

# 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  $T_{\text{sat}}$  y  $P_{\text{sat}}$  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
  - Cambios 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,  $E_{\text{entra}}$  y  $E_{\text{sale}}$  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  $Q_{\text{sal}}$ ? 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
  - Coefficiente 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,  $S_{\text{entra}}$  y  $S_{\text{sale}}$  342
- Generación de entropía,  $S_{\text{gen}}$  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,  $\eta_{II}$  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 reciprocantes 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  $T_{\text{baja, prom}}$ ) 507  
Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas (aumento de  $T_{\text{alta, prom}}$ ) 508  
Incremento de la presión de la caldera (aumento de  $T_{\text{alta, prom}}$ ) 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  $\Delta h$ ,  $\Delta u$  y  $\Delta s$  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 comprensible 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 $\theta$ 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 INGLESAS) 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.26E Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 77°F, 1 atm 807
Tabla A.17E Propiedades de gas ideal del aire 794	Tabla A.27E Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes 808
Tabla A.18E Propiedades de gas ideal del nitrógeno, $N_2$ 796	Tabla A.29E Propiedades de la atmósfera a gran altitud 809
Tabla A.19E Propiedades de gas ideal del oxígeno, $O_2$ 798	Figura A.33E Gráfica psicrométrica a 1 atm de presión total 810
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	

## APÉNDICE 3

INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE EES 811

ÍNDICE 825