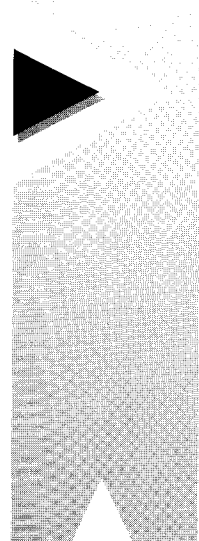


# Índice



<b>PREFACIO</b> .....	xxiii
<b>Capítulo 1. GENERALIDADES</b> .....	1
1.1. Introducción .....	2
1.1.1. Definición de Ingeniería Química .....	2
1.1.2. Operación Básica. Operación continua, discontinua y semicontinua ...	2
1.1.2.1. Operaciones continuas, estacionarias, permanentes o uniformes .....	3
1.1.2.2. Operaciones discontinuas, intermitentes o por cargas .....	3
1.1.2.3. Operación semicontinua .....	3
1.1.2.4. Ventajas de las operaciones continuas .....	4
1.1.2.5. Desventajas de las operaciones continuas .....	4
1.1.3. Transferencia de materia. Mecanismos .....	4
1.1.4. Requisitos para la transferencia de materia entre fases .....	5
1.1.5. Contacto entre fases no miscibles .....	5
1.1.6. Fundamentos de las operaciones .....	7
1.2. Clasificación de las operaciones de separación .....	8
1.2.1. Contacto directo de dos fases inmiscibles .....	9
1.2.1.1. Superficie interfacial gas-líquido .....	9
1.2.1.2. Superficie interfacial líquido-líquido .....	9
1.2.1.3. Superficie interfacial líquido-sólido .....	9
1.2.1.4. Superficie interfacial gas-sólido .....	9
1.2.1.5. Resumen .....	9

1.2.2.	Fases separadas por una membrana .....	10
1.2.2.1.	Gas-gas .....	10
1.2.2.2.	Gas-líquido .....	10
1.2.2.3.	Líquido-líquido .....	10
1.2.3.	Uso de fenómenos interfaciales .....	10
1.2.4.	Teniendo en cuenta el agente de separación .....	10
1.2.4.1.	Calor o enfriamiento .....	10
1.2.4.2.	Reducción de la presión, gradiente de presión (gradiente de presión más membrana) .....	11
1.2.4.3.	Gas no condensable o vapor condensable .....	11
1.2.4.4.	Líquido no volátil, o líquido inmiscible, o disolvente .....	11
1.2.4.5.	Sólido adsorbente, resina sólida, o molécula clatrante .....	11
1.2.4.6.	Solución salina más concentrada más membrana .....	11
1.2.4.7.	Burbujas de aire más tensioactivos .....	11
1.2.4.8.	Capilaridad más papel o fase gel, o gel sólido .....	11
1.2.4.9.	Membrana .....	11
1.2.4.10.	Campo magnético, eléctrico, o energía eléctrica .....	12
1.2.4.11.	Fuerza centrífuga .....	12
1.2.5.	Teniendo en cuenta el proceso de recuperación .....	12
1.2.5.1.	Procesos de recuperación a partir de gases .....	12
1.2.5.2.	Procesos de recuperación a partir de líquidos .....	12
1.2.5.3.	Procesos de recuperación a partir de sólidos .....	13
1.3.	Operaciones de separación. Definiciones .....	13
<b>Capítulo 2.</b>	<b>EQUILIBRIO ENTRE FASES .....</b>	<b>17</b>
2.1.	Introducción .....	18
2.2.	Condiciones termodinámicas para el equilibrio entre fases .....	18
2.3.	Diagramas de equilibrio .....	18
2.3.1.	Mezclas binarias .....	19
2.3.1.1.	Sistemas vapor-líquido .....	19
2.3.1.2.	Sistemas gas-líquido .....	22
2.3.1.3.	Sistemas líquido-sólido .....	23
2.3.2.	Diagramas de solubilidad .....	27
2.3.3.	Diagramas de adsorción .....	28
2.3.4.	Sistemas gas-sólido .....	29
2.3.5.	Mezclas ternarias .....	30
2.3.5.1.	Sistemas líquido-líquido .....	30
<b>Capítulo 3.</b>	<b>DATOS ENTÁLPICOS .....</b>	<b>35</b>
3.1.	Entalpías molares de los compuestos puros .....	36
3.2.	Entalpía molar de una mezcla .....	37
3.3.	Entalpía molar parcial de una mezcla .....	37
3.3.1.	Entalpía molar de una mezcla gaseosa .....	38
3.3.2.	Entalpía molar de una mezcla líquida .....	38
3.3.3.	Entalpía molar de una mezcla adsorbida .....	39
3.3.3.1.	Mezcla adsorbida procedente de una fase gaseosa .....	39
3.3.3.2.	Mezcla adsorbida procedente de una mezcla líquida .....	40

3.4.	Diagramas entálpicos de mezclas binarias .....	40
3.4.1.	Sistemas líquido-vapor: $H$ - $y$ , $h$ - $x$ .....	40
3.4.2.	Sistemas líquido-sólido .....	41
3.4.3.	Disoluciones de un solo componente .....	42
<b>Capítulo 4.</b>	<b>ECUACIONES DE CONSERVACIÓN, CAMBIO O CONTINUIDAD DE LAS PROPIEDADES EXTENSIVAS</b> .....	<b>45</b>
4.1.	Introducción .....	46
4.2.	Ecuación general de conservación de cualquier propiedad extensiva .....	46
4.2.1.	Ecuación de conservación de materia .....	48
4.2.2.	Ecuación de conservación de cantidad de movimiento .....	56
4.2.3.	Ecuación de conservación de energía .....	58
4.3.	Recordatorio del capítulo de densidades de flujo en fenómenos de transporte .	61
4.3.1.	Definiciones según la teoría cinética de los gases .....	61
4.3.2.	Ecuaciones representativas de los flujos de materia. Ecuaciones derivadas .....	63
4.4.	Recordatorio sobre el teorema del transporte .....	64
4.5.	Ecuación general de conservación, cambio o continuidad de cualquier propiedad extensiva desde un punto de vista microscópico .....	66
4.5.1.	Ecuación general de conservación de materia. Ecuaciones derivadas ..	67
4.5.2.	Ecuación de conservación de cantidad de movimiento. Ecuaciones derivadas .....	69
4.6.	Transferencia de materia por difusión .....	79
4.6.1.	Planteamiento del problema .....	79
4.6.2.	Régimen estacionario. Difusión simple .....	80
4.6.2.1.	Difusión unidimensional de un gas puro .....	80
4.6.2.2.	Difusión unidimensional en mezclas binarias gaseosas .....	83
4.6.3.	Régimen estacionario. Difusión con generación .....	96
4.6.3.1.	Difusión unidimensional con velocidad másica despreciable, temperatura y propiedades físicas constantes .....	96
4.6.4.	Régimen no estacionario. Difusión simple .....	99
4.6.4.1.	Difusión unidimensional de un solo componente con velocidad másica despreciable, presión, temperatura y propiedades físicas constantes .....	99
4.6.4.2.	Difusión unidimensional en mezclas binarias gaseosas. Presión, temperatura y propiedades físicas constantes .....	106
4.6.5.	Régimen no estacionario. Difusión con generación .....	110
4.6.5.1.	Difusión unidimensional de un solo componente con velocidad másica despreciable, presión, temperatura y propiedades físicas prácticamente constantes .....	110
<b>Capítulo 5.</b>	<b>EVAPORACIÓN</b> .....	<b>119</b>
5.1.	Introducción .....	120
5.2.	Balances de materia y entálpicos .....	121
5.3.	Recuperación de energía de los vapores .....	121
5.4.	Transmisión de calor .....	122
5.5.	Datos entálpicos .....	122
5.6.	Características de evaporadores. Tipos de evaporadores .....	123

5.7.	Método de cálculo .....	131
5.8.	Sistemas de múltiple efecto .....	136
5.8.1.	Análisis simplificado del sistema de múltiple efecto .....	136
5.8.1.1.	Área de cada efecto .....	139
5.8.1.2.	Número óptimo de efectos .....	140
5.8.2.	Análisis real del sistema de múltiple efecto .....	141
5.9.	Compresión del vapor .....	154
5.9.1.	Compresión mecánica del vapor .....	155
5.9.2.	Compresión térmica del vapor .....	156
5.10.	Evaporadores con fluido de calefacción secundario .....	157
<b>Capítulo 6.</b>	<b>TRANSFERENCIA DE MATERIA ENTRE FASES. CONTACTO CONTINUO</b> .....	<b>159</b>
6.1.	Introducción .....	160
6.2.	Transferencia de materia entre fases. Coeficientes individuales y globales ....	161
6.3.	Ecuaciones de diseño .....	175
<b>Capítulo 7.</b>	<b>ABSORCIÓN</b> .....	<b>177</b>
7.1.	Introducción .....	178
7.2.	Ecuaciones de diseño para columnas de relleno .....	179
7.2.1.	Resistencia en la fase gaseosa controlante .....	183
7.2.2.	Resistencia en la fase líquida controlante .....	183
7.2.3.	Ambas resistencias son significativas .....	184
7.3.	Ecuaciones de diseño para el caso particular de mezclas diluidas .....	185
7.3.1.	Relaciones entre las alturas de las unidades de transferencia .....	187
7.3.2.	Resistencia en la fase gaseosa controlante .....	188
7.3.3.	Resistencia en la fase líquida controlante .....	188
7.3.4.	Ambas resistencias son significativas .....	189
7.4.	Métodos de resolución .....	189
7.4.1.	Integración gráfica .....	189
7.4.2.	Integración numérica .....	190
7.5.	Método de Colburn .....	191
7.6.	Ecuaciones de diseño para mezclas concentradas en función del número de unidades de transferencia y de la altura de la unidad de transferencia .....	193
7.7.	Condiciones límites de operación .....	195
7.8.	Efectos caloríficos .....	199
7.9.	Ejemplos .....	201
<b>Capítulo 8.</b>	<b>DESTILACIÓN</b> .....	<b>237</b>
8.1.	Introducción .....	238
8.2.	Método gráfico simplificado .....	239
8.2.1.	Coeficientes de transferencia de materia .....	242
8.2.2.	Relación entre coeficientes de transferencia de materia .....	243
8.2.3.	Ecuaciones de diseño .....	246
8.2.4.	Relación entre alturas de la unidad de transferencia .....	250
8.2.5.	Sustitución de la caldera por una corriente de vapor directo <i>C</i> .....	253
8.2.6.	Columna de destilación con dos alimentos .....	255

8.3.	Método gráfico riguroso .....	257
8.3.1.	Determinación del número de unidades de transferencia .....	261
8.3.1.1.	Inyección directa de vapor .....	263
8.3.1.2.	Columnas complejas .....	263
8.4.	Condiciones límites de operación .....	266
8.4.1.	Razón de reflujo mínima .....	266
8.4.1.1.	Método gráfico simplificado .....	266
8.4.1.2.	Método analítico .....	267
8.4.1.3.	Método gráfico riguroso .....	268
8.4.2.	Razón de reflujo infinita .....	269
8.4.2.1.	Método gráfico simplificado .....	269
8.4.2.2.	Método analítico .....	270
8.4.2.3.	Método gráfico riguroso .....	271
8.4.3.	Razón de reflujo óptima .....	272
<b>Capítulo 9.</b>	<b>EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO DE MEZCLAS BINARIAS .....</b>	<b>287</b>
9.1.	Extracción simple .....	288
9.2.	Caso de insolubilidad total del componente <i>B</i> , inerte y el componente <i>S</i> , disolvente .....	288
9.2.1.	Balace de materia del componente <i>C</i> .....	289
9.3.	Caso en el que solo se transfiere el componente de la fase refinado a la fase extracto .....	290
9.3.1.	Balace de materia .....	290
9.3.2.	Ecuaciones de diseño .....	290
9.3.3.	Método de Wiegand .....	293
9.3.4.	Método de Colburn .....	294
9.4.	Otros métodos de cálculo gráfico .....	295
9.4.1.	Utilizando un diagrama triangular rectangular y un diagrama de distribución normal .....	295
9.4.2.	Utilizando un diagrama de disolvente sobre base libre de disolvente y otro de distribución sobre base libre de disolvente .....	297
9.5.	Extracción con reflujo .....	298
9.6.	Método de cálculo gráfico .....	300
9.6.1.	Utilizando un diagrama triangular rectangular y un diagrama de distribución normal .....	300
9.6.2.	Utilizando un diagrama de disolvente, y otro de distribución sobre base libre de disolvente .....	305
9.7.	Ejemplos .....	306
<b>Capítulo 10.</b>	<b>ADSORCIÓN-DESADSORCIÓN .....</b>	<b>317</b>
10.1.	Introducción .....	318
10.2.	Transferencia de materia entre fases fluida y sólida. Coeficientes de transporte .....	319
10.3.	Ecuaciones a utilizar .....	320
10.3.1.	Ecuaciones de balace de materia .....	320
10.3.2.	Ecuaciones de transferencia .....	321
10.3.3.	Ecuaciones de diseño .....	322
10.4.	Grandes adsorbedores ( <i>hypersorbers</i> ) .....	323

<b>Capítulo 11. CASCADA DE ETAPAS DE EQUILIBRIO. VARIABLES DE DISEÑO</b> .....	329
11.1. Introducción .....	330
11.2. Elementos individuales .....	332
11.2.1. Etapa de equilibrio .....	332
11.2.2. Sector de $N$ etapas de equilibrio en serie .....	333
11.2.3. Etapa de equilibrio de alimentación .....	336
11.2.4. Etapa de equilibrio de extracción de producto .....	337
11.2.5. Condensador y caldera parciales .....	339
11.2.6. Condensador y caldera totales .....	340
11.2.7. Concentrador .....	341
11.3. Cascadas de etapas de equilibrio integradas por $U$ elementos .....	342
11.3.1. Cascada de etapas de equilibrio donde llevar a cabo las operaciones de extracción sin reflujo, lixiviación, absorción y adsorción .....	342
11.3.2. Cascada de etapas de equilibrio para la operación de rectificación con caldera y condensador parciales .....	343
11.3.3. Cascada de etapas de equilibrio para la operación de rectificación con caldera parcial y condensador total .....	345
11.3.4. Cascada de etapas para la operación de extracción con reflujo .....	349
11.3.5. Cascada de etapas de equilibrio complejas .....	350
 <b>Capítulo 12. TEMPERATURA DE BURBUJA, TEMPERATURA DE ROCÍO, DESTILACIÓN SÚBITA</b> .....	 351
12.1. Introducción .....	352
12.2. Temperatura de burbuja. Métodos de cálculo .....	358
12.3. Temperatura de rocío. Métodos de cálculo .....	360
12.4. Destilación súbita. Métodos de cálculo .....	363
 <b>Capítulo 13. RECTIFICACIÓN: GENERALIDADES Y ECUACIONES BÁSICAS</b> .....	 371
13.1. Introducción .....	372
13.2. Columna de rectificación de pisos .....	372
13.3. Consideraciones generales .....	373
13.3.1. Componentes claves. Separación y calidad .....	373
13.3.2. Presiones y temperaturas .....	374
13.3.3. Razón de reflujo y número de pisos. Límites de funcionamiento .....	375
13.3.4. Pisos .....	376
13.3.5. Columna .....	377
13.3.6. Accesorios e instrumentación .....	377
13.4. Ecuaciones básicas .....	377
13.4.1. Relación general de equilibrio .....	378
13.4.2. Columna global con caldera y condensador incluidos .....	380
13.4.2.1. Balances de materia .....	380
13.4.2.2. Balance entálpico .....	380
13.4.3. Sector de enriquecimiento con condensador incluido .....	381
13.4.3.1. Balances de materia .....	381
13.4.3.2. Balance entálpico .....	383
13.4.4. Sector de agotamiento con caldera incluida .....	385
13.4.4.1. Balances de materia .....	385
13.4.4.2. Balance entálpico .....	387

13.4.5.	Sector de entrada de la corriente alimento comprendido entre los pisos $a$ y $a + 1$ .....	389
13.4.5.1.	Balances de materia .....	389
13.4.5.2.	Balances entálpicos .....	389
13.4.6.	Conexión entre los sectores de enriquecimiento y agotamiento mediante el sector de entrada de la corriente alimento .....	390
13.4.6.1.	Balances de materia. Ecuaciones derivadas .....	390
13.4.6.2.	Balances entálpicos. Ecuaciones derivadas .....	390
13.4.7.	Sectores de agotamiento y de entrada de alimento .....	391
13.4.7.1.	Balances de materia. Ecuaciones derivadas .....	391
13.4.7.2.	Balances entálpicos. Ecuaciones derivadas .....	392
13.4.8.	Sectores de enriquecimiento, de entrada de alimento y de agotamiento. Piso óptimo de alimentación .....	393
13.4.9.	Razón de caudales molares individuales $r_i/d_i$ .....	394
13.4.10.	Existencia de una segunda corriente lateral de alimentación o extracción de producto .....	396
13.4.10.1.	Balance de materia .....	396
13.4.10.2.	Balance entálpico .....	397
13.4.11.	Sector intermedio .....	397
13.4.11.1.	Balance de materia .....	397
13.4.11.2.	Balance entálpico .....	400
13.4.12.	Conexión entre los sectores de enriquecimiento, intermedio y agotamiento .....	401
<b>Capítulo 14.</b>	<b>RECTIFICACIÓN MEZCLAS BINARIAS</b> .....	<b>403</b>
14.1.	Introducción .....	404
14.2.	Método gráfico de McCabe-Thiele .....	404
14.2.1.	Sector de enriquecimiento y condensador .....	404
14.2.2.	Sector de agotamiento y caldera .....	407
14.2.3.	Sector de alimentación .....	408
14.2.4.	Determinación del número de etapas teóricas .....	409
14.2.5.	Construcción gráfica .....	411
14.2.6.	Nuevo significado de $q$ .....	413
14.2.7.	Lugar geométrico de los puntos de intersección de las rectas operativas .....	413
14.2.8.	Sustitución de la caldera por una corriente de vapor directo $C$ .....	415
14.2.9.	Columna de destilación con dos alimentos .....	416
14.3.	Método analítico de Lewis .....	418
14.4.	Método gráfico de Ponchon y Savarit .....	419
14.4.1.	Determinación del número de etapas o pisos teóricos .....	423
14.4.2.	Inyección directa de vapor .....	425
14.4.3.	Columnas complejas .....	427
14.5.	Método riguroso gráfico de diseño en diagrama de distribución $y-x$ .....	428
14.5.1.	Columna convencional .....	428
14.5.2.	Inyección directa de vapor .....	431
14.5.3.	Columnas complejas .....	431
14.6.	Columna convencional con sectores constituidos por tramos con relleno y tramos de pisos indistintamente .....	431

14.6.1.	Método gráfico simplificado .....	432
14.6.1.1.	Sector de enriquecimiento .....	432
14.6.1.2.	Sector de agotamiento .....	433
14.6.1.3.	Altura de la columna .....	433
14.6.2.	Método gráfico riguroso en diagrama de distribución y-x .....	433
14.7.	Columna compleja con sectores constituidos por tramos con relleno y tramos de pisos indistintamente .....	434
14.7.1.	Método gráfico simplificado .....	434
14.7.1.1.	Sector de enriquecimiento y de agotamiento .....	435
14.7.1.2.	Sector intermedio .....	435
14.7.2.	Método gráfico riguroso .....	436
14.8.	Condiciones límites de operación .....	436
14.8.1.	Razón de reflujo mínima .....	436
14.8.1.1.	Método gráfico de McCabe-Thiele .....	436
14.8.1.2.	Método analítico de Underwood .....	437
14.8.1.3.	Método de Ponchon y Savarit .....	438
14.8.2.	Relación de reflujo infinita .....	439
14.8.2.1.	Método gráfico de McCabe-Thiele .....	439
14.8.2.2.	Método analítico de Fenske .....	440
14.8.2.3.	Método de Ponchon y Savarit .....	441
14.8.3.	Razón de reflujo óptima .....	442
14.9.	Método numérico de Lewis .....	443
14.10.	Método numérico de Sorel .....	447
14.11.	Rectificación intermitente o por cargas .....	454
14.11.1.	Composición del destilado constante, razón de reflujo $L_D/D$ , variable .....	454
14.11.2.	Razón de reflujo $L_D/D$ constante, composición del destilado variable .....	456
14.12.	Ejemplos .....	456
<b>Capítulo 15.</b>	<b>DESTILACIÓN MULTICOMPONENTE .....</b>	<b>477</b>
15.1.	Consideraciones previas .....	479
15.1.1.	Condición entálpica de la corriente alimento .....	479
15.1.2.	Presión de funcionamiento .....	479
15.2.	Tipo de condensador .....	480
15.3.	Razón de reflujo $L_D/D$ .....	480
15.4.	Composición aproximada de las corrientes $D$ y $R$ .....	480
15.5.	Métodos de cálculo simplificados .....	484
15.5.1.	Método de Lewis-Matheson .....	485
15.5.2.	Método de Thiele-Geddes .....	489
15.5.3.	Método de Amundson y Pontinen .....	495
15.6.	Métodos de convergencia .....	500
15.6.1.	Método $\theta$ .....	500
15.6.2.	Aplicación del método $\theta$ de convergencia al de cálculo de Thiele-Geddes .....	501
15.6.3.	Aplicación del método de convergencia $\theta$ al de cálculo de Lewis-Matheson .....	507
15.6.4.	Método de Bonner de concordancia en el centro .....	508



15.6.5.	Método de relajación .....	510
15.6.6.	Método de Newton-Raphson .....	512
15.7.	Métodos de cálculo rigurosos .....	514
15.7.1.	Método de Lewis-Matheson combinado con los balances de entalpía ..	514
15.7.2.	Método de Thiele-Geddes combinados con los balances de entalpía ..	521
15.7.2.1.	Métodos de atenuación de los cambios de variación de estado de los sucesivos tanteos para forzar la convergencia del método de Thiele-Geddes combinado con los balances de entalpía .....	529
15.7.2.2.	Columna no adiabática. Método $Q$ de cálculo .....	529
15.7.3.	Método de Amundson y Pontinen combinado con los balances de entalpía .....	532
15.7.4.	Método de relajación combinado con los balances de entalpía ....	534
15.7.5.	Método de Newton-Raphson combinado con los balances de entalpía .....	535
15.8.	Consideraciones finales .....	536
15.8.1.	Errores de redondeo .....	536
15.8.2.	Temperaturas de burbuja, rocío y convergencia .....	536
15.8.3.	Peculiaridades de los componentes unifásicos y separables .....	536
15.8.3.1.	Componentes unifásicos .....	536
15.8.3.2.	Componentes separables .....	539
15.8.4.	Columnas complejas .....	542
15.8.4.1.	Método de convergencia $\theta$ .....	542
15.8.4.2.	Método de Thiele-Geddes .....	546
15.8.4.3.	Método de Thiele-Geddes, combinado con los balances de entalpía .....	550
15.9.	Condiciones límites de operación .....	550
15.9.1.	Razón de reflujo $L_D/D$ mínima. Número de pisos infinitos .....	550
15.9.1.1.	Métodos rigurosos .....	551
15.9.1.2.	Métodos aproximados .....	552
15.9.2.	Razón de reflujo ( $L_D/D$ ) infinita. Números de pisos mínimo .....	560
15.9.2.1.	Métodos rigurosos .....	560
15.9.2.2.	Métodos aproximados .....	560
15.10.	Métodos aproximados de cálculo del número de pisos basados en las condiciones límites de funcionamiento .....	561
15.10.1.	Método de Brown-Martin .....	561
15.10.2.	Método de Gilliland .....	562
15.10.3.	Método de Erbor y Maddox .....	563
15.10.4.	Método de los factores de absorción y desabsorción efectivos ...	564
15.11.	Ejemplos .....	564
<b>Capítulo 16.</b>	<b>EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO .....</b>	<b>603</b>
16.1.	Cascadas de etapas de equilibrio utilizadas en la operación de extracción líquido-líquido .....	604
16.2.	Ecuaciones básicas .....	605
16.2.1.	Etapas de equilibrio genérica, $n$ .....	605
16.2.2.	Cascada global .....	607
16.2.2.1.	Unidad de concentración ③ .....	609

	16.2.2.2.	Sector de enriquecimiento ④	611
	16.2.2.3.	Sector de agotamiento ⑤	613
	16.2.2.4.	Sectores de enriquecimiento y de agotamiento	615
16.3.		Extracción de mezclas binarias	615
	16.3.1	Extracción en una sola etapa de equilibrio	616
	16.3.1.1.	Diagrama triangular rectangular	616
	16.3.1.2.	Diagrama de distribución	618
	16.3.1.3.	Diagrama de disolvente	618
	16.3.1.4.	Diagrama de distribución sobre base libre de disolvente	620
	16.3.2.	Extracción en varias etapas de equilibrio en serie con porciones distintas del mismo disolvente	620
	16.3.2.1.	Diagrama triangular rectangular	621
	16.3.2.2.	Diagrama de distribución	623
	16.3.2.3.	Diagrama de disolvente	624
	16.3.2.4.	Diagrama de distribución sobre base libre de disolvente	626
	16.3.2.5.	Componente <i>B</i> y disolvente <i>S</i> , totalmente inmiscibles	627
	16.3.3.	Ejemplos	628
	16.3.4.	Extracción con enriquecimiento en contracorriente	637
	16.3.4.1.	Diagrama triangular rectangular. Método de Hunter y Nash	638
	16.3.4.2.	Razón de reflujo mínima: $S_0/A)_{\min}$ ; Número de etapas de equilibrio, infinito	639
	16.3.4.3.	Diagrama de distribución <i>y-x</i> : Método de Varteressian-Fenske	639
	16.3.4.4.	Diagrama de disolvente: Método de Maloney-Schubert	641
	16.3.4.5.	Diagrama de distribución <i>y'-x'</i> : Método de Varteressian-Fenske	643
	16.3.4.6.	Componente <i>B</i> y disolvente <i>S</i> totalmente inmiscibles	643
	16.3.5.	Extracción con reflujo	646
	16.3.5.1.	Diagrama triangular rectangular: Método de Hunter y Nash	646
	16.3.5.2.	Diagrama de distribución <i>y-x</i> : Método de Varteressian-Fenske	651
	16.3.5.3.	Diagrama de disolvente: Método de Maloney-Schubert	652
	16.3.5.4.	Razón de reflujo mínima, total y óptima	657
	16.3.6.	Ejemplos	658
<b>Capítulo 17.</b>		<b>LIXIVIACIÓN O EXTRACCIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO</b>	671
	17.1.	Separación de un solo componente de una mezcla sólida	672
	17.2.	Caso más general	672
	17.2.1.	Diagrama triangular rectangular	672
	17.2.2.	Diagrama de distribución	673
	17.3.	Caso particular	674
	17.3.1.	Diagrama triangular rectangular	674
	17.3.2.	Diagrama de distribución <i>y-x</i>	674
	17.4.	Caso general	675
	17.4.1.	Diagrama de sólido $H_B-y''$ ; $h_B-x''$	675
	17.4.2.	Diagrama de distribución $y''-x''$	676

17.5.	Caso particular .....	676
17.5.1.	Diagrama de sólido $H_B-y''$ , $h_B-x''$ .....	676
17.5.2.	Diagrama de distribución $y''-x''$ .....	677
17.6.	Caso de solubilidad limitada de soluto .....	677
17.6.1.	Diagrama triangular rectangular. Diagrama distribución .....	677
17.6.2.	Diagrama de sólido $H_B-y''$ , $h_B-x''$ .....	677
17.6.3.	Diagrama de distribución $y''-x''$ .....	677
17.7.	Lixiviación en varias etapas de equilibrio en serie con porciones distintas del mismo disolvente .....	678
17.7.1.	Diagrama triangular rectangular .....	680
17.7.2.	Diagrama de distribución $y-x$ .....	681
17.7.3.	Diagrama de sólido $H_B-y''$ ; $h_B-x''$ .....	682
17.7.4.	Diagrama de distribución sobre base libre de sólido $y''-x''$ .....	683
17.8.	Método gráfico-analítico .....	684
17.8.1.	Caso particular: Sólido inerte $B$ y disolvente $S$ , totalmente insolubles. Razón: $\rho = \frac{\text{Disolución separada}}{\text{Disolución retenida}} = \text{Constante}$ .....	685
17.9.	Lixiviación con enriquecimiento en contracorriente .....	688
17.9.1.	Variables de diseño .....	688
17.9.2.	Diagrama triangular rectangular .....	689
17.9.3.	Diagrama de distribución $y-x$ .....	690
17.9.4.	Diagrama de sólido .....	691
17.9.5.	Diagrama de distribución $y''-x''$ .....	692
17.9.6.	Método gráfico-analítico .....	692
17.9.7.	Sólido inerte $B$ y disolvente $S$ , totalmente insolubles. Razón: $\rho = \frac{\text{Disolución separada}}{\text{Disolución retenida}} = \text{Constante}$ .....	694
17.10.	Ejemplos .....	695
<b>Capítulo 18.</b>	<b>ABSORCIÓN-DESABSORCIÓN DE MEZCLAS BINARIAS GASEOSAS</b> .....	715
18.1.	Una etapa de equilibrio .....	716
18.2.	Columna constituida por una cascada de etapas de equilibrio .....	717
18.2.1.	Caso particular: Los caudales de los componentes portadores tanto de la fase líquida, como en la gaseosa, permanecen constantes .....	718
18.3.	Condiciones límites de operación .....	720
18.4.	Caso de no isothermicidad .....	721
18.5.	Mezclas diluidas. Método analítico .....	723
<b>Capítulo 19.</b>	<b>ADSORCIÓN Y DESADSORCIÓN</b> .....	729
19.1.	Introducción .....	730
19.2.	Adsorción-desadsorción en una sola etapa de contacto .....	730
19.3.	Adsorción en varias etapas en serie con porciones distintas del mismo adsorbente .....	732
19.4.	Adsorción en una cascada de etapas de equilibrio con flujo de fases en contracorriente .....	734
19.5.	Desadsorción en una cascada de etapas de equilibrio con flujo de fases en contracorriente .....	735

19.6.	Caso particular .....	736
19.7.	Adsorción y desadsorción de mezclas binarias .....	737
19.7.1.	Adsorción en una etapa de equilibrio .....	738
19.7.2.	Adsorción en varias etapas de equilibrio en serie con porciones distintas del mismo adsorbente .....	738
19.7.3.	Adsorción con enriquecimiento en contracorriente .....	738
19.7.4.	Adsorción con reflujo .....	738
19.8.	Ejemplos .....	
<b>Capítulo 20.</b>	<b>PROCESOS DE INTERACCIÓN AIRE-AGUA. PSICROMETRÍA .....</b>	<b>743</b>
20.1.	Introducción .....	744
20.2.	Definiciones .....	744
20.3.	Humidificación no adiabática .....	748
20.4.	Humidificación adiabática .....	749
20.5.	Teoría del termómetro de bulbo húmedo .....	751
20.6.	Diagrama psicrométrico o carta de humedades de Grosvenor .....	755
20.7.	Ejemplos .....	757
<b>Capítulo 21.</b>	<b>OPERACIONES DE INTERACCIÓN AIRE-AGUA. DISEÑO DE APARATOS .....</b>	<b>771</b>
21.1.	Introducción .....	772
21.1.1.	Humidificación adiabática del aire .....	772
21.1.2.	Humidificación no adiabática del aire .....	773
21.1.3.	Deshumidificación del aire .....	773
21.1.4.	Enfriamiento del agua con temperatura de saturación, $T^{\text{sat}}$ en la interfase mayor que la temperatura, $T$ , del aire .....	774
21.1.5.	Enfriamiento del agua con temperatura de saturación, $T^{\text{sat}}$ , menor que la temperatura del aire $T$ , y de la correspondiente del agua $T^{\text{L}}$ .....	775
21.2.	Ecuaciones fundamentales .....	776
21.2.1.	Humidificación del aire .....	777
21.2.1.1.	Transferencia del vapor de agua a través del aire .....	778
21.2.1.2.	Transmisión de calor a través del aire .....	779
21.2.1.3.	Transmisión de calor a través de la fase líquida .....	780
21.2.1.4.	Ecuaciones integrales .....	780
21.2.1.5.	Humidificación adiabática .....	781
21.2.1.6.	Método del potencial entálpico .....	784
21.2.1.7.	Cálculo del número de unidades de transporte .....	785
21.3.	Coefficiente de transporte .....	789
21.3.1.	Método de Mickley .....	790
21.3.2.	Ecuaciones empíricas para los coeficientes de transporte individuales .....	793
21.4.	Ejemplos .....	794
<b>Capítulo 22.</b>	<b>SECADO .....</b>	<b>805</b>
22.1.	Introducción .....	806
22.2.	Análisis matemático .....	806
22.2.1.	Datos de equilibrio y termodinámicos para la mezcla vapor-gas .....	807
22.3.	Datos de equilibrio para sistemas sólido-fluido .....	807
22.4.	Mecanismo .....	808
22.5.	Balances de materia y entálpico .....	809

22.6.	Datos sobre velocidad de secado .....	811
22.7.	Cálculo del tiempo de secado en condiciones de secado constante .....	814
22.8.	Cálculo del tiempo de secado en condiciones de secado variables .....	815
22.8.1.	Secadores adiabáticos para sistemas aire-agua .....	816
22.8.1.1.	Velocidad de secado dada en forma analítica (secadores en contracorriente o en paralelo) .....	816
22.8.1.2.	Velocidad de secado dada en forma gráfica (secadores en contracorriente o en paralelo) .....	817
22.8.1.3.	Efecto del cambio de la razón de caudales de flujo, $m$ , en secaderos en contracorriente .....	818
22.8.1.4.	Secadores en paralelo .....	818
22.9.	Secadores de flujo dividido .....	819
22.10.	Secadores adiabáticos para sistemas distintos del aire-agua .....	820
22.11.	Secadores no adiabáticos para sistemas aire-agua .....	820
22.11.1.	Secadores con calentamiento del gas .....	820
22.11.1.1.	Velocidad de secado dada en forma analítica .....	820
22.11.1.2.	Velocidad de secado dada en forma gráfica .....	821
22.11.1.3.	Velocidad de transmisión de calor a un secador iso-termo .....	821
22.12.	Sistemas distintos del aire-agua con o sin calentamiento del gas .....	821
22.13.	Secadores en que el calor se transmite directamente al material .....	821
22.14.	Ejemplos .....	822

<b>Capítulo 23.</b>	<b>CRISTALIZACIÓN .....</b>	<b>843</b>
23.1.	Introducción .....	844
23.2.	Datos de equilibrio .....	844
23.3.	Datos entálpicos .....	846
23.4.	Balances de materia .....	848
23.5.	Saturación y sobresaturación .....	849
23.6.	Nucleación .....	850
23.6.1.	Teoría de la nucleación homogénea .....	851
23.6.1.1.	Equilibrio .....	851
23.6.1.2.	Cinética .....	853
23.6.1.3.	Nucleación heterogénea .....	853
23.6.1.4.	Nucleación secundaria .....	854
23.7.	Crecimiento de cristales .....	854
23.7.1.	Velocidad de crecimiento de cristales .....	855
23.7.2.	Ley del $\Delta l$ para el crecimiento de los cristales .....	855
23.8.	Distribución de tamaños de cristales .....	856
23.9.	Cristalizador tipo tanque agitado ideal .....	858
23.10.	Tanques agitados en serie .....	860
23.11.	Ejemplos .....	863

<b>Capítulo 24.</b>	<b>INTERCAMBIO IÓNICO .....</b>	<b>873</b>
24.1.	Intercambio iónico .....	875
24.2.	Aplicaciones específicas .....	875
24.2.1.	Ablandamiento de aguas .....	876

24.2.2.	Desmineralización .....	876
24.2.3.	Recuperación de metales .....	876
24.2.4.	Modulado de proceso .....	877
24.2.5.	Purificación .....	877
24.3.	Materiales de intercambio iónico .....	878
24.3.1.	Formas de las resinas .....	880
24.4.	Fundamentos .....	882
24.5.	Equilibrio sistemas binarios .....	884
24.5.1.	Intercambio de iones de igual valencia .....	888
24.5.2.	Intercambio de iones monovalentes y divalentes .....	889
24.5.3.	Resinas de intercambio aniónico .....	890
24.5.4.	Relaciones de equilibrio empíricas .....	891
24.6.	Equilibrio para sistemas multicomponentes .....	892
24.7.	Cinética de intercambio iónico .....	892
24.7.1.	Transferencia de materia en la disolución .....	893
24.7.2.	Transferencia de materia en la matriz de la resina .....	900
24.7.3.	Difusión en el poro .....	904
24.7.4.	Intercambio iónico con reacción química en la resina .....	905
24.7.5.	Modelo de núcleo decreciente .....	907
24.7.6.	Comentario general .....	907
24.8.	Configuración de proceso .....	908
24.8.1.	Unidades de lecho fijo .....	908
24.8.2.	Unidades de lecho fluidizado .....	911
24.8.3.	Unidades de lecho móvil .....	911
24.8.4.	Unidades de tanques agitados .....	911
24.8.5.	Unidades de desionización continua .....	911
24.9.	Ecuaciones de diseño .....	912
24.9.1.	Ecuaciones de continuidad .....	912
24.9.2.	Ecuaciones de transferencia .....	914
24.9.3.	Relaciones de equilibrio .....	915
24.9.4.	Suposiciones simplificativas .....	915
24.10.	Diseño de aparatos con flujo continuo en contracorriente .....	916
24.10.1.	Equipo diferencial .....	917
24.10.1.1.	Controla la velocidad de difusión en la película líquida. No hay mezcla axial .....	917
24.10.1.2.	Controla la velocidad de difusión en la resina. No hay mezcla axial .....	919
24.10.1.3.	Sin control en la película líquida y en la resina. No hay mezcla axial .....	920
24.10.2.	Equipo de cascada de etapas .....	921
24.11.	Contacto discontinuo .....	923
24.11.1.	Difusión en la película líquida con intercambio binario de iones de igual carga .....	924
24.11.2.	Difusión en la película líquida para intercambio binario de iones de distinta carga .....	925
24.11.3.	Intercambio binario de iones de igual carga controlado por la difusión en la resina .....	926
24.11.4.	Comparación de tiempos medios .....	928

24.11.5.	Intercambio binario de iones de diferente carga controlado por la difusión en la resina .....	929
24.11.6.	Intercambio binario sin control por parte de la película líquida o de la partícula de resina .....	929
24.11.7.	Modelo de núcleo decreciente .....	930
24.11.8.	Procesos de neutralización .....	932
24.12.	Equipamiento .....	932
24.13.	Problemas y averías comunes .....	932
24.14.	Economía .....	933
24.15.	Ejemplos .....	934

<b>Capítulo 25.</b>	<b>APÉNDICE .....</b>	<b>945</b>
25.1.	Representación de los estados de agregación de la materia .....	947
25.2.	Definiciones de las unidades básicas del Sistema Internacional, SI .....	947
25.3.	Nombres y símbolos de las unidades básicas SI .....	948
25.4.	Prefijos SI .....	949
25.5.	Unidades empleadas junto con las del SI .....	949
25.6.	Unidades derivadas SI para otras magnitudes .....	950
25.7.	Nombres y símbolos de las magnitudes de uso más general en termodinámica química .....	951
25.8.	Otros símbolos y convenciones en termodinámica química, .....	953
25.9.	Propiedades de transporte .....	954
25.10.	Números adimensionales .....	954
25.11.	Tablas de conversión de unidades .....	955
25.12.	Tabla con algunas ecuaciones de estado .....	959
25.13.	Gráficas con factores de compresibilidad .....	960
25.13.1.	Factor de compresibilidad $Z$ , frente a presión reducida $P_r$ con temperatura reducida, $T_r$ , como parámetro y factor de compresibilidad crítico $Z_c = 0,27$ . Abscisa de 0 a 4,0 .....	960
25.13.2.	Factor de compresibilidad $Z$ , frente a presión reducida $P_r$ con temperatura reducida, $T_r$ , como parámetro y factor de compresibilidad crítico $Z_c = 0,27$ . Abscisa de 0 a 28 .....	960
25.14.	Ecuaciones empíricas y semiteóricas para la correlación de coeficientes de actividad en fase líquida de parejas binarias .....	961
25.15.	Gráficas de coeficientes de actividad .....	962
25.15.1.	Coefficientes de actividad de mezclas de agua y alcoholes normales a 25 °C .....	962
25.15.2.	Variaciones típicas de coeficientes de actividad con la composición de sistemas líquidos binarios .....	963
25.16.	Valores experimentales de coeficientes de difusión .....	964
25.16.1.	Valores experimentales de coeficientes de interdifusión para algunas mezclas binarias gaseosas a bajas presiones, $P \cdot D_{AB}$ (Pa · m <sup>5</sup> /s) $\equiv$ (N/m <sup>2</sup> )(m <sup>2</sup> /s) .....	964
25.16.2.	Valores experimentales de coeficientes de difusión, $D_{AB}$ (m <sup>2</sup> /s), en disolventes orgánicos a dilución infinita .....	965
25.16.3.	Valores experimentales de coeficientes de difusión para gases y no electrolitos a bajas concentraciones en agua, $D_{AB}$ (m <sup>2</sup> /s) .....	966

25.17.	Viscosidades dinámicas y capacidades caloríficas de líquidos .....	967
25.18.	Capacidades caloríficas de gases y conductividades térmicas de gases y líquidos .....	968
25.19.	Gráfica para caudales de anegamiento en anillos al azar .....	969
25.20.	Gráfica para caudales de carga o arrastre y rellenos al azar (anillos) .....	970
25.21.	Gráficas de datos de equilibrio .....	971
25.21.1.	Datos de equilibrio para algunos hidrocarburos .....	971
25.21.2.	Constantes de equilibrio para distintos hidrocarburos a la presión de 80 psia .....	972
25.21.3.	Valores de $k$ para sistemas de hidrocarburos ligeros .....	973
25.22.	Gráficas de Gilliland .....	975
25.22.1.	Gráfica de Gilliland. a) En coordenadas normales; y b) En coordenadas doble logarítmica .....	975
25.22.2.	Efecto de la condición de la alimentación sobre la correlación de Gilliland .....	976
25.23.	Presión de saturación y volumen específico de vapor saturado: $p_s$ y $v_s$ .....	976
25.24.	Datos de equilibrio sólido-fluido .....	977
25.24.1.	Tensión de vapor de algunas sustancias en función de la humedad, a 25 °C .....	977
25.25.	Sistemas aire-agua .....	978
25.25.1.	Diagrama de Mollier .....	978
25.25.2.	Diagrama psicrométrico .....	979
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		981
<b>ÍNDICE DE MATERIAS</b> .....		997