

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	Coeficientes 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	57
3.6.1	Teoría o modelo de la doble película	58
3.6.2	Coeficientes 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	104
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	Coeficientes 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	253
10.3.1	Fundamentos de análisis y diseño de torres de refrigeración	253
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 aspersión 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	Osmosis 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