

Contenido

Prefacio	xvii
Nomenclatura	xxv
1 ■ CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMODINÁMICA	1
1-1 Termodinámica y energía	2
1-2 Nota acerca de las dimensiones y unidades	4
1-3 Sistemas cerrados y abiertos	8
1-4 Formas de energía	9
1-5 Propiedades de un sistema	12
1-6 Estado y equilibrio	13
1-7 Procesos y ciclos	14
1-8 El postulado de estado	16
1-9 Presión	17
1-10 Temperatura y la ley cero de la termodinámica	21
1-11 Resumen	26
Referencias y lecturas sugeridas	27
Problemas	27
2 ■ PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS	37
2-1 Sustancia pura	38
2-2 Fases de una sustancia pura	38

2-3	Procesos de cambio de fase de sustancias puras	39
2-4	Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase	44
2-5	La superficie P - v - T	50
2-6	Tablas de propiedades	51
2-7	La ecuación de estado de gas ideal	63
2-8	Factor de compresibilidad —una medida de la desviación del comportamiento de gas ideal	66
2-9	Otras ecuaciones de estado	70
2-10	Resumen	75
	Referencias y lecturas sugeridas	76
	Problemas	77

3 ■ LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA: SISTEMAS CERRADOS 91

3-1	Introducción a la primera ley de la termodinámica	92
3-2	Transferencia de calor	92
3-3	Trabajo	100
3-4	Formas mecánicas del trabajo	104
3-5	La primera ley de la termodinámica	116
3-6	Un enfoque sistemático a la solución de problemas	120
3-7	Calores específicos	128
3-8	Energía interna, entalpía y calores específicos de gases ideales	130
3-9	Energía interna, entalpía y calores específicos de sólidos y líquidos	139
3-10	Aspectos termodinámicos de sistemas biológicos	141
3-11	Resumen	148
	Referencias y lecturas sugeridas	150
	Problemas	150

4 ■ LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA: VOLÚMENES DE CONTROL 177

4-1	Análisis termodinámico de volúmenes de control	178
4-2	El proceso de flujo permanente	184
4-3	Algunos dispositivos de ingeniería de flujo permanente	189
4-4	Procesos de flujo no permanente	204
4-5	Resumen	216
	Referencias y lecturas sugeridas	218
	Problemas	218

5 ■ LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA	239
5-1 Introducción a la segunda ley de la termodinámica	240
5-2 Depósitos de energía térmica	241
5-3 Máquinas térmicas	242
5-4 Refrigeradores y bombas de calor	249
5-5 Máquinas de movimiento perpetuo	255
5-6 Procesos reversible e irreversible	257
5-7 El ciclo de Carnot	262
5-8 Los principios de Carnot	265
5-9 La escala termodinámica de temperaturas	266
5-10 La máquina térmica de Carnot	268
5-11 El refrigerador y la bomba de calor de Carnot	273
5-12 Resumen	275
Referencias y lecturas sugeridas	277
Problemas	277
6 ■ ENTROPÍA	295
6-1 La desigualdad de Clausius	296
6-2 Entropía	298
6-3 El principio del incremento de entropía	302
6-4 Causas del cambio de entropía	313
6-5 ¿Qué es la entropía?	315
6-6 Diagramas de propiedades que incluyen a la entropía	319
6-7 Las relaciones $T ds$	322
6-8 El cambio de entropía de sustancias puras	324
6-9 El cambio de entropía de sólidos y líquidos	329
6-10 El cambio de entropía de gases ideales	332
6-11 Trabajo de flujo permanente reversible	340
6-12 Minimización del trabajo del compresor	344
6-13 Eficiencias adiabáticas de algunos dispositivos de flujo permanente	348
6-14 Resumen	356
Referencias y lecturas sugeridas	360
Problemas	361
7 ■ ANÁLISIS DE LA SEGUNDA LEY SISTEMAS DE INGENIERÍA	387
7-1 Disponibilidad —potencial de trabajo máximo	388
7-2 Trabajo reversible e irreversibilidad	390
7-3 Eficiencia de la segunda ley	397

7-4	Análisis de la segunda ley en sistemas cerrados	401
7-5	Análisis de la segunda ley en sistemas de flujo permanente	411
7-6	Análisis de la segunda ley en sistemas de flujo no permanente	416
7-7	Aspectos de la segunda ley en la vida diaria	422
7-8	Resumen	426
	Referencias y lecturas sugeridas	429
	Problemas	429

APÉNDICE 1 ■ TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES DEL SI) A-3

Tabla A-1	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico	A-4
Tabla A-2	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes	A-5
Tabla A-3	Calores específicos y densidades de sólidos y líquidos comunes	A-8
Tabla A-4	Agua saturada —tabla de temperaturas	A-10
Tabla A-5	Agua saturada —tabla de presiones	A-12
Tabla A-6	Agua sobrecalentada	A-14
Tabla A-7	Agua líquida comprimida	A-18
Tabla A-8	Hielo saturado —vapor de agua	A-19
Figura A-9	Diagrama $T-s$ para el agua	A-20
Figura A-10	Diagrama de Mollier para el agua	A-21
Tabla A-11	Refrigerante saturado 12 —tabla de temperatura	A-22
Tabla A-12	Refrigerante saturado 12 —tabla de presión	A-23
Tabla A-13	Refrigerante sobrecalentado 12	A-24
Figura A-14	Diagrama $P-h$ para el refrigerante 12	A-27
Tabla A-15	Refrigerante 134a saturado	A-28
Tabla A-16	Refrigerante 134a sobrecalentado	A-30
Tabla A-17	Propiedades de gas ideal del aire	A-34
Tabla A-18	Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2	A-36
Tabla A-19	Propiedades de gas ideal del oxígeno, O_2	A-38
Tabla A-20	Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO_2	A-40
Tabla A-21	Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO	A-42
Tabla A-22	Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H_2	A-44
Tabla A-23	Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H_2O	A-45
Tabla A-24	Propiedades de gas ideal del oxígeno monoatómico, O	A-47

Tabla A-25	Propiedades de gas ideal del hidróxido, OH	A-47
Tabla A-26	Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25°C, 1 atm	A-48
Tabla A-27	Entalpía de combustión y entalpía de vaporización a 25°C, 1 atm	A-49
Tabla A-28	Logaritmos base e de la constante de equilibrio K_p	A-50
Tabla A-29	Constantes que aparecen en las ecuaciones de estado Beattie-Bridgeman y Benedict-Webb-Rubin	A-51
Figura A-30	Gráfica generalizada de compresibilidad	A-52
Figura A-31	Gráfica generalizada de desviación de entalpía	A-55
Figura A-32	Gráfica generalizada de desviación de entropía	A-57
Figura A-33	Gráfica psicrométrica a 1 atm de presión total	A-59
Tabla A-34	Funciones de flujo compresible isentrópico unidimensional para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, y $k = 1.4$	A-60
Tabla A-35	Funciones de choque normal unidimensional para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, y $k = 1.4$	A-61

APÉNDICE 2 ■ TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES INGLÉSAS)

Tabla A-1E	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico	A-64
Tabla A-2E	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes	A-65
Tabla A-3E	Calores específicos y densidades de sólidos y líquidos comunes	A-68
Tabla A-4E	Agua saturada —tabla de temperaturas	A-69
Tabla A-5E	Agua saturada —tabla de presiones	A-70
Tabla A-6E	Agua sobrecalentada	A-72
Tabla A-7E	Agua líquida comprimida	A-76
Tabla A-8E	Hielo saturado —vapor de agua	A-77
Figura A-9E	Diagrama $T-s$ para el agua	A-78
Figura A-10E	Diagrama de Mollier para el agua	A-79
Tabla A-11E	Refrigerante saturado 12 —tabla de temperatura	A-80
Tabla A-12E	Refrigerante saturado 12 —tabla de presión	A-81
Tabla A-13E	Refrigerante sobrecalentado 12	A-82
Figura A-14E	Diagrama $P-h$ para el refrigerante 12	A-85
Tabla A-15E	Refrigerante saturado 134a	A-86

Contenido

Prefacio	xvii
Nomenclatura	xxv
8 ■ CICLOS DE POTENCIA DE GAS	449
8-1 Consideraciones básicas en el análisis de ciclos de potencia	451
8-2 El ciclo de Carnot y su valor en ingeniería	453
8-3 Suposiciones de aire estándar	455
8-4 Breve panorama de las reciprocantes	456
8-5 Ciclo de Otto: el ciclo ideal para las máquinas de encendido de chispa	457
8-6 Ciclo Diesel: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión	464
8-7 Ciclos de Stirling y Ericsson	468
8-8 Ciclo Brayton: el ciclo ideal para los motores de turbina de gas	472
8-9 El ciclo Brayton con regeneración	479
8-10 El ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración	482
8-11 Ciclos ideales de propulsión de chorro	486
8-12 Análisis de la segunda ley en ciclos de potencia de gas	493
8-13 Resumen	495
Referencias y lecturas sugeridas	498
Problemas	499

9 ■ CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADO	521
9-1 El ciclo de vapor de Carnot	522
9-2 Ciclo Rankine: el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor	523
9-3 Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados	527
9-4 ¿Cómo incrementar la eficiencia del ciclo Rankine?	529
9-5 El ciclo ideal Rankine de recalentamiento	534
9-6 El ciclo ideal Rankine regenerativo	537
9-7 Análisis de la segunda ley en ciclos de potencia de vapor	546
9-8 Cogeneración	548
9-9 Ciclos de vapor binarios	552
9-10 Ciclos de potencia combinados de gas-vapor	555
9-11 Resumen	558
Referencias y lecturas sugeridas	559
Problemas	560
10 ■ CICLOS DE REFRIGERACIÓN	583
10-1 Refrigeradores y bombas de calor	584
10-2 El ciclo de Carnot invertido	585
10-3 El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	587
10-4 Ciclos reales de refrigeración por compresión de vapor	591
10-5 Selección del refrigerante adecuado	593
10-6 Sistemas de bombas de calor	596
10-7 Sistemas innovadores de refrigeración por compresión de vapor	597
10-8 Ciclos de refrigeración de gas	604
10-9 Sistemas de refrigeración por absorción	608
10-10 Generación de potencia termoeléctrica y sistemas de refrigeración	611
10-11 Resumen	613
Referencias y lecturas sugeridas	614
Problemas	615
11 ■ RELACIONES DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS	629
11-1 Un poco de matemáticas: derivadas parciales y relaciones asociadas	630
11-2 Las relaciones de Maxwell	635
11-3 La ecuación de Clapeyron	637
11-4 Relaciones generales para du , dh , ds , C_v y C_p	639

11-5	El coeficiente Joule-Thomson	646
11-6	Δh , Δu y Δs de gases reales	648
11-7	Resumen	653
	Referencias y lecturas sugeridas	655
	Problemas	656
12	■ MEZCLAS DE GASES	665
12-1	Composición de una mezcla de gases: Masa y fracciones moleculares	666
12-2	Comportamiento P - v - T de mezclas de gases: Gases ideales y reales	668
12-3	Propiedades de mezcla de gases: Gases ideales y reales	672
12-4	Resumen	680
	Referencias y lecturas sugeridas	682
	Problemas	682
13	■ MEZCLAS DE GAS-VAPOR Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE	691
13-1	Aire seco y atmosférico	692
13-2	Humedad específica y relativa del aire	693
13-3	Temperatura de punto de rocío	695
13-4	Saturación adiabática y temperaturas de bulbo húmedo	697
13-5	La carta psicrométrica	700
13-6	Comodidad humana y acondicionamiento de aire	701
13-7	Procesos de acondicionamiento de aire	703
13-8	Resumen	717
	Referencias y lecturas sugeridas	720
	Problemas	720
14	■ REACCIONES QUÍMICAS	733
14-1	Combustibles y combustión	734
14-2	Procesos de combustión teórico y real	737
14-3	Entalpía de formación y entalpía de combustión	742
14-4	Análisis de la primera ley de sistemas reactivos	746
14-5	Temperatura de flama adiabática	751
14-6	Cambio de entropía de sistemas reactivos	754
14-7	Análisis de la segunda ley de sistemas reactivos	756
14-8	Resumen	763
	Referencias y lecturas sugeridas	765
	Problemas	766

15 ■ EQUILIBRIO QUÍMICO Y DE FASE	781
15-1 Criterio para el equilibrio químico	782
15-2 La constante de equilibrio para mezclas de gases ideales	784
15-3 Algunas aclaraciones importantes acerca de la K_p de mezclas de gases ideales	787
15-4 Equilibrio químico para reacciones simultáneas	791
15-5 Variación de K_p con la temperatura	793
15-6 Equilibrio de fase	795
15-7 Resumen	799
Referencias y lecturas sugeridas	801
Problemas	801
16 ■ TERMODINÁMICA DEL FLUJO DE FLUIDO A ALTA VELOCIDAD	811
16-1 Propiedades de estancamiento	812
16-2 Velocidad del sonido y número de mach	816
16-3 Flujo isentrópico unidimensional	819
16-4 Flujo isentrópico a través de toberas	826
16-5 Ondas de choque normales en flujo de tobera	835
16-6 Flujo a través de toberas y difusores reales	841
16-7 Toberas de vapor	848
16-8 Resumen	851
Referencias y lecturas sugeridas	855
Problemas	856
APÉNDICE 1 ■ TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES DEL SI)	A-3
Tabla A-1 Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico	A-4
Tabla A-2 Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes	A-5
Tabla A-3 Calores específicos y densidades de sólidos y líquidos comunes	A-8
Tabla A-4 Agua saturada —tabla de temperaturas	A-10
Tabla A-5 Agua saturada —tabla de presiones	A-12
Tabla A-6 Agua sobrecalentada	A-14
Tabla A-7 Agua líquida comprimida	A-18
Tabla A-8 Hielo saturado —vapor de agua	A-19

Figura A-9	Diagrama T - s para el agua	A-20
Figura A-10	Diagrama de Mollier para el agua	A-21
Tabla A-11	Refrigerante saturado 12 —tabla de temperatura	A-22
Tabla A-12	Refrigerante saturado 12 —tabla de presión	A-23
Tabla A-13	Refrigerante sobrecalentado 12	A-24
Figura A-14	Diagrama P - h para el refrigerante 12	A-27
Tabla A-15	Refrigerante 134a saturado	A-28
Tabla A-16	Refrigerante 134a sobrecalentado	A-30
Tabla A-17	Propiedades de gas ideal del aire	A-34
Tabla A-18	Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2	A-36
Tabla A-19	Propiedades de gas ideal del oxígeno, O_2	A-38
Tabla A-20	Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO_2	A-40
Tabla A-21	Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO	A-42
Tabla A-22	Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H_2	A-44
Tabla A-23	Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H_2O	A-45
Tabla A-24	Propiedades de gas ideal del oxígeno monoatómico, O	A-47
Tabla A-25	Propiedades de gas ideal del hidróxido, OH	A-47
Tabla A-26	Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a $25^\circ C$, 1 atm	A-48
Tabla A-27	Entalpía de combustión y entalpía de vaporización a $25^\circ C$, 1 atm	A-49
Tabla A-28	Logaritmos base e de la constante de equilibrio K_p	A-50
Tabla A-29	Constantes que aparecen en las ecuaciones de estado Beattie-Bridgeman y Benedict-Webb-Rubin	A-51
Figura A-30	Gráfica generalizada de compresibilidad	A-52
Figura A-31	Gráfica generalizada de desviación de entalpía	A-55
Figura A-32	Gráfica generalizada de desviación de entropía	A-57
Figura A-33	Gráfica psicrométrica a 1 atm de presión total	A-59
Tabla A-34	Funciones de flujo compresible isentrópico unidimensional para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, y $k = 1.4$	A-60
Tabla A-35	Funciones de choque normal unidimensional para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, y $k = 1.4$	A-61

APÉNDICE 2 ■ TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES INGLÉSAS)

Tabla A-1E	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico	A-64
------------	--	------

Tabla A-2E	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes	A-65
Tabla A-3E	Calores específicos y densidades de sólidos y líquidos comunes	A-68
Tabla A-4E	Agua saturada —tabla de temperaturas	A-69
Tabla A-5E	Agua saturada —tabla de presiones	A-70
Tabla A-6E	Agua sobrecalentada	A-72
Tabla A-7E	Agua líquida comprimida	A-76
Tabla A-8E	Hielo saturado —vapor de agua	A-77
Figura A-9E	Diagrama $T-s$ para el agua	A-78
Figura A-10E	Diagrama de Mollier para el agua	A-79
Tabla A-11E	Refrigerante saturado 12 —tabla de temperatura	A-80
Tabla A-12E	Refrigerante saturado 12 —tabla de presión	A-81
Tabla A-13E	Refrigerante sobrecalentado 12	A-82
Figura A-14E	Diagrama $P-h$ para el refrigerante 12	A-85
Tabla A-15E	Refrigerante saturado 134a	A-86
Tabla A-16E	Refrigerante sobrecalentado 134a	A-88
Tabla A-17E	Propiedades de gas ideal del aire	A-91
Tabla A-18E	Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2	A-93
Tabla A-19E	Propiedades de gas ideal del oxígeno, O_2	A-95
Tabla A-20E	Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO_2	A-97
Tabla A-21E	Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO	A-99
Tabla A-22E	Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H_2	A-101
Tabla A-23E	Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H_2O	A-102
Tabla A-26E	Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a $77^\circ F$, 1 atm	A-104
Tabla A-27E	Entalpía de combustión y entalpía de vaporización a $77^\circ F$, 1 atm	A-105
Tabla A-29E	Constantes que aparecen en las ecuaciones de estado Beattie-Bridgeman y Benedict-Webb-Rubin	A-106
Figura A-33E	Gráfica psicrométrica a 1 atm de presión total	A-107

APÉNDICE 3 ■ ACERCA DEL SOFTWARE

A-109

Índice

I-1