

FUNDAMENTOS DE LAS OPERACIONES DE SEPARACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA

COLECCIÓN: MONOGRAFÍAS DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla

CONSEJO DE REDACCIÓN

Arahal Junco, Consuelo. Universidad de Sevilla.

Carballar Rincón, Alejandro. Universidad de Sevilla.

Limón Marruedo, Daniel. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Luis, Alejandro José. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla.

Salas Gómez, Francisco. Universidad de Sevilla.

COMITÉ CIENTÍFICO

Aracil Santonja, Javier. Universidad de Sevilla y Universidad de Málaga

Bernelli Zazzera, Franco. Politecnico di Milano

Chinesta, Francisco. École Centrale de Nantes

Félez Mindan, Jesús. Universidad Politécnica de Madrid

Gallego Sevilla, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid

García-Lomas Jung, Francisco Javier. Universidad de Sevilla

Giner Maravilla, Eugenio. Universidad Politécnica de Valencia

González Díez, Isabel. Universidad de Sevilla

Montañés García, José Luis. Universidad Politécnica de Madrid

Montes Martos, Juan Manuel. Universidad de Sevilla

Navarro Esteve, Pablo José. Universidad Politécnica de Valencia.

Ollero de Castro, Pedro. Universidad de Sevilla

Verdú, Sergio. Princeton University

Pedro Ollero de Castro

FUNDAMENTOS DE LAS OPERACIONES DE SEPARACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA

2ª Edición



SEVILLA 2023

Serie: Ingeniería
Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla
Núm.: 17

COMITÉ EDITORIAL:

Araceli López Serena
(Directora de la Editorial Universidad de Sevilla)
Elena Leal Abad
(Subdirectora)
Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

1ª Edición: 2020
2ª Edición: 2023

Motivo de cubierta: columnas de separación de una planta química.

© Editorial Universidad de Sevilla 2023
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <https://editorial.us.es>
© Pedro Ollero de Castro 2023

Impreso en papel ecológico
Impreso en España-Printed in Spain
ISBN 978-84-472-2434-0
Depósito Legal: SE 40-2023
Diseño de cubierta: Santi García. santi@elmaquetador.es
Diseño de interior: F. Javier Payán Somet
Maquetación: Alejandro Escudero Santana
Impresión: Podiprint

Prefacio

Las principales unidades de proceso de una planta química son aquellas en las que se produce un cambio de composición química. Este cambio puede ser debido a una reacción química o a la separación de los componentes de una mezcla o solución. Esto último es lo que sucede en las denominadas operaciones de separación. El resto de unidades de proceso se dedican a operaciones auxiliares de almacenamiento, impulsión, cambio de fase, calentamiento y enfriamiento.

En este texto no se abordan las operaciones de separación mecánica de fases tales como la filtración de gases y líquidos o la decantación de dos fases líquidas. Las operaciones de separación de transferencia de masa que se incluyen en esta obra tienen como objetivo separar los componentes que forman parte de mezclas y soluciones homogéneas. Todas ellas se caracterizan porque al menos una sustancia se transfiere a través de otra a escala molecular (difusión molecular). Además de en Ingeniería Química, las operaciones de separación de transferencia de masa se emplean profusamente en Ingeniería Ambiental y en Biotecnología.

Existen excelentes libros que tratan con gran detalle y profundidad esta temática destacando entre ellos: “Mass Transfer Operations” de R.E. Treybal y “Separation Process Principles” de J.D. Seader y E.J. Henley. Estos manuales se citan frecuentemente como bibliografía recomendada para los estudiantes de grado y máster en Ingeniería Química y resultan muy útiles para profundizar en la materia y analizar casos de separación más complejos que los incluidos en esta obra.

El propósito de este texto es el de servir al estudiante del grado en Ingeniería Química como herramienta de estudio en la que pueda encontrar una explicación sencilla y detallada de los principios fundamentales de análisis y diseño básico de Operaciones de Separación de Transferencia de Masa. Con este objetivo se hace hincapié en los conceptos básicos y en la resolución de problemas sencillos soslayando casos complejos de separación multicomponente.

El primero de los temas es una introducción en la que se presentan y se definen las operaciones de separación de transferencia de masa. Los dos siguientes tratan sobre la Transferencia de Masa, es decir el fenómeno de transporte subyacente en todas las operaciones de separación que se estudian a lo largo del libro. El cuarto tema es de carácter

general y en él se analizan de forma detallada los diferentes de modelos de flujo y de contacto que pueden darse en los equipos de separación. Este análisis se realiza de forma independiente a la operación específica de la que se trate: se establecen los principios fundamentales de análisis de los equipos de contacto continuo y de contacto por etapas, la influencia que puede tener el grado de mezcla de las fases que intercambian masa y la disposición en iso- o en contracorriente de los fluidos entre los que se transfiere la masa. En los restantes ocho temas se tratan individualmente las principales operaciones de separación de transferencia de masa que pueden encontrarse en una planta de proceso: la absorción (tema 5), la destilación (tema 6), la extracción líquido-líquido (tema 7), la extracción sólido-líquido (tema 8), la adsorción (tema 9), la humidificación (tema 10), el secado de sólidos (tema 11) y la separación con membranas (tema 12).

En todos los casos, después de presentar los objetivos de cada operación separación, se analiza el equilibrio de fases y la cinética de transferencia y finalmente, se describen los métodos de análisis y diseño básico de los equipos en los que se llevan a cabo las separaciones. Cada tema incluye ejemplos de cálculo de equipos que ilustran los métodos de diseño que se presentan. Algunos ejemplos se resuelven “a mano” o gráficamente y otros haciendo uso del programa EES (“Engineering Equation Solver”). Se trata de una herramienta computacional muy fácil de usar y capaz de resolver con gran eficacia sistemas de ecuaciones algebraicas y diferenciales. Está dotado además de una amplia base de propiedades termodinámicas y de transporte que facilitan enormemente la solución de problemas de Ingeniería Química. En el capítulo dedicado a la operación de Destilación, el más extenso de esta obra, se hace también una referencia clara a Aspen Plus, un programa informático de amplio uso en simulación de procesos químicos, muy útil para resolver casos de separación multicomponente con equilibrios de fase complejos.

Se considera que el nivel de complejidad, la extensión y el contenido de esta obra son apropiados para un curso de grado en Ingeniería Química de entre 6 y 9 créditos ECTS dependiendo de si se incluyen todas las operaciones de separación mencionadas anteriormente o si se dejan fuera del curso algunas.

Finalmente quiero agradecer la inestimable colaboración que me han prestado en la elaboración de esta obra Custodia Fernández Baco y Fátima Arroyo Torralvo, profesoras de Ingeniería Química que han impartido conmigo durante años la asignatura Operaciones de Separación del grado en Ingeniería Química de la Universidad de Sevilla.

La edición final del texto, así como las figuras e ilustraciones que contiene, se deben al buen hacer y a la habilidad de Francisco Bueno Ramón cuyo excelente trabajo también quiero agradecer.

Índice

<i>Prefacio</i>	I
<i>Índice</i>	III
1 Introducción a las operaciones de separación	1
1.1 Introducción	1
1.2 Operaciones de separación de transferencia de masa	2
1.2.1 Operaciones de separación de equilibrio con agente de separación (energético o másico)	5
1.2.2 Operaciones de separación con una barrera semipermeable	7
1.2.3 Operaciones de separación basadas en un gradiente externo	7
1.3 Especificación y evaluación de operaciones de separación	7
1.4 Selección de operaciones de separación	9
1.5 Equipos para operaciones de separación de equilibrio	9
1.6 Bibliografía recomendada	11
2 Transferencia de masa y fenómenos de transporte	13
2.1 Introducción	13
2.2 Transferencia molecular de masa o difusión molecular	14
2.2.1 Transferencia molecular de masa en sistemas multicomponentes	16
2.3 Transferencia de masa en fluidos en movimiento	17
2.4 Analogía entre los fenómenos de transporte de masa, calor y cantidad de movimiento	21
2.5 Flujos molares y ley de Fick	22
2.6 Cálculo de difusividades binarias de masa en gases y líquidos	28
2.6.1 Difusividad en gases	29
2.6.2 Difusividades en líquidos	31
2.7 Bibliografía recomendada	37

3	Transferencia convectiva de masa	39
3.1	Introducción	39
3.2	La ecuación de transferencia convectiva de masa y los coeficientes de transporte	40
3.2.1	Otras definiciones de coeficientes de transferencia de masa	42
3.2.2	Definición de fuerza impulsora	42
3.2.3	Coefficientes medios de transferencia de masa	42
3.3	Ecuaciones teóricas de analogía entre los coeficientes de transporte	44
3.3.1	Analogías de Reynolds y de Sherwood y Karman	44
3.3.2	Analogía de Prandtl-Taylor	45
3.3.3	Analogías de Karman y Sherwood	45
3.4	Correlaciones empíricas y ecuaciones de analogía basadas en los factores j	46
3.4.1	Correlaciones empíricas y factores j para flujo por el interior de tuberías	47
3.4.2	Correlaciones empíricas y factores j para placas planas	47
3.4.3	Correlaciones empíricas y factores j para esferas	48
3.4.4	Factores j para flujo perpendicular a cilindros	52
3.4.5	Factores j para lechos fijos y fluidizados	52
3.4.6	Correlaciones para torres de relleno	54
3.5	Teoría de la película de Lewis y Withman	56
3.6	Transferencia convectiva de masa entre dos fases fluidas	58
3.6.1	Teoría o modelo de la doble película	58
3.6.2	Coefficientes globales de transferencia de masa	60
3.6.3	Concepto de etapa o resistencia controlante	61
3.7	Bibliografía recomendada	65
4	Modelos de contacto en operaciones de separación	67
4.1	Introducción	67
4.2	Operaciones de separación de contacto por etapas	70
4.2.1	Concepto de etapa real y de etapa de equilibrio	70
4.2.2	Sistemas multietapa o cascada de etapas	82
4.3	Equipos de contacto continuo	88
4.3.1	Flujo de pistón en ambas fases y disposición isocorriente	88
4.3.2	Flujo de pistón en contracorriente	91
4.4	Bibliografía recomendada	97
5	Absorción de gases	99
5.1	Introducción	99
5.2	Equilibrio de absorción	100
5.3	Disolventes de absorción	103
5.4	Equipos de absorción	104
5.5	Diseño de equipos de absorción	108

5.5.1	Torres de relleno	109
5.5.2	Columnas de platos	119
5.6	Bibliografía recomendada	123
6	Destilación	125
6.1	Introducción	125
6.2	Equilibrio líquido-vapor	126
6.2.1	Equilibrio L-V de mezclas ideales	126
6.2.2	Equilibrio L-V en mezclas no ideales	129
6.2.3	Coefficientes de distribución y volatilidad relativa	133
6.3	Destilación flash	134
6.4	Destilación multietapa y columnas de destilación	139
6.5	Destilación de mezclas binarias: el método de McCabe Thiele	144
6.5.1	Cálculo del número de etapas con el método $M - T$	150
6.5.2	Aporte y extracción de calor	151
6.5.3	Operación a reflujo total	151
6.5.4	Reflujo mínimo	152
6.6	Destilación multicomponente	157
6.6.1	Consideraciones previas al diseño	159
6.7	Diseño básico de columnas de destilación multicomponentes.	161
6.7.1	Método simplificado ("shortcut") de diseño de columnas de destilación	161
6.7.2	Diseño riguroso de columnas de destilación multicomponentes	167
6.8	Destilación azeotrópica heterogénea y extractiva	168
6.8.1	Destilación azeotrópica heterogénea	169
6.8.2	Destilación extractiva	170
6.9	Bibliografía recomendada	171
7	Extracción Líquido-Líquido	173
7.1	Introducción	173
7.2	Equilibrio Líquido-Líquido	176
7.2.1	Equilibrio tipo I	178
7.2.2	Equilibrio tipo II	179
7.2.3	Efecto de la temperatura y de la presión	180
7.2.4	Otras coordenadas triangulares para representar el equilibrio	180
7.2.5	Línea conjugada para interpolar datos de equilibrio	181
7.3	Elección del disolvente de extracción	182
7.4	Equipos de extracción	184
7.4.1	Mezclador-Decantador	185
7.4.2	Equipos multietapa sin agitación mecánica	186
7.4.3	Columnas con agitación mecánica y otros tipos de extractores	188
7.5	Cálculo de equipos de extracción líquido-líquido	190
7.5.1	Cálculo de una etapa de equilibrio	190

7.5.2	Extracción continua por etapas en contracorriente	192
7.5.3	Extracción con etapas en contracorriente y reflujo del extracto	197
7.6	Bibliografía recomendada	198
8	Extracción Sólido-Líquido	199
8.1	Introducción	199
8.2	Características básicas de los sistemas de extracción sólido-líquido	199
8.2.1	Distribución del soluto en la matriz sólida	200
8.2.2	Equilibrio práctico	201
8.2.3	Métodos de operación	201
8.3	Equipos y sistemas de extracción sólido-líquido	201
8.3.1	Extractores discontinuos y semicontinuos	201
8.3.2	Extractores continuos	204
8.4	Equilibrio en sistemas de extracción sólido-líquido y representación gráfica	205
8.4.1	Representación gráfica del equilibrio práctico	206
8.5	Análisis y diseño de sistemas de extracción sólido-líquido	208
8.5.1	Lixiviación en una única etapa	208
8.5.2	Cascada de etapas en contracorriente	210
8.6	Programa EES para extracción sólido-líquido	215
8.7	Bibliografía recomendada	217
9	Adsorción	219
9.1	Introducción	219
9.2	Fundamentos de adsorción	223
9.2.1	Equilibrio de adsorción	223
9.2.2	Cinética o dinámica de adsorción	227
9.3	Sistemas de adsorción	229
9.3.1	Adsorbentes	229
9.3.2	Equipos de adsorción	231
9.3.3	Sistemas de regeneración del adsorbente	232
9.4	Análisis y diseño de sistemas de adsorción	234
9.4.1	Adsorción en lecho fijo	237
9.5	Bibliografía recomendada	247
10	Humidificación	249
10.1	Introducción	249
10.2	Propiedades de un gas húmedo y equilibrio de fases	249
10.3	Enfriamiento de agua y torres de refrigeración	254
10.3.1	Fundamentos de análisis y diseño de torres de refrigeración	254
10.3.2	Tipos de torres de refrigeración	258

10.4	Enfriamiento y acondicionamiento de gases	261
10.4.1	Enfriamiento evaporativo de gases	261
10.4.2	Acondicionamiento de gases	261
10.4.3	Deshumidificación de gases	265
10.5	Programas EES para operaciones de humidificación	266
10.5.1	Programa EES para torre de refrigeración	266
10.5.2	Programa EES para sistema de acondicionamiento de aire	267
10.6	Bibliografía recomendada	268
11	Secado de sólidos	269
11.1	Introducción	269
11.2	Fundamentos del secado de sólidos	270
11.2.1	Equilibrio de secado	270
11.2.2	Cinética y mecanismos de secado	273
11.2.3	Estimación de la velocidad de secado	275
11.3	Secaderos industriales	277
11.3.1	Secaderos directos /indirectos	278
11.3.2	Secaderos continuos/discontinuos	279
11.3.3	Secaderos de bandejas	279
11.3.4	Secaderos de turbina	280
11.3.5	Secaderos rotatorios	281
11.3.6	Secaderos de lecho fluidizado	283
11.3.7	Secaderos por congelación (" <i>freeze dryers</i> ")	284
11.3.8	Secaderos a vacío de paletas	285
11.3.9	Secaderos bandas	285
11.3.10	Secaderos neumáticos	286
11.3.11	Secaderos de tambor	287
11.3.12	Secadero de aspersion o " <i>spray dryer</i> "	287
11.3.13	Secaderos con vapor sobrecalentado	288
11.4	Análisis y diseño de secaderos industriales	289
11.4.1	Balance de materia y energía de secaderos continuos	289
11.4.2	Análisis de secaderos continuos	290
11.4.3	Diseño de secaderos rotatorios a alta temperatura	295
11.5	Programa EES para secadero rotatorio	303
11.6	Bibliografía recomendada	306
12	Operaciones de separación con membranas	307
12.1	Introducción	307
12.2	Tipos de membranas y de módulos de membrana	307
12.3	Características generales de los procesos de separación con membranas	311
12.4	Procesos de separación con membranas	312
12.5	Transporte a través de membranas microporosas y de membranas densas	315

12.5.1	Transporte a través de membranas microporosas	315
12.5.2	Transporte a través de membranas densas: modelo solución-difusión	317
12.5.3	Modelos de flujo en módulos de membrana	319
12.6	Permeación o separación de mezclas gaseosas mediante membranas	319
12.6.1	Análisis de la permeación de gases	320
12.6.2	Análisis de un módulo cuyo modelo de flujo es mezcla perfecta	321
12.6.3	Configuración de etapas en cascada	324
12.7	Ósmosis Inversa	325
12.7.1	Análisis de la ósmosis inversa	325
12.7.2	Polarización por concentración	327
12.7.3	Plantas de ósmosis inversa	328
12.8	Bibliografía recomendada	332
	<i>Índice de Figuras</i>	333
	<i>Índice de Tablas</i>	339

1 Introducción a las operaciones de separación

1.1 Introducción

Las operaciones de separación tienen una importancia capital en los procesos y en las plantas químicas. La figura 1.1 muestra un diagrama de bloques básico y típico de un proceso químico cuyo objetivo es convertir unas materias primas (alimentación) que contiene los reactivos en un producto mediante una o varias reacciones químicas que son las que convierten moléculas (reactivos) presentes en las materias primas en moléculas del producto deseado. Las materias primas suelen contener impurezas o inertes que en muchas ocasiones no conviene que lleguen al reactor; si ese es el caso habrá que implementar un *sistema de separación* que sea capaz de separar esos componentes de los reactivos. Por otro lado, en un reactor la conversión de los reactivos en productos no suele ser completa y además suele haber reacciones secundarias que dan lugar a subproductos diferentes del producto deseado. Por ello, la corriente efluente del reactor, constituida por reactivos no convertidos, subproductos y el producto deseado debe ser procesada en un *sistema de separación* del que se obtendrán los reactivos para recircularlos, los subproductos y el producto con el grado de pureza deseado.

Así como la mezcla de varios componentes es un proceso espontáneo que va acompañado de un incremento de la entropía, la separación de componentes de una mezcla no lo es y requiere el aporte de energía para llevarla a cabo. Así, por ejemplo, la disolución (mezcla) de sal común en agua es un proceso espontáneo mientras que separar esos dos componentes de una solución se puede llevar a cabo por varios métodos de separación, pero todos requieren el aporte de energía:

- Evaporar el agua aportando calor para luego condensarla y obtener agua pura líquida
- Extraer calor (para lo cual se requiere energía) de la solución para congelar el agua y separar los cristales de hielo (agua pura)

- Bombear (aporte de energía mecánica) la solución salina a través de una membrana de *ósmosis inversa* que deja pasar el agua pero no la sal

Tanto en este ejemplo como en otros muchos, el aporte de energía es un factor de coste decisivo y, por ello, el que condiciona en buena medida el método de separación preferido entre las alternativas existentes.

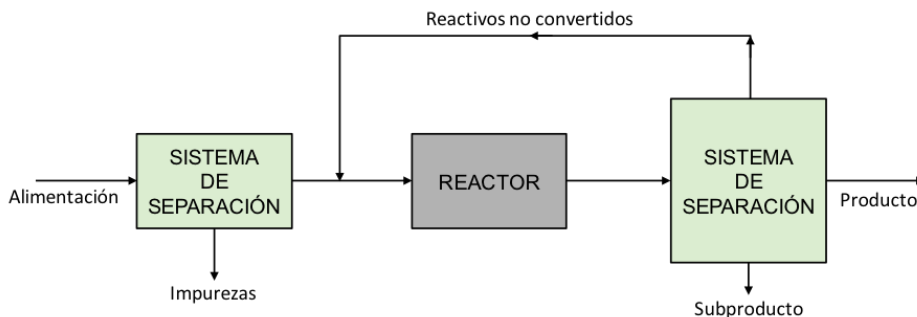


Figura 1.1 Diagrama de bloque básico de un proceso químico.

En este texto no se tratan las operaciones de *separación mecánica* que tienen por objetivo separar las diferentes fases existentes en una corriente de proceso. A esa categoría de operaciones de separación pertenecen, por ejemplo, la *filtración* de gases y de líquidos para separar partículas sólidas de la fase fluida y la *decantación* o la *centrifugación* para separar dos fases líquidas inmiscibles. En estas operaciones el mecanismo de separación involucra fuerzas mecánicas (gravedad, centrífuga) y eléctricas o magnéticas así como efectos de tamizado. Las operaciones de separación que se tratan en este texto son las llamadas *operaciones de transferencia de masa* que tienen por objetivo separar las distintas especies químicas o componentes presentes inicialmente en una *única* fase, es decir en una mezcla líquida, gaseosa o sólida. Aunque las operaciones de separación mecánica no se estudian en este texto si es importante conocerlas ya que, como se verá más adelante, están involucradas en muchas de las operaciones de transferencia de masa.

1.2 Operaciones de separación de transferencia de masa

La figura 1.2 muestra un esquema básico de una operación de separación. Una alimentación F , líquida o gaseosa constituida por dos o más componentes se separa en dos o más productos (P_1, P_2, \dots, P_n) que difieren entre sí y con la alimentación en su *composición* y que pueden diferir también entre sí y con la alimentación en la *fase* o estado de agregación. Así, por ejemplo, F puede estar constituida por una mezcla gaseosa al 50% de A y B y P_1 ser un producto gaseoso con un 90% de A y un 10% de B y P_2 ser un producto líquido con un 95% de B y un 5% de A . Este sería el caso de una operación de *fraccionamiento* cuyo propósito es obtener productos enriquecidos en determinados componentes. La separación de un componente presente en pequeñas cantidades en la alimentación sería una operación

de *purificación* muy usada en el tratamiento de emisiones gaseosas y en el tratamiento de aguas residuales para controlar la contaminación ambiental.

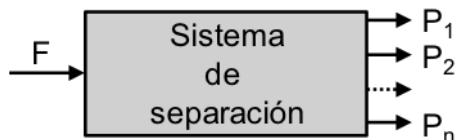


Figura 1.2 Esquema de un sistema de separación de una alimentación F en n productos P .

Para obtener diversos *productos a partir de una alimentación y forzar a las distintas especies químicas de F* a que se distribuyan de forma diferente en esos productos existen varias técnicas que aparecen esquematizadas en la figura 1.3. En todos los casos se requiere un *agente de separación* que puede ser *energético* (1.3a) (aportar/extraer calor), *másico* (1.3b) (una fase líquida, sólida o gaseosa), una *barrera semipermeable* (1.3c) o incluso un *gradiente* en un campo de fuerzas (1.3d). En todos los casos, aunque no aparezca explícitamente, como cuando se emplea un *agente de energético*, será necesario aportar energía en el proceso global de separación. En una *destilación* para separar componentes de una mezcla líquida se aporta calor (agente energético) para generar una fase vapor que estará enriquecida en los componentes más volátiles y una fase líquida enriquecida en los componentes más pesados. Así, por ejemplo, en una destilación etanol-agua la concentración de etanol en la fase vapor será mayor que la de alimentación y mientras que en la fase líquida ocurre lo contrario, la concentración de etanol será menor que la de la alimentación. Otros ejemplos de operaciones de separación en las que se usa un agente energético son la *evaporación* de soluciones, la *crystalización* o la *condensación parcial* de mezclas de vapores y gases. En una operación de *absorción* se utiliza un *agente másico* (un disolvente) para separar selectivamente uno o varios componentes de una mezcla de gases. Un ejemplo típico es la separación de NH_3 de aire usando agua como disolvente de absorción ya que el NH_3 es mucho más soluble en agua que el aire. Otros ejemplos de operaciones de separación en las que se usa un agente másico (líquido, gas o sólido) son: (a) la *desorción* o “*stripping*” para separar componentes de una mezcla líquida mediante un gas que arrastra selectivamente los componentes más volátiles, (b) la *extracción líquido-líquido* para separar componentes de una mezcla líquida con un disolvente líquido inmiscible que disuelve selectivamente las especies a separar, (c) la *extracción sólido-líquido* o *lixiviación* que separa componentes de una mezcla sólida con un disolvente líquido y (d) la *adsorción* para separar tanto componentes de mezclas líquidas como gaseosas mediante un sólido adsorbente que tiene la capacidad de retener selectivamente sobre su superficie determinadas especies químicas. En todas estas operaciones de separación están presentes dos fases inmiscibles y la separación se produce porque hay una *transferencia de masa* preferencial (mayor velocidad) de unos componentes respecto de otros de una fase a otra. La fuerza impulsora y la dirección de esa transferencia están determinadas por la *termodinámica* y la separación que puede conseguirse está limitada por el *equilibrio de fases*.

En las operaciones de separación que usan una barrera semipermeable o *membrana* (Figura 1.3c) las dos fases entre las que se produce la transferencia de masa son miscibles pero no se mezclan al estar separadas por la membrana. Los componentes se separan porque unos pasan mejor (más rápidamente) que otros a través de la membrana.

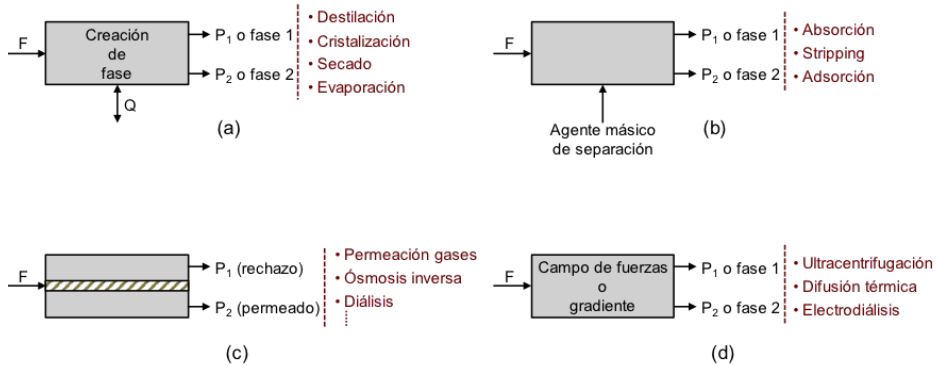


Figura 1.3 Tipos de operaciones de separación.

La separación de aire en nitrógeno (con algo de oxígeno) y aire enriquecido en oxígeno (con más de un 21 % (v) de oxígeno) se debe a que el oxígeno pasa mejor a través de una *membrana polimérica* que el nitrógeno.

Por último, también hay operaciones de separación muy especializadas basadas en la creación de un *campo de fuerzas* mecánico o eléctrico que actúa de forma diferente sobre las diferentes especies químicas que conforman la mezcla.

De acuerdo con lo descrito más arriba las operaciones de transferencia de masa también se pueden clasificar en:

- Operaciones de separación de equilibrio basadas en que los componentes se distribuyen de forma diferente en el equilibrio entre las fases (unos son más volátiles o tienen más presión de vapor que otros, unos son más solubles en una fase líquida que otros). En estas operaciones se requiere un agente másico o un agente energético de separación para aportar o generar la otra fase.
- Operaciones basadas en la diferente velocidad con la que los diferentes componentes de una mezcla atraviesan una membrana
- Operaciones basadas en que los diferentes componentes se desplazan a diferente velocidad o en diferente dirección cuando son sometidos a un campo de fuerzas.

La razón última por la cual se produce la separación entre los componentes de una mezcla está en que esos componentes tienen diferentes propiedades *moleculares*, *termodinámicas* o de *transporte*. Entre las propiedades moleculares están la *masa molecular*, la *forma* (factor acéntrico), la *carga eléctrica*, el *momento dipolar* y el *radio cinético*. La *presión de vapor*, la *solubilidad* y la *adsorptividad* son las propiedades termodinámicas involucradas, mientras que la *difusión molecular* es la propiedad de transporte que interviene. Sin

embargo, las transferencias de calor y de cantidad de movimiento también juegan un papel importante en muchas operaciones de separación.

1.2.1 Operaciones de separación de equilibrio con agente de separación (energético o másico)

En este texto se tratan todas las operaciones de separación de transferencia de masa basadas en la creación y/o en la adición de una fase mediante un agente energético o másico. La creación de una fase a partir de la alimentación puede hacerse por cualquiera de los siguientes mecanismos:

- Añadiendo calor y vaporizando un líquido como en las operaciones de vaporización parcial, destilación y evaporación de soluciones
- Extrayendo calor para condensar parcialmente una mezcla de vapores y gases (condensación parcial) o para crear una fase sólida pura a partir de una solución (cristalización)
- Reduciendo la presión para provocar la vaporización parcial de una mezcla líquida (vaporización flash)

La adición de un agente másico de separación para formar una fase a la que se transfieren determinados componentes de la alimentación se da en:

- La *absorción* de componentes de una mezcla gaseosa por un disolvente (agente másico)
- La *desorción* o “*stripping*” de componentes de un líquido mediante un gas o un vapor de arrastre (agente másico)
- La *extracción sólido-líquido*, operación de separación en la que un componente de una alimentación sólida se transfiere a la fase líquida (disolvente) añadida (agente másico)
- La *extracción líquido-líquido* para transferir componentes de una alimentación líquida a un disolvente (agente másico) que es parcialmente insoluble con la alimentación
- La *adsorción* para separar determinados componentes de una mezcla líquida o gaseosa mediante un sólido adsorbente (agente másico) que los retiene sobre su superficie.

Hay casos especiales de operaciones de separación que combinan las dos formas de generar una nueva fase a la que se transfieren selectivamente componentes de la alimentación:

- En *destilación extractiva* se usa un agente másico miscible con la alimentación que facilita la separación por destilación que, como se ha dicho antes, usa calor como agente de separación
- En el *secado de sólidos* (separación de un componente líquido que humedece un sólido) se suele combinar un agente másico (gas que arrastra los vapores) con el aporte de calor que facilita la vaporización del líquido

En general puede decirse que las operaciones con agente energético son preferibles a las que usan un agente másico. Ésta preferencia se debe a que las que usan un agente másico: (1) requieren un equipo de separación adicional para regenerar el agente másico y volver a utilizarlo, (2) siempre hay pérdidas de agente másico que hay que reponer, (3) posibilitan la contaminación del producto deseado con el agente másico y (4) el proceso global de separación suele ser más complejo y caro.

Cuando mediante la aplicación de calor o frío se genera una fase *pura* constituida por uno solo de los componentes de la alimentación, la operación no suele considerarse como una operación de transferencia de masa. Este es el caso de la *evaporación de soluciones* que contienen un soluto sólido con la finalidad de concentrarlas o de obtener el disolvente puro. En esta operación la fase vapor que se crea por aporte de calor está constituida sólo por el disolvente de la solución y la operación está gobernada sólo por transferencia de calor. También es el caso de una *cristalización* a partir de una solución en la que, por extracción de calor, se obtiene una fase sólida pura que, o bien son cristales de soluto o cristales del disolvente dependiendo de a qué lado de la composición eutéctica se encuentre la composición de la alimentación. La cristalización también está gobernada por transferencia de calor.

En las restantes operaciones de separación mencionadas la transferencia de calor y de cantidad de movimiento pueden jugar un papel significativo pero quien *controla* o *gobierna* la separación entre componentes es la *transferencia de masa de una fase a la otra*. Como se verá en temas posteriores la velocidad de transferencia de masa depende de un *coeficiente de transferencia* y de la *fuerza impulsora* que es la desviación respecto del equilibrio. Los distintos componentes tienen diferentes *coeficientes de transferencia* de masa pero la diferencia, sobre todo cuando hay fuerte turbulencia, no es muy apreciable. Lo que explica la gran diferencia en velocidad de transferencia y con ello el elevado grado de separación que se alcanza en muchas operaciones es la diferencia de concentraciones de equilibrio entre los componentes a separar. En el tema 3 se verá como la velocidad de transferencia de un componente *i* de una fase a otra se puede expresar mediante una *ecuación de transporte* como la siguiente:

$$N_i = K_{y_i}(y_i - y_i^*)$$

donde K_{y_i} es el *coeficiente global de transferencia de masa* correspondiente al componente *i*, y_i es la fracción molar del componente *i* en la fase desde donde se transfiere e y_i^* es la fracción molar de equilibrio correspondiente a la concentración de *i* en la fase receptora. La diferencia $(y_i - y_i^*)$ es la fuerza impulsora global para la transferencia de masa. Así, por ejemplo, en la separación del amoníaco presente en una corriente de aire mediante absorción en agua el factor determinante es la diferencia de solubilidades (concentraciones en el equilibrio) de los componentes a separar aire (oxígeno y nitrógeno) y amoníaco en agua. A 20°C y para una presión parcial de 1 atm las solubilidades de esos tres componentes son 0,0043, 0,0019 y 52,9 g/100g de agua respectivamente. Esta enorme diferencia de concentraciones en el equilibrio hace que el NH_3 se pueda separar muy bien del aire por simple absorción en agua. Aunque los coeficientes de transferencia de masa de los tres componentes puedan ser parecidos, la fuerza impulsora para la transferencia es mucho mayor para el amoníaco aun cuando el porcentaje de amoníaco en el aire sea muy inferior

al del oxígeno o al del nitrógeno. En términos de la ecuación anterior y_{NH_3} puede ser bastante menor que y_{O_2} e y_{N_2} pero $y_{NH_3}^*$ es mucho menor que las correspondientes al oxígeno y al nitrógeno y eso hace que la fuerza impulsora para el amoníaco sea mucho mayor. Visto de otra forma, $y_{O_2}^*$ e $y_{N_2}^*$ son mucho más próximos a y_{O_2} e y_{N_2} debido a la baja solubilidad de estos gases en agua.

1.2.2 Operaciones de separación con una barrera semipermeable

La separación con membranas se usa cada vez más debido a que las membranas que se pueden fabricar hoy en día son más selectivas, duraderas y baratas. En este tipo de operaciones la separación se produce debido a que la velocidad de paso a través de la membrana de los distintos componentes de la alimentación es diferente. La membrana separa la fase alimentación en dos fases producto, llamadas *rechazo* o *retenido* y *permeado*, que son completamente miscibles entre sí. En las membranas *densas* (no porosas) la velocidad de paso de cada componente depende de la *permeabilidad* de la membrana a ese componente y la permeabilidad depende a su vez de la *solubilidad* en la membrana y de la *difusividad* a través de la misma. Las membranas densas se usan en *permeación* de gases (separar mezclas gaseosas), en *perevaporación* (separación de mezclas líquidas) y en *osmosis inversa* (separación de un disolvente, generalmente agua, de sales disueltas). En las membranas *microporosas* es el tamaño diferente de los componentes a separar quien determina que la velocidad de paso sea diferente y se consiga la separación. La *diálisis*, la *ultrafiltración* y la *microfiltración* de soluciones para separar moléculas más o menos grandes de un líquido son ejemplos de operaciones de separación con membranas que usan membranas microporosas.

1.2.3 Operaciones de separación basadas en un gradiente externo

Este tipo de operaciones suelen tener unos objetivos muy específicos y no se emplean con tanta profusión en la industria química por lo que tampoco se tratan en este texto. En la *ultracentrifugación* se genera un campo de fuerzas centrífugas capaz de separar los componentes debido a su diferente masa. En la separación de los isótopos U-235 y U-238 del uranio, la alimentación es en fase vapor (hexafluoruro de uranio) y el componente más pesado que contiene el isótopo U-238 se concentra en la zona más externa de la centrífuga por donde sale separado de la alimentación enriquecida en U-235 que sale por la parte central de la centrífuga. La *difusión térmica* permite separar isótopos de una fase líquida o gas creando un gradiente térmico que hace que los componentes se difundan a diferente velocidad. La *electroforesis* se basa en la aplicación de campo de fuerzas eléctricas y se emplea para separar coloides cargados eléctricamente. La *electrodiálisis* combina membranas cargadas eléctricamente con la aplicación de un campo eléctrico para eliminar sales de una solución (desalinizar salmueras).

1.3 Especificación y evaluación de operaciones de separación

Los equipos de separación se diseñan y se operan para alcanzar unos requerimientos de *pureza* y *recuperación* determinados. La pureza de un producto obtenido en un sistema de separación se suele expresar en muchas ocasiones por el nivel de impurezas, es decir,

la cantidad de componentes distintos al deseado en la corriente producto. En el caso de productos gaseosos esa cantidad de productos no deseados se suele expresar en % molar y en el caso de productos líquidos en % en peso. En el contexto de operaciones de control de la contaminación ambiental se emplean generalmente ppm (partes por millón) y ppb (partes por billón) molares o másicas según sean productos gaseosos o líquidos. Si se trata de soluciones acuosas la pureza se suele expresar como moles por litro (molaridad), equivalentes por litro (normalidad) o moles por kg de disolvente (molalidad).

La *recuperación* de un determinado componente en un determinado producto del sistema de separación es la fracción de ese componente en la alimentación que sale con esa corriente de producto. La recuperación suele estar reñida con la pureza en el sentido de que conseguir una elevada pureza suele ser a costa de reducir la recuperación. Una buena separación es la que consigue simultáneamente una elevada pureza y una elevada recuperación.

La magnitud o la eficacia de la separación conseguida de dos componentes en dos corrientes de producto se suele expresar mediante el *factor de separación* definido como la relación entre las fracciones molares o másicas de esos dos componentes en un producto, dividida por esa relación de fracciones molares o másicas en el otro producto. El orden de los componentes se suele elegir para que el factor de separación sea mayor que 1. Si el factor de separación es 1 no hay separación y cuanto mayor sea mejor es la separación de esos dos componentes en esos dos productos.

Ejemplo 1.3.1 Considérese la operación de fraccionamiento citada al comienzo del apartado 2. Una alimentación constituida por *A* y *B* al 50% se separa en un producto P_1 que contiene un 90% de *A* y un producto P_2 que contiene un 5% de *A*. Se desea calcular la recuperación de *A* en el producto P_1 y el grado de separación que se logra entre los componentes *A* y *B*.

Solución. Tomando como base de cálculo 100 unidades en la alimentación, las dos ecuaciones de balance de materia que pueden plantearse son:

- Balance de *A*: $50 = 0,9 \cdot P_1 + 0,05 \cdot P_2$

- Balance de *B*: $50 = 0,1 \cdot P_1 + 0,95 \cdot P_2$

Resolviendo el sistema de ecuaciones resulta: $P_1 = 52,94$ y $P_2 = 47,06$. La recuperación de *A* en el producto P_1 es: $0,9 \cdot P_1 / 50 = 0,953$ (95,3%) y el grado de separación que se consigue es:

$$S = \frac{\frac{0,9}{0,1}}{\frac{0,05}{0,95}} = 171$$

La impureza en el producto P_1 es obviamente del 10%.

1.4 Selección de operaciones de separación

En general puede decirse que la separación de los componentes de una alimentación puede conseguirse aplicando diferentes tipos de operaciones de separación o incluso diferentes combinaciones entre ellas. Sin embargo es claro que entre las alternativas existentes habrá que elegir la mejor en términos de economía y seguridad. Elegir la mejor alternativa es una tarea compleja que desborda el ámbito de este texto. Es claro que cada operación de separación está asociada a alguna propiedad de los componentes; así por ejemplo, la destilación explota la diferencia de presiones de vapor o volatilidad, la adsorción la diferencia de adsorptividad o la diferencia de tamaños moleculares, etc. Por tanto, una operación de separación candidata será aquella asociada a una propiedad que tenga valores muy diferentes entre los componentes a separar.

Además de esta importante consideración, los factores específicos que han de tenerse en cuenta a la hora de seleccionar la mejor alternativa son los siguientes:

- En relación con la alimentación los factores importantes son:
 - La composición, en especial la concentración de los componentes a recuperar o separar
 - El caudal, la temperatura, la presión y el estado de agregación (gas, líquido, sólido)
- En relación con los productos los factores a considerar son:
 - La pureza requerida
 - La temperatura, la presión y el estado de agregación (gas, líquido, sólido) requeridos

Tanto en relación con la alimentación y como con los productos, las condiciones de temperatura, presión y estado de agregación tienen una importancia relativa ya que pueden alterarse con relativa facilidad mediante intercambiadores de calor, bombas y compresores. Sin embargo, siempre hay que tener presente que vaporizar un líquido de elevado calor latente de vaporización, condensar un vapor a muy baja temperatura o comprimir un gas contribuirán significativamente al coste de la operación.

Otros factores que hay que tener presentes a la hora de seleccionar la operación más apropiada son la facilidad de escalado, las limitaciones de espacio y la energía que se requiere poner en juego.

1.5 Equipos para operaciones de separación de equilibrio

Existe una enorme variedad de equipos para llevar a cabo las operaciones de separación de equilibrio. Sin embargo, en todos ellos lo que se busca esencialmente es:

- Una elevada área de superficie de interfase por unidad de tamaño (altura, volumen); esta es la razón por la cual:

- un gas se dispersa en forma de burbujas a través de un líquido como sucede en una columna de platos perforados o en una columna de borboteo
 - un líquido se dispersa en forma de gotas en un gas o en otro líquido inmisible como sucede en una columna o torre de pulverización
 - un líquido se distribuye sobre la superficie de partículas como sucede en una torre de relleno
- Una elevada velocidad relativa entre las fases que intercambian materia para lograr elevados coeficientes de transferencia de masa
 - Mantener una elevada fuerza impulsora (desviación respecto del equilibrio) a lo largo de todo el equipo siendo esta la razón por la cual muchos equipos de transferencia de masa operan en *contracorriente* (las dos fases circulan en sentido contrario a través del equipo) y no en *isocorriente*.

La figura 1.4 muestra esquemáticamente los equipos que suelen usarse cuando la operación de separación involucra una fase gas y una fase líquida. De entre ellos los más usados son las torres o columnas de *platos* y las columnas de *relleno*. Equipos muy similares a las columnas y a los *tanques de borboteo* también se emplean cuando las dos fases entre las que se transfiere materia son líquidas e inmiscibles entre sí.

Para las operaciones que involucran una fase sólida (adsorción, secado, lixiviación) la variedad de equipos es enorme y su descripción fuera del alcance de este tema. Baste decir aquí que el sólido suele estar presente en forma granular, para que la superficie sea amplia, constituyendo un *lecho fijo* de partículas atravesado por la fase fluida con la que se transfiere materia o un *lecho fluidizado* con las partículas suspendidas en la corriente fluida líquida o gas.

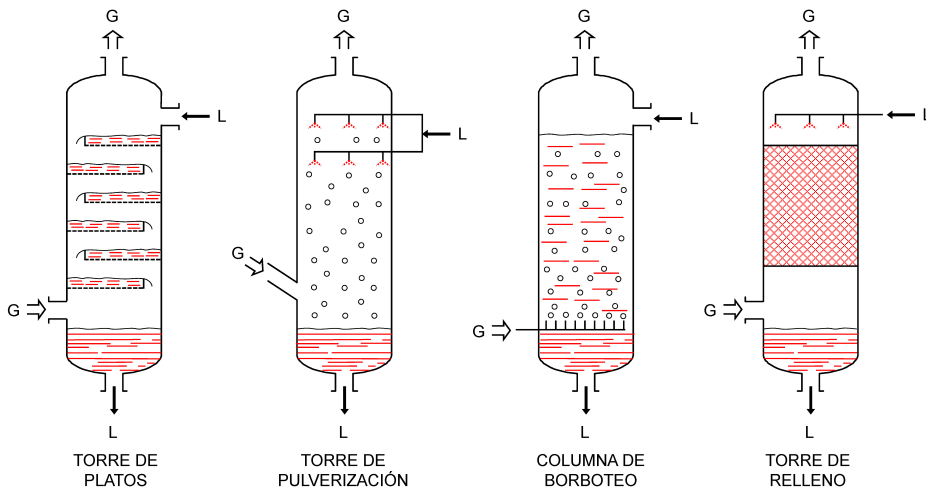


Figura 1.4 Equipos usados en operaciones de separación de equilibrio.

1.6 Bibliografía recomendada

King C.J.: *Separation Processes*, 2^a ed. (1980). Center for Studies in Higher Education

Treybal R.E.: *Mass Transfer Operations*, 3^a ed. (1980). McGraw-Hill

Seader J.D., Henley E.J. and Roper D.K.: *Separation Process Principles*, 3^a ed. (2011). John Wiley and Sons.