

CONTENIDO

CAPÍTULO UNO

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TERMODINÁMICA 1

- 1.1 Termodinámica y energía 2
 - Áreas de aplicación de la termodinámica 3
- 1.2 Nota sobre las dimensiones y unidades 3
 - Algunas unidades del SI e inglesas 5
 - Homogeneidad dimensional 7
- 1.3 Sistemas cerrados y abiertos 8
- 1.4 Propiedades de un sistema 10
- 1.5 Estado y equilibrio 12
 - Postulado de estado 12
- 1.6 Procesos y ciclos 13
 - Proceso de flujo estable 14
- 1.7 Formas de energía 14
 - Algunas consideraciones físicas de la energía interna 16
 - Más sobre energía nuclear 18
- 1.8 Energía y ambiente 19
 - Ozono y smog 20
 - Lluvia ácida 21
 - El efecto invernadero: el cambio de clima y calentamiento global 22
- 1.9 Temperatura y la ley cero de la termodinámica 25
 - Escalas de temperatura 25
- 1.10 Presión 28
 - Variación de la presión con la profundidad 30
- 1.11 El manómetro 32
 - Otros instrumentos para medir presión 34
- 1.12 El barómetro y la presión atmosférica 35
- 1.13 Técnica para la solución de problemas 37
 - Una indicación sobre los dígitos significativos 39
 - Paquetes de software para ingeniería 40
 - Engineering Equation Solver [Solucionador de Ecuaciones de Ingeniería] (EES) 41
 - Temas de interés especial: Aspectos termodinámicos de los sistemas biológicos* 42
 - Alimento y ejercicio 44
 - Dietas 47
 - Resumen 50
 - Referencias y lecturas sugeridas 50
 - Problemas 51

CAPÍTULO DOS

PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS 63

- 2.1 Sustancia pura 64
- 2.2 Fases de una sustancia pura 64
- 2.3 Procesos de cambio de fase de sustancias puras 65
 - Líquido comprimido y líquido saturado 65
 - Vapor saturado y vapor sobrecalentado 66
 - Temperatura de saturación y presión de saturación 66
 - Algunas consecuencias de la dependencia de T_{sat} y P_{sat} 68
- 2.4 Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase 70
 - 1 El diagrama T - v 70
 - 2 El diagrama P - v 71
 - Ampliación de los diagramas para incluir la fase sólida 72
 - 3 El diagrama P - T 75
 - La superficie P - v - T 75
- 2.5 Tablas de propiedades 76
 - Entalpía: una propiedad de combinación 77
 - 1a Estados de líquido saturado y de vapor saturado 77
 - 1b Mezcla saturada de líquido-vapor 79
 - 2 Vapor sobrecalentado 82
 - 3 Líquido comprimido 83
 - Estado de referencia y valores de referencia 84
- 2.6 Ecuación de estado de gas ideal 86
 - ¿Es el vapor de agua un gas ideal? 88
- 2.7 Factor de compresibilidad, una medida de la desviación del comportamiento de gas ideal 88
- 2.8 Otras ecuaciones de estado 93
 - Ecuación de estado de van der Waals 93
 - Ecuación de estado de Beattie-Bridgeman 94
 - Ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin 94
 - Ecuación de estado virial 94
- 2.9 Calores específicos 97
- 2.10 Energía interna, entalpía y calores específicos de gases ideales 99
 - Relaciones de calores específicos para gases ideales 102
- 2.11 Energía interna, entalpía y calores específicos de sólidos y líquidos 103
 - Cambio en la energía interna 104

Cambios de entalpía 104

Temas de interés especial: Presión de vapor y equilibrio de fases 105

Resumen 109

Referencias y lecturas sugeridas 110

Problemas 111

CAPÍTULO TRES

TRANSFERENCIA DE ENERGÍA POR CALOR, TRABAJO Y MASA 121

- 3.1** Transferencia de calor 122
Antecedentes históricos acerca del calor 123
- 3.2** Transferencia de energía por trabajo 124
Trabajo eléctrico 127
- 3.3** Formas mecánicas del trabajo 127
1 Trabajo de la frontera móvil 128
2 Trabajo en flecha 133
3 Trabajo de resorte 134
4 Otras formas mecánicas de trabajo 136
- 3.4** Formas no mecánicas del trabajo 138
- 3.5** Principio de conservación de la masa 139
Tasas de flujo másico y de volumen 139
Principio de conservación de la masa 140
Balance de masa para procesos con flujo estable 141
- 3.6** Trabajo de flujo y la energía de un fluido en movimiento 144
Energía total de un fluido en movimiento 145
Transporte de energía por masa 146
Temas de interés especial: Mecanismos de transferencia de calor 148
Resumen 153
Referencias y lecturas sugeridas 153
Problemas 154

CAPÍTULO CUATRO

LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA 163

- 4.1** La primera ley de la termodinámica 164
Balance de energía 165
Cambio de energía de un sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$ 165
Mecanismos de transferencia de energía, E_{entra} y E_{sale} 166
- 4.2** Balance de energía para sistemas cerrados 168
- 4.3** Balance de energía para sistemas de flujo estable 178
Balance de energía para sistemas de flujo estable 179

4.4 Algunos dispositivos con ingeniería de flujo estable 182

- 1 Toberas y difusores 182
2 Turbinas y compresores 185
3 Válvulas de estrangulamiento 187
4a Cámaras de mezclado 189
4b Intercambiadores de calor 190
5 Flujo en tuberías y ductos 193

4.5 Balance de energía para procesos de flujo no estable 194

- Balance de masa 195
Balance de energía 195

Temas de interés especial: Refrigeración y congelación de alimentos 200

- Propiedades térmicas de los alimentos 202
Refrigeración de frutas y verduras 204
Refrigeración de carnes 205
Productos de aves de corral 207
Resumen 211
Referencias y lecturas sugeridas 212
Problemas 212

CAPÍTULO CINCO

LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA 241

- 5.1** Introducción a la segunda ley de la termodinámica 242
- 5.2** Depósitos de energía térmica 243
- 5.3** Máquinas térmicas 243
¿Podemos ahorrar Q_{cal} ? 246
Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin-Planck 249
- 5.4** Eficiencias de conversión de energía 249
- 5.5** Refrigeradores y bombas de calor 253
Coeficiente de funcionamiento 254
Bombas de calor 255
Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Clausius 258
Equivalencia de los dos enunciados 258
- 5.6** Máquinas de movimiento perpetuo 259
- 5.7** Procesos reversible e irreversible 261
Irreversibilidades 263
Procesos interna y externamente reversibles 264
- 5.8** El ciclo de Carnot 265
El ciclo de Carnot inverso 267
- 5.9** Los principios de Carnot 267
- 5.10** La escala termodinámica de temperatura 268
- 5.11** La máquina térmica de Carnot 270
La calidad de la energía 272
Cantidad contra calidad en la vida diaria 273

5.12 El refrigerador y la bomba de calor de Carnot 274

Temas de interés especial: Refrigeradores caseros 277

Resumen 281
Referencias y lecturas sugeridas 282
Problemas 282

Volúmenes de control 345
La generación de entropía asociada a un proceso de transferencia de calor 352

Temas de interés especial: Reducción del costo del aire comprimido 353

Resumen 363
Referencias y lecturas sugeridas 364
Problemas 365

CAPÍTULO SEIS

ENTROPÍA 297

6.1 Entropía 298
Un caso especial: procesos isotérmicos de transferencia de calor internamente reversibles 300

6.2 El principio del incremento de entropía 301
Algunos comentarios sobre la entropía 303

6.3 Cambio de entropía de sustancias puras 305

6.4 Procesos isoentrópicos 308

6.5 Diagramas de propiedades que incluyen a la entropía 309

6.6 ¿Qué es la entropía? 311
La entropía y la generación de entropía en la vida diaria

6.7 Las relaciones $T ds$ 315

6.8 El cambio de entropía de sólidos y líquidos 316

6.9 El cambio de entropía de gases ideales 319
Calores específicos constantes (tratamiento aproximado) 320
Calores específicos variables (tratamiento exacto) 320
Procesos isoentrópicos de gases ideales 322
Calores específicos constantes (tratamiento aproximado) 322
Calores específicos variables (tratamiento exacto) 323
Presión relativa y volumen específico relativo 323

6.10 Trabajo reversible en flujo estable 326
Demostración de que los dispositivos de flujo estable entregan el máximo trabajo y consumen el mínimo cuando el proceso es reversible 329

6.11 Minimización del trabajo del compresor 330
Compresión por etapas múltiples con interenfriamiento 331

6.12 Eficiencias isoentrópicas de algunos dispositivos de flujo estable 334
Eficiencia isoentrópica de turbinas 335
Eficiencia isoentrópica de compresores y bombas 336
Eficiencia isoentrópica de toberas 339

6.13 BALANCE DE ENTROPÍA
Cambio de entropía de un sistema, $\Delta S_{\text{sistema}}$ 342
Mecanismos de transferencia de entropía, S_{entra} y S_{sale} 342
Generación de entropía, S_{gen} 344
Sistemas cerrados 345

CAPÍTULO SIETE

EXERGÍA: UNA MEDIDA DEL POTENCIAL DE TRABAJO 383

7.1 Exergía: potencial de trabajo de la energía 384
Exergía (potencial de trabajo) asociada con las energías cinética y potencial 385

7.2 Trabajo reversible e irreversibilidad 387

7.3 Eficiencia de segunda ley, η_{II} 391

7.4 Cambio de exergía de un sistema 394
Exergía de una masa fija: exergía no de flujo (o de sistema cerrado) 394
Exergía de un fluido en movimiento: exergía de flujo 396

7.5 Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa 399
Transferencia de exergía por transferencia de calor, Q 399
Transferencia de exergía por trabajo, W 400
Transferencia de exergía por masa, m 400

7.6 El principio de decremento de exergía y la destrucción de exergía 401
Destrucción de exergía 402

7.7 Balance de exergía: sistemas cerrados 403

7.8 Balance de exergía: volúmenes de control 414
Balance de exergía para sistemas con flujo estable 414
Temas de interés especial: Aspectos de la segunda ley en la vida diaria 420
Resumen 424
Referencias y lecturas sugeridas 425
Problemas 425

CAPÍTULO OCHO

CICLOS DE POTENCIA DE GAS 439

8.1 Consideraciones básicas en el análisis de ciclos de potencia 440

8.2 El ciclo de Carnot y su valor en ingeniería 442

8.3 Suposiciones de aire estándar 444

- 8.4** Breve panorama de las máquinas recíprocas 444
- 8.5** Ciclo de Otto: el ciclo ideal para las máquinas de encendido de chispa 445
- 8.6** Ciclo Diesel: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión 451
- 8.7** Ciclos de Stirling y Ericsson 454
- 8.8** Ciclo Brayton: el ciclo ideal para los motores de turbina de gas 458
Desarrollo de las turbinas de gas 461
Desviación de los ciclos de turbina de gas reales de los idealizados 463
- 8.9** El ciclo Brayton con regeneración 465
- 8.10** El ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración 467
- 8.11** Ciclos ideales de propulsión por reacción 470
Modificaciones para los motores de turborreactor 474
- 8.12** Análisis de segunda ley en ciclos de potencia de gas 477
- Temas de interés especial: Ahorro de combustible y dinero al manejar sensatamente 480*
Antes de conducir 481
Mientras maneja 483
Después de conducir 486
Resumen 486
Referencias y lecturas sugeridas 488
Problemas 488

CAPÍTULO NUEVE

CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR Y COMBINADOS 499

- 9.1** El ciclo de vapor de Carnot 500
- 9.2** Ciclo Rankine: el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor 501
Análisis de energía del ciclo Rankine ideal 502
- 9.3** Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados 505
- 9.4** ¿Cómo incrementar la eficiencia del ciclo Rankine? 507
Reducción de la presión del condensador (disminución de $T_{baja, prom}$) 507
Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas (aumento de $T_{alta, prom}$) 508
Incremento de la presión de la caldera (aumento de $T_{alta, prom}$) 508

- 9.5** El ciclo Rankine ideal con recalentamiento 511
- 9.6** El ciclo Rankine ideal regenerativo 514
Calentadores abiertos de agua de alimentación 515
Calentadores cerrados de agua de alimentación 516
- 9.7** Análisis de segunda ley en ciclos de potencia de vapor 521
- 9.8** Cogeneración 524
- 9.9** Ciclos de potencia combinados de gas-vapor 528
- Temas de interés especial: Ciclos binarios de vapor 531*
Resumen 533
Referencias y lecturas sugeridas 534
Problemas 534

CAPÍTULO DIEZ

CICLOS DE REFRIGERACIÓN 547

- 10.1** Refrigeradores y bombas de calor 548
- 10.2** El ciclo invertido de Carnot 549
- 10.3** El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor 551
- 10.4** Ciclos reales de refrigeración por compresión de vapor 554
- 10.5** Selección del refrigerante adecuado 557
- 10.6** Sistemas de bombas de calor 558
- 10.7** Sistemas innovadores de refrigeración por compresión de vapor 559
Sistemas de refrigeración en cascadas 560
Sistemas de refrigeración por compresión de múltiples etapas 563
Sistemas de refrigeración de propósito múltiple con un solo compresor 565
Licuefacción de gases 566
- 10.8** Ciclos de refrigeración de gas 567
- 10.9** Sistemas de refrigeración por absorción 570
- Temas de interés especial: Generación de energía termoeléctrica y sistemas de refrigeración 573*
Resumen 575
Referencias y lecturas sugeridas 576
Problemas 576

CAPÍTULO ONCE

RELACIONES DE PROPIEDADES
TERMODINÁMICAS 585

- 11.1 Un poco de matemáticas: derivadas parciales y relaciones asociadas 586
Diferenciales parciales 587
Relaciones de diferenciales parciales 588
- 11.2 Las relaciones de Maxwell 590
- 11.3 La ecuación de Clapeyron 592
- 11.4 Relaciones generales para du , dh , ds , c_v y c_p 595
Cambios de la energía interna 595
Cambio de entalpía 596
Cambios de entropía 597
Calores específicos C_v y C_p 597
- 11.5 El coeficiente Joule-Thomson 601
- 11.6 Las Δh , Δu y Δs de gases reales 603
Cambios de entalpía de gases reales 603
Cambios de energía interna de gases reales 605
Cambios de entropía de gases reales 605
Resumen 608
Referencias y lecturas sugeridas 609
Problemas 609

CAPÍTULO DOCE

MEZCLAS DE GASES 615

- 12.1 Composición de una mezcla de gases: fracciones molares y de masa 616
- 12.2 Comportamiento P - v - T de mezclas de gases: gases ideales y reales 618
Mezcla de gases ideales 619
Mezcla de gases reales 619
- 12.3 Propiedades de mezcla de gases: gases ideales y reales 622
Mezclas de gases ideales 623
Mezclas de gases reales 626
Temas de interés especial: Potencial químico y el trabajo de separación de mezclas 630
Mezclas de gas ideal y soluciones ideales 632
Trabajo mínimo de separación de mezclas 634
Procesos de mezclado reversibles 635
Eficiencia de segunda ley 636
Caso especial: separación de una mezcla de dos componentes 636
Una aplicación: procesos de desalinización 637
Resumen 640
Referencias y lecturas sugeridas 641
Problemas 641

CAPÍTULO TRECE

MEZCLA DE GAS-VAPOR Y ACONDICIONAMIENTO
DE AIRE 647

- 13.1 Aire seco y atmosférico 648
- 13.2 Humedad específica y relativa del aire 649
- 13.3 Temperatura de punto de rocío 651
- 13.4 Temperaturas de saturación adiabática y bulbo húmedo 653
- 13.5 La carta psicrométrica 656
- 13.6 Comodidad humana y acondicionamiento de aire 658
- 13.7 Procesos de acondicionamiento de aire 660
Calentamiento y enfriamiento simple ($\omega = \text{constante}$) 660
Calentamiento con humidificación 661
Enfriamiento con deshumidificación 663
Enfriamiento evaporativo 665
Mezcla adiabática de corrientes de aire 667
Torres de enfriamiento húmedo 669
Resumen 671
Referencias y lecturas sugeridas 672
Problemas 673

CAPÍTULO CATORCE

REACCIONES QUÍMICAS 681

- 14.1 Combustibles y combustión 682
- 14.2 Procesos de combustión teóricos y reales 686
- 14.3 Entalpía de formación y entalpía de combustión 691
- 14.4 Análisis de primera ley de sistemas reactivos 695
Sistemas de flujo estable 695
Sistemas cerrados 696
- 14.5 Temperatura de flama adiabática 699
- 14.6 Cambio de entropía de sistemas reactivos 702
- 14.7 Análisis de segunda ley de sistemas reactivos 703
Temas de interés especial: Celdas de combustible 709
Resumen 710
Referencias y lecturas sugeridas 712
Problemas 712

APÉNDICE 1

TABLAS DE PROPIEDADES Y DIAGRAMAS (UNIDADES DEL SI) 721

Tabla A.1	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto-crítico 722
Tabla A.2	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes 723
Tabla A.3	Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes 726
Tabla A.4	Agua saturada-Tabla de temperaturas 728
Tabla A.5	Agua saturada-Tabla de presiones 730
Tabla A.6	Agua sobrecalentada 732
Tabla A.7	Agua líquida comprimida 736
Tabla A.8	Hielo saturado-vapor de agua 737
Figura A.9	Diagrama $T-s$ para el agua 738
Figura A.10	Diagrama de Mollier para el agua 739
Tabla A.11	Refrigerante 134a saturado-Tabla de temperatura 740
Tabla A.12	Refrigerante 134a saturado-Tabla de presión 741
Tabla A.13	Refrigerante 134a sobrecalentado 742
Figura A.14	Diagrama $P-h$ para el refrigerante 134a 744
Tabla A.15	Funciones unidimensionales isoentrópicas de flujo compresible para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, con $k = 1.4$ 745
Tabla A.16	Funciones unidimensionales de choque normal para un gas ideal con calores específicos y masa molar constantes, con $k = 1.4$ 746
Tabla A.17	Propiedades de gas ideal del aire 747
Tabla A.18	Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2 749
Tabla A.19	Propiedades de gas ideal del oxígeno, O_2 751
Tabla A.20	Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO_2 753
Tabla A.21	Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO 755
Tabla A.22	Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H_2 757
Tabla A.23	Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H_2O 758
Tabla A.24	Propiedades de gas ideal del oxígeno monoatómico, O 760

Tabla A.25	Propiedades de gas ideal del hidroxilo, OH 760
Tabla A.26	Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a $25^\circ C$, 1 atm 761
Tabla A.27	Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes 762
Tabla A.28	Logaritmos base θ de la constante de equilibrio K_p 763
Tabla A.29	Propiedades de la atmósfera a gran altitud 764
Figura A.30a	Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert-bajas presiones 765
Figura A.30b	Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert-presiones intermedias 766
Figura A.30c	Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert-altas presiones 767
Figura A.31	Gráfica generalizada de desviación de entalpía 768
Figura A.32	Gráfica generalizada de desviación de entropía 769
Figura A.33	Gráfica psicométrica a 1 atm de presión total 770

APÉNDICE 2

TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES INGLÉSAS) 771

Tabla A.1E	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico 772
Tabla A.2E	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes 773
Tabla A.3E	Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes 776
Tabla A.4E	Agua saturada-Tabla de temperatura 778
Tabla A.5E	Agua saturada-Tabla de presiones 779
Tabla A.6E	Agua sobrecalentada 781
Tabla A.7E	Agua líquida comprimida 785
Tabla A.8E	Hielo saturado-vapor de agua 786
Figura A.9E	Diagrama $T-s$ para el agua 787
Figura A.10E	Diagrama de Mollier para el agua 788
Tabla A.11E	Refrigerante 134a saturado-Tabla de temperatura 789
Tabla A.12E	Refrigerante 134a saturado-Tabla de presiones 790
Tabla A.13E	Refrigerante 134a sobrecalentado 791

Figura A.14E Diagrama $P-h$ para el refrigerante
134a 793

Tabla A.17E Propiedades de gas ideal
del aire 794

Tabla A.18E Propiedades de gas ideal del
nitrógeno, N_2 796

Tabla A.19E Propiedades de gas ideal del
oxígeno, O_2 798

Tabla A.20E Propiedades de gas ideal del dióxido
de carbono, CO_2 800

Tabla A.21E Propiedades de gas ideal del monóxido
de carbono, CO 802

Tabla A.22E Propiedades de gas ideal del
hidrógeno, H_2 804

Tabla A.23E Propiedades de gas ideal del vapor
de agua, H_2O 805

Tabla A.26E Entalpía de formación, función de Gibbs de
formación y entropía absoluta a $77^\circ F$,
1 atm 807

Tabla A.27E Propiedades de algunos combustibles e
hidrocarburos comunes 808

Tabla A.29E Propiedades de la atmósfera a gran
altitud 809

Figura A.33E Gráfica psicrométrica a 1 atm de presión
total 810

APÉNDICE 3

INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE EES 811

ÍNDICE 825