

Prefacio xix

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS 1

- 1-1 Termodinámica y energía 2**
Áreas de aplicación de la termodinámica 3
- 1-2 Importancia de las dimensiones y unidades 3**
Algunas unidades SI e inglesas 6
Homogeneidad dimensional 8
Relaciones de conversión de unidades 9
- 1-3 Sistemas cerrados y abiertos 10**
- 1-4 Propiedades de un sistema 12**
Continuo 12
- 1-5 Densidad y densidad relativa 13**
- 1-6 Estado y equilibrio 14**
Postulado de estado 14
- 1-7 Procesos y ciclos 15**
Proceso de flujo estacionario 16
- 1-8 Temperatura y ley cero de la termodinámica 17**
Escala de temperatura 17
Escala de temperatura internacional de 1990 (ITS-90) 20
- 1-9 Presión 21**
Variación de la presión con la profundidad 23
- 1-10 Manómetro 26**
Otros dispositivos de medición de presión 29
- 1-11 Barómetro y presión atmosférica 29**
- 1-12 Técnica para resolver problemas 33**
Paso 1: enunciado del problema 33
Paso 2: esquema 33
Paso 3: suposiciones y aproximaciones 34
Paso 4: leyes físicas 34
Paso 5: propiedades 34
Paso 6: cálculos 34
Paso 7: razonamiento, comprobación y análisis 34
Paquetes de software de ingeniería 35
Programa para resolver ecuaciones de ingeniería (*Engineering Equation Solver*, EES) 36
Observación acerca de los dígitos significativos 38

Resumen 39
Referencias y lecturas recomendadas 39
Problemas 40

CAPÍTULO 2 ENERGÍA, TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y ANÁLISIS GENERAL DE ENERGÍA 51

- 2-1 Introducción 52**
- 2-2 Formas de energía 53**
Algunas consideraciones físicas en relación con la energía interna 55
Más sobre energía nuclear 56
Energía mecánica 58
- 2-3 Transferencia de energía por calor 60**
Antecedentes históricos sobre el calor 61
- 2-4 Transferencia de energía por trabajo 62**
Trabajo eléctrico 65
- 2-5 Formas mecánicas del trabajo 66**
Trabajo de flecha 66
Trabajo de resorte 67
Trabajo hecho sobre barras sólidas elásticas 67
Trabajo relacionado con el estiramiento de una película líquida 68
Trabajo hecho para elevar o acelerar un cuerpo 68
Formas no mecánicas del trabajo 69
- 2-6 La primera ley de la termodinámica 70**
Balance de energía 71
Cambio de energía de un sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$ 72
Mecanismos de transferencia de energía, E_{entrada} y E_{salida} 73
- 2-7 Eficiencia en la conversión de energía 78**
Eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos 82
- 2-8 Energía y ambiente 86**
Ozono y esmog 87
Lluvia ácida 88
Efecto invernadero: calentamiento global y cambio climático 89

Tema de interés especial:
Mecanismos de transferencia de calor 92
Resumen 96
Referencias y lecturas recomendadas 97
Problemas 98

CAPÍTULO 3 PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS 111

- 3-1 Sustancia pura 112**

3-2 Fases de una sustancia pura 112

3-3 Procesos de cambio de fase en sustancias puras 113
 Líquido comprimido y líquido saturado 114
 Vapor saturado y vapor sobrecalentado 114
 Temperatura de saturación y presión de saturación 115
 Algunas consecuencias de la dependencia de T_{sat} y P_{sat} 117

Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase 118
 1 Diagrama T - v 118
 2 Diagrama P - v 120
 Ampliación de los diagramas para incluir la fase sólida 121
 3 Diagrama P - T 124
 Superficie P - v - T 125

3-5 Tablas de propiedades 126
 Entalpía: una propiedad de combinación 126
 1a Estados de líquido saturado y de vapor saturado 127
 1b Mezcla saturada de líquido-vapor 129
 2 Vapor sobrecalentado 132
 3 Líquido comprimido 133
 Estado de referencia y valores de referencia 135

3-6 Ecuación de estado de gas ideal 137
 ¿El vapor de agua es un gas ideal? 139

3-7 Factor de compresibilidad, una medida de la desviación del comportamiento de gas ideal 139

3-8 Otras ecuaciones de estado 144
 Ecuación de estado de Van der Waals 144
 Ecuación de estado de Beattie-Bridgeman 145
 Ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin 145
 Ecuación de estado virial 145

Tema de interés especial:
Presión de vapor y equilibrio de fases 149
 Resumen 153
 Referencias y lecturas recomendadas 154
 Problemas 154

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE ENERGÍA DE SISTEMAS CERRADOS 165

4-1 Trabajo de frontera móvil 166
 Proceso politrópico 171

4-2 Balance de energía para sistemas cerrados 173

4-3 Calores específicos 178

4-4 Energía interna, entalpía y calores específicos de gases ideales 180
 Relaciones de calores específicos de gases ideales 182

4-5 Energía interna, entalpía y calores específicos de sólidos y líquidos 189
 Cambios de energía interna 189
 Cambios de entalpía 189

Tema de interés especial:
Aspectos termodinámicos de los sistemas biológicos 193
 Resumen 200
 Referencias y lecturas recomendadas 201
 Problemas 201

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE MASA Y ENERGÍA DE VOLÚMENES DE CONTROL 219

5-1 Conservación de la masa 220
 Flujos másico y volumétrico 220
 Principio de conservación de la masa 222
 Balance de masa para procesos de flujo estacionario 223
 Caso especial: flujo incompresible 224

5-2 Trabajo de flujo y energía de un fluido en movimiento 226
 Energía total de un fluido en movimiento 227
 Energía transportada por la masa 228

5-3 Análisis de energía de sistemas de flujo estacionario 230

5-4 Algunos dispositivos de ingeniería de flujo estacionario 233
 1 Toberas y difusores 233
 2 Turbinas y compresores 236
 3 Válvulas de estrangulamiento 239
 4a Cámaras de mezclador 240
 4b Intercambiadores de calor 242
 5 Flujo en tuberías y ductos 244

5-5 Análisis de procesos de flujo no estacionario 246
Tema de interés especial:
Ecuación general de energía 251
 Resumen 254
 Referencias y lecturas recomendadas 255
 Problemas 255

CAPÍTULO 6 LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA 279

6-1 Introducción a la segunda ley 280

6-2 Depósitos de energía térmica 281

6-3 Máquinas térmicas 282
 Eficiencia térmica 283
 ¿Es posible ahorrar Q_{salida} ? 285
 La segunda ley de la termodinámica:
 enunciado de Kelvin-Planck 287

6-4 Refrigeradores y bombas de calor 287
 Coeficiente de desempeño 288
 Bombas de calor 289
 Desempeño de refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor 290

La segunda ley de la termodinámica:
 enunciado de Clausius 292
 Equivalencia de los dos enunciados 293

6-5 Máquinas de movimiento perpetuo 294

6-6 Procesos reversibles e irreversibles 296
 Irreversibilidades 297
 Procesos interna y externamente reversibles 298

6-7 El ciclo de Carnot 299
 Ciclo de Carnot inverso 301

6-8 Principios de Carnot 301

6-9 Escala termodinámica de temperatura 303

6-10 La máquina térmica de Carnot 305
 Calidad de la energía 307
 Cantidad contra calidad en la vida diaria 307

6-11 El refrigerador de Carnot y la bomba de calor 308
Tema de interés especial:
Refrigeradores domésticos 311
 Resumen 315
 Referencias y lecturas recomendadas 316
 Problemas 316

**CAPÍTULO 7
 ENTROPÍA 331**

7-1 Entropía 332
 Caso especial: procesos isotérmicos de transferencia de calor internamente reversibles 334

7-2 El principio del incremento de entropía 335
 Algunos comentarios sobre la entropía 337

7-3 Cambio de entropía de sustancias puras 339

7-4 Procesos isentrópicos 343

7-5 Diagramas de propiedades que involucran a la entropía 344

7-6 ¿Qué es la entropía? 346
 La entropía y la generación de entropía en la vida diaria 348

7-7 Las relaciones $T ds$ 350

7-8 Cambio de entropía de líquidos y sólidos 351

7-9 Cambio de entropía de gases ideales 354
 Calores específicos constantes (análisis aproximado) 355
 Calores específicos variables (análisis exacto) 356
 Procesos isentrópicos de gases ideales 358
 Calores específicos constantes (análisis aproximado) 358
 Calores específicos variables (análisis exacto) 359
 Presión relativa y volumen específico relativo 359

7-10 Trabajo reversible de flujo estacionario 362
 Demostración que los dispositivos de flujo estacionario entregan el máximo trabajo y consumen el mínimo cuando el proceso es reversible 365

7-11 Minimización del trabajo del compresor 366
 Compresión en etapas múltiples con interenfriamiento 367

7-12 Eficiencias isentrópicas de dispositivos de flujo estacionario 370
 Eficiencia isentrópica de turbinas 371
 Eficiencias isentrópicas de compresores y bombas 373
 Eficiencia isentrópica de toberas 375

7-13 Balance de entropía 377
 Cambio de entropía de un sistema, $\Delta S_{\text{sistema}}$ 378
 Mecanismos de transferencia de entropía, S_{entrada} y S_{salida} 378
 1 Transferencia de calor 378
 2 Flujo másico 379
 Generación de entropía, S_{gen} 380
 Sistemas cerrados 381
 Volúmenes de control 381
 Generación de entropía asociada con un proceso de transferencia de calor 388

Tema de interés especial:
Reducción del costo del aire comprimido 390
 Resumen 400
 Referencias y lecturas recomendadas 401
 Problemas 402

**CAPÍTULO 8
 EXERGÍA: UNA MEDIDA DEL POTENCIAL DE TRABAJO 427**

8-1 Exergía: potencial de trabajo de la energía 428
 Exergía (potencial de trabajo) asociada con la energía cinética y potencial 429

8-2 Trabajo reversible e irreversibilidad 431

8-3 Eficiencia según la segunda ley, η_{II} 436

8-4 Cambio de exergía de un sistema 439
 Exergía de una masa fija: exergía sin flujo (o de sistema cerrado) 439
 Exergía de una corriente de flujo: exergía de flujo (o corriente) 442

8-5 Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa 445
 Transferencia de exergía por calor, Q 445
 Transferencia de exergía por trabajo, W 446
 Transferencia de exergía por masa, m 447

8-6 Principio de disminución de exergía y destrucción de exergía 447
 Destrucción de exergía 448

8-7 Balance de exergía: sistemas cerrados 449

8-8 Balance de exergía: volúmenes de control 460
 Balance de exergía para sistemas de flujo estacionario 461
 Trabajo reversible, W_{rev} 462
 Eficiencia según la segunda ley para dispositivos de flujo estacionario, η_{II} 462

- Tema de interés especial:**
Aspectos cotidianos de la segunda ley 468
 Resumen 473
 Referencias y lecturas recomendadas 474
 Problemas 474

CAPÍTULO 9

CICLOS DE POTENCIA DE GAS 491

- 9-1 Consideraciones básicas para el análisis de los ciclos de potencia 492
- 9-2 El ciclo de Carnot y su valor en ingeniería 494
- 9-3 Suposiciones de aire estándar 496
- 9-4 Breve panorama de las máquinas recíprocas 497
- 9-5 Ciclo de Otto: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por chispa 498
- 9-6 Ciclo Diesel: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión 504
- 9-7 Ciclos Stirling y Ericsson 507
- 9-8 Ciclo Brayton: el ciclo ideal para los motores de turbina de gas 511
 Desarrollo de las turbinas de gas 514
 Desviación de los ciclos reales de turbina de gas en comparación con los idealizados 517
- 9-9 Ciclo Brayton con regeneración 519
- 9-10 Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración 521
- 9-11 Ciclos ideales de propulsión por reacción 525
 Modificaciones para motores de turboreactor 529
- 9-12 Análisis de ciclos de potencia de gas con base en la segunda ley 531
- Tema de interés especial:**
Ahorro de combustible y dinero al manejar con sensatez 534
 Resumen 541
 Referencias y lecturas recomendadas 543
 Problemas 543

CAPÍTULO 10

CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS 559

- 10-1 El ciclo de vapor de Carnot 560
- 10-2 Ciclo Rankine: el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor 561
 Análisis de energía del ciclo Rankine ideal 562

- 10-3 Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados 565

10-4 ¿Cómo incrementar la eficiencia del ciclo Rankine? 568

Reducción de la presión del condensador (*reducción de $T_{baja, prom}$*) 568
 Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas (*incremento de $T_{alta, prom}$*) 569
 Incremento de la presión de la caldera (*incremento de $T_{alta, prom}$*) 569

10-5 El ciclo Rankine ideal con recalentamiento 572

- 10-6 El ciclo Rankine ideal regenerativo 576
 Calentadores abiertos de agua de alimentación 576
 Calentadores cerrados de agua de alimentación 578

10-7 Análisis de ciclos de potencia de vapor con base en la segunda ley 584

10-8 Cogeneración 587

10-9 Ciclos de potencia combinados de gas y vapor 591

Tema de interés especial:
Ciclos binarios de vapor 594

Resumen 597
 Referencias y lecturas recomendadas 597
 Problemas 598

CAPÍTULO 11

CICLOS DE REFRIGERACIÓN 615

- 11-1 Refrigeradores y bombas de calor 616
- 11-2 El ciclo invertido de Carnot 617
- 11-3 El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor 618
- 11-4 Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor 622
- 11-5 Análisis de la segunda ley del ciclo de refrigeración por compresión de vapor 624
- 11-6 Selección del refrigerante adecuado 629
- 11-7 Sistemas de bombas de calor 631
- 11-8 Sistemas innovadores de refrigeración por compresión de vapor 633
 Sistemas de refrigeración en cascada 633
 Sistemas de refrigeración por compresión de múltiples etapas 636
 Sistemas de refrigeración de propósito múltiple con un solo compresor 638
 Licuefacción de gases 639
- 11-9 Ciclos de refrigeración de gas 641
- 11-10 Sistemas de refrigeración por absorción 644

Tema de interés especial:
Sistemas termoeléctricos de generación de potencia y de refrigeración 647

Resumen 649
Referencias y lecturas recomendadas 650
Problemas 650

CAPÍTULO 12

RELACIONES DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS 667

12-1 Un poco de matemáticas: derivadas parciales y relaciones asociadas 668

Diferenciales parciales 669
Relaciones de derivadas parciales 671

12-2 Relaciones de Maxwell 672

12-3 La ecuación de Clapeyron 674

12-4 Relaciones generales para du, dh, ds, c_v y c_p 677

Cambios en la energía interna 677
Cambios de entalpía 678
Cambios de entropía 679
Calores específicos c_v y c_p 680

12-5 El coeficiente de Joule-Thomson 684

12-6 Las $\Delta h, \Delta u$ y Δs de gases reales 685

Cambios en la entalpía de gases reales 686
Cambios de energía interna de gases ideales 687
Cambios de entropía de gases reales 687

Resumen 690
Referencias y lecturas recomendadas 691
Problemas 691

CAPÍTULO 13

MEZCLA DE GASES 699

13-1 Composición de una mezcla de gases: fracciones molares y de masa 700

13-2 Comportamiento P - v - T de mezclas de gases: gases ideales y reales 702

Mezclas de gases ideales 703
Mezclas de gases reales 703

13-3 Propiedades de mezclas de gases: gases ideales y reales 707

Mezclas de gases ideales 708
Mezclas de gases reales 711

Tema de interés especial:
Potencial químico y el trabajo de separación de mezclas 715

Resumen 726

Referencias y lecturas recomendadas 727
Problemas 727

CAPÍTULO 14

MEZCLAS DE GAS-VAPOR Y ACONDICIONAMIENTO DE AIRE 737

14-1 Aire seco y aire atmosférico 738

14-2 Humedad específica y relativa del aire 739

14-3 Temperatura de punto de rocío 741

14-4 Temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo 743

14-5 La carta psicrométrica 746

14-6 Comodidad humana y acondicionamiento de aire 747

14-7 Procesos de acondicionamiento de aire 749

Calentamiento y enfriamiento simples ($\omega = \text{constante}$) 750
Calentamiento con humidificación 751
Enfriamiento con deshumidificación 752
Enfriamiento evaporativo 754
Mezclado adiabático de flujos de aire 755
Torres de enfriamiento húmedo 757

Resumen 759
Referencias y lecturas recomendadas 761
Problemas 761

CAPÍTULO 15

REACCIONES QUÍMICAS 771

15-1 Combustibles y combustión 772

15-2 Procesos de combustión teórica y real 776

15-3 Entalpía de formación y entalpía de combustión 782

15-4 Análisis de sistemas reactivos con base en la primera ley 785

Sistemas de flujo estacionario 786
Sistemas cerrados 787

15-5 Temperatura de flama adiabática 790

15-6 Cambio de entropía de sistemas reactivos 793

15-7 Análisis de sistemas reactivos con base en la segunda ley 795

Tema de interés especial:
Celdas de combustible 800

Resumen 802
Referencias y lecturas recomendadas 803
Problemas 803

CAPÍTULO 16

EQUILIBRIO QUÍMICO Y DE FASE 815

- 16-1 Criterio para el equilibrio químico 816**
- 16-2 La constante de equilibrio para mezclas de gases ideales 818**
- 16-3 Algunas observaciones respecto a la K_p de las mezclas de gases ideales 822**
- 16-4 Equilibrio químico para reacciones simultáneas 826**
- 16-5 Variación de K_p con la temperatura 828**
- 16-6 Equilibrio de fase 830**
Equilibrio de fase para un sistema de un solo componente 830
La regla de fases 831
Equilibrio de fases para un sistema multicomponente 832
Resumen 837
Referencias y lecturas recomendadas 838
Problemas 839

CAPÍTULO 17

FLUJO COMPRESIBLE 847

- 17-1 Propiedades de estancamiento 848**
- 17-2 Velocidad del sonido y número de Mach 851**
- 17-3 Flujo isentrópico unidimensional 853**
Variación de la velocidad del fluido con el área de flujo 856
Relaciones de propiedades para el flujo isentrópico de gases ideales 858
- 17-4 Flujo isentrópico a través de toberas aceleradoras 860**
Toberas convergentes 860
Toberas divergentes 865
- 17-5 Ondas de choque y ondas de expansión 869**
Choques normales 869
Choques oblicuos 876
Ondas expansivas de Prandtl-Meyer 880
- 17-6 Flujo en un ducto con transferencia de calor, de fricción insignificante (flujo de Rayleigh) 884**
Relaciones de propiedades para flujos de Rayleigh 890
Flujo de Rayleigh ahogado 891
- 17-7 TOBERAS DE VAPOR de agua 893**
Resumen 896
Referencias y lecturas recomendadas 897
Problemas 898

APÉNDICE 1

TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI) 907

- Tabla A-1** Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico 908
- Tabla A-2** Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes 909
- Tabla A-3** Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes 912
- Tabla A-4** Agua saturada. Tabla de temperaturas 914
- Tabla A-5** Agua saturada. Tabla de presiones 916
- Tabla A-6** Vapor de agua sobrecalentado 918
- Tabla A-7** Agua líquida comprimida 922
- Tabla A-8** Hielo saturado. Vapor de agua 923
- Figura A-9** Diagrama T - s para el agua 924
- Figura A-10** Diagrama de Mollier para el agua 925
- Tabla A-11** Refrigerante 134a saturado. Tabla de temperatura 926
- Tabla A-12** Refrigerante 134a saturado. Tabla de presión 928
- Tabla A-13** Refrigerante 134a sobrecalentado 929
- Figura A-14** Diagrama P - h para el refrigerante 134a 931
- Figura A-15** Carta generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert 932
- Tabla A-16** Propiedades de la atmósfera a gran altitud 933
- Tabla A-17** Propiedades de gas ideal del aire 934
- Tabla A-18** Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2 936
- Tabla A-19** Propiedades de gas del oxígeno, O_2 938
- Tabla A-20** Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO_2 940
- Tabla A-21** Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO 942
- Tabla A-22** Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H_2 944
- Tabla A-23** Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H_2O 945
- Tabla A-24** Propiedades de gas ideal del oxígeno monoatómico, O 947
- Tabla A-25** Propiedades de gas ideal del hidroxilo, OH 947