

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| Prólogo | xv |
| Introducción | xvii |
| Notación | xxi |
| CAPÍTULO 1 | |
| FUNDAMENTOS DEL TRANSPORTE DE MASA | 1 |
| 1.1 Principios básicos | 2 |
| 1.1.1 Características de la difusión de masa | 2 |
| 1.1.2 Descripción del fenómeno | 3 |
| 1.1.3 Definiciones de velocidad media y densidad de flujo | 4 |
| 1.1.4 Ecuación de mecanismo del transporte de masa | 5 |
| 1.1.5 La ley de Fick en relación con coordenadas fijas | 5 |
| 1.2 Difusividad | 7 |
| 1.2.1 Significado y definición | 7 |
| 1.2.2 Cálculo de la difusividad | 7 |
| 1.2.2.1 Difusividad en gases | 7 |
| 1.2.2.2 Difusividad en líquidos | 11 |
| 1.2.2.3 Difusividad en sólidos | 13 |
| 1.2.3 Determinación experimental de la difusividad en gases | 13 |
| 1.2.4 Caso de las membranas | 13 |
| 1.3 Ecuación de continuidad | 14 |
| 1.3.1 Ecuación global | 14 |
| 1.3.2 Ecuación para un componente de una mezcla binaria | 15 |
| 1.4 Efectos acoplados | 17 |
| Preguntas | 18 |
| Problemas | 18 |
| Soluciones | 19 |
| Referencias | 19 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 2 | |
| MODELOS MATEMÁTICOS PARA TRANSFERENCIA DE MASA | 21 |
| 2.1 Modelado de sistemas de transferencia de masa | 22 |
| 2.1.1 Difusión en fase inmóvil | 22 |
| 2.1.2 Difusión de un gas en otro inmóvil | 27 |
| 2.1.3 Absorción con reacción química de primer orden | 29 |
| 2.1.3.1 Caso análogo: absorción en un catalizador sólido | 31 |
| 2.1.4 Evaporación de una esfera en un medio inmóvil infinito | 34 |
| 2.1.5 Transferencia simultánea de masa y <i>momentum</i> | 37 |
| 2.1.5.1 Caso análogo: absorción física en régimen transitorio | 40 |
| 2.1.6 Transferencia en régimen seudoestable | 43 |
| 2.1.6.1 Caso de frontera móvil | 43 |
| 2.1.6.2 Caso de condición frontera cambiante | 45 |
| 2.2 Ecuaciones de transporte extendidas | 46 |
| 2.2.1 Solución de las ecuaciones extendidas | 48 |
| 2.2.2 Condiciones de aplicación de las ecuaciones extendidas | 48 |
| 2.3 Aspectos termodinámicos | 49 |
| Preguntas | 50 |
| Problemas | 50 |
| Soluciones | 53 |
| Referencias | 54 |
| CAPÍTULO 3 | |
| TEORÍA DE LA CAPA LÍMITE | 57 |
| 3.1 Capa límite hidrodinámica | 58 |
| 3.1.1 Descripción del fenómeno | 58 |
| 3.1.2 Solución del modelo matemático | 59 |
| 3.1.3 Definición del factor de fricción | 62 |
| 3.2 Capa límite térmica | 62 |
| 3.2.1 Descripción del fenómeno | 62 |
| 3.2.2 Solución del modelo matemático | 62 |
| 3.2.3 Coeficiente de transferencia de calor | 63 |
| 3.3 Capa límite de transferencia de masa | 64 |
| 3.3.1 Descripción del fenómeno | 64 |
| 3.3.2 Coeficiente de transferencia de masa | 65 |
| 3.4 Analogía de Chilton-Colburn | 66 |
| Preguntas | 68 |
| Problemas | 68 |
| Soluciones | 69 |
| Referencias | 69 |

CAPÍTULO 4**MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD
DE TRANSFERENCIA DE MASA**

| | |
|--|-----|
| | 71 |
| Primera parte. Transferencia desde la interfase | 72 |
| 4.1 Modelos de transferencia | 72 |
| 4.1.1 Modelo de película estática de Whitman | 72 |
| 4.2 Coeficientes de transferencia de masa. Definición | 73 |
| 4.2.1 Coeficientes generales | 73 |
| 4.2.2 Coeficientes particulares | 74 |
| 4.2.3 Coeficientes volumétricos | 74 |
| 4.3 Determinación experimental y uso de los coeficientes de transferencia | 75 |
| 4.4 Cálculo de la velocidad de transferencia | 78 |
| 4.4.1 Correlaciones para calcular el coeficiente de transferencia | 78 |
| 4.5 Modelos de renovación de superficie | 80 |
| Segunda parte. Transferencia interfacial | 82 |
| 4.6 Equilibrio interfacial líquido-gas | 83 |
| 4.7 Velocidad de transferencia interfacial. Soluciones diluidas | 83 |
| 4.7.1 Definición del coeficiente global de transferencia | 84 |
| 4.7.2 Potencial global. Caso líquido-gas | 84 |
| 4.7.3 Cálculo de los coeficientes globales. Modelo de la doble resistencia | 85 |
| 4.7.4 Paso limitante | 87 |
| 4.7.5 Cálculo de las composiciones interfaciales. Línea de unión | 89 |
| 4.8 Velocidad de transferencia. Soluciones concentradas | 91 |
| 4.9 Cálculo de la velocidad de transferencia de dos componentes | 92 |
| 4.9.1 Existencia de un paso limitante | 94 |
| 4.10 Velocidad de transferencia interfacial con reacción química | 95 |
| 4.10.1 Velocidad del proceso | 95 |
| 4.10.2 Caso especial: reacción irreversible de primer orden no instantánea | 96 |
| 4.11 Sistemas con parámetros concentrados | 98 |
| Preguntas | 101 |
| Problemas | 102 |
| Soluciones | 103 |
| Referencias | 104 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---|-----|
| FUNDAMENTOS DE LAS OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA | 105 |
| 5.1 Operaciones con transferencia de masa | 106 |
| 5.2 Importancia de los procesos de separación | 107 |
| 5.3 Tipos de operación | 107 |
| 5.4 Equipo de operaciones de transferencia de masa | 108 |
| 5.4.1 La columna de platos | 108 |
| 5.4.2 Contacto continuo | 110 |
| 5.4.3 Contacto gas-líquido por burbujeo | 111 |
| 5.4.4 Columnas de burbujeo | 111 |
| 5.4.5 Comparación entre las columnas empacadas y de platos | 112 |
| 5.5 Cálculo del equipo de contacto con etapas | 112 |
| 5.6 Cálculo de equipo para contacto continuo | 113 |
| 5.7 Equilibrio de fases en los procesos de separación | 113 |
| 5.7.1 Equilibrio vapor-líquido | 113 |
| 5.7.2 Sistemas líquido-líquido | 115 |
| 5.7.3 Sistemas gas-líquido | 116 |
| 5.7.4 Relación de equilibrio por medio de nomogramas | 116 |
| 5.7.5 Diagramas de fases (sistemas binarios y ternarios) | 118 |
| 5.7.5.1 Sistemas vapor-líquido (destilación, evaporación instantánea) | 118 |
| 5.7.6 Volatilidad relativa | 120 |
| 5.7.7 Equilibrio líquido-líquido (extracción líquida) | 122 |
| 5.7.8 Sistemas gas-líquido (absorción de gases) | 123 |
| 5.8 Evaporación instantánea en sistemas de multicomponentes | 124 |
| 5.8.1 Caso 1: P y T especificadas | 126 |
| 5.8.2 Caso 2: P y $V/F = 0$ especificados: líquido saturado o punto de burbuja | 128 |
| 5.8.3 Caso 3: P y $V/F = 1$ especificadas: vapor saturado o punto de rocío | 129 |
| 5.9 Evaporación instantánea en sistemas binarios | 129 |
| 5.10 Determinación de la condición térmica de una mezcla líquida o vapor | 131 |
| 5.11 Cálculo de las dimensiones de un tanque vertical de evaporación instantánea | 133 |
| Preguntas | 136 |
| Problemas | 137 |
| Soluciones | 140 |
| Referencias | 140 |

CAPÍTULO 6

| | |
|--|-----|
| ABSORCIÓN GAS-LÍQUIDO POR CONTACTO CONTINUO | 143 |
| Introducción | 144 |
| 6.1 La columna empacada | 145 |
| 6.1.1 Empaques | 146 |
| 6.1.2 Comportamiento hidráulico | 148 |
| 6.1.3 Punto de inundación | 148 |
| 6.2 Coeficientes de transferencia de masa | 151 |
| 6.2.1 Determinación experimental | 151 |
| 6.2.2 Correlaciones de Billet-Schultes | 151 |
| 6.2.3 Correlaciones de Sherwood y Molstad | 155 |
| 6.3 Diseño de columnas empacadas para absorción líquido-gas | 156 |
| 6.3.1 Línea de operación | 157 |
| 6.3.1.1 Caso de mezclas gaseosas diluidas | 158 |
| 6.3.1.2 Caso de mezclas gaseosas concentradas | 158 |
| 6.3.2 Línea de equilibrio | 159 |
| 6.3.3 Ecuación de diseño | 159 |
| 6.3.3.1 Caso de soluciones diluidas: línea de equilibrio recta | 160 |
| 6.3.3.2 Caso de soluciones concentradas | 162 |
| 6.3.3.3 Unidades de transferencia | 163 |
| 6.3.4 Cálculo del flujo de líquido | 164 |
| 6.3.5 Diámetro de la columna | 166 |
| 6.3.6 Flujo en paralelo | 168 |
| 6.4 Desorción | 172 |
| 6.5 Absorción por burbujeo | 172 |
| Preguntas | 174 |
| Problemas | 174 |
| Soluciones | 176 |
| Referencias | 176 |

CAPÍTULO 7

| | |
|---|-----|
| DESTILACIÓN | 177 |
| 7.1 Destilación fraccionada | 178 |
| 7.2 Secuencia de diseño en destilación fraccionada | 179 |
| 7.2.1 Presión de operación | 180 |
| 7.2.2 Etapa ideal | 180 |
| 7.3 Método de McCabe-Thiele | 180 |
| 7.3.1 Sección de enriquecimiento | 180 |
| 7.3.2 Sección de agotamiento | 182 |
| 7.3.3 Alimentación | 183 |
| 7.3.4 Localización del plato de alimentación | 185 |
| 7.3.5 Condiciones de operación limitantes | 185 |
| 7.3.6 Relación de reflujo óptima | 187 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| 7.4 | Método numérico o analítico | 194 |
| 7.5 | Diámetro de plato y de columna | 197 |
| 7.6 | Eficiencia y número real de platos | 199 |
| 7.6.1 | Comentarios finales acerca de eficiencias de plato y de columna | 201 |
| 7.7 | Columnas empacadas en destilación | 205 |
| 7.8 | Destilación de multicomponentes | 209 |
| 7.9 | Caso de estudio propuesto: cambio de platos de válvulas por empaque estructurado en una columna de destilación para aumentar capacidad | 216 |
| 7.10 | Caso de estudio resuelto: análisis de exergía en columnas de destilación | 216 |
| 7.10.1 | Caso 1 (primera configuración). Una sola columna de destilación (<i>SC</i>) | 218 |
| 7.10.2 | Caso 2 (segunda configuración). Dos columnas con alimentación dividida (<i>FS</i>) | 218 |
| 7.10.3 | Caso 3 (tercera configuración). Dos columnas con integración de calor hacia atrás (<i>LSR</i>) | 219 |
| Preguntas | | 222 |
| Problemas | | 223 |
| Soluciones | | 226 |
| Referencias | | 226 |
| CAPÍTULO 8 | | |
| EXTRACCIÓN | | 227 |
| 8.1 | Extracción líquido-líquido | 228 |
| 8.2 | Equipo para la extracción líquido-líquido | 228 |
| 8.3 | Selección del solvente | 231 |
| 8.4 | Equilibrio líquido-líquido | 231 |
| 8.5 | Balances de materia en extracción líquida | 232 |
| 8.6 | Extracción en una sola etapa | 233 |
| 8.7 | Extracción en varias etapas a corrientes cruzadas | 235 |
| 8.8 | Extracción en varias etapas a contracorriente, método gráfico | 239 |
| 8.9 | Extracción en varias etapas a contracorriente, método analítico con ecuaciones de Kremser | 243 |
| 8.10 | Cálculo de flujo de disolvente mínimo | 245 |
| 8.11 | Estimación de la altura de la columna de extracción | 246 |
| 8.11.1 | Eficiencia global de la columna (E_0) | 246 |
| 8.11.2 | Altura equivalente a un plato teórico (HETP) | 247 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 8.12 | Estimación del diámetro de la columna de extracción con flujo a contracorriente | 247 |
| 8.13 | Extracción sólido-líquido o extracción por solventes | 252 |
| 8.14 | Extracción supercrítica | 253 |
| | Preguntas | 254 |
| | Problemas | 256 |
| | Referencias | 260 |

CAPÍTULO 9**CONTACTO AIRE-AGUA** 261

| | | |
|------------|--|-----|
| 9.1 | Definiciones básicas | 262 |
| 9.1.1 | Presión de vapor en el equilibrio | 262 |
| 9.1.2 | Humedad molar absoluta | 262 |
| 9.1.3 | Humedad mísica absoluta | 262 |
| 9.1.4 | Humedad de saturación | 263 |
| 9.1.5 | Humedad absoluta porcentual o porcentaje de humedad absoluta | 263 |
| 9.1.6 | Humedad relativa | 263 |
| 9.1.7 | Punto de rocío | 265 |
| 9.1.8 | Volumen húmedo | 266 |
| 9.1.9 | Calor húmedo (C_h) | 266 |
| 9.1.10 | Calor húmedo medio (C_{hm}) | 267 |
| 9.1.11 | Entalpía de aire húmedo (o entalpía total) | 268 |
| 9.2 | Temperatura de saturación adiabática | 269 |
| 9.2.1 | Descripción del proceso teórico | 270 |
| 9.3 | Carta de humedad o psicrométrica | 272 |
| 9.4 | Temperatura de bulbo húmedo | 275 |
| 9.5 | Operaciones de contacto aire-agua | 280 |
| 9.5.1 | Ecuaciones de diseño | 281 |
| 9.5.2 | Humidificación de aire | 284 |
| 9.5.3 | Humidificación-enfriamiento adiabático de aire | 287 |
| 9.5.4 | Deshumidificación de aire por contacto directo | 289 |
| 9.5.5 | Enfriamiento de agua a contracorriente | 291 |
| 9.5.5.1 | Ecuación de diseño | 292 |
| 9.5.5.2 | Línea de operación | 293 |
| 9.5.5.3 | Línea de equilibrio | 294 |
| 9.5.5.4 | Líneas de unión y coeficiente global de transferencia | 294 |
| 9.5.5.5 | Integral de Merkel | 295 |
| 9.5.5.6 | Función de empaque o característica de torre | 295 |
| 9.5.5.7 | Método NUT y AUT | 296 |
| 9.5.5.8 | Flujo mínimo de aire | 296 |
| 9.5.5.9 | Relación agua-aire para una torre de enfriamiento de altura conocida | 297 |
| 9.5.5.10 | Cálculo de la altura de una torre de enfriamiento de agua | 299 |

| | |
|--|-----|
| 9.6 Aplicación a la operación de secado | 300 |
| Preguntas | 303 |
| Problemas | 303 |
| Soluciones | 304 |
| Referencias | 305 |
| CAPÍTULO 10 | |
| ABSORCIÓN DE OXÍGENO EN BIORREACTORES | 307 |
| 10.1 Requerimiento de oxígeno en los procesos de fermentación | 309 |
| 10.2 Determinación experimental de $k_L a$ en fermentadores por métodos fisicoquímicos | 312 |
| 10.2.1 Método del sulfito | 312 |
| 10.2.2 Método dinámico por desgasificación | 314 |
| 10.2.3 Correlaciones para calcular los coeficientes de transferencia en la fase líquida | 316 |
| 10.2.4 Cálculo de la potencia consumida P_G | 317 |
| 10.3 Determinación experimental de $k_L a$ en fermentadores por métodos biológicos | 317 |
| 10.3.1 Método dinámico | 317 |
| 10.3.2 Método de balances gaseosos | 319 |
| 10.3.3 Implementación del método de balances gaseosos | 320 |
| 10.3.4 Corrección de $k_L a$ por influencia de las burbujas | 322 |
| Preguntas | 323 |
| Problemas | 324 |
| Soluciones | 325 |
| Referencias | 325 |
| APÉNDICES | |
| A Funciones y definiciones matemáticas | 328 |
| A.1 Derivada sustancial | 328 |
| A.2 Función error | 328 |
| A.2.1 Regla de Leibnitz para derivar una integral | 329 |
| A.2.2 Derivada de la función error | 330 |
| A.3 Funciones Bessel | 330 |
| A.3.1 Funciones Bessel ordinarias | 330 |
| A.3.2 Funciones Bessel modificadas | 331 |
| B Métodos de determinación de la difusividad | 333 |
| B.1 Método de Winklemann para determinar difusividad en fase gaseosa | 333 |
| B.2 Método del sulfito | 333 |
| B.2.1 Solubilidad del oxígeno | 333 |
| B.2.2 Generalización de los cálculos | 334 |
| B.2.3 Procedimiento de laboratorio para el método del sulfito | 335 |

| | | |
|----------|---|-----|
| C | Propiedades físicas de sustancias puras | 336 |
| C.1 | Propiedades del aire a $P = 1$ atm | 336 |
| C.2 | Propiedades del agua líquida | 337 |
| D | Datos de equilibrio vapor-líquido y de entalpía-concentración de diversos sistemas | 338 |
| D.1 | Datos de equilibrio vapor-líquido | 338 |
| D.2 | Datos de entalpía concentración | 339 |
| E | Datos de equilibrio líquido-líquido de diversos sistemas ternarios | 341 |
| F | Los nomogramas de DePriester y la ecuación de McWilliams | 343 |
| F.1 | Nomogramas de DePriester | 343 |
| F.2 | Ecuación de McWilliams | 345 |
| | Índice | 347 |