

# Contenido

<b>Prefacio</b>	<b>xv</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>xvii</b>
<b>Acerca del autor</b>	<b>xix</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xxi</b>
<b>Capítulo 1 Introducción a la ingeniería de procesos de separación</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b> Importancia de las separaciones	1
<b>1.2.</b> El concepto de equilibrio	2
<b>1.3.</b> Transferencia de masa	4
<b>1.4.</b> Métodos para resolver los problemas	5
<b>1.5.</b> Prerrequisitos	7
<b>1.6.</b> Otras fuentes sobre ingeniería de procesos de separación	8
<b>1.7.</b> Resumen–Objetivos	9
Referencias	9
Tarea	10
<b>Capítulo 2 Destilación instantánea</b>	<b>12</b>
<b>2.1.</b> Método básico de destilación instantánea	12
<b>2.2.</b> Forma y fuentes de los datos de equilibrio	14
<b>2.3.</b> Representación gráfica del equilibrio binario vapor-líquido	16
<b>2.4.</b> Destilación instantánea binaria	21
<b>2.4.1.</b> Procedimiento secuencial de solución	21
Ejemplo 2-1. Separador de evaporación instantánea para etanol y agua	24
<b>2.4.2.</b> Procedimiento de solución simultánea	27
<b>2.5.</b> Equilibrio vapor-líquido con varios componentes	29
<b>2.6.</b> Destilación instantánea de varios componentes	34
<b>2.7.</b> Convergencia simultánea con varios componentes	40
<b>2.8.</b> Cálculo de los tamaños	45
<b>2.9.</b> Uso de tambores de destilación existentes	49
<b>2.10.</b> Resumen–Objetivos	50
Referencias	51
Tarea	52
Apéndice al capítulo 2 Simulación en computadora de la destilación instantánea	59

<b>Capítulo 3</b>	<b>Introducción a la destilación en columna</b>	<b>65</b>
3.1.	Desarrollo de una cascada de destilación	65
3.2.	Equipo de destilación	72
3.3.	Especificaciones	74
3.4.	Balances externos de la columna	76
	Ejemplo 3-1. Balances externos para destilación binaria	79
3.5.	Resumen-Objetivos	81
	Referencias	81
	Tarea	81
<b>Capítulo 4</b>	<b>Destilación en columna: balances internos, etapa por etapa</b>	<b>86</b>
4.1.	Balances internos	86
4.2.	Métodos de solución de etapa por etapa, para destilación binaria	90
	Ejemplo 4-1. Cálculos etapa por etapa con el método de Lewis	94
4.3.	Introducción al método de McCabe-Thiele	97
4.4.	Línea de alimentación	101
	Ejemplo 4-2. Cálculos de la línea de alimentación	106
4.5.	Método completo de McCabe-Thiele	109
	Ejemplo 4-3. Método de McCabe-Thiele	109
4.6.	Perfiles para destilación binaria	112
4.7.	Calentamiento con vapor directo	114
	Ejemplo 4-4. Análisis de McCabe-Thiele de calentamiento con vapor directo	114
4.8.	Procedimiento general de análisis McCabe-Thiele	118
	Ejemplo 4-5. Destilación con dos alimentaciones	120
4.9.	Otras situaciones en las columnas de destilación	125
4.9.1.	Condensadores parciales	125
4.9.2.	Vaporizadores totales	126
4.9.3.	Corrientes laterales o líneas de salida	126
4.9.4.	Vaporizadores intermedios y condensadores intermedios	128
4.9.5.	Columnas de agotamiento y enriquecimiento	129
4.10.	Condiciones límite de operación	130
4.11.	Eficiencias	133
4.12.	Problemas de simulación	135
4.13.	Usos nuevos para columnas viejas	136
4.14.	Reflujo subenfriado y vapor sobrecalentado al plato inferior	138
4.15.	Comparaciones entre los métodos analíticos y los gráficos	140
4.16.	Resumen-Objetivos	142
	Referencias	143
	Tarea	144
	Apéndice al capítulo 4 Simulaciones de destilación binaria en computadora	158
<b>Capítulo 5</b>	<b>Introducción a la destilación de varios componentes</b>	<b>161</b>
5.1.	Dificultades de cálculo	161
	Ejemplo 5-1. Balances externos usando recuperaciones fraccionarias	164
5.2.	Perfiles para destilación de varios componentes	167
5.3.	Resumen-Objetivos	172
	Referencias	172
	Tarea	172

<b>Capítulo 6</b>	<b>Procedimientos de cálculo exacto para destilación de varios componentes</b>	<b>176</b>
6.1.	Introducción a la solución matricial para destilación de varios componentes	176
6.2.	Balances de masa de componentes en forma de matrices	178
6.3.	Proposición inicial para tasas de flujo	181
6.4.	Cálculos de punto de burbuja	181
	Ejemplo 6-1. Temperatura de punto de burbuja	183
6.5.	Método $\theta$ de convergencia	184
	Ejemplo 6-2. Cálculo de matrices y convergencia con $\theta$	186
6.6.	Balances de energía en forma matricial	191
6.7.	Resumen-Objetivos	194
	Referencias	195
	Tarea	195
	Apéndice al capítulo 6 Simulaciones en computadora de columnas de destilación de varios componentes	200
<b>Capítulo 7</b>	<b>Métodos abreviados aproximados para destilación de varios componentes</b>	<b>205</b>
7.1.	Reflujo total: Ecuación de Fenske	205
	Ejemplo 7-1. Ecuación de Fenske	209
7.2.	Reflujo mínimo: Ecuaciones de Underwood	210
	Ejemplo 7-2. Ecuaciones de Underwood	214
7.3.	Correlación de Gilliland para la cantidad de etapas a relación de reflujo finita	215
	Ejemplo 7-3. Correlación de Gilliland	217
7.4.	Resumen-Objetivos	219
	Referencias	219
	Tarea	220
<b>Capítulo 8</b>	<b>Introducción a métodos complejos de destilación</b>	<b>225</b>
8.1.	Ruptura de azeótropos con otros separadores	225
	Ejemplo 8-1. Secado de benceno por destilación	231
8.2.	Procesos de destilación azeotrópica binaria heterogénea	227
8.2.1.	Azeótropos heterogéneos binarios	227
8.2.2.	Secado de compuestos orgánicos parcialmente miscibles con agua	230
	Ejemplo 8-2. Destilación por arrastre con vapor de agua	232
8.3.	Destilación por arrastre de vapor	234
8.4.	Procesos de destilación a dos presiones	238
8.5.	Sistemas ternarios complejos de destilación	239
8.5.1.	Curvas de destilación	240
8.5.2.	Curvas de residuo	243
8.6.	Destilación extractiva	245
8.7.	Destilación azeotrópica con solvente agregado	251
8.8.	Destilación con reacción química	255
8.9.	Resumen-Objetivos	258
	Referencias	258
	Tarea	260
	Apéndice al capítulo 8 Simulación de sistemas complejos de destilación	270
<b>Capítulo 9</b>	<b>Destilación intermitente</b>	<b>276</b>
9.1.	Destilación intermitente binaria: Ecuación de Rayleigh	278

9.2.	Destilación intermitente binaria simple	279
	Ejemplo 9-1. Destilación simple de Rayleigh	281
9.3.	Destilación intermitente a nivel constante	283
9.4.	Destilación intermitente por arrastre con vapor de agua	284
9.5.	Destilación intermitente en varias etapas	285
9.5.1.	Relación de reflujo constante	286
	Ejemplo 9-2. Destilación intermitente en varias etapas	286
9.5.2.	Relación de reflujo variable	290
9.6.	Tiempo de operación	291
9.7.	Resumen-Objetivos	292
	Referencias	292
	Tarea	293
<b>Capítulo 10 Diseño de columnas de platos y empacadas</b>		<b>301</b>
10.1.	Descripción de los equipos en las columnas de platos	301
10.1.1.	Platos, bajantes y vertederos	304
10.1.2.	Entradas y salidas	306
10.2.	Eficiencias de platos	309
	Ejemplo 10-1. Estimación de la eficiencia general	312
10.3.	Cálculo del diámetro de la columna	314
	Ejemplo 10-2. Cálculo del diámetro para una columna de platos	318
10.4.	Distribución y consideraciones hidráulicas para platos perforados	320
	Ejemplo 10-3. Distribución de plato y cálculos hidráulicos	324
10.5.	Diseño de platos de válvulas	327
10.6.	Introducción al diseño de columnas empacadas	329
10.7.	Partes internas de las columnas empacadas	329
10.8.	Altura del empaque. Método de la Hetp	331
10.9.	Inundación de la columna empacada y cálculo del diámetro	333
	Ejemplo 10-4. Cálculo del diámetro de una columna empacada	338
10.10.	Consideraciones económicas	341
10.11.	Resumen-Objetivos	345
	Referencias	345
	Tarea	348
<b>Capítulo 11 Economía y conservación de energía en la destilación</b>		<b>354</b>
11.1.	Costos de destilación	354
11.2.	Efectos de la operación sobre los costos	359
	Ejemplo 11-1. Estimación del costo para una destilación	364
11.3.	Cambios en capacidades de la planta	366
11.4.	Conservación de la energía en la destilación	366
11.5.	Síntesis de secuencias de columnas para destilación de varios componentes casi ideales	370
	Ejemplo 11-2. Secuenciación de columnas con heurísticas	374
11.6.	Síntesis de sistemas de destilación para mezclas ternarias no ideales	376
	Ejemplo 11-3. Desarrollo de procesos para separar una mezcla ternaria compleja	378
11.7.	Resumen-Objetivos	380
	Referencias	380
	Tarea	382

<b>Capítulo 12</b>	<b>Absorción y arrastre</b>	<b>385</b>
12.1.	Equilibrios de absorción y arrastre	387
12.2.	Líneas de operación para absorción	389
	Ejemplo 12.1. Análisis gráfico de la absorción	392
12.3.	Análisis del arrastre	394
12.4.	Diámetro de la columna	396
12.5.	Solución analítica: La ecuación de Kremser	397
	Ejemplo 12-2. Análisis de separador de arrastre con la ecuación de Kremser	402
12.6.	Absorbedores y separadores de arrastre con varios solutos diluidos	403
12.7.	Solución matricial para absorbedores y separadores de arrastre con soluciones concentradas	406
12.8.	Absorción irreversible	410
12.9.	Resumen-Objetivos	411
	Referencias	412
	Tarea	413
	Apéndice al capítulo 12 Simulaciones de absorción y arrastre en computadora	421
<b>Capítulo 13</b>	<b>Extracción inmiscible, lavado, lixiviación y extracción supercrítica</b>	<b>424</b>
13.1.	Procesos y equipos de extracción	424
13.2.	Extracción a contracorriente	428
13.2.1.	Método de McCabe-Thiele para sistemas diluidos	428
	Ejemplo 13-1. Extracción diluida a contracorriente con fases inmiscibles	432
13.2.2.	Método de Kremser para sistemas diluidos	434
13.3.	Extracción fraccionada diluida	435
13.4.	Extracción en una etapa y con flujo cruzado	439
	Ejemplo 13-2. Extracción de una proteína con una etapa y flujo cruzado	440
13.5.	Extracción con fases inmiscibles y concentradas	443
13.6.	Extracción intermitente	444
13.7.	Procedimientos generalizados de McCabe-Thiele y de Kremser	445
13.8.	Lavado	448
	Ejemplo 13-3. Lavado	451
13.9.	Lixiviación	452
13.10.	Extracción con fluido supercrítico	454
13.11.	Aplicación a otras separaciones	457
13.12.	Resumen-Objetivos	457
	Referencias	457
	Tarea	459
<b>Capítulo 14</b>	<b>Extracción de sistemas parcialmente miscibles</b>	<b>468</b>
14.1.	Equilibrios en extracción	468
14.2.	Cálculos en mezclado y la regla de la palanca	471
14.3.	Sistemas de una etapa y flujo cruzado	474
	Ejemplo 14-1. Extracción en una etapa	474
14.4.	Cascadas de extracción a contracorriente	477
14.4.1.	Balances externos de masa	477
14.4.2.	Puntos de diferencia y cálculos de etapa por etapa	479
14.4.3.	Problema completo de extracción	483
	Ejemplo 14-2. Extracción a contracorriente	483

14.5.	Relación entre los diagramas de McCabe-Thiele y triangulares	485
14.6.	Flujo mínimo de solvente	486
14.7.	Simulaciones de la extracción en computadora	488
14.8.	Lixiviación con tasas de flujo variables	489
	Ejemplo 14-3. Cálculos para lixiviación	490
14.9.	Resumen-Objetivos	492
	Referencias	492
	Tarea	493
	Apéndice al capítulo 14 Simulación de la extracción en computadora	499
<b>Capítulo 15 Análisis de la transferencia de masa</b>		<b>501</b>
15.1.	Fundamentos de la transferencia de masa	501
15.2.	Análisis de las columnas de destilación con altura y número de unidades de transferencia (HTU y NTU)	504
	Ejemplo 15-1. Destilación en una columna empacada	508
15.3.	Relación entre $H_{ETP}$ y HTU	511
15.4.	Correlaciones de transferencia de masa para torres empacadas	513
15.4.1.	Correlaciones detalladas para empaques aleatorios	513
	Ejemplo 15-2. Estimación de $H_o$ y $H_L$	515
15.4.2.	Correlaciones sencillas	520
15.5.	Análisis HTU-NTU de absorbedores y separadores de arrastre	521
	Ejemplo 15-3. Absorción de $SO_2$	525
15.6.	Análisis HTU-NTU de absorbedores concurrentes	526
15.7.	Transferencia de masa en un plato	528
	Ejemplo 15-4. Estimación de la eficiencia de plato	530
15.8.	Resumen-Objetivos	531
	Referencias	531
	Tarea	532
<b>Capítulo 16 Introducción a los procesos de separación con membrana</b>		<b>535</b>
16.1.	Equipos de separación con membrana	537
16.2.	Conceptos relacionados con las membranas	541
16.3.	Permeación de gases	544
16.3.1.	Permeación de mezclas binarias de gases	544
16.3.2.	Permeación binaria en sistemas perfectamente mezclados	547
	Ejemplo 16-1. Permeado de gas bien mezclado-solución	
	analítica secuencial	549
	Ejemplo 16-2. Permeación de gas bien mezclado-soluciones	
	simultáneas analítica y gráfica	550
16.3.3.	Permeación de varios componentes en sistemas perfectamente mezclados	555
	Ejemplo 16-3. Permeación gaseosa perfectamente mezclada	
	de varios componentes	556
16.4.	Ósmosis inversa	558
16.4.1.	Análisis de la ósmosis y la ósmosis inversa	558
	Ejemplo 16-4. Ósmosis inversa sin polarización de concentración	562
16.4.2.	Determinación experimental de las propiedades de las membranas	564
	Ejemplo 16-5. Determinación de las propiedades de membranas	
	para ósmosis inversa	564

<b>14.5.</b>	Relación entre los diagramas de McCabe-Thiele y triangulares	485
<b>14.6.</b>	Flujo mínimo de solvente	486
<b>14.7.</b>	Simulaciones de la extracción en computadora	488
<b>14.8.</b>	Lixiviación con tasas de flujo variables	489
	Ejemplo 14-3. Cálculos para lixiviación	490
<b>14.9.</b>	Resumen–Objetivos	492
	Referencias	492
	Tarea	493
	Apéndice al capítulo 14 Simulación de la extracción en computadora	499
<b>Capítulo 15 Análisis de la transferencia de masa</b>		<b>501</b>
<b>15.1.</b>	Fundamentos de la transferencia de masa	501
<b>15.2.</b>	Análisis de las columnas de destilación con altura y número de unidades de transferencia (HTU y NTU)	504
	Ejemplo 15-1. Destilación en una columna empacada	508
<b>15.3.</b>	Relación entre HETP y HTU	511
<b>15.4.</b>	Correlaciones de transferencia de masa para torres empacadas	513
	<b>15.4.1.</b> Correlaciones detalladas para empaques aleatorios	513
	Ejemplo 15-2. Estimación de $H_G$ y $H_L$	515
	<b>15.4.2.</b> Correlaciones sencillas	520
<b>15.5.</b>	Análisis HTU-NTU de absorbedores y separadores de arrastre	521
	Ejemplo 15-3. Absorción de $SO_2$	525
<b>15.6.</b>	Análisis HTU-NTU de absorbedores concurrentes	526
<b>15.7.</b>	Transferencia de masa en un plato	528
	Ejemplo 15-4. Estimación de la eficiencia de plato	530
<b>15.8.</b>	Resumen–Objetivos	531
	Referencias	531
	Tarea	532
<b>Capítulo 16 Introducción a los procesos de separación con membrana</b>		<b>535</b>
<b>16.1.</b>	Equipos de separación con membrana	537
<b>16.2.</b>	Conceptos relacionados con las membranas	541
<b>16.3.</b>	Permeación de gases	544
	<b>16.3.1.</b> Permeación de mezclas binarias de gases	544
	<b>16.3.2.</b> Permeación binaria en sistemas perfectamente mezclados	547
	Ejemplo 16-1. Permeado de gas bien mezclado-solución analítica secuencial	549
	Ejemplo 16-2. Permeación de gas bien mezclado-soluciones simultáneas analítica y gráfica	550
	<b>16.3.3.</b> Permeación de varios componentes en sistemas perfectamente mezclados	555
	Ejemplo 16-3. Permeación gaseosa perfectamente mezclada de varios componentes	556
<b>16.4.</b>	Ósmosis inversa	558
	<b>16.4.1.</b> Análisis de la ósmosis y la ósmosis inversa	558
	Ejemplo 16-4. Ósmosis inversa sin polarización de concentración	562
	<b>16.4.2.</b> Determinación experimental de las propiedades de las membranas	564
	Ejemplo 16-5. Determinación de las propiedades de membranas para ósmosis inversa	564

<b>17.4.2.</b>	Ondas de choque	658
	Ejemplo 17-7. Onda de choque autoafiladora	659
<b>17.5.</b>	Intercambio iónico	663
<b>17.5.1.</b>	Equilibrio en el intercambio iónico	664
<b>17.5.2.</b>	Movimiento de los iones	667
	Ejemplo 17-8. Movimiento de iones para intercambio divalente-monovalente	668
<b>17.6.</b>	Transferencia de masa y energía	672
<b>17.6.1.</b>	Transferencia de masa y difusión	672
<b>17.6.2.</b>	Balances de masa en la columna	674
<b>17.6.3.</b>	Transferencia de masa con parámetro agrupado	675
<b>17.6.4.</b>	Balances de energía y transferencia de calor	676
<b>17.6.5.</b>	Deducción de la teoría del movimiento del soluto	677
<b>17.6.6.</b>	Simuladores detallados	678
<b>17-7.</b>	Soluciones de transferencia de masa para sistemas lineales	678
<b>17.7.1.</b>	Solución de Lapidus y Amundson para equilibrio local con dispersión	679
<b>17.7.2.</b>	Superposición en sistemas lineales	680
	Ejemplo 17-9. Solución de Lapidus y Amundson para elución	681
<b>17.7.3.</b>	Cromatografía lineal	683
	Ejemplo 17-10. Determinación de los parámetros de una isoterma lineal, N, y la resolución, en cromatografía lineal	686
<b>17.8.</b>	Método LUB para sistemas no lineales	687
	Ejemplo 17-11. Método LUB	690
<b>17.9.</b>	Lista de control para diseño y operación en la práctica	691
<b>17.10.</b>	Resumen-Objetivos	693
	Referencias	693
	Tarea	696
	Apéndice al capítulo 17 Introducción al simulador Aspen Chromatography	708
<b>Guía de localización de problemas en Aspen Plus para separaciones</b>		<b>713</b>
<b>Respuestas a problemas seleccionados</b>		<b>717</b>
<b>Índice</b>		<b>723</b>