorción* o *agotamiento*, es lo opuesto a la absorción. En este caso el gas soluble se transfiere del líquido a la fase gaseosa, debido a que la concentración en el líquido es mayor que la correspondiente al equilibrio con el gas. Por ejemplo, el amoníaco puede agotarse de una solución acuosa mediante el burbujeo de aire fresco a través de la mezcla. El aire que entra no contiene amoníaco, mientras que el líquido sí lo contiene, de tal forma que la transferencia se verifica del líquido al gas.

La absorción y el agotamiento se utilizan con frecuencia en la industria química. El ácido clorhídrico se produce por la absorción en agua de cloruro de hidrógeno gaseoso. La fermentación aerobia de los sedimentos y lodos de aguas negras requieren la absorción de aire. La carbonatación de refrescos involucra la absorción de bióxido de carbono; al abrir una botella, disminuye la presión y se presenta algo de desorción.

Tanto la absorción como el agotamiento se llevan a cabo en equipo de etapas múltiples y en menor grado, en equipo de contacto continuo.

Extracción líquido-líquido

En algunas ocasiones, una mezcla líquida puede separarse por contacto con un segundo disolvente líquido. Los componentes de la mezcla son solubles en distintas proporciones en el líquido disolvente. En teoría, el componente que va a extraerse es soluble en el disolvente, mientras que el resto de los componentes son insolubles. Por ello, el soluto es el único componente que se transfiere de la mezcla inicial a la fase del disolvente. La mezcla inicial se convierte en el *refinado* a medida que

se agota en el soluto. La fase del disolvente se convierte en el *extracto* al enriquecerse en soluto. En la práctica, todos los componentes son solubles hasta cierto punto y por ello la separación sólo es posible cuando las solubilidades son suficientemente distintas. En cualquier caso, el componente no extraído debe ser suficientemente insoluble para producir dos fases que puedan separarse.

La extracción líquido-líquido también se conoce como *extracción con disolvente*. Los principios se ilustran en los siguientes capítulos, utilizando sistemas de tres componentes: un soluto, un disolvente y un segundo disolvente. La presentación de los principios que en forma sobresimplificada se hace aquí, será explicada con mayor detalle más adelante. La separación de un componente de una solución homogénea se lleva a cabo mediante la adición de otro constituyente insoluble; el disolvente, en el que el constituyente que se desea extraer de la solución, llamado soluto, es preferencialmente soluble y hacia el cual se difundirá a una velocidad característica, hasta que se logren en ambas fases las concentraciones de equilibrio del soluto. Por ejemplo, el ácido acético (soluto), puede separarse de una solución acuosa por contacto con éter isopropílico (disolvente). Aunque el agua es ligeramente soluble en el éter, es en esencia el componente no extraído que forma el refinado.

La extracción con disolvente se utiliza para eliminar componentes indeseables del aceite lubricante y otras fracciones de petróleo crudo, para separar al niobio del tantalio, para producir ácido fosfórico concentrado y muchas otras aplicaciones. Se utiliza tanto equipo de etapas múltiples como de contacto continuo. En la mayor parte de los casos, es necesario separar al extracto resultante en sus componentes.

Extracción sólido-líquido

Los componentes de una fase sólida pueden separarse por disolución selectiva de la parte soluble de un sólido con un disolvente adecuado. Esta operación se conoce también como *lixiviación* o *lavado*. El sólido debe estar finamente dividido para que el disolvente líquido pueda hacer un contacto más completo. Por lo general, el componente deseable es soluble, mientras que el resto del sólido es insoluble. El soluto debe recuperarse del extracto en una etapa adicional de separación.

Un ejemplo cotidiano de extracción sólido-líquido es la preparación de café. Aquí, los constituyentes solubles del café se separan de los insolubles por disolución en agua caliente. Si se permite que estén en contacto el tiempo suficiente, la solución de café alcanzará un equilibrio con el sólido remanente. La solución resultante se separa de los sólidos.

La extracción sólido-líquido también se utiliza en la industria para la producción de café instantáneo con el fin de extraer el café soluble del grano. Otras aplicaciones industriales incluyen la extracción de aceite de

soya, que emplea hexano como disolvente y la recuperación de uranio a partir de minerales pobres por extracción con ácido sulfúrico o soluciones de carbonato de sodio. Debido a que una de las fases es un sólido que no fluye, se requieren tipos especiales de equipo para la extracción sólido-líquido.

Adsorción

La adsorción implica la transferencia de un constituyente de un fluido a la superficie de una fase sólida. Para completar la separación, el constituyente adsorbido debe separarse del sólido. La fase fluida puede ser un gas o un líquido. Si varios constituyentes se adsorben en distintas proporciones, casi siempre es posible separarlos en componentes relativamente puros.

Se utilizan muchos adsorbentes sólidos. Estrictamente hablando, el término *adsorbente* se aplica a un sólido que retiene al soluto en su superficie por la acción de fuerzas físicas. Un ejemplo sería la adsorción de vapores orgánicos en carbón. Las fracciones ligeras del gas natural se separan en la industria mediante un lecho móvil de adsorbente. Muchos otros procesos industriales utilizan lechos fijos y procesos cíclicos o intermitentes, en lugar de equipo de etapas múltiples, debido a la dificultad de mover el sólido.

Las mallas moleculares (4) son adsorbentes sintéticos especiales para separar mezclas por diferencias del tamaño, polaridad o saturación de enlaces carbono de las moléculas. Por ejemplo, las moléculas de agua son relativamente pequeñas y tienen una polaridad elevada, por lo que se adsorben en forma preferencial en adsorbentes tales como las mallas moleculares. Estos adsorbentes son útiles para secar gases y líquidos; las mallas moleculares se utilizan para separar parafinas normales de corrientes de hidrocarburos en refinerías de petróleo, que se usan en la fabricación de detergentes biodegradables.

Los procesos que retienen solutos en sólidos por diferentes medios, están muy relacionados con la adsorción. Uno de dichos procesos es el de *intercambio iónico*, donde el soluto se retiene por el efecto de una reacción química con la resina sólida de intercambio iónico (1, 6). Como el nombre lo dice, los iones que se encuentran en una solución pueden eliminarse mediante este proceso, el cual se utiliza mucho para producir agua de gran pureza. Otras aplicaciones incluyen la recuperación de antibióticos de caldos de fermentación y la separación de tierras raras.

La formación de *clatratos* es un fenómeno físico que se aplica para separar mezclas con base en su *forma* molecular. El clatrato sólido atrae y retiene a las moléculas que tienen una forma molecular determinada. Por ejemplo, por medio de un proceso industrial se separa paraxileno de metaxileno, mediante un compuesto clatrático que atrapa al primero. Estos dos compuestos tienen propiedades físicas y químicas muy parecidas, por lo que no pueden emplearse técnicas de separación

convencionales. El compuesto clatrático puede considerarse como un tipo particular de adsorbente.

Las resinas de intercambio iónico, las mallas moleculares y los compuestos clatráticos son relativamente costosos si se les compara con adsorbentes de tipo convencional, como son el carbón activado y la sílica gelatinosa. Por ello, estos adsorbentes especiales se emplean en separaciones que no pueden realizarse por métodos convencionales. Estas separaciones especiales se llevan a cabo en procesos intermitentes con adsorbentes de lecho fijo, en lugar de utilizar equipo de etapas múltiples o de contacto continuo.

Las operaciones de transferencia de masa que implican la transferencia hacia una fase sólida, se conocen también como *procesos de absorción* e incluyen a todos los tipos de fuerzas de atracción de los sólidos.

Es posible separar una mezcla de varios solutos adsorbibles utilizando un lecho fijo de adsorbente. Primero, se alimenta un pequeño volumen de la mezcla al lecho que se adsorbe por completo cerca de la entrada. Entonces, se pasa un flujo continuo de disolvente a través del lecho. Parte de la mezcla se desadsorbe y avanza con el disolvente. La velocidad a la cual avanza cada soluto sobre el lecho, depende de su adsorción de equilibrio en el sólido. Si el adsorbente retiene fuertemente a un componente, éste pasará con lentitud a través del lecho, mientras que un componente que se adsorbe poco, avanzará con mayor rapidez. Como resultado, los componentes saldrán del lecho en tiempos diferentes y podrán separarse. Este proceso de separación recibe el nombre de *cromatografía* (8). La separación por cromatografía es un método de análisis químico para muestras pequeñas. Tiene pocas aplicaciones a gran escala. La separación de tierras raras por intercambio iónico que se mencionó con anterioridad, es ejemplo de una separación cromatográfica.

Separaciones por membrana

Algunos procesos de separación involucran la transferencia de masa a través de una membrana plástica delgada (1). Aunque estas operaciones tienen relativamente poca aplicación, son promisorias para problemas especiales de separación. La teoría de la separación por membranas aún no se desarrolla por completo, pero como primera aproximación, puede considerarse que es un efecto del tamaño molecular. Las moléculas más pequeñas pasan con mayor facilidad a través de los poros de una membrana. Como resultado, si se utiliza una fuerza motriz para "empujar" las moléculas a través de la membrana, las moléculas más pequeñas se separarán selectivamente. Algunas moléculas mayores también pasan, por lo que la separación no es perfecta.

La *diálisis* es un proceso de separación en el que la masa se transfiere a través de una membrana por efecto de un gradiente de concentración, que actúa como fuerza motriz (13). En su mayor aplicación industrial, que es la fabricación de rayón viscoso, el hidróxido de

sodio se separa de una solución acuosa que también contiene hemicelulosa. La solución fluye por un lado de la membrana, mientras que por el otro fluye agua pura. La diferencia de concentraciones entre la solución y el agua pura, obliga al hidróxido de sodio a pasar a través de la membrana, pero la hemicelulosa se encuentra en suspensión coloidal en la solución y es demasiado grande para pasar a través de los poros de la membrana. La diálisis también se utiliza para recuperar ácido sulfúrico de aguas de desecho en las refinerías de cobre, así como en la purificación de sangre en riñones artificiales.

La *electrodiálisis* utiliza una diferencia de potencial eléctrico como fuerza motriz, para iones en solución (5). Los iones positivos pasan a través de membranas apropiadas al sentir la atracción de la terminal negativa, mientras que los iones negativos, viajando en dirección contraria, atraviesan una membrana para llegar a la terminal positiva. De esta forma, pueden eliminarse tanto los iones positivos como los negativos.

La electrodiálisis se utiliza para recuperar ácido gastado y para eliminar la sal del agua de pozos salobres. También puede llegar a ser útil en la purificación de agua de mar, si se reducen los costos de las membranas y la energía.

Tanto la diálisis como la electrodiálisis implican la transferencia de masa a través de una membrana, de una fase a una segunda fase. Son ambas por completo miscibles, por lo que la membrana también sirve para evitar que las fases vuelvan a mezclarse.

Un proceso de separación por membrana que se desarrolló recientemente, utiliza una diferencia de presión para forzar a las moléculas de disolvente a través de la membrana, mientras que las moléculas del soluto permanecen atrás. Este proceso no involucra la transferencia de masa entre las fases. Se parece más a la filtración, en donde las partículas sólidas en suspensión se separan de un líquido, al forzar el paso de la mezcla por un medio filtrante poroso, de tal forma que el líquido pasa y el sólido queda retenido. El uso de una membrana permite "filtrar" soluciones homogéneas que no podrían separarse con un filtro ordinario. Por esta razón, se le da el nombre de *ultrafiltración*. La presión que se aplica debe exceder a la presión osmótica; en algunas ocasiones, también se le llama *ósmosis inversa* a este proceso (10).

Además de las moléculas grandes, pueden separar algunas sales iónicas de bajo peso molecular, si se utilizan las membranas iónicas adecuadas. Las cargas de las membranas sirven entonces para evitar el paso de iones cargados, permitiendo únicamente el paso del disolvente. La ósmosis inversa se utiliza a gran escala para producir agua pura a partir de agua de mar.

La *difusión gaseosa* es un proceso de separación que hace recordar a la ultrafiltración, aunque el mecanismo físico es diferente. En la difusión gaseosa, se fuerza el paso de una mezcla gaseosa a través de una barrera metálica porosa (2). El componente gaseoso de

menor peso molecular fluye con mayor rapidez a través de la barrera, por lo que del otro lado de ésta, el gas se enriquece en ese componente. Sólo una fracción del gas que fluye hacia la barrera consigue atravesarla; el resto, agotado en el componente ligero, se elimina para un procesamiento posterior. Los costos de energía asociados con la compresión del gas son muy elevados, por lo que la difusión gaseosa tiene una sola aplicación industrial de importancia: la separación del uranio 235 del uranio 238. Existen plantas de difusión gaseosa con una inversión de más de mil millones de dólares, destinadas a la fabricación de U^{235} enriquecido, para los reactores nucleares.

Otros procesos de separación

Un gran número de importantes operaciones unitarias, involucra la separación de componentes de una mezcla, pero no se acostumbra agrupar las operaciones con los procesos usuales de separación.

La *evaporación, cristalización y secado*, se basan en la transferencia simultánea de calor y masa. En la evaporación, se concentra una solución líquida al evaporar parte del disolvente. Los requerimientos de calor son grandes, puesto que debe suministrarse el calor latente de vaporización del disolvente. La evaporación tiene muchas aplicaciones industriales en dondequiera que sea necesario concentrar soluciones. Lo que comúnmente se conoce como destilación de agua de mar, es en realidad un proceso de evaporación para recuperar agua potable.

Si se evapora una solución hasta alcanzar la saturación con el soluto, una evaporación adicional o un enfriamiento, resulta en una precipitación de cristales sólidos. Esto constituye la base física de la *cristalización*, una operación unitaria que se utiliza para separar solutos de una solución. La cristalización se utiliza en la industria para la fabricación de muchas sales inorgánicas. También puede usarse para separar mezclas de sales por cristalización fraccionada. La evaporación y cristalización se tratan con mayor detalle en el Cap. 19.

La operación de *secado*, separa un líquido de un sólido por vaporización del líquido. Esta importante operación unitaria se estudia en el Cap. 18.

La *deshumidificación* separa un vapor de una fase gaseosa, mediante el enfriamiento del gas hasta la condensación del vapor. Esta operación de transferencia de masa es la base para el acondicionamiento de aire; se trata en el Cap. 17.

Las mezclas de multifases pueden separarse en dos o más fracciones mediante varias operaciones. En este caso, la mezcla de fases debe ser heterogénea; esto es, las fases deben diferenciarse físicamente una de otra, aun cuando pueden estar finamente divididas e íntimamente mezcladas. Las mezclas de partículas sólidas pueden separarse en diferentes tamaños por *tamizado, elutriación, criba* o *clasificación*. Las partículas sólidas pueden separarse de líquidos por *filtración, centrifuga-*

ción o sedimentación. Las fases líquidas inmiscibles también pueden separarse por centrifugación, como en un separador típico de emulsiones. Los sólidos pueden separarse de los gases o líquidos y los líquidos de los gases, mediante separadores de tipo ciclón. Estas operaciones no involucran transferencia de masa en el sentido usual del término; por ello, no se les considera como operaciones de transferencia de masa. Los componentes son físicamente distintos, por lo que se requiere un proceso mecánico para separarlos, más que una operación de transferencia de masa. Las operaciones de separación mecánica se mencionan aquí para enfatizar la gran variedad de principios físicos en los que se basan las separaciones. Algunas de ellas se estudian en el Cap. 22.

En esta sección se han descrito brevemente las operaciones unitarias con las que se separan los componentes de una mezcla. Las separaciones que pueden ser descritas con el modelo físico de una etapa de equilibrio se tratan en los siguientes capítulos. En la Parte III de este libro se estudian muchos otros procesos de separación.

El concepto de etapas

Una *etapa* puede definirse como una unidad de equipo en la cual se ponen en contacto íntimo dos fases distintas que después se separan mecánicamente. Durante el contacto, varios componentes de la mezcla se redistribuyen entre las fases. Las dos fases resultantes alcanzan el equilibrio y tienen composiciones diferentes a las que tenían las fases iniciales. Mediante el contacto y la separación sucesivas de fases distintas (una operación de multietapas), son posibles grandes cambios en la composición de las fases. En una *etapa de equilibrio*, las dos fases se mezclan durante un tiempo suficiente para permitir que se establezca un equilibrio termodinámico entre las fases que salen de la etapa. En el equilibrio no existe cambio neto en la composición de las fases para condiciones de operación fijas. En el equipo industrial real resulta poco práctico permitir que el contacto dure un tiempo suficiente y la mezcla sea perfecta para alcanzar el equilibrio. Por ello, una *etapa real* no produce un cambio en composición tan grande como el de una etapa de equilibrio. La *eficiencia de etapa* se define como la razón del cambio de composición para una etapa real a la que se obtiene en una etapa de equilibrio. Las eficiencias de etapa para equipos industriales van desde un pequeño porcentaje hasta cerca del 100%. Debido a que una etapa de equilibrio da el mayor cambio posible de composición para un conjunto de condiciones de operación, recibe también el nombre de *etapa teórica* o ideal. Aunque rara vez se obtienen las condiciones de equilibrio en el equipo real, el concepto de etapa de equilibrio es útil en el análisis de operaciones en etapas. Como es frecuente en el caso de la ingeniería química, el modelo físico es una versión idealizada de una unidad real de equipo.

El cálculo de los requerimientos de equipo para operaciones industriales de multietapas involucra casi siempre la determinación del número de etapas de equilibrio y la aplicación de eficiencias de etapa para determinar el número de etapas reales necesarias. La eficiencia de etapas es un "factor de corrección" para trasladar el modelo físico de una etapa de equilibrio a la aplicación práctica de etapas reales en un equipo industrial. Las eficiencias de etapa dependen de la velocidad de transferencia de masa y del tiempo y área de contacto en una etapa única. Estos factores son funciones complejas de la geometría de la etapa y de las velocidades de flujo de las fases. La evaluación de eficiencias de etapa se estudia en el Cap. 16.

Equipo para operaciones en etapas

Los equipos para operaciones en etapas varían mucho en tamaño y detalles de construcción, pero hay bastantes similitudes fundamentales. En general, cada etapa de un equipo mezcla las dos fases que entran, a fin de que el material pueda transferirse con la mayor rapidez posible de una fase a la otra. Cada etapa debe separar las dos fases resultantes, en forma tan completa como sea posible y pasarlas a las etapas adyacentes. Algunos equipos industriales pueden consistir en una etapa única, pero son más frecuentes las unidades que emplean etapas múltiples con flujo a contracorriente de las dos fases. La operación de multietapas permite mayores cambios en la composición de las dos fases que la que se alcanza con una sola etapa.

El equipo para mezclar y separar las dos fases, depende de las características físicas de las fases. La fase L puede ser un líquido o un sólido finamente dividido; la fase V puede ser un gas, un vapor o un líquido, dependiendo del proceso de separación. Los gases y líquidos fluyen con facilidad de etapa a etapa, pero los sólidos son más difíciles de transferir. Por esta razón, las operaciones de etapas en las que existe un movimiento de sólidos a contracorriente con una fase fluida son menos comunes. Los sólidos finamente divididos pueden llegar a fluir, por lo que también esta técnica se utiliza para mover sólidos. En otros casos, el sólido debe transferirse mecánicamente de etapa a etapa.

Por razones económicas, las etapas deben verificar el contacto y la separación en la forma más simple posible. Por ejemplo, siempre que es posible se utiliza la fuerza de gravedad para separar las fases y promover su flujo, con objeto de evitar la necesidad de contar con equipo costoso como pueden ser bombas o centrífugas. Por otra parte, cuando la separación es difícil, el equipo caro puede ser inevitable.

Contacto gas-líquido

La gran diferencia de densidad entre los gases y los líquidos hace que la separación de fases sea relativa-

mente sencilla. Las dos fases pueden mezclarse burbujeando el gas a través del líquido. Las burbujas de gas se separan del líquido formando una fase gaseosa continua al alcanzar la superficie del líquido. Las etapas se construyen en una columna vertical, con objeto de que el líquido tenga un flujo descendente de etapa a etapa por gravedad. El gas fluye hacia arriba debido a la diferencia de presión que se mantiene mediante un compresor, un soplador o una caldera. Las etapas reales en una columna vertical se conocen como *platos* o *platillos*.

Se han sugerido, muchos tipos diferentes de platos pero sólo consideraremos unos cuantos. Por muchos años, los platos de capuchones fueron los más utilizados en las columnas de destilación y absorción. El capuchón (Fig. 2-2) tiene un diseño que dispersa la fase gaseosa en pequeñas burbujas que atraviesan la fase líquida. Evita que el líquido descienda por las entradas de gas a bajas velocidades de gas. Los capuchones se fabrican en diversas formas y en varios tamaños.

En la Fig. 2-3 se muestra un patrón de flujo típico en una columna con capuchones. Aquí, el líquido fluye a través del plato cayendo por el rebosadero al plato de abajo. El gas fluye hacia arriba a través de los capuchones y el líquido. La Fig. 2-3 es una representación esquemática simplificada de una columna de capuchones. En la Fig. 2-4 se muestra un plato de capuchones real.



Fig. 2-2 Capuchón desmontado. El tubo ascendente que se muestra en la parte baja de la fotografía se sujeta al plato. El gas fluye a través del tubo y llega al capuchón de donde sale por las rejillas verticales, dispersándose en la fase líquida que cubre las rejillas del capuchón. (Vulcan Mfg. Co.)

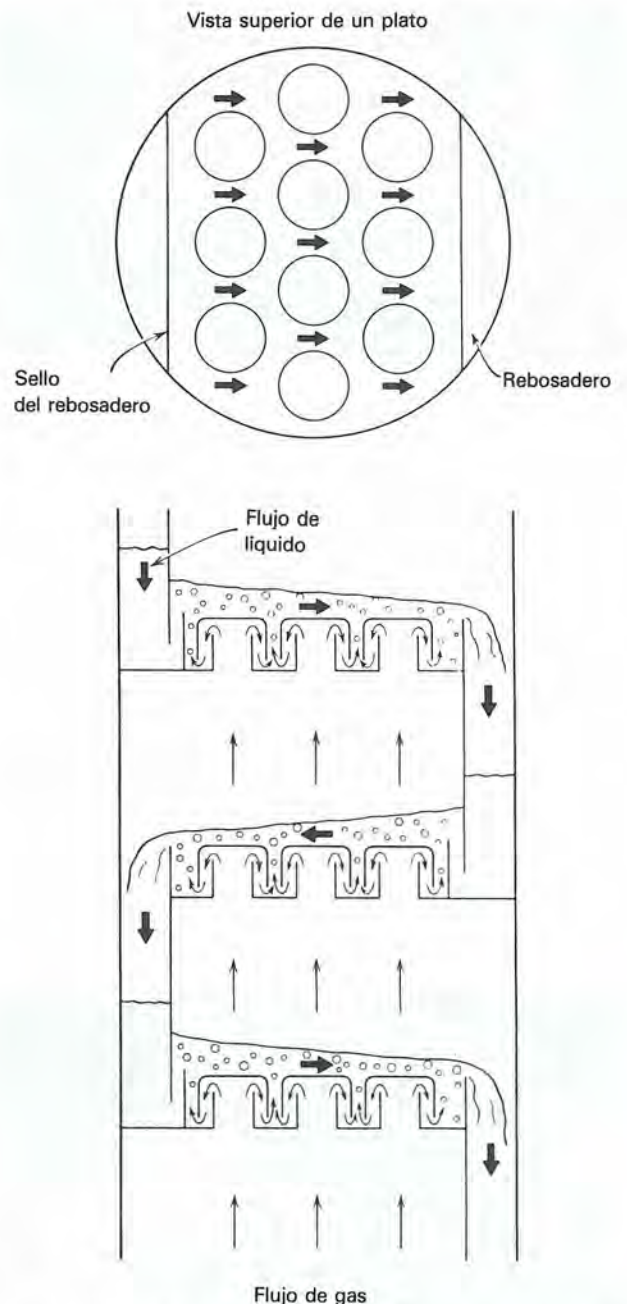


Fig. 2-3 Platos de capuchones con flujo cruzado para el contacto de dos fases líquidas. El gas fluye en el sentido que indican las flechas delgadas. El líquido fluye como lo indican las flechas gruesas. Los capuchones dispersan el gas en el líquido. Su diseño minimiza las fugas de líquido a través de las entradas de gas.

Las columnas de capuchones pueden operarse con alta eficiencia en un amplio intervalo de velocidades de flujo de las fases. La cantidad de líquido que puede escaparse a través de los canales de gas es pequeña y la altura de líquido en cada plato puede mantenerse al nivel deseado. Como resultado, el contacto líquido-gas puede ser satisfactorio para un amplio intervalo de velocidades de flujo, de tal manera que es posible mantener eficiencias relativamente constantes. Debido a que su costo es li-



Fig. 2-4 Plato de capuchones con flujo cruzado. Las represas (o vertederos) de lámina metálica que atraviesan el lado izquierdo y el lado derecho del plato que se muestra en la fotografía, mantienen al líquido en un nivel lo suficientemente elevado para cubrir las ranuras de los capuchones. El líquido fluye hacia abajo desde el plato superior cayendo en el lado izquierdo del plato que se muestra. Desde allí fluye por todo el plato hasta el vertedero del lado derecho. El vertedero de entrada mantiene el nivel del líquido cubriendo la parte baja del rebosadero, de tal forma que el gas no puede establecer cortocircuitos a través del rebosadero. El plato que se muestra tiene 6 pies de diámetro interno y el material de construcción es cobre. Se destina a una columna de destilación de 20 platos que se usa en una planta vitivinícola. (Cortesía de Vulcan Mfg. Co.)

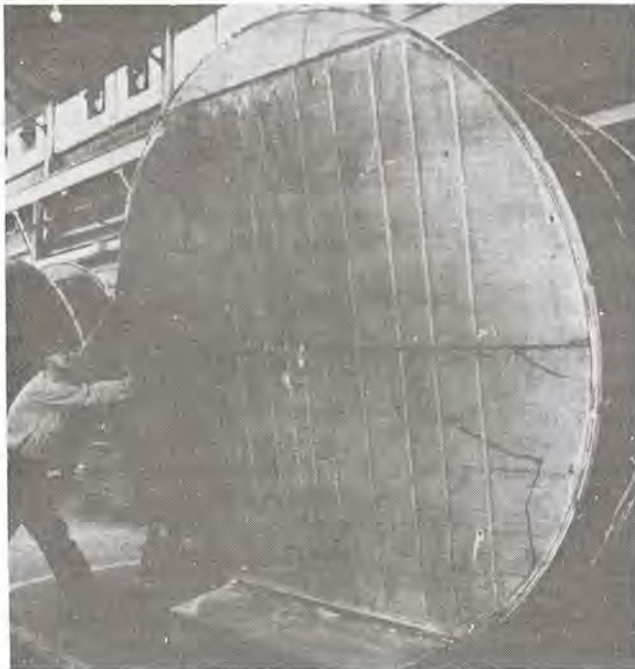


Fig. 2-5 Plato de malla con flujo cruzado. La fotografía muestra la parte inferior del plato, con el rebosadero adaptado al fondo. Los canales que van de la parte superior hasta el fondo proporcionan una mayor resistencia estructural, al igual que los soportes que cruzan el plato en forma horizontal. (Cortesía de Vulcan Mfg. Co.)

geramente alto, los platos de capuchones están siendo desplazados por otros tipos nuevos de platos, que se describen más adelante.

Los *platos perforados* han alcanzado una gran popularidad en los últimos años debido a su simplicidad y bajo costo. El tipo más común de plato perforado es el *plato de malla*, tal como el que se muestra en la Fig. 2-5, con flujo cruzado. Otro patrón de flujo que se emplea en los platos de malla es el que se muestra en la Fig. 2-6. Como el nombre lo indica, el plato de malla consiste en una lámina metálica perforada con cientos de agujeros redondos. Los agujeros son por lo general de 1/8 a 1/2

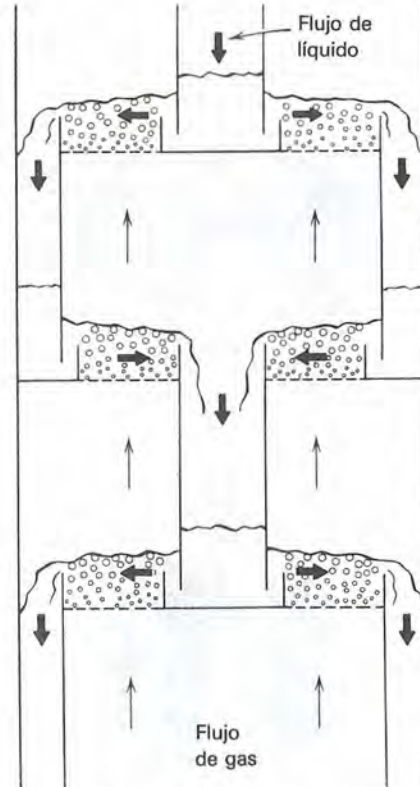
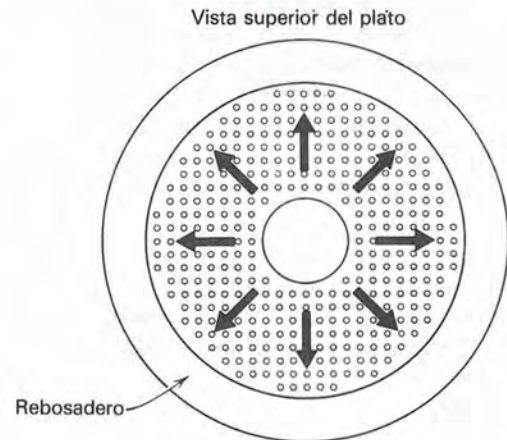


Fig. 2-6 Platos de malla de disco y rosquilla para el contacto de dos fases fluidas. Las flechas delgadas indican el flujo de gas, mientras que las gruesas señalan el flujo del líquido. El gas se dispersa en el líquido, en cada plato, al pasar a través de los pequeños agujeros del mismo.

plg de diámetro. El líquido fluye a través del plato y las burbujas de gas suben a través de los agujeros. Cuando se tienen altas velocidades de gas, el flujo de éste evita que el líquido descienda a través de las perforaciones, pero cuando la velocidad del gas es baja, es posible que se produzcan fugas serias. Estas fugas o *llanto*, pueden reducir significativamente la eficiencia de la etapa. Esta es una limitación de las platos de malla que debe considerarse cuidadosamente durante el diseño.

Un desarrollo más reciente de platos perforados es el de los *platos de válvula*. Las perforaciones en un plato

de válvulas se cubren con capuchones que se elevan, tal como se muestra en la Fig. 2-7. Los capuchones se elevan cuando el gas sube a través de las perforaciones, cayendo a su lugar para tapan la perforación cuando el flujo de gas disminuye. De esta forma, el llanto se reduce de manera significativa cuando el flujo de gas es bajo. Además, los capuchones dirigen al gas en sentido horizontal hacia el líquido, con lo cual se obtiene un mayor mezclado que en los platos de malla, en donde el gas pasa directamente hacia arriba a través del líquido. Las perforaciones en un plato de válvulas son con fre-

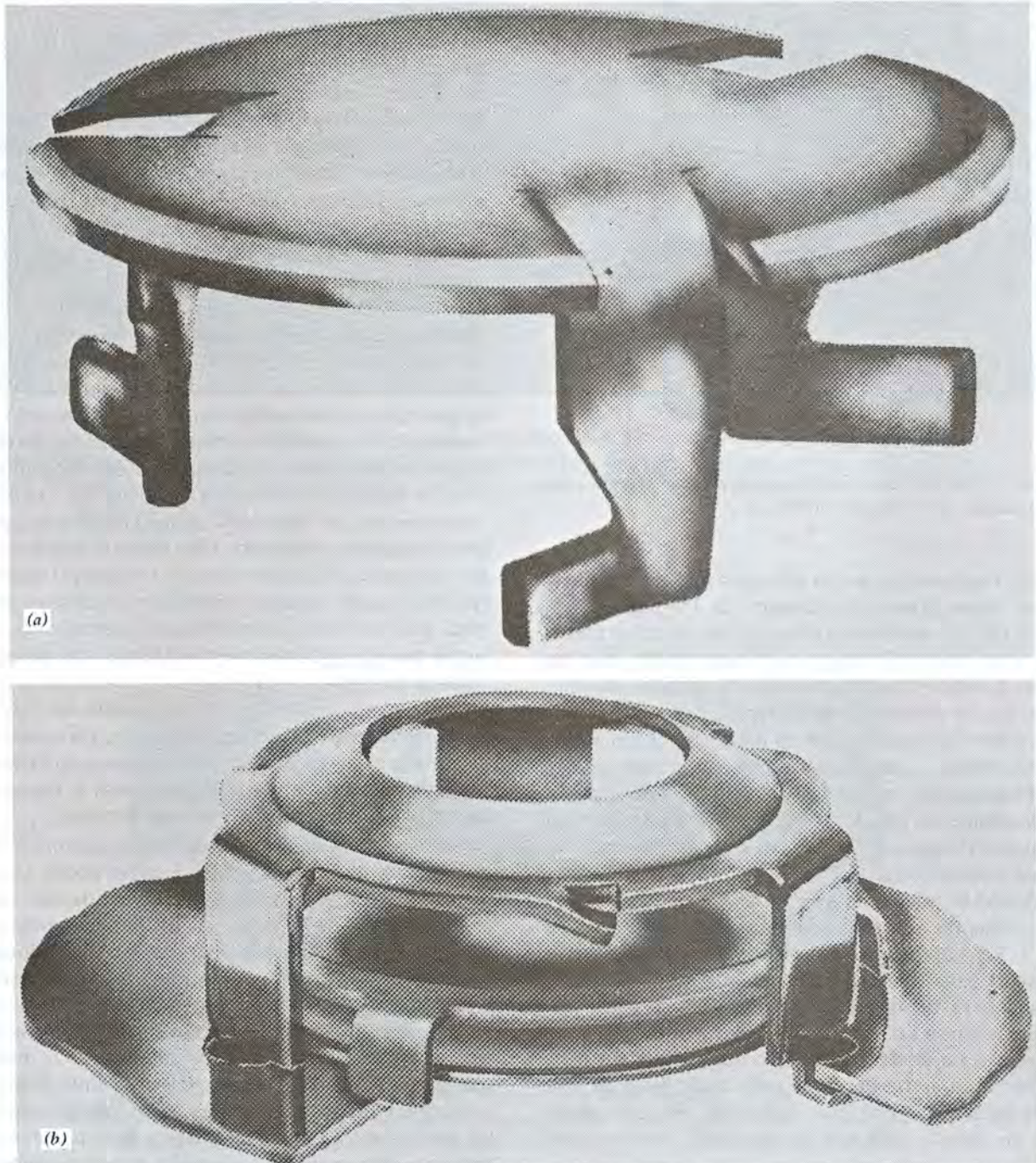


Fig. 2-7 Capuchones de válvula —se muestran dos tipos—. A medida que se reduce el flujo de gas, los capuchones caen hacia la superficie del plato, sellando la abertura para el flujo del líquido. (a) Modelo A-1. (b) Modelo V-1. (Cortesía de Glitsch, Inc.)



Fig. 2-8 Corte de una columna con platos de válvula para flujo cruzado. (Cortesía de Glitsch, Inc.)

cuencia, mayores que en los platos de malla — tan grandes que llegan a tener un diámetro de $1\frac{1}{2}$ plg.

En la Fig. 2-8 se muestra una columna típica de platos de válvulas con flujo cruzado. Los platos de válvulas pueden operar en un intervalo de velocidades de flujo mayor que el de los platos de malla. Su costo se encuentra entre el de los platos de malla y el de los platos de capuchones. Las eficiencias de etapa son altas y aproximadamente constantes para un intervalo amplio de velocidades de gas. Los platos de malla y de válvulas han logrado desplazar a los platos de capuchones en muchas aplicaciones.

El diseño de equipo para el contacto líquido-gas involucra problemas complejos de mecánica de fluidos. Las Refs, 7, 9 y 12 proporcionan procedimientos detallados de diseño para columnas de multietapas. Aquí se da únicamente un breve resumen de los problemas. La función principal de un plato es lograr un contacto íntimo entre el gas y el líquido. El espacio que se encuentra inmediatamente arriba del plato debe estar lleno de una mezcla líquido-gas con gran agitación. Por ello, debe existir un espacio para que las dos fases puedan separarse.

El *diámetro de un plato* depende en primer lugar del volumen de la fase gaseosa que sube a través de la torre. Es poco deseable contar con una velocidad eleva-

da del gas a través de los platos, debido a que origina una mayor caída de presión para el gas. Una gran caída de presión puede requerir de una distancia mayor entre los platos para la carga hidráulica necesaria, destinada al flujo descendente del líquido de plato a plato. La caída de presión en la fase gaseosa debe tener un valor especialmente bajo en las columnas que operan al vacío.

El líquido debe fluir a través del plato con una altura tal que cubra en forma adecuada las salidas de gas para todas las velocidades de flujo del mismo. Esto puede requerir de patrones de flujo complejos, con varias entradas y salidas en el caso de platos grandes. La Fig. 2-9 muestra un plato de válvulas con flujo dividido, mientras que la Fig. 2-10 muestra un terraplén en un plato de 40 pies de diámetro, necesario para mantener una altura del líquido razonablemente uniforme. La altura del líquido se controla con la velocidad del flujo del mismo y la altura del vertedero de salida. La caída de presión de la fase gaseosa, también depende de la altura del líquido sobre las salidas de gas. Por lo anterior, la altura del líquido debe ser suficiente para cubrir las salidas, pero no debe ser excesiva, debido a que puede originar caídas de presión no deseadas.

El *arrastre* es el acarreo de gotas de líquido en la fase gaseosa, hacia el plato superior. Dicho arrastre resulta indeseable debido a que disminuye la eficiencia de la etapa. El arrastre ocurre cuando las velocidades de flujo de gas son muy elevadas, por lo que el diámetro de la columna debe ajustarse para que la velocidad de gas no origine arrastre (para un gasto de masa específico). El arrastre tiende a disminuir la eficiencia de etapa y en consecuencia, se requieren etapas adicionales para lograr la separación deseada. Para evitar el arrastre puede ser necesario utilizar una columna de mayor diámetro. Por ello, resulta necesario establecer un balance económico entre el número de platos y el diámetro de la columna cuando se determina hasta qué grado debe eliminarse el arrastre.

Aunque una espuma en un plato puede dar lugar a un área mayor de superficie líquido-gas, con la consiguiente alta velocidad de transferencia de masa, la formación excesiva de espuma puede llegar a llenar el espacio entre los platos, originando un mayor arrastre.

La *inundación* ocurre cuando existe un arrastre excesivo o bien, cuando se presenta un retroceso excesivo del líquido en el rebosadero. La inundación resulta cuando se intenta hacer pasar demasiado líquido o demasiado gas a través de la columna. Evitar la inundación es un factor importante en la selección del diámetro de una columna. El espacio entre los platos debe ser suficiente para minimizar el arrastre. En las columnas grandes, el espacio entre los platos debe ser de al menos 2 pies para permitir que el personal de mantenimiento se meta entre los platos. Una separación más grande entre los platos, origina una altura mayor de la columna y en consecuencia, mayores costos. De nuevo, es necesario hacer un balance económico entre la separación de las etapas y el arrastre. Una separación más baja da lugar a una columna más pequeña y económica, pero causa un

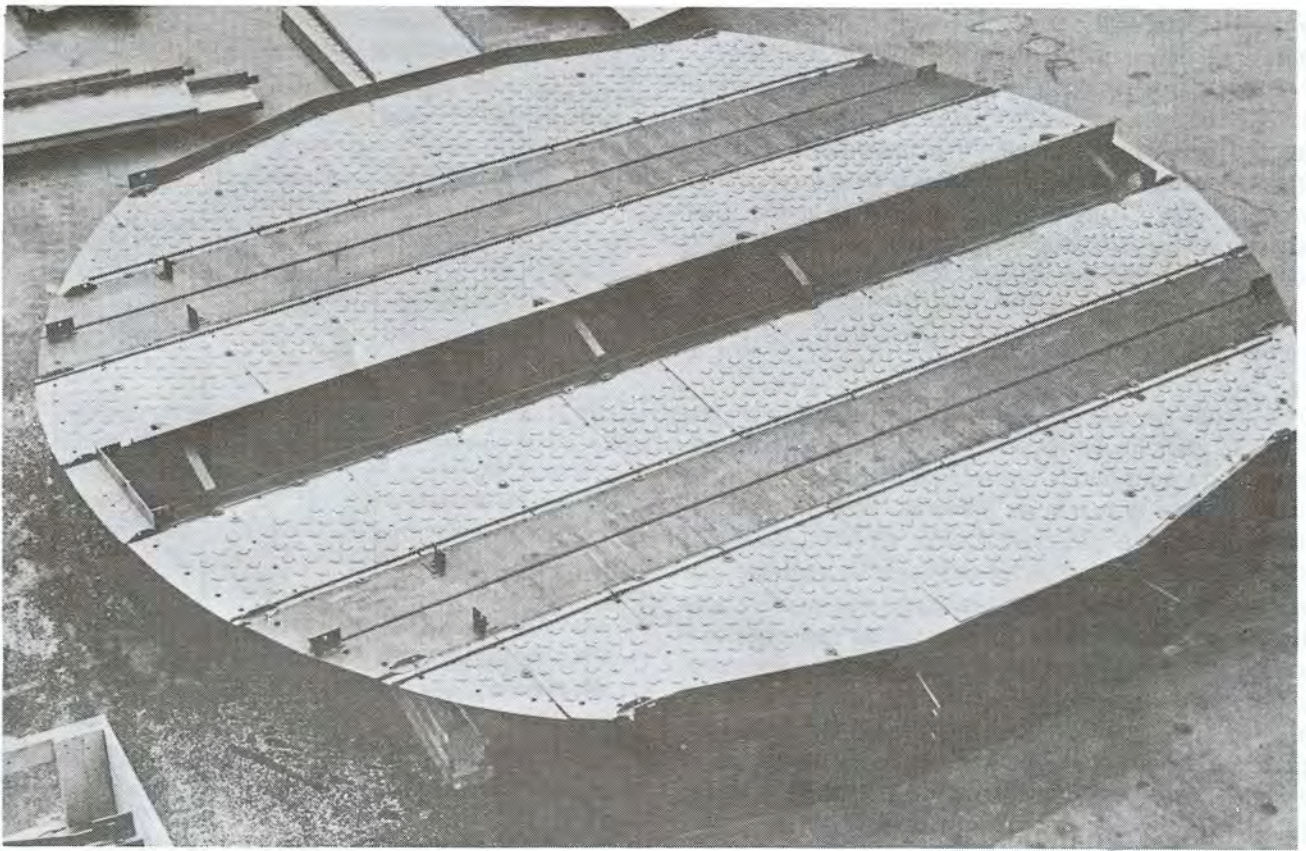


Fig. 2-9 Plato de válvulas con patrón de flujo dividido. El líquido fluye del plato superior a través de los rebosaderos, cayendo en las dos áreas rectangulares vacías que se muestran en la figura. De ahí fluyen hacia los lados en dirección a las orillas donde se encuentran los vertederos. (Cortesía de Glitsch, Inc.)

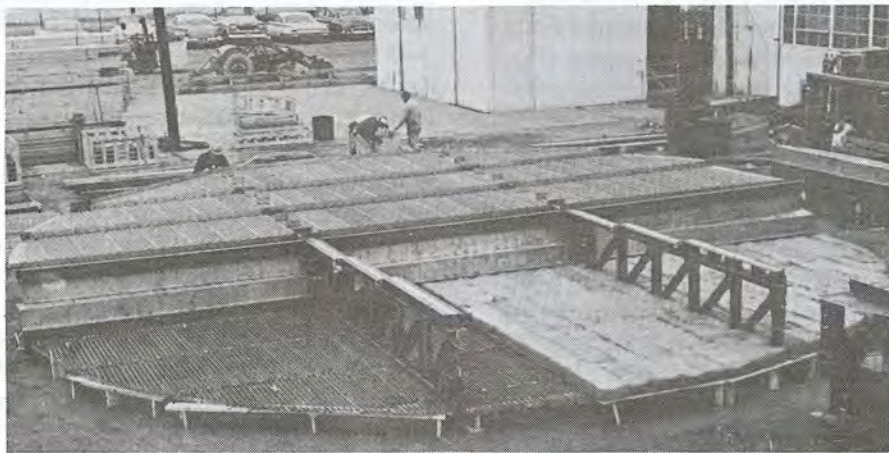


Fig. 2-10 Plato de válvulas con terraplén. Este plato tiene un diámetro tan grande (40 pies), que se necesita un terraplén para asegurar una altura uniforme del líquido. La sección del plato al frente de la fotografía aún no se instala. El rebosadero del plato superior se encuentra sobre el diámetro central, más allá del cual es posible observar 3 terraplanes de válvulas. La malla de alambre, instalada y de manera parcial en el lado derecho, ayuda a eliminar las gotas del líquido arrastradas por el gas del plato inferior. Los platos de este tamaño se utilizan en la destilación de petróleo crudo. (Cortesía de Glitsch, Inc.)

arrastre mayor que obliga a incrementar el número de platos, así como la altura y el costo de la columna.

En los platos de malla, el tamaño y número de agujeros debe seleccionarse con cuidado. Los agujeros grandes causan caídas de presión más bajas pero producen una dispersión mala de gas. Una gran área *total* de agujeros da lugar a una caída de presión pequeña, pero también a una velocidad baja de gas, que puede ser la causa de un llanto excesivo.

Contacto líquido-líquido

En la extracción con disolventes, se deben mezclar y separar dos líquidos. En el contacto líquido-gas, la gran diferencia de densidades entre el líquido y el gas, hace posible utilizar la fuerza de gravedad para promover el flujo y dispersar el gas en el líquido; en la extracción, la diferencia de densidad de las dos fases es pequeña, por lo que la fuerza de gravedad resulta menos efectiva para la dispersión de las fases. Los platos de capuchones y los de válvulas no se utilizan en la extracción líquido-líquido, debido a que el flujo inducido por gravedad no produce una dispersión adecuada de las fases. La fase ligera que fluye hacia arriba a través de los platos, no se divide en burbujas suficientemente pequeñas al pasar por los capuchones o por las válvulas.

Los platos de malla con rebosadero se utilizan mucho para el contacto líquido-líquido, aunque la construcción de la columna es diferente a la que se emplea para el contacto gas-líquido. Puede dispersarse ya sea el líquido pesado o el ligero. El líquido que moja preferentemente al plato debe ser la fase continua. De esta forma, la fase dispersa se desprende del plato con facilidad, formando pequeñas burbujas. En la Fig. 2-11a se muestra una sección de una columna típica, con la fase ligera dispersa. Esta columna se asemeja a un equipo con platos de malla para el contacto gas-líquido, con el líquido ligero actuando en forma análoga al gas. Una columna en la que se dispersa la fase pesada, es básicamente (Fig. 2-11b) una columna invertida en la que se dispersa la fase ligera. Esta sube por los rebosaderos y la fase pesada se dispersa *debajo* de cada plato. El diámetro de las perforaciones en un plato de malla oscila entre 1/8 y 1/4 plg. El número de perforaciones de un plato está determinado por la velocidad de flujo total de la fase dispersa. Para lograr una buena dispersión, el líquido debe tener una gran velocidad al pasar por los agujeros. La altura del líquido en el plato depende de la presión necesaria para alcanzar la velocidad de flujo que se requiere para pasar por las perforaciones. Por ejemplo, en la Fig. 2-11b, la altura de la fase pasada por encima del plato, debe ser suficiente para impulsar dicha fase a través de las perforaciones, a la velocidad requerida para lograr una buena dispersión. El área del rebosadero se selecciona de tal forma que la velocidad de flujo de la fase dispersa, sea lo suficientemente baja para prevenir que caigan en él gotas de la fase dispersa. En la Fig. 2-1 se muestran dos grandes columnas de extracción de multietapas.

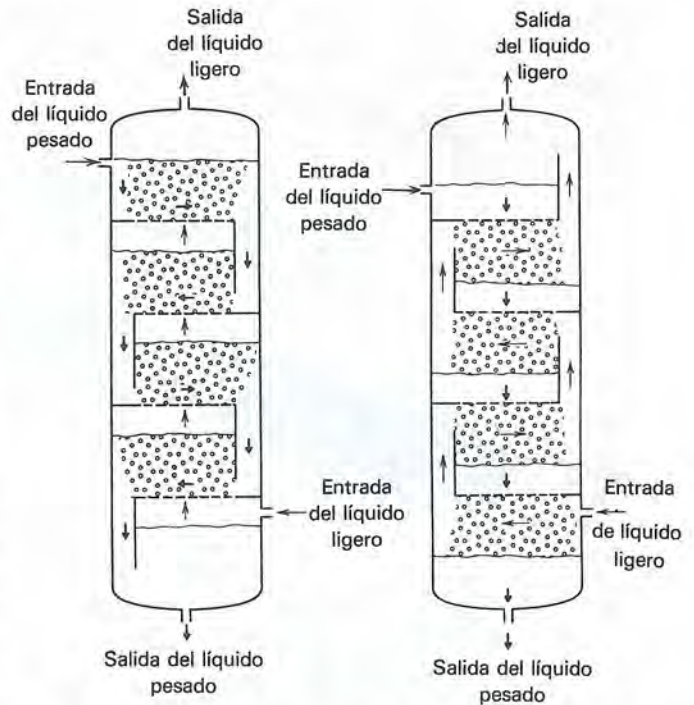


Fig. 2-11 Columnas de platos de malla para la extracción líquido-líquido. (a) Fase ligera dispersa; (b) fase pesada dispersa.

Se utilizan mezcladores mecánicos para lograr una mayor dispersión de las fases que la que se logra en una columna con platos de malla. Después de mezclarse, las dos fases se pasan a un sedimentador en el que se permite su separación, por medio de una sedimentación por gravedad. Estos equipos reciben el nombre de *mezclador-sedimentador*. En la Fig. 2-12a se muestra el diagrama esquemático de uno de estos equipos. Los mezcladores-sedimentadores se utilizan en serie para obtener una separación de multietapas (Fig. 2-12b).

El grado de mezclado puede variar en forma independiente, cambiando la velocidad y forma de impulsor. Aunque resulta deseable lograr un mezclado total, en ocasiones, cuando el mezclado es demasiado vigoroso, se forma una emulsión que no puede separarse por sedimentación. El tamaño del tanque sedimentador se determina por medio de las velocidades de flujo y la rapidez con que se sedimenta la fase dispersa. Si las densidades de las fases son casi iguales, la sedimentación es muy lenta, por lo que se requiere usar una centrífuga. Esta suministra una fuerza mucho mayor que la de gravedad. Las emulsiones también pueden separarse con centrífugas (véase el Cap. 22).

Se pueden emplear varios sistemas de flujo en los mezcladores-sedimentadores. Las etapas pueden ordenarse en sentido vertical para un flujo por gravedad de ambas fases. Un sistema en etapas, como el que se muestra en la Fig. 2-12b, puede usarse para flujo por gravedad cuando las unidades son demasiado grandes para un sistema vertical. Los sistemas horizontales requieren el bombeo de una o ambas fases. El mezclador-

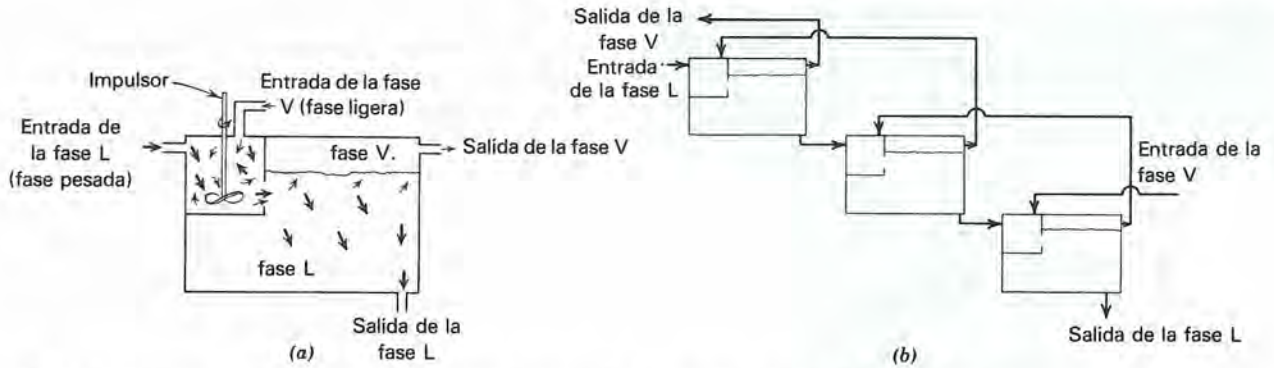


Fig. 2-12 Mezcladores-sedimentadores para la extracción líquido-líquido. Las dos fases que entran se mezclan completamente por medio del impulsor. La mezcla fluye hacia el tanque sedimentador, en donde se permite que las dos fases se separen por la acción de la gravedad. (a) Etapa simple de un mezclador-sedimentador. (b) Sistema multietapas de mezclador-sedimentador. [Cortesía de B. L. Coplan y cols., *Chem. Eng. Prog.*, 50 Págs. 403 (1954).]

sedimentador con "bomba de mezclado" (Fig. 2-13) utiliza al impulsor para mezclar y promover el flujo de etapa a etapa. Los mezcladores-sedimentadores son populares debido a que cuando se logra una buena mezcla, es posible obtener altas eficiencias de etapa (90 a 100%). Sin embargo, el uso de bombas accionadas con motores y de tanques sedimentadores separados, incrementa el costo por etapa en comparación con los platos de malla. El diseño de equipo para el contacto líquido-líquido se estudia en las Refs. 7 y 11.

Contacto sólido-fluido

El contacto de un sólido granular con un líquido o un gas en un sistema continuo de multietapas, se complica por los problemas que introduce el transporte de una fase sólida de una a otra etapa. El sólido puede moverse

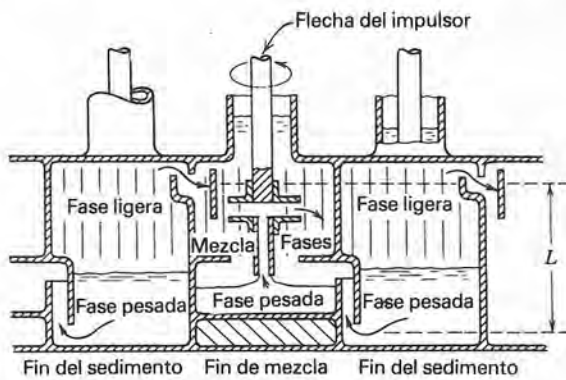


Fig. 2-13 Mezclador-sedimentador con "bomba de mezclado". Este corte posterior muestra tres etapas adyacentes. Las dos fases se mezclan por medio del impulsor de una bomba y después se permite que se separen en el lado opuesto de la etapa. Para simplificar el patrón del flujo, los impulsores se encuentran en los extremos opuestos de tapas adyacentes. El impulsor no sólo mezcla las fases, sino que también promueve el flujo de las fases entre las etapas.

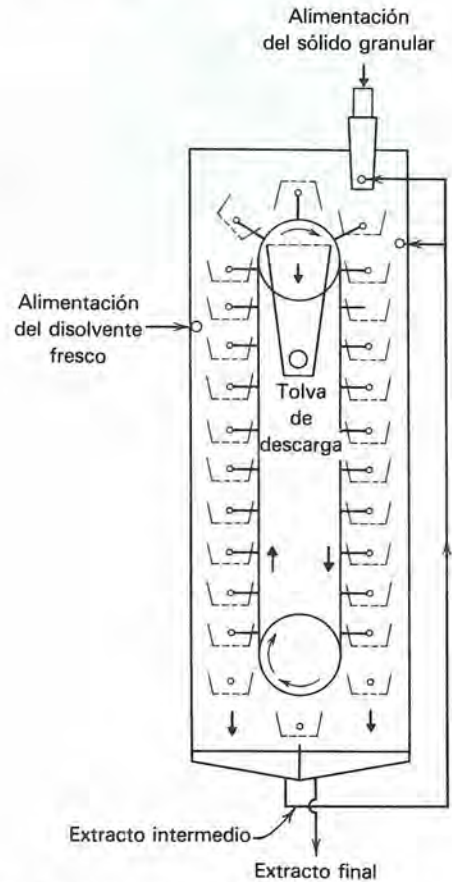
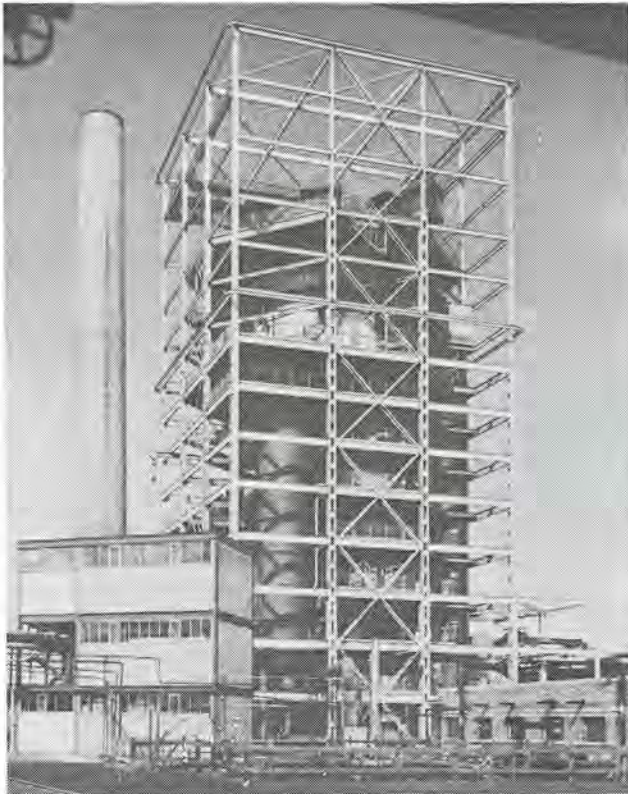


Fig. 2-14 Extractor de tipo canasta. El extractor Bollman se utiliza mucho para extraer el aceite de las semillas (como las de soya). Las semillas se alimentan a canastas perforadas que rotan en una banda continua. Las canastas se descargan en la parte más alta del ciclo, inmediatamente antes de volverlas a llenar. El disolvente fresco fluye a contracorriente de las canastas que suben del lado izquierdo. El extracto intermedio se colecta en el fondo en lado izquierdo y se bombea a la parte superior derecha, en donde se atomiza sobre las canastas descendentes. El flujo del lado derecho es en paralelo. El extracto final se filtra para eliminar las partículas sólidas. Un extractor de este tipo sirve para procesar 405 ton/día de soya. Consta de 38 canastas, cada una de las cuales tienen 6.5 pies de longitud, 2.3 pies de ancho y 1.8 pies de profundidad (3).



en canastas, tal como se muestra en la Fig. 2-14. El patrón de flujo resultante es en etapas, pero sólo la mitad del sistema opera a contracorriente. Un sólido finamente dividido puede fluir como un líquido o gas bajo condiciones apropiadas, tal como se describe en el Cap. 22. Esto suele implicar un flujo de gas o de líquido a través del sólido, con objeto de "fluidificarlo". El principio de la fluidificación de sólidos se aplica al diseño de algunos equipos para el contacto sólido-líquido. Un adsorbedor industrial grande utiliza un adsorbente que se fluidifica con gas en cada una de sus cinco etapas (Fig. 2-15). Para separaciones sólido-líquido a gran escala, como las que se observan en el enriquecimiento de minerales, se utilizan espesadores continuos (Cap. 22). La fase sólida sale de la etapa formando una suspensión con el agua.

Para concluir el estudio sobre el equipo de multi-etapas, es necesario reiterar que sólo hemos considerado el equipo en etapas. Muchos de los procesos de separación pueden utilizar también equipo de contacto continuo, que se estudia en el Cap. 16.

REFERENCIAS

1. A.I.Ch.E., *Chem. Engr. Prog. Symp. Series*, No. 24 (1955).
2. Benedict, M., and T. H. Pigford, *Nuclear Chemical Engineering*, McGraw-Hill, New York (1957).
3. Kenyon, R. L., N. F. Kruse, S. P. Clark, *Ind. Eng. Chem.*, 40, p. 186 (1948).
4. Li, N. N., *Recent Developments in Separation Science*, CRC Press, Cleveland (1972).
5. Mintz, M. S., *Ind. Eng. Chem.*, 55, No. 6, p. 18 (1963).
6. Nachod, F. C., and V. Schubert, eds., *Ion Exchange Technology*, Academic Press, New York (1960).

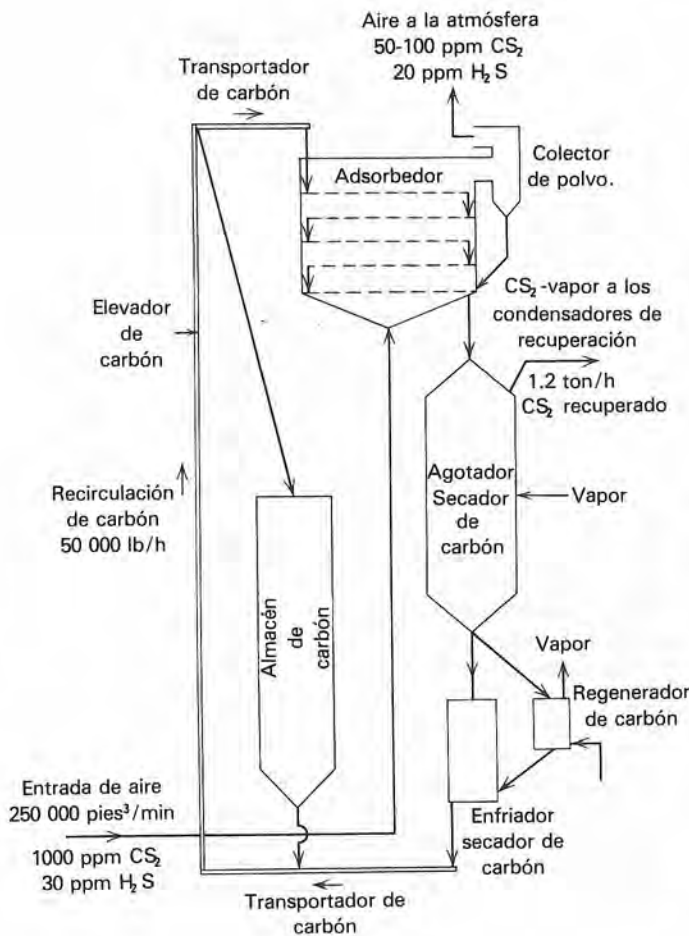


Fig. 2-15 Operación de un adsorbedor de cinco etapas a contracorriente. Este adsorbedor recupera el disulfuro de carbono del aire de salida de una planta de viscosa. La viscosa se fabrica tratando la celulosa con hidróxido de sodio y disulfuro de carbono (CS₂). El aire de la planta contiene 1000 ppm de CS₂ en volumen, por lo que es necesario adsorberlo en carbón fluidificado para reducir la concentración a 50-100 ppm. En el diagrama de flujo simplificado, se incluyen datos de proceso.

En la fotografía, el tanque negro que se encuentra al lado izquierdo de la estructura, es el tanque de almacenamiento de carbón. La columna de color claro y gran diámetro que se encuentra debajo de la parte superior de la estructura, es la sección de adsorción. Cada una de las etapas tiene un diámetro de 38 pies y está cubierta con 2 a 3 plg de carbón fluidificado. El equipo que se encuentra a la derecha del recipiente en el que se almacena el carbón, utiliza vapor de alta temperatura para eliminar el disulfuro de carbono del carbón sólido. El disulfuro de carbono se recupera del vapor por condensación, seguida de una separación mecánica de los líquidos inmiscibles.

En la chimenea alta del lado izquierdo de la estructura se utiliza el escape del aire de la planta cuando el adsorbedor no está en operación. Se muestra también el diagrama de flujo del proceso. (Courtaulds, Ltd., Coventry, Inglaterra.)