

---

# Contenido

---

Prólogo .....	9
Agradecimientos .....	11
<b>1. Introducción a las Operaciones Unitarias. Conceptos fundamentales ...</b>	<b>25</b>
1.1. Proceso .....	25
1.2. Ingeniería de los procesos alimentarios .....	26
1.3. Transformación y comercialización de productos agrícolas .....	27
1.4. Diagramas de flujo. Descripción de algunos procesos alimentarios ..	27
1.5. Régimen estacionario y no estacionario .....	29
1.6. Operaciones discontinuas, continuas y semicontinuas .....	30
1.7. Las Operaciones Unitarias. Clasificación .....	31
1.7.1. Operaciones Unitarias de transporte de cantidad de movi- miento .....	32
1.7.2. Operaciones Unitarias de transferencia de materia .....	32
1.7.3. Operaciones Unitarias de transmisión de calor .....	32
1.7.4. Operaciones Unitarias de transferencia simultánea de ma- teria-calor .....	33
1.7.5. Operaciones Unitarias complementarias .....	33
1.8. Planteamiento matemático de los problemas .....	35
<b>2. Sistemas de unidades. Análisis dimensional y semejanza .....</b>	<b>35</b>
2.1. Sistemas de magnitudes y unidades .....	35
2.1.1. Sistemas absolutos de unidades .....	36
2.1.2. Sistemas técnicos de unidades .....	36
2.1.3. Sistemas ingenieriles de unidades .....	37
2.1.4. Sistema Internacional de unidades (SI) .....	38
2.1.5. Unidades térmicas .....	39
2.1.6. Conversión de unidades .....	41
2.2. Análisis dimensional .....	43
2.2.1. Teorema $\pi$ de Buckingham .....	44
2.2.2. Métodos de análisis dimensional .....	46
2.3. Teoría de la semejanza .....	

<b>14 Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos</b>		
2.3.1. Semejanza geométrica .....	47	
2.3.2. Semejanza mecánica .....	48	
Problemas .....	53	
<b>3. Introducción a los fenómenos de transporte</b> .....	65	
3.1. Introducción histórica .....	65	
3.2. Fenómenos de transporte. Definición .....	66	
3.3. Regímenes de circulación. Experimento de Reynolds .....	67	
3.4. Mecanismos de los fenómenos de transporte .....	70	
3.4.1. Transferencia de materia .....	71	
3.4.2. Transmisión de energía .....	72	
3.4.3. Transporte de cantidad de movimiento .....	73	
3.4.4. Leyes de velocidad .....	73	
3.4.5. Fenómenos acoplados .....	73	
<b>4. Transporte molecular de cantidad de movimiento, energía y materia</b> ..	75	
4.1. Introducción .....	75	
4.2. Transporte de cantidad de movimiento. Ley de Newton de la visco-		
sidad .....	75	
4.3. Transmisión de energía. Ley de Fourier de la conducción de calor ...	77	
4.4. Transferencia de materia. Ley de Fick de la difusión .....	78	
4.5. Ecuación general de velocidad .....	83	
<b>5. Balances macroscópicos de materia y energía</b> .....	85	
5.1. Introducción .....	85	
5.2. Balance macroscópico de materia .....	86	
5.3. Balance macroscópico de energía .....	89	
Problemas .....	96	
<b>6. Interacción aire-agua</b> .....	107	
6.1. Introducción .....	107	
6.2. Propiedades del aire húmedo .....	107	
6.3. Diagrama psicrométrico de Mollier para aire húmedo .....	111	
6.3.1. Diagrama psicrométrico $\phi$ - $T$ - $X$ .....	111	
6.3.2. Diagrama psicrométrico $X$ - $T$ .....	115	
6.4. Temperatura de termómetro húmedo .....	116	
6.5. Saturación adiabática del aire .....	118	
Problemas .....	121	
<b>7. Reología de productos alimentarios</b> .....	129	
7.1. Introducción .....	129	
7.2. Esfuerzo y deformación .....	130	
7.3. Sólidos elásticos y fluidos newtonianos .....	132	
7.4. Funciones viscosimétricas .....	134	
7.5. Clasificación reológica de alimentos fluidos .....	135	
7.6. Flujo newtoniano .....	137	
7.7. Flujo no newtoniano .....	139	
7.7.1. Flujo independiente del tiempo .....	139	
7.7.2. Flujo dependiente del tiempo .....	142	
7.8. Viscoelasticidad .....	146	
7.9. Efecto de la temperatura .....	152	
7.10. Efecto de la concentración sobre la viscosidad .....	153	
7.10.1. Teorías estructurales de la viscosidad .....	153	
7.10.2. Viscosidad de soluciones .....	154	
7.10.3. Efecto combinado temperatura-concentración .....	156	
7.11. Modelos mecánicos .....	157	
7.11.1. Modelo de Hooke .....	157	
7.11.2. Modelo de Newton .....	158	
7.11.3. Modelo de Kelvin .....	158	
7.11.4. Modelo de Maxwell .....	159	
7.11.5. Modelo de Saint-Venant .....	160	
7.11.6. Modelo mecánico del cuerpo de Bingham .....	160	
7.12. Medidas reológicas en alimentos semilíquidos .....	161	
7.12.1. Métodos fundamentales .....	161	
7.12.2. Métodos empíricos .....	175	
7.12.3. Métodos imitativos .....	175	
Problemas .....	177	
<b>8. Transporte de fluidos por tuberías</b> .....	181	
8.1. Introducción .....	181	
8.2. Circulación de fluidos incompresibles .....	182	
8.2.1. Criterio para flujo laminar .....	182	
8.2.2. Distribución de velocidades .....	186	
8.2.3. Perfil universal de velocidades .....	194	
8.3. Balances macroscópicos en la circulación de fluidos .....	196	
8.3.1. Balance de materia .....	196	
8.3.2. Balance de cantidad de movimiento .....	198	
8.3.3. Balance de energía total .....	198	
8.3.4. Balance de energía mecánica .....	201	
8.4. Pérdidas de energía mecánica .....	202	
8.4.1. Factores de fricción .....	202	
8.4.2. Cálculo de factores de fricción .....	203	
8.4.3. Pérdidas menores de energía mecánica .....	213	
8.5. Diseño de tuberías .....	218	
8.5.1. Cálculo de la velocidad y flujo de circulación .....	218	
8.5.2. Cálculo del diámetro mínimo de tubería .....	219	
8.5.3. Redes de tuberías .....	221	
8.6. Bombas .....	225	

8.6.1. Características de una bomba .....	225	11.2.3. Modelo simultáneo flujo viscoso y de fricción .....	303
8.6.2. Punto de instalación de una bomba .....	229	11.2.4. Modelo de adsorción preferencial y flujo capilar .....	303
8.6.3. Potencia de la bomba .....	229	11.2.5. Modelo basado en la termodinámica de procesos irreversibles .....	304
8.6.4. Rendimiento de una bomba .....	230	11.3. Modelos de transferencia a través de la capa de polarización ....	305
8.6.5. Tipos de bombas .....	230	11.3.1. Modelo hidráulico .....	306
Problemas .....	233	11.3.2. Modelo osmótico .....	309
<b>9. Circulación de fluidos a través de lechos porosos. Fluidización</b> .....	243	11.4. Ósmosis Inversa .....	311
9.1. Introducción .....	243	11.4.1. Modelo matemático .....	311
9.2. Ley de Darcy. Permeabilidad .....	243	11.4.2. Capa de polarización por concentración .....	314
9.3. Definiciones previas .....	244	11.4.3. Influencia de distintos factores .....	315
9.4. Ecuaciones para el flujo a través de lechos porosos .....	248	11.5. Ultrafiltración .....	318
9.4.1. Régimen laminar. Ecuación de Kozeny-Carman .....	248	11.5.1. Modelo matemático .....	318
9.4.2. Régimen turbulento. Ecuación de Burke-Plummer ....	249	11.5.2. Capa de polarización por concentración .....	319
9.4.3. Flujo global laminar-turbulento. Ecuaciones de Ergun y de Chilton-Colburn .....	250	11.5.3. Influencia de diferentes factores .....	321
9.5. Fluidización .....	254	11.6. Diseño de sistemas de ósmosis inversa y ultrafiltración .....	323
9.5.1. Velocidad mínima de fluidización .....	255	11.6.1. Primer método de diseño .....	324
9.5.2. Porosidad mínima de fluidización .....	256	11.6.2. Segundo método de diseño .....	326
9.5.3. Altura del lecho .....	257	11.7. Disposición operativa de los módulos .....	327
Problemas .....	259	11.7.1. Etapa única .....	328
<b>10. Filtración</b> .....	271	11.7.2. Cascadas simples en serie .....	328
10.1. Introducción .....	271	11.7.3. Dos etapas con recirculación .....	329
10.2. Fundamentos de la filtración .....	271	Problemas .....	331
10.2.1. Resistencia de la torta de filtración .....	272	<b>12. Propiedades térmicas de los alimentos</b> .....	339
10.2.2. Resistencia del medio filtrante .....	275	12.1. Conductividad térmica .....	339
10.2.3. Resistencia total de filtración .....	275	12.2. Calor específico .....	340
10.2.4. Tortas compresibles .....	276	12.3. Densidad .....	343
10.3. Filtración a caída de presión constante .....	277	12.4. Difusividad térmica .....	347
10.4. Filtración a caudal volumétrico constante .....	279	Problemas .....	350
10.5. Lavado de la torta .....	283	<b>13. Transmisión de calor por conducción</b> .....	353
10.6. Capacidad de filtración .....	283	13.1. Ecuaciones fundamentales en la conducción de calor .....	353
10.7. Condiciones óptimas de filtración a presión constante .....	285	13.1.1. Coordenadas rectangulares .....	353
10.8. Filtros de vacío de discos rotativos .....	287	13.1.2. Coordenadas cilíndricas .....	356
Problemas .....	287	13.1.3. Coordenadas esféricas .....	356
<b>11. Procesos de separación por membranas</b> .....	297	13.2. Conducción de calor en régimen estacionario .....	357
11.1. Introducción .....	297	13.2.1. Conducción monodimensional de calor .....	358
11.1.1. Etapas en la transferencia de materia .....	301	13.2.2. Conducción bidimensional de calor .....	364
11.1.2. Polarización por concentración .....	301	13.2.3. Conducción tridimensional de calor .....	368
11.2. Modelos de transferencia a través de la membrana .....	301	13.3. Conducción de calor en estado no estacionario .....	369
11.2.1. Modelo de solución-difusión .....	301	13.3.1. Conducción monodimensional de calor .....	370
11.2.2. Modelo simultáneo difusión y flujo capilar .....	302	13.3.2. Conducción bi- y tridimensional de calor. Regla de Newman .....	381
		Problemas .....	382

18 Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos

**14. Transmisión de calor por convección** ..... 395

14.1. Introducción ..... 395

14.2. Coeficientes de transmisión de calor ..... 395

14.2.1. Coeficientes individuales ..... 395

14.2.2. Coeficientes globales ..... 401

14.3. Intercambiadores de calor de tubos concéntricos ..... 405

14.3.1. Características de diseño ..... 405

14.3.2. Cálculo de los coeficientes individuales ..... 409

14.3.3. Cálculo de las pérdidas de carga ..... 410

14.4. Intercambiadores de calor de carcasa y tubos ..... 410

14.4.1. Características de diseño ..... 413

14.4.2. Cálculo de la verdadera diferencia de temperatura media logarítmica ..... 414

14.4.3. Cálculo de los coeficientes individuales ..... 417

14.4.4. Cálculo de las pérdidas de carga ..... 421

14.5. Intercambiadores de calor de placas ..... 422

14.5.1. Características de diseño ..... 425

14.5.2. Número de unidades de transferencia ..... 427

14.5.3. Cálculo de la verdadera diferencia de temperatura media logarítmica ..... 428

14.5.4. Cálculo de los coeficientes de transmisión de calor ..... 432

14.5.5. Cálculo de las pérdidas de carga ..... 432

14.5.6. Procedimiento de diseño ..... 434

14.6. Intercambiadores de calor de superficie ampliada ..... 435

14.6.1. Modelo matemático ..... 437

14.6.2. Eficacia de una aleta ..... 439

14.6.3. Cálculo de intercambiadores de calor de superficie ampliada ..... 439

14.7. Intercambiadores de calor de pared rascada ..... 441

14.8. Depósitos agitados con camisa y serpentines ..... 441

14.8.1. Coeficiente individual en el interior del depósito ..... 442

14.8.2. Coeficiente individual en el interior del serpentín ..... 442

14.8.3. Coeficiente individual en la camisa ..... 443

14.9. Eficacia de intercambio de calor ..... 449

Problemas ..... 483

**15. Transmisión de calor por radiación** ..... 483

15.1. Introducción ..... 484

15.2. Leyes fundamentales ..... 484

15.2.1. Ley de Planck ..... 484

15.2.2. Ley de Wien ..... 485

15.2.3. Ley de Stefan-Boltzmann ..... 485

15.3. Propiedades de la radiación ..... 485

15.3.1. Propiedades totales ..... 485

15.3.2. Propiedades monocromáticas. Ley de Kirchhoff ..... 486

15.3.3. Propiedades direccionales ..... 488

15.4. Factores de visión ..... 489

15.4.1. Definición y cálculo ..... 490

15.4.2. Propiedades de los factores de visión ..... 492

15.5. Intercambio de energía radiante entre superficies separadas por medios no absorbentes ..... 493

15.5.1. Radiación entre superficies negras ..... 493

15.5.2. Radiación entre una superficie y otra negra que la rodea completamente ..... 494

15.5.3. Radiación entre superficies negras en presencia de reflectarias. Factor refractario ..... 494

15.5.4. Radiación entre superficies no negras. Factor gris ..... 496

15.6. Coeficiente de transmisión de calor por radiación ..... 496

15.7. Transmisión simultánea de calor por convección y radiación ..... 497

Problemas ..... 500

**16. Procesado térmico de alimentos** ..... 505

16.1. Introducción ..... 505

16.2. Cinética de destrucción térmica ..... 505

16.2.1. Tiempo de reducción decimal  $D$  ..... 506

16.2.2. Curvas de destrucción térmica ..... 507

16.2.3. Constante de tiempo de muerte térmica  $z$  ..... 508

16.2.4. Grado de reducción  $n$  ..... 511

16.2.5. Tiempo de muerte térmica  $F$  ..... 511

16.2.6. Valor de cocción  $C$  ..... 514

16.2.7. Efecto de la temperatura sobre los parámetros cinéticos y de tratamiento térmico ..... 514

16.3. Tratamiento de productos envasados ..... 515

16.3.1. Curva de penetración de calor ..... 516

16.3.2. Métodos para determinar la letalidad ..... 518

16.4. Tratamiento térmico en el procesado aséptico ..... 520

16.4.1. Tiempos de permanencia ..... 523

16.4.2. Dispersión de tiempos de permanencia ..... 524

16.4.3. Función de distribución  $E$  en el comportamiento ideal .. 527

16.4.4. Función de distribución  $E$  en el comportamiento no ideal ..... 529

16.4.5. Aplicación de los modelos de distribución al tratamiento térmico en continuo ..... 532

Problemas ..... 534

**17. Conservación de alimentos por frío** ..... 547

17.1. Congelación ..... 547

17.2. Temperatura de congelación ..... 549

17.2.1.	Agua no congelada .....	550	18.8.4.	Secado por microondas .....	624
17.2.2.	Masa molecular equivalente de solutos .....	552	18.8.5.	Secaderos de lecho fluidizado .....	624
17.3.	Propiedades térmicas de los alimentos congelados .....	552	Problemas .....	625	
17.3.1.	Densidad .....	552			
17.3.2.	Calor específico .....	553	<b>19. Evaporacion</b> .....	631	
17.3.3.	Conductividad térmica .....	553	19.1.	Introducción .....	631
17.4.	Tiempo de congelación .....	554	19.2.	Transmisión de calor en los evaporadores .....	632
17.5.	Diseño de sistemas de congelación .....	559	19.2.1.	Entalpías de vapores y líquidos .....	633
17.6.	Refrigeración .....	560	19.2.2.	Aumento ebulloscópico .....	634
17.7.	Sistemas mecánicos de refrigeración .....	563	19.2.3.	Coefficientes de transmisión de calor .....	637
17.8.	Refrigerantes .....	565	19.3.	Evaporador de simple efecto .....	638
17.9.	Sistemas multipresión .....	567	19.4.	Aprovechamiento del vapor desprendido .....	639
17.9.1.	Sistemas de dos compresores y un evaporador .....	567	19.4.1.	Recompresión del vapor desprendido .....	639
17.9.2.	Sistemas de dos compresores y dos evaporadores .....	571	19.4.2.	Bomba térmica .....	642
Problemas .....	574	19.4.3.	Múltiple efecto .....	644	
<b>18. Deshidratación</b> .....	583	19.5.	Evaporadores de múltiple efecto .....	645	
18.1.	Introducción .....	583	19.5.1.	Sistemas de circulación de las corrientes .....	646
18.2.	Mezcla de dos corrientes de aire .....	584	19.5.2.	Modelo matemático .....	648
18.3.	Balances de materia y calor en secaderos ideales .....	585	19.5.3.	Resolución del modelo matemático .....	650
18.3.1.	Secadero continuo sin recirculación .....	585	19.5.4.	Procedimiento de cálculo .....	651
18.3.2.	Secadero continuo con recirculación .....	586	19.6.	Equipos de evaporación .....	653
18.4.	Mecanismos de deshidratación .....	587	19.6.1.	Evaporadores de circulación natural .....	653
18.4.1.	Proceso de secado .....	587	19.6.2.	Evaporadores de circulación forzada .....	656
18.4.2.	Período de secado a velocidad constante .....	590	19.6.3.	Evaporadores de tubos largos .....	657
18.4.3.	Período de secado a velocidad decreciente .....	592	19.6.4.	Evaporadores de placas .....	658
18.5.	Secaderos de armario y lecho .....	594	Problemas .....	659	
18.5.1.	Componentes de un secadero .....	595	<b>20. Destilación</b> .....	673	
18.5.2.	Balances de materia y calor .....	596	20.1.	Introducción .....	673
18.6.	Secado por atomización .....	603	20.2.	Equilibrio líquido-vapor .....	673
18.6.1.	Inyectores de presión .....	604	20.2.1.	Presiones parciales. Leyes de Dalton, Raoult y Henry ...	676
18.6.2.	Atomizadores rotatorios .....	605	20.2.2.	Volatilidad relativa .....	678
18.6.3.	Atomizadores neumáticos. Dos fluidos .....	609	20.2.3.	Diagrama entalpía-composición .....	679
18.6.4.	Interacción entre las gotas y el aire de secado .....	610	20.3.	Destilación de mezclas binarias .....	680
18.6.5.	Balances de calor y materia .....	611	20.3.1.	Destilación simple .....	680
18.7.	Liofilización .....	612	20.3.2.	Destilación súbita .....	682
18.7.1.	Etapas de congelación .....	615	20.4.	Rectificación continua de mezclas binarias .....	684
18.7.2.	Etapas primaria y secundaria de secado .....	615	20.4.1.	Cálculo del número de platos .....	685
18.7.3.	Transferencia simultánea de calor y materia .....	616	20.4.2.	Relación de reflujo .....	691
18.8.	Otros tipos de secado .....	621	20.4.3.	Alimentaciones múltiples y extracciones laterales .....	695
18.8.1.	Deshidratación osmótica .....	621	20.4.4.	Eficacia de platos .....	698
18.8.2.	Secado solar .....	622	20.4.5.	Diámetro de la columna .....	699
18.8.3.	Secaderos de tambor .....	623	20.4.6.	Columnas de agotamiento .....	701
			20.5.	Rectificación discontinua .....	702

22 Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos

20.5.1. Operación con composición de destilado constante ....	703
20.5.2. Operación a razón de reflujo constante .....	705
20.6. Destilación por vapor directo .....	706
Problemas .....	709
<b>21. Absorción</b> .....	721
21.1. Introducción .....	721
21.2. Equilibrio líquido-gas .....	722
21.3. Mecanismo de la absorción .....	724
21.3.1. Teoría de la doble película .....	725
21.3.2. Ecuaciones básicas de transferencia de materia .....	725
21.3.3. Velocidad de absorción .....	727
21.4. Columnas de relleno .....	730
21.4.1. Selección del disolvente .....	730
21.4.2. Obtención de datos de equilibrio .....	731
21.4.3. Balance de materias .....	731
21.4.4. Balance entálpico .....	734
21.4.5. Elección del tipo de relleno. Cálculo del diámetro de la columna .....	735
21.4.6. Cálculo de altura de la columna .....	743
21.5. Columnas de platos .....	752
Problemas .....	755
<b>22. Extracción sólido-líquido</b> .....	767
22.1. Introducción .....	767
22.2. Equilibrio sólido-líquido .....	768
22.2.1. Retención de disolución y disolvente .....	770
22.2.2. Diagramas triangular y rectangular .....	771
22.3. Métodos de extracción .....	775
22.3.1. Contacto simple único .....	776
22.3.2. Contacto simple repetido .....	779
22.3.3. Contacto múltiple en contracorriente .....	785
22.4. Aparatos de extracción sólido-líquido .....	792
22.4.1. Extractores de contacto simple .....	792
22.4.2. Sistemas de múltiples contactos con lecho fijo .....	794
22.4.3. Extractores continuos de lecho móvil .....	794
22.4.4. Otros tipos de extractores .....	797
22.5. Aplicaciones a la industria alimentaria .....	799
Problemas .....	805
<b>23. Adsorción. Intercambio iónico</b> .....	815
23.1. Introducción .....	815
23.1.1. Adsorción .....	815
23.1.2. Intercambio iónico .....	815

23.2. Equilibrio de los procesos .....	816
23.2.1. Equilibrio de adsorción .....	816
23.2.2. Equilibrio de intercambio iónico .....	818
23.3. Cinética de los procesos .....	819
23.3.1. Cinética de adsorción .....	819
23.3.2. Cinética de intercambio iónico .....	820
23.4. Operación por etapas .....	821
23.4.1. Contacto simple único .....	821
23.4.2. Contacto simple repetido .....	823
23.4.3. Contacto múltiple en contracorriente .....	824
23.5. Columnas de lecho móvil .....	826
23.6. Columnas de lecho fijo .....	827
23.6.1. Columnas de lecho fijo con equilibrio entre fases .....	828
23.6.2. Método deductivo de Rosen .....	828
23.6.3. Método de la zona de cambio .....	829
Problemas .....	837

<b>Bibliografía</b> .....	845
---------------------------	-----

<b>Apéndice</b> .....	855
-----------------------	-----