

Termodinámica

Novena edición

Yunus A. Çengel
Michael A. Boles
Mehmet Kanoğlu

Mc
Graw
Hill



TERMODINÁMICA

NOVENA EDICIÓN

YUNUS A. ÇENGEL

University of Nevada, Reno

MICHAEL A. BOLES

North Carolina State University

MEHMET KANOĞLU

University of Gaziantep

Revisión técnica

Alejandro Rojas Tapia

Universidad Nacional Autónoma de México

**Abraham Laurencio Martínez
Bautista**

*Universidad Nacional Autónoma
de México*

Rodolfo Soto Urbina

Universidad de Costa Rica

Guillermo Evangelista Benites

Universidad Nacional de Trujillo, Perú

Ignacio del Valle Granados

Tecnológico de Costa Rica

Eligio Astorga Cordero

Universidad de Costa Rica

Víctor Hugo Ayerdi Barbales

Universidad del Valle de Guatemala

Leonora de Lemos Medina

Universidad de Costa Rica

Mario René Santizo Calderón

Universidad Rafael Landívar Guatemala



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • GUATEMALA • LONDRES
MADRID • MILÁN • NUEVA DELHI • NUEVA YORK • SAN JUAN
SANTIAGO • SAO PAULO • SIDNEY • SINGAPUR • TORONTO

Director general de Latinoamérica: Martín Chueco
Director editorial Latinoamérica: Hans Serrano
Gerente de portafolio de Universidades Latinoamérica: Gabriela López Ballesteros
Senior Editor: Guillermo Domínguez Chávez
Gerente de pre prensa: José Palacios
Supervisor de pre prensa: Zeferino García

Traductor: Rodolfo Navarro Salas

TERMODINÁMICA

Novena edición

Esta publicación no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, ni registrada en/o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotocopiado, electrónico, ni magnético, electroóptico o de cualquier otro tipo, sin el permiso previo y por escrito de la editorial.



DERECHOS RESERVADOS COPYRIGHT © 2019, 2015, 2012, 2009 respecto a la cuarta edición en español por McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V

Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 16, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Alcaldía Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN 13: 978-1-4562-6978-4

ISBN 10: 1-4562-6978-X

Traducido de *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th edition. Copyright © 2019 por Yunis A. Çengel, Michael A. Boles y Mehmet Kanoğlu, Publicado por McGraw-Hill Global Education Holdings, LLC. All rights reserved. ISBN 125-9822672.

Translated from *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th edition. Copyright © 2019 by Yunis A. Çengel, Michael A. Boles and Mehmet Kanoğlu, Published by McGraw-Hill Global Education Holdings, LLC. All rights reserved. ISBN 978-1-260-09268-4

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 24 23 22 21 20 19

Impreso en México

Printed in Mexico

Citas sobre la ética

Sin la ética, todo sucede como si fuéramos cinco mil millones de pasajeros en una gran maquinaria y nadie es el conductor. Y cada vez va más rápido, pero no sabemos hacia dónde.

Jacques Cousteau

Solo porque puedes hacerlo y porque tienes el derecho a hacerlo, no significa que esté bien hacerlo.

Laura Schlessinger

Un hombre sin ética es un animal salvaje desatado en el mundo.

Manly Hall

La preocupación por un hombre y su destino debe ser siempre el principal interés de cualquier esfuerzo técnico. Nunca hay que olvidarlo entre los diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

Educar la mente de un hombre y no su moral es educar a una amenaza para la sociedad.

Theodore Roosevelt

La política que gira en torno al beneficio es barbarie.

Said Nursi

La verdadera prueba de la civilización no es el censo ni el tamaño de sus ciudades ni de sus cosechas, sino la clase de hombres que produce.

Ralph W. Emerson

La medida del carácter de un hombre es lo que él haría si supiera que nunca sería descubierto.

Thomas B. Macaulay

ACERCA DE LOS AUTORES

Yunus A. Çengel es profesor emérito de ingeniería mecánica en la University of Nevada, en Reno. Obtuvo su licenciatura en ingeniería mecánica en Istanbul Technical University y su maestría y doctorado en ingeniería mecánica en la North Carolina State University. Sus áreas de interés son la energía renovable, la eficiencia energética, las políticas energéticas, la mejora en la transferencia de calor y la educación ingenieril. Ha fungido como director del Industrial Assessment Center (IAC) en la University of Nevada, Reno, de 1996 a 2000. Ha presidido grupos de estudiantes de ingeniería en numerosas instalaciones manufactureras del norte de Nevada y de California, donde ha hecho evaluaciones industriales, y ha preparado informes de conservación de energía, minimización de desperdicios y aumento de producción para esas empresas. También ha trabajado como consejero de varias organizaciones y corporaciones gubernamentales.

El doctor Çengel también es autor o coautor de libros de texto ampliamente difundidos como *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5a. ed., 2015), *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4a. ed., 2018), *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* (5a. ed., 2017) y *Differential Equations for Engineers and Scientists* (1a. ed., 2013), todos publicados por McGraw-Hill. Algunos de estos libros han sido traducidos al chino (tradicional simplificado), japonés, coreano, español, francés, portugués, italiano, turco, griego, tailandés y vasco.

Çengel recibió notables premios a la enseñanza, así como el premio al “autor distinguido” que otorga ASEE Meriam/Wiley, en 1992, y en 2000, por su autoría de excelencia. Es un ingeniero profesional registrado en el estado de Nevada y es miembro de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y de la American Society for Engineering Education (ASEE).

Michael A. Boles es profesor asociado de ingeniería mecánica y aeroespacial en North Carolina State University, donde obtuvo su doctorado en ingeniería mecánica y fue nombrado profesor distinguido por los alumnos. El doctor Boles ha recibido numerosos premios y reconocimientos por su excelencia como profesor de ingeniería. Recibió el premio SAE Ralph R. Teetor de Educación, y dos veces fue electo para la Academia de Profesores Distinguidos de North Carolina State University (ASME). La sección estudiantil de esa universidad lo ha reconocido en forma consistente como “profesor notable del año”, y como el miembro docente con mayor impacto en los alumnos de ingeniería mecánica.

Se especializa en transferencia de calor e intervino en la solución analítica y numérica de cambio de fase y secado de medios porosos. Es miembro de la American Society for Engineering Education (ASEE) y Sigma Xi. El doctor Boles recibió el premio al “autor distinguido” de ASEE Meriam/Wiley, en 1992, por sus excelentes autorías.

Mehmet Kanoğlu es profesor de ingeniería mecánica en la Universidad de Goziantep. Obtuvo su licenciatura en ingeniería mecánica en la Istanbul Technical University y su maestría y doctorado en ingeniería mecánica en la University of Nevada, Reno. Sus áreas de investigación incluyen eficiencia energética, sistemas de refrigeración, licuefacción de gases, producción y licuefacción de hidróge-

no, sistemas de energía renovable, energía geotérmica, y cogeneración. Es autor y coautor de más de 60 artículos para revistas y numerosos artículos para conferencias.

El Dr. Kanoğlu ha impartido cursos en la University of Nevada, Reno, University of Ontario Institute of Technology, American University of Sharjah, y University of Goziantep. Es coautor de los libros *Refrigeration Systems and Applications* (2a. ed. Wiley, 2010) y *Efficiency Evaluation of Energy Systems* (Springer, 2012).

El Dr. Kanoğlu ha fungido como instructor en programas de entrenamiento para gerentes de energía certificados y como experto para el United Nations Development Programme (UNDP) en proyectos de eficiencia energética y energía renovable. Ha impartido numerosos cursos de entrenamiento, conferencias y presentaciones sobre eficiencia energética y sistemas de energía renovable. También se ha desempeñado como asesor de organizaciones estatales de financiación de proyectos de investigación y de compañías industriales.

CONTENIDO BREVE

CAPÍTULO 1

Introducción y conceptos básicos 1

CAPÍTULO 2

Energía, transferencia de energía y análisis general de energía 51

CAPÍTULO 3

Propiedades de las sustancias puras 109

CAPÍTULO 4

Análisis de energía de sistemas cerrados 159

CAPÍTULO 5

Análisis de masa y energía de volúmenes de control 209

CAPÍTULO 6

La segunda ley de la termodinámica 267

CAPÍTULO 7

Entropía 319

CAPÍTULO 8

Exergía 411

CAPÍTULO 9

Ciclos de potencia de gas 473

CAPÍTULO 10

Ciclos de potencia de vapor y combinados 543

CAPÍTULO 11

Ciclos de refrigeración 599

CAPÍTULO 12

Relaciones de propiedades termodinámicas 647

CAPÍTULO 13

Mezcla de gases 677

CAPÍTULO 14

Mezclas de gas-vapor y acondicionamiento de aire 711

CAPÍTULO 15

Reacciones químicas 747

CAPÍTULO 16

Equilibrio químico y de fase 791

CAPÍTULO 17

Flujo compresible 823

CAPÍTULO 18 (CAPÍTULO EN LA WEB)

Energía renovable

APÉNDICE 1

Tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades SI) 881

APÉNDICE 2

Tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades inglesas) 931

CONTENIDO

Prefacio xvi

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 y volúmenes de control 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 internacional de temperatura de 1990 (ITS-90) 20
- 1-9 Presión 21**
Variación de la presión con la profundidad 23
- 1-10 Dispositivos para la medición de la presión 26**
Barómetro 26
Manómetro 29
Otros dispositivos de medición de presión 32
- 1-11 Técnica para resolver problemas 33**
Paso 1: enunciado del problema 34
Paso 2: esquema 34
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 35
Paquetes de software de ingeniería 35
Solucionadores de ecuaciones 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 de 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 70
- 2-6 La primera ley de la termodinámica 70**
Balance de energía 72
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 77**
Eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos 81
- 2-8 Energía y ambiente 85**
Ozono y esmog 86
Lluvia ácida 87
Efecto invernadero: calentamiento global y cambio climático 88

Tema de interés especial:
Mecanismos de transferencia de calor 91
Resumen 96
Referencias y lecturas recomendadas 96
Problemas 97

CAPÍTULO 3

Propiedades de las sustancias puras 109

- 3-1 Sustancia pura 110**
- 3-2 Fases de una sustancia pura 110**

- 3-3 Procesos de cambio de fase en sustancias puras 111**
 Líquido comprimido y líquido saturado 112
 Vapor saturado y vapor sobrecalentado 112
 Temperatura de saturación y presión de saturación 113
 Algunas consecuencias de la dependencia de T_{sat} y P_{sat} 115
- 3-4 Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase 116**
 1 Diagrama T - v 116
 2 Diagrama P - v 118
 Ampliación de los diagramas para incluir la fase sólida 119
 3 Diagrama P - T 121
 Superficie P - v - T 121
- 3-5 Tablas de propiedades 122**
 Entalpía: una propiedad de combinación 123
 1a Estados de líquido saturado y de vapor saturado 123
 1b Mezcla saturada de líquido-vapor 125
 2 Vapor sobrecalentado 128
 3 Líquido comprimido 130
 Estado de referencia y valores de referencia 131
- 3-6 Ecuación de estado de gas ideal 133**
 ¿El vapor de agua es un gas ideal? 135
- 3-7 Factor de compresibilidad, una medida de la desviación del comportamiento de gas ideal 136**
- 3-8 Otras ecuaciones de estado 139**
 Ecuación de estado de Van der Waals 140
 Ecuación de estado de Beattie-Bridgeman 140
 Ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin 141
 Ecuación de estado virial 142
- Tema de interés especial:*
Presión de vapor y equilibrio de fases 144
 Resumen 148
 Referencias y lecturas recomendadas 149
 Problemas 149

CAPÍTULO 4

Análisis de energía de sistemas cerrados 159

- 4-1 Trabajo de frontera móvil 160**
 Proceso politrópico 164
- 4-2 Balance de energía para sistemas cerrados 166**
- 4-3 Calores específicos 171**
- 4-4 Energía interna, entalpía y calores específicos de gases ideales 172**
 Relaciones de calores específicos de gases ideales 175
- 4-5 Energía interna, entalpía y calores específicos de sólidos y líquidos 180**
 Cambios de energía interna 180
 Cambios de entalpía 180

Tema de interés especial:
Aspectos termodinámicos de los sistemas biológicos 183

- Resumen 191
 Referencias y lecturas recomendadas 192
 Problemas 192

CAPÍTULO 5

Análisis de masa y energía de volúmenes de control 209

- 5-1 Conservación de la masa 210**
 Flujos másico y volumétrico 210
 Principio de conservación de la masa 212
 Balance de masa para procesos de flujo estacionario 214
 Caso especial: flujo incompresible 214
- 5-2 Trabajo de flujo y energía de un fluido en movimiento 216**
 Energía total de un fluido en movimiento 217
 Energía transportada por la masa 218
- 5-3 Análisis de energía de sistemas de flujo estacionario 220**
- 5-4 Algunos dispositivos ingenieriles de flujo estacionario 223**
 1 Toberas y difusores 223
 2 Turbinas y compresores 226
 3 Válvulas de estrangulamiento 229
 4a Cámaras de mezclado 230
 4b Intercambiadores de calor 232
 5 Flujo en tuberías y ductos 234
- 5-5 Análisis de procesos de flujo no estacionario 236**
Tema de interés especial:
Ecuación general de energía 241
 Resumen 244
 Referencias y lecturas recomendadas 245
 Problemas 245

CAPÍTULO 6

La segunda ley de la termodinámica 267

- 6-1 Introducción a la segunda ley 268**
- 6-2 Depósitos de energía térmica 269**
- 6-3 Máquinas térmicas 270**
 Eficiencia térmica 271
 ¿Es posible ahorrar Q_{salida} ? 273
 La segunda ley de la termodinámica:
 enunciado de Kelvin-Planck 275
- 6-4 Refrigeradores y bombas de calor 275**
 Coeficiente de desempeño 276
 Bombas de calor 277
 Desempeño de refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor 278

- La segunda ley de la termodinámica:
 enunciado de Clausius 280
 Equivalencia de los dos enunciados 280
- 6-5 Máquinas de movimiento perpetuo 281**
- 6-6 Procesos reversibles e irreversibles 284**
 Irreversibilidades 285
 Procesos interna y externamente reversibles 286
- 6-7 El ciclo de Carnot 287**
 Ciclo de Carnot inverso 289
- 6-8 Principios de Carnot 289**
- 6-9 Escala termodinámica de temperatura 290**
- 6-10 La máquina térmica de Carnot 292**
 Calidad de la energía 294
 Cantidad contra calidad en la vida diaria 295
- 6-11 El refrigerador de Carnot y la bomba de calor 296**
Tema de interés especial:
Refrigeradores domésticos 299
 Resumen 303
 Referencias y lecturas recomendadas 304
 Problemas 304

CAPÍTULO 7

Entropía 319

- 7-1 Entropía 320**
 Caso especial: procesos isotérmicos de transferencia de calor internamente reversibles 322
- 7-2 El principio del incremento de entropía 323**
 Algunos comentarios sobre la entropía 325
- 7-3 Cambio de entropía de sustancias puras 327**
- 7-4 Procesos isentrópicos 331**
- 7-5 Diagramas de propiedades que involucran a la entropía 332**
- 7-6 ¿Qué es la entropía? 334**
 La entropía y la generación de entropía en la vida diaria 336
- 7-7 Las relaciones $T ds$ 337**
- 7-8 Cambio de entropía de líquidos y sólidos 339**
- 7-9 Cambio de entropía de gases ideales 342**
 Calores específicos constantes (análisis aproximado) 343
 Calores específicos variables (análisis exacto) 343
 Procesos isentrópicos de gases ideales 345
 Calores específicos constantes (análisis aproximado) 345
 Calores específicos variables (análisis exacto) 346
 Presión relativa y volumen específico relativo 346

- 7-10 Trabajo reversible de flujo estacionario 350**
 Demostración de que los dispositivos de flujo estacionario entregan el máximo trabajo y consumen el mínimo cuando el proceso es reversible 353
- 7-11 Minimización del trabajo del compresor 354**
 Compresión en etapas múltiples con interenfriamiento 355
- 7-12 Eficiencias isentrópicas de dispositivos de flujo estacionario 357**
 Eficiencia isentrópica de turbinas 358
 Eficiencias isentrópicas de compresores y bombas 360
 Eficiencia isentrópica de toberas 362
- 7-13 Balance de entropía 364**
 Cambio de entropía de un sistema, $\Delta S_{\text{sistema}}$ 365
 Mecanismos de transferencia de entropía, S_{entrada} y S_{salida} 365
 1 Transferencia de calor 366
 2 Flujo másico 366
 Generación de entropía, S_{gen} 367
 Sistemas cerrados 368
 Volúmenes de control 369
 Generación de entropía asociada con un proceso de transferencia de calor 376
Tema de interés especial:
Reducción del costo del aire comprimido 377
 Resumen 386
 Referencias y lecturas recomendadas 387
 Problemas 388

CAPÍTULO 8

Exergía 411

- 8-1 Exergía: potencial de trabajo de la energía 412**
 Exergía (potencial de trabajo) asociada con la energía cinética y potencial 413
- 8-2 Trabajo reversible e irreversibilidad 415**
- 8-3 Eficiencia según la segunda ley, η_{II} 420**
- 8-4 Cambio de exergía de un sistema 423**
 Exergía de una masa fija: exergía sin flujo (o de sistema cerrado) 423
 Exergía de una corriente de flujo: exergía de flujo (o corriente) 425
- 8-5 Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa 428**
 Transferencia de exergía por calor, Q 428
 Transferencia de exergía por trabajo, W 430
 Transferencia de exergía por masa, m 430
- 8-6 Principio de disminución de exergía y destrucción de exergía 431**
 Destrucción de exergía 432
- 8-7 Balance de exergía: sistemas cerrados 432**

8-8 Balance de exergía: volúmenes de control 444

Balance de exergía para sistemas de flujo estacionario 444
Trabajo reversible 445
Eficiencia según la segunda ley para dispositivos de flujo estacionario, η_{II} 445

Tema de interés especial:

Aspectos cotidianos de la segunda ley 452

Resumen 456
Referencias y lecturas recomendadas 457
Problemas 458

CAPÍTULO 9

Ciclos de potencia de gas 473

9-1 Consideraciones básicas para el análisis de los ciclos de potencia 474

9-2 El ciclo de Carnot y su valor en ingeniería 476

9-3 Suposiciones de aire estándar 478

9-4 Breve panorama de las máquinas recíprocantes 479

9-5 Ciclo de Otto: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por chispa 480

9-6 Ciclo Diésel: el ciclo ideal para las máquinas de encendido por compresión 487

9-7 Ciclos Stirling y Ericsson 491

9-8 Ciclo Brayton: el ciclo ideal para los motores de turbina de gas 495

Desarrollo de las turbinas de gas 497
Desviación de los ciclos reales de turbina de gas en comparación con los idealizados 500

9-9 Ciclo Brayton con regeneración 502

9-10 Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración 504

9-11 Ciclos ideales de propulsión por reacción 508

Modificaciones para motores de turborreactor 512

9-12 Análisis de ciclos de potencia de gas con base en la segunda ley 515

Tema de interés especial:

Ahorro de combustible y dinero al manejar con sensatez 518

Resumen 525
Referencias y lecturas recomendadas 526
Problemas* 527

CAPÍTULO 10

Ciclos de potencia de vapor y combinados 543

10-1 El ciclo de vapor de Carnot 544

10-2 Ciclo Rankine: el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor 545

Análisis de energía del ciclo Rankine ideal 546

10-3 Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados 549

10-4 ¿Cómo incrementar la eficiencia del ciclo Rankine? 552

Reducción de la presión del condensador (*reducción de $T_{baja,prom}$*) 552
Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas (*incremento de $T_{alta,prom}$*) 553
Incremento de la presión de la caldera (*incremento de $T_{alta,prom}$*) 553

10-5 El ciclo Rankine ideal con recalentamiento 556

10-6 El ciclo Rankine ideal regenerativo 560

Calentadores abiertos de agua de alimentación 560
Calentadores cerrados de agua de alimentación 562

10-7 Análisis de ciclos de potencia de vapor con base en la segunda ley 568

10-8 Cogeneración 570

10-9 Ciclos de potencia combinados de gas y vapor 575

Tema de interés especial:

Ciclos binarios de vapor 578

Resumen 581
Referencias y lecturas recomendadas 581
Problemas 582

CAPÍTULO 11

Ciclos de refrigeración 599

11-1 Refrigeradores y bombas de calor 600

11-2 El ciclo invertido de Carnot 601

11-3 El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor 602

11-4 Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor 606

11-5 Análisis de la segunda ley del ciclo de refrigeración por compresión de vapor 608

11-6 Selección del refrigerante adecuado 613

11-7 Sistemas de bombas de calor 615

- 11-8 Sistemas innovadores de refrigeración por compresión de vapor 616**
Sistemas de refrigeración en cascada 617
Sistemas de refrigeración por compresión de múltiples etapas 619
Sistemas de refrigeración de propósito múltiple con un solo compresor 621
Licuefacción de gases 622
- 11-9 Ciclos de refrigeración de gas 623**
- 11-10 Sistemas de refrigeración por absorción 626**
Tema de interés especial:
Sistemas termoelectricos de generación de potencia y de refrigeración 630
Resumen 632
Referencias y lecturas recomendadas 633
Problemas 633

CAPÍTULO 12

Relaciones de propiedades termodinámicas 647

- 12-1 Un poco de matemáticas: derivadas parciales y relaciones asociadas 648**
Diferenciales parciales 649
Relaciones de derivadas parciales 650
- 12-2 Relaciones de Maxwell 652**
- 12-3 La ecuación de Clapeyron 654**
- 12-4 Relaciones generales para du, dh, ds, c_v y c_p 657**
Cambios en la energía interna 657
Cambios de entalpía 658
Cambios de entropía 659
Calores específicos c_v y c_p 659
- 12-5 El coeficiente de Joule-Thomson 663**
- 12-6 Las $\Delta h, \Delta u$ y Δs de gases reales 665**
Cambios en la entalpía de gases reales 665
Cambios de energía interna de gases ideales 666
Cambios de entropía de gases reales 667
Resumen 670
Referencias y lecturas recomendadas 671
Problemas 671

CAPÍTULO 13

Mezcla de gases 677

- 13-1 Composición de una mezcla de gases: fracciones molares y de masa 678**
- 13-2 Comportamiento P - v - T de mezclas de gases: gases ideales y reales 679**
Mezclas de gases ideales 680
Mezclas de gases reales 681

- 13-3 Propiedades de mezclas de gases: gases ideales y reales 684**
Mezclas de gases ideales 685
Mezclas de gases reales 688
Tema de interés especial:
Potencial químico y el trabajo de separación de mezclas 692
Resumen 702
Referencias y lecturas recomendadas 703
Problemas 703

CAPÍTULO 14

Mezclas de gas-vapor y acondicionamiento de aire 711

- 14-1 Aire seco y aire atmosférico 712**
- 14-2 Humedad específica y relativa del aire 713**
- 14-3 Temperatura de punto de rocío 715**
- 14-4 Temperaturas de saturación adiabática y de bulbo húmedo 717**
- 14-5 La carta psicrométrica 720**
- 14-6 Comodidad humana y acondicionamiento de aire 721**
- 14-7 Procesos de acondicionamiento de aire 723**
Calentamiento y enfriamiento simples ($\omega = \text{constante}$) 724
Calentamiento con humidificación 725
Enfriamiento con deshumidificación 727
Enfriamiento evaporativo 728
Mezclado adiabático de flujos de aire 730
Torres de enfriamiento húmedo 732
Resumen 735
Referencias y lecturas recomendadas 736
Problemas 736

CAPÍTULO 15

Reacciones químicas 747

- 15-1 Combustibles y combustión 748**
- 15-2 Procesos de combustión teórica y real 752**
- 15-3 Entalpía de formación y entalpía de combustión 758**
- 15-4 Análisis de sistemas reactivos con base en la primera ley 762**
Sistemas de flujo estacionario 762
Sistemas cerrados 763
- 15-5 Temperatura de flama adiabática 767**

- 15-6 Cambio de entropía de sistemas reactivos 770**
- 15-7 Análisis de sistemas reactivos con base en la segunda ley 771**
Tema de interés especial:
Celdas de combustible 777
Resumen 778
Referencias y lecturas recomendadas 779
Problemas 780

CAPÍTULO 16

Equilibrio químico y de fase 791

- 16-1 Criterio para el equilibrio químico 792**
- 16-2 La constante de equilibrio para mezclas de gases ideales 794**
- 16-3 Algunas observaciones respecto a la K_p de las mezclas de gases ideales 798**
- 16-4 Equilibrio químico para reacciones simultáneas 802**
- 16-5 Variación de K_p con la temperatura 804**
- 16-6 Equilibrio de fase 806**
Equilibrio de fase para un sistema de un solo componente 806
La regla de fases 807
Equilibrio de fases para un sistema multicomponente 808
Resumen 814
Referencias y lecturas recomendadas 815
Problemas 815

CAPÍTULO 17

Flujo compresible 823

- 17-1 Propiedades de estancamiento 824**
- 17-2 Velocidad del sonido y número de Mach 827**
- 17-3 Flujo isentrópico unidimensional 829**
Variación de la velocidad del fluido con el área de flujo 832
Relaciones de propiedades para el flujo isentrópico de gases ideales 834
- 17-4 Flujo isentrópico a través de toberas aceleradoras 836**
Toberas convergentes 836
Toberas convergentes-divergentes 840
- 17-5 Ondas de choque y ondas de expansión 844**
Choques normales 844

- Choques oblicuos 850
Ondas expansivas de Prandtl-Meyer 855

- 17-6 Flujo en un ducto con transferencia de calor y fricción insignificante (flujo de Rayleigh) 860**
Relaciones de propiedades para flujos de Rayleigh 865
Flujo de Rayleigh ahogado 867
- 17-7 Toberas de vapor de agua 869**
Resumen 872
Referencias y lecturas recomendadas 873
Problemas 873

CAPÍTULO 18 (CAPÍTULO EN LA WEB)

disponible en www.mhhe.com/cengel/termo9e
Energía renovable

- 18-1 Introducción**
- 18-2 Energía solar**
Radiación solar
Captador solar de placa plana
Captador solar concentrador
Captador de energía solar concentrador lineal
Centrales solares de torre
Estanque solar
Celdas fotovoltaicas
Aplicaciones solares pasivas
Ganancia de calor solar a través de las ventanas
- 18-3 Energía eólica**
Tipos de turbinas eólicas y curva de rendimiento energético
Potencial de energía eólica
Densidad de energía eólica
Eficiencia de turbina eólica
Límite de Betz para la eficiencia de turbina eólica
- 18-4 Energía hidráulica**
Análisis de una planta de energía hidroeléctrica
Tipos de turbinas
- 18-5 Energía geotérmica**
Producción de energía geotérmica
- 18-6 Energía de biomasa**
Recursos de biomasa
Conversión de la biomasa en biocombustible
Productos de biomasa
Producción de electricidad y calor por medio de biomasa
Deshechos sólidos municipales
Resumen
Referencias y lecturas sugeridas
Problemas

APÉNDICE 1

Tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades SI) 881

TABLA A-1	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico 882
TABLA A-2	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes 883
TABLA A-3	Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes 886
TABLA A-4	Agua saturada. Tabla de temperaturas 888
TABLA A-5	Agua saturada. Tabla de presiones 890
TABLA A-6	Vapor de agua sobrecalentado 892
TABLA A-7	Agua líquida comprimida 896
TABLA A-8	Hielo saturado. Vapor de agua 897
FIGURA A-9	Diagrama T - s para el agua 898
FIGURA A-10	Diagrama de Mollier para el agua 899
TABLA A-11	Refrigerante R-134a saturado. Tabla de temperatura 900
TABLA A-12	Refrigerante R-134a saturado. Tabla de presión 902
TABLA A-13	Refrigerante R-134a sobrecalentado 903
FIGURA A-14	Diagrama P - h para el refrigerante R-134a 905
FIGURA A-15	Carta generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert 906
TABLA A-16	Propiedades de la atmósfera a gran altitud 907
TABLA A-17	Propiedades de gas ideal del aire 908
TABLA A-18	Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2 910
TABLA A-19	Propiedades de gas ideal del oxígeno, O_2 912
TABLA A-20	Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO_2 914
TABLA A-21	Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO 916
TABLA A-22	Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H_2 918
TABLA A-23	Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H_2O 919

TABLA A-24	Propiedades de gas ideal del oxígeno monoatómico, O 921
TABLA A-25	Propiedades de gas ideal del hidroxilo, OH 921
TABLA A-26	Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a $25^\circ C$, 1 atm 922
TABLA A-27	Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes 923
TABLA A-28	Logaritmos naturales de la constante de equilibrio K_p 924
FIGURA A-29	Carta generalizada de desviación de entalpía 925
FIGURA A-30	Carta generalizada de desviación de entropía 926
FIGURA A-31	Carta psicrométrica a 1 atm de presión total 927
TABLA A-32	Funciones de flujo compresible unidimensional e isentrópico de un gas ideal con $k = 1.4$ 928
TABLA A-33	Funciones de choque normal unidimensional de un gas ideal con $k = 1.4$ 929
TABLA A-34	Funciones del flujo de Rayleigh para un gas ideal con $K = 1.4$ 930

APÉNDICE 2

Tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades inglesas) 931

TABLA A-1E	Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico 932
TABLA A-2E	Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes 933
TABLA A-3E	Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes 936
TABLA A-4E	Agua saturada. Tabla de temperaturas 938
TABLA A-5E	Agua saturada. Tabla de presiones 940
TABLA A-6E	Vapor de agua sobrecalentado 942
TABLA A-7E	Agua líquida comprimida 946
TABLA A-8E	Hielo saturado. Vapor de agua 947

FIGURA A-9E	Diagrama $T-s$ para el agua	948	TABLA A-21E	Propiedades de gas ideal del monóxido de carbono, CO	964
FIGURA A-10E	Diagrama de Mollier para el agua	949	TABLA A-22E	Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H ₂	966
TABLA A-11E	Refrigerante R-134a saturado. Tabla de temperatura	950	TABLA A-23E	Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H ₂ O	967
TABLA A-12E	Refrigerante R-134a saturado. Tabla de presión	951	TABLA A-26E	Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 77°F, 1 atm	969
TABLA A-13E	Refrigerante R-134a sobrecalentado	952	TABLA A-27E	Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes	970
FIGURA A-14E	Diagrama $P-h$ para el refrigerante R-134a	954	FIGURA A-31E	Gráfica psicrométrica a 1 atm de presión total	971
TABLA A-16E	Propiedades de la atmósfera a gran altitud	955	Índice analítico		973
TABLA A-17E	Propiedades de gas ideal del aire	956	Nomenclatura		980
TABLA A-18E	Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N ₂	958	Factores de conversión		982
TABLA A-19E	Propiedades de gas ideal del oxígeno, O ₂	960			
TABLA A-20E	Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO ₂	962			

PREFACIO

ANTECEDENTES

La termodinámica es una materia excitante y fascinante que trata sobre la energía, la cual es esencial para la conservación de la vida, además de que ha sido por mucho tiempo una parte fundamental de los programas de estudio de ingeniería en todo el mundo. Es una ciencia que tiene una amplia aplicación: desde los organismos microscópicos hasta los electrodomésticos, los vehículos de transporte, los sistemas de generación de energía eléctrica e incluso la filosofía. Este libro contiene material suficiente para dos cursos consecutivos de termodinámica; se presupone que los estudiantes poseen antecedentes sólidos en física y cálculo.

OBJETIVOS

Esta obra está pensada para utilizarse como libro de texto por los estudiantes durante los últimos años de su licenciatura, así como por ingenieros como libro de referencia. Sus objetivos son:

- Cubrir los *principios básicos* de la termodinámica.
- Presentar una vasta cantidad de *ejemplos reales de ingeniería* con la finalidad de proporcionar al estudiante una idea de cómo se aplica la termodinámica en la práctica de la ingeniería.
- Desarrollar una *comprensión intuitiva* de la termodinámica haciendo énfasis en la física y en los argumentos físicos.

Se desea sobre todo que este libro —mediante sus explicaciones claras sobre conceptos y el uso de numerosos ejemplos prácticos y figuras— ayude a los estudiantes a desarrollar las habilidades básicas para llenar el hueco que existe entre el conocimiento y la confianza para aplicar adecuadamente tal aprendizaje.

FILOSOFÍA Y OBJETIVO

La filosofía que contribuyó a la enorme popularidad que gozaron las ediciones anteriores de esta obra se ha conservado intacta en esta nueva edición. En particular, el objetivo ha sido proporcionar un libro de ingeniería que:

- Llegue directamente y *de una manera sencilla pero precisa* a la mente de los futuros ingenieros.
- Conduzca a los estudiantes a una comprensión clara y un conocimiento sólido de los *principios básicos* de la termodinámica.
- Fomente el *pensamiento creativo* y el desarrollo de una *comprensión más profunda* y un *conocimiento intuitivo* sobre la materia.
- Sea *leído* por los estudiantes con *interés y entusiasmo* en vez de que solo se utilice como una ayuda en la resolución de problemas.

Se ha hecho un esfuerzo especial para fomentar la curiosidad natural de los lectores y ayudar a los estudiantes a explorar las diversas facetas del emocionante

tema de la termodinámica. La respuesta entusiasta que hemos recibido por parte de los usuarios de ediciones anteriores —desde pequeñas escuelas hasta grandes universidades alrededor del mundo— y las continuas traducciones en nuevos lenguajes indican que nuestros objetivos se han alcanzado en buena parte. En nuestra filosofía, creemos que la mejor forma de aprender es a través de la práctica; por lo tanto, se ha buscado a lo largo de todo el libro, reforzar el material que se presentó en ediciones anteriores. Anteriormente, los ingenieros pasaban una gran parte de su tiempo sustituyendo valores en las fórmulas y obteniendo resultados numéricos. Sin embargo, ahora la manipulación de fórmulas y el procesamiento de datos numéricos se dejan principalmente a las computadoras. El ingeniero del mañana deberá tener una comprensión clara y conocimientos firmes sobre los *principios básicos* de modo que pueda entender incluso los problemas más complejos, formularlos e interpretar los resultados. Nos esforzamos por enfatizar estos principios básicos y además de ofrecer a los estudiantes un panorama del uso que se da a las computadoras en la práctica de la ingeniería.

En todo el libro se utiliza el enfoque tradicional *clásico* o *macroscópico*, con argumentos microscópicos de apoyo. Este enfoque está más acorde con la intuición de los estudiantes y hace mucho más fácil el aprendizaje de la materia.

LO NUEVO EN ESTA EDICIÓN

Se conservaron todas las características sobresalientes de las ediciones anteriores. Se modificó una gran cantidad de problemas al final de cada capítulo y muchos otros son nuevos. Asimismo, se reemplazaron varios de los ejemplos resueltos.

HERRAMIENTAS PARA EL APRENDIZAJE

INTRODUCCIÓN TEMPRANA A LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La primera ley de la termodinámica se presenta al principio del capítulo 2, “Energía, transferencia de energía y análisis general de energía”. Este capítulo introductorio conforma el marco para establecer una comprensión general de las diferentes formas de la energía, los mecanismos para la transferencia de energía, el concepto de balance de energía, la economía termodinámica, la conversión de energía y la eficiencia de conversión, mediante el uso de escenarios familiares dentro de los que se incluyen formas de energía eléctrica y mecánica, principalmente. Asimismo, en las primeras etapas del curso se exponen a los estudiantes algunas aplicaciones de la termodinámica en la vida real, lo que les ayuda a crear conciencia del valor económico de la energía. Vale señalar el énfasis en la utilización de energía renovable, como la eólica y la hidráulica, y el uso eficiente de los recursos existentes.

ÉNFASIS EN LA FÍSICA

Una característica distintiva de este libro es el énfasis en los aspectos físicos del tema, además de las representaciones y manipulaciones. Los autores tienen certeza de que el énfasis en la educación de licenciatura debe ser *desarrollar un sentido de los mecanismos físicos subyacentes* y un *dominio de solución de problemas prácticos* que es probablemente lo que un ingeniero va a encarar en el mundo real. El desarrollo de una comprensión intuitiva en el transcurso del curso de termodinámica debe ser algo motivador y valioso para los estudiantes.

USO EFICIENTE DE LA ASOCIACIÓN

Una mente observadora no debe tener dificultades para comprender las ciencias de la ingeniería. Después de todo, los principios de estas ciencias se basan en *ex-*

periencias cotidianas y observaciones experimentales. A lo largo de la obra se usará un enfoque intuitivo más físico y con frecuencia se *realizan similitudes* entre el tema en cuestión y las experiencias diarias de los estudiantes, de modo que puedan relacionar la materia estudiada con lo que saben de antemano. El proceso de cocinar, por ejemplo, sirve como un excelente vehículo para demostrar los principios básicos de la termodinámica.

AUTOAPRENDIZAJE

El material del texto se presenta en un nivel de complejidad tal que un estudiante promedio pueda seguir sin problema. Se dirige *a los* estudiantes, no *por encima de* ellos; de hecho, se presta para el *autoaprendizaje*. La secuencia de la cobertura del material va de lo *simple* a lo *general*. Es decir, comienza con el caso más simple y agrega complejidad de forma gradual. De esta manera los conceptos básicos se aplican repetidamente a sistemas distintos, por lo que los estudiantes adquieren un dominio de cómo aplicar los principios en lugar de cómo simplificar una fórmula general. Al observar que los principios de la ciencia se basan en observaciones experimentales, todas las deducciones que se presentan en este libro se basan en argumentos físicos, por lo tanto son fáciles de seguir y comprender.

AMPLIO USO DE IMÁGENES

Las figuras son instrumentos importantes para el aprendizaje y permiten a los estudiantes “darse una idea general”. En el texto se hace un uso eficiente de los gráficos. Además, se han mejorado una gran cantidad de figuras para volverlas tridimensionales y, por lo tanto, más realistas. Las figuras atraen la atención y estimulan la curiosidad y el interés. La mayoría de las figuras sirven como un medio para enfatizar conceptos importantes que de otra forma pasarían inadvertidos, mientras que otras se utilizan como resúmenes de párrafos.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE Y RESÚMENES


Los capítulos comienzan con una *descripción general* del material que se estudiará y con los *objetivos de aprendizaje* específicos. Al final de cada capítulo se incluye un *resumen* que proporciona una revisión rápida de los conceptos básicos y relaciones importantes enfatizando la importancia del material.

NUMEROSOS EJEMPLOS RESUELTOS CON UN PROCEDIMIENTO SISTEMÁTICO PARA SOLUCIONARLOS

Cada capítulo contiene varios *ejemplos* resueltos que esclarecen el material e ilustran el uso de los principios básicos. En la resolución de los problemas de ejemplo se utilizó un enfoque *intuitivo y sistemático* en un estilo conversacional informal. En primer término, se enuncia el problema y se identifican los objetivos. Después, se establecen las suposiciones junto con sus justificaciones. En forma separada, se enlistan las propiedades necesarias para resolver el problema, si así lo amerita. Se utilizan valores numéricos en conjunto con sus unidades para enfatizar que si los primeros carecen de las segundas no tienen ningún significado, y que la manipulación de éstas es tan importante como la manipulación de aquéllos mediante el uso de la calculadora. Una vez que se llega a la solución, se analiza el significado del valor que se obtuvo. Este método se utiliza también de manera consistente en las resoluciones que se presentan en el manual de respuestas del profesor.

UNA GRAN CANTIDAD DE PROBLEMAS REALES AL FINAL DE CADA CAPÍTULO

Los problemas que se incluyen al final de cada capítulo están agrupados bajo temas específicos a fin de hacer que su selección sea más fácil tanto para el pro-

fesor como para el estudiante. En cada grupo de problemas se encuentran *Preguntas de concepto*, indicadas con la letra “C”, para verificar el nivel de comprensión del estudiante sobre conceptos básicos. Los problemas que se agrupan en el apartado *Problemas de repaso* son de naturaleza más completa y no están relacionados directamente con alguna sección específica de determinado capítulo (en algunos casos requieren la revisión del material que se aprendió en los capítulos anteriores). Los del apartado *Diseño y ensayo* tienen como objetivo alentar a los estudiantes a elaborar juicios sobre ingeniería, conducir la investigación independiente de temas de interés y comunicar sus descubrimientos de manera profesional. Los problemas identificados con la letra “E” están en unidades inglesas, por lo que los usuarios del SI pueden ignorarlos. Los problemas con el icono  son de naturaleza muy detallada y están diseñados para ser resueltos con una computadora y un software apropiado. Varios problemas relacionados con la economía y la seguridad se incorporan a lo largo del libro para reforzar, entre los estudiantes de ingeniería, la conciencia acerca del costo y la seguridad. Las respuestas a algunos problemas seleccionados se enumeran inmediatamente después de la descripción de los mismos para mayor comodidad. Además, con el fin de preparar a los estudiantes para el examen sobre fundamentos de ingeniería (que cada vez cobra mayor importancia en el criterio de selección del ABET 2000) y para facilitar los exámenes de opción múltiple, se incluyeron más de 200 *problemas de opción múltiple* en los diferentes apartados de los problemas que se hallan al final de cada capítulo. Dichos problemas están identificados bajo el título *Problemas para el examen de fundamentos de ingeniería* (FI) a fin de que sean reconocibles fácilmente. El objetivo de estos problemas es verificar la comprensión de los fundamentos y ayudar a los lectores a evitar que incurran en errores comunes.

CONVENCIÓN DE SIGNOS

Se renuncia al uso de una convención de signos formales para calor y trabajo debido a que a menudo puede ser contraproducente. Se adopta un método físicamente significativo e interesante para crear interacciones en lugar de un método mecánico. Los subíndices “entrada” y “salida” se emplean en lugar de los signos más y menos con el fin de señalar las direcciones de las interacciones.

FÓRMULAS FÍSICAMENTE SIGNIFICATIVAS

Se usan las formas físicamente significativas de las ecuaciones de balance en lugar de las fórmulas, a fin de fomentar una comprensión más profunda y evitar un método del tipo “receta de cocina”. Los balances de masa, energía, entropía y exergía para *cualquier sistema* que experimenta *cualquier proceso* se expresan como sigue

Balance de masa:

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = \Delta m_{\text{sistema}}$$

Balance de energía:

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\text{Transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\text{Cambio en la energía interna, cinética, potencial, etc.}}$$

Balance de entropía:

$$\underbrace{S_{\text{entrada}} - S_{\text{salida}}}_{\text{Transferencia neta de entropía por calor y masa}} + \underbrace{S_{\text{gen}}}_{\text{Generación entrópica}} = \underbrace{\Delta S_{\text{sistema}}}_{\text{Cambio en la entropía}}$$

Balance de exergía:

$$\underbrace{X_{\text{entrada}} - X_{\text{salida}}}_{\text{Transferencia neta de exergía por calor, trabajo y masa}} - \underbrace{X_{\text{eliminado}}}_{\text{Destrucción de exergía}} = \underbrace{\Delta X_{\text{sistema}}}_{\text{Cambio de exergía}}$$

Estas relaciones reafirman que durante un proceso real la masa y la energía se conservan, la entropía se genera y la exergía se destruye. Se invita a los estudiantes a que usen estas formas de balance en los primeros capítulos después de que especifiquen el sistema y las simplifiquen para cada problema en particular.

Un método mucho más relajado se emplea en los capítulos posteriores a medida que los estudiantes van adquiriendo un mayor dominio.

SELECCIÓN DE UNIDADES SI O UNIDADES INGLESAS

Como un reconocimiento al hecho de que las unidades inglesas aún se usan ampliamente en algunas industrias, en el libro se emplean tanto unidades SI como inglesas, haciendo énfasis en el SI. El contenido se puede cubrir usando la combinación de unidades SI e inglesas o únicamente las del SI, de acuerdo con la preferencia del profesor. Las gráficas y tablas de propiedades en los apéndices se presentan en ambas unidades, excepto en aquellas que implican cantidades dimensionales. Los problemas, tablas y gráficas en unidades inglesas están identificados con la letra “E”, colocado después del número con la finalidad de que sea sencillo reconocerlos; asimismo, los usuarios del sistema SI pueden ignorarlos sin problema.

TEMAS DE INTERÉS ESPECIAL

La mayoría de los capítulos contienen una sección llamada “Tema de interés especial”, en la que se analizan algunos aspectos interesantes de la termodinámica. Ejemplos de ello son *Aspectos termodinámicos de los sistemas biológicos*, que aparece en el capítulo 4; *Refrigeradores domésticos*, del 6; *Aspectos cotidianos de la segunda ley*, del 8, y *Ahorro de combustible y dinero al manejar con sensatez*, del capítulo 9. Los temas seleccionados para esta sección ofrecen extensiones verdaderamente intrigantes sobre termodinámica, sin embargo, si se desea pueden omitirse sin que esto represente una pérdida de continuidad.

GLOSARIO DE TÉRMINOS DE TERMODINÁMICA

En todos los capítulos, cuando se introduce y define un concepto o término importante, aparece en negritas. Los términos y conceptos termodinámicos también aparecen en un glosario localizado en nuestro sitio web adjunto. Este glosario único ayuda a reforzar la terminología clave y es una excelente herramienta de aprendizaje y revisión para los estudiantes a medida que avanzan en su curso de termodinámica.

FACTORES DE CONVERSIÓN

Los factores de conversión y las constantes físicas de uso frecuente se listan en las páginas finales del libro para que sean una referencia fácil de usar.



Connect® de McGraw-Hill es una plataforma de enseñanza-aprendizaje adaptativo que permite estudiar en el libro y asignar y realizar tareas (en idioma español) con el propósito de que el estudiante ponga a prueba su conocimiento y evalúe su aprendizaje. Se fundamenta en las ciencias del aprendizaje, reconocidas para mejorar los resultados de los estudiantes.

Se pueden utilizar los materiales proporcionados en la plataforma e incluso agregar contenido propio para diseñar un curso completo que ayude a los estudiantes a lograr mejores resultados.

Esta edición incluye con el libro impreso un código de acceso para Connect® con vigencia de 1 año. Para mayor información sobre la implementación de Connect® en su clase como profesor consulte a su representante de McGraw-Hill.

SUPLEMENTOS (EN INGLÉS)

El siguiente suplemento está disponible para los usuarios de este libro.

COSMOS

El sistema completo de organización del manual de soluciones en línea (COSMOS, por el inglés: *Complete Online Solutions Manual Organization System*) permite a los profesores simplificar la creación de tareas, cuestionarios y exámenes mediante la utilización de problemas y soluciones del texto, así como de su propio material. COSMOS ahora está disponible en <http://cosmos.mhe.com>

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean reconocer, con aprecio, los numerosos y valiosos comentarios, sugerencias, críticas constructivas y elogios por parte de los siguientes evaluadores y revisores:

Edward Anderson

Texas Tech University

John Biddle

Cal Poly Pomona University

Gianfranco DiGiuseppe

Kettering University

Shoeleh Di Julio

California State University-Northridge

Afshin Ghajar

Oklahoma State University

Harry Hardee

New Mexico State University

Kevin Lyons

North Carolina State University

Kevin McFarlan

John Brown University

Saeed Manafzadeh

University of Illinois-Chicago

Alez Moutsoglou

South Dakota State University

Rishi Raj

The City College of New York

Maria Sanchez

California State University-Fresno

Kalyan Srinivasan

Mississippi State University

Robert Stiger

Gonzaga University

Sus sugerencias ayudaron mucho a mejorar la calidad de este texto. Damos las gracias a Mohsen Hassan Vand por sus valiosas sugerencias y contribuciones. También quisiéramos agradecer a nuestros alumnos, de quienes recibimos gran cantidad de retroalimentación de acuerdo con sus perspectivas. Por último, deseamos expresar nuestro aprecio a nuestras esposas, así como a nuestros hijos, por su persistente paciencia, comprensión y apoyo durante la preparación de este texto.

Yunus A. Çengel
Michael A. Boles
Mehmet Kanoğlu

AGRADECIMIENTOS DE LA EDICIÓN EN ESPAÑOL

Esta edición en español de *Termodinámica* ha sido mejorada y enriquecida por los comentarios de profesores que lo han usado a través de los años. McGraw-Hill agradece a los centros de estudio y profesores usuarios de esta obra por su apoyo y retroalimentación.

MÉXICO

Olga Felix Beltrán

*Benemérita Universidad Autónoma
de Puebla*

Alejandro Parra Córdova

*Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey,
Campus Guadalajara*

Enrique Muñoz Díaz

*Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey,
Campus Ciudad de México*

Joel Martínez Camarillo

María del Pilar Morales Valdés

*Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey, Campus Toluca*

Miguel Ángel Gijón Rivera

*Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey,
Campus Puebla*

Dalia Ruiz Domínguez

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y
Eléctrica, Culhuacán
Instituto Politécnico Nacional*

Pedro Quinto Diez

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y
Eléctrica, Zacatenco
Instituto Politécnico Nacional*

Fredy Cuellar Robles

Leticia Esperanza Colón Izquierdo

Epifanio Villordo Ávila

Óscar Ramos Zamora

Instituto Tecnológico de Toluca

Arturo Morales Fuentes

Miguel García Yera

*Facultad de Ingeniería Mecánica
y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León*

Gabriel Delgado Ruiz Velasco

Jesús Tamez García

Universidad de Monterrey

Hortencia Caballero López

*Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México*

Gabriela Macías Esquivel

*Facultades de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma
de México
Universidad La Salle*

José Mauricio Pardo Benito

Rodolfo Raúl Cobos Téllez

*Facultad de Ingeniería
Universidad Panamericana*

Luis Alfonso Guerrero Rodríguez

*Universidad Panamericana
Campus Bonaterra Aguascalientes*

ESPAÑA

Daniel Crespo

Xavier Ramis

Universitat Politècnica de Catalunya

Joan Carles Bruno

Universitat Rovira i Virgili

Manuel Lucas

Universidad Miguel Hernández

Miquel Caballeria

Universitat de Vic

HONDURAS

Ana Amaya

César López Castillo

Fernando José Sorto Aguilera

Francis Salomón Occhiena

Horacio Enrique Galdámez

Rodríguez

*Universidad Nacional Autónoma
de Honduras (UNAH)*

INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

Toda ciencia posee un vocabulario único y la termodinámica no es la excepción. La definición precisa de conceptos básicos constituye una base sólida para el desarrollo de una ciencia y evita posibles malas interpretaciones. Este capítulo inicia con un repaso de la termodinámica y los sistemas de unidades y continúa con la explicación de algunos conceptos básicos, como *sistema*, *estado*, *postulado de estado*, *equilibrio*, *proceso* y *ciclo*. Se analizan las propiedades intensivas y extensivas de un sistema y se definen la densidad, la gravedad específica y el peso específico. También se analizan los términos *temperatura* y *escalas de temperatura* con especial énfasis en la escala internacional de temperatura de 1990. Posteriormente se presenta la *presión*, definida como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área, y se analizan las presiones *absoluta* y *manométrica*, la variación de la presión con la profundidad y los instrumentos de medición de presión, como manómetros y barómetros. El estudio cuidadoso de estos conceptos es esencial para lograr una buena comprensión de los temas tratados en este libro. Por último, se presenta una *técnica para resolver problemas*, intuitiva y sistemática, que se puede usar como modelo en la solución de problemas de ingeniería.



OBJETIVOS

En el capítulo 1, los objetivos son:

- Identificar el vocabulario específico relacionado con la termodinámica por medio de la definición precisa de conceptos básicos con la finalidad de formar una base sólida para el desarrollo de los principios de la termodinámica.
- Revisar los sistemas de unidades SI métrico e inglés que se utilizarán en todo el libro.
- Explicar los conceptos básicos de la termodinámica, como sistema, estado, postulado de estado, equilibrio, proceso y ciclo.
- Analizar las propiedades de un sistema y definir la densidad, la gravedad específica y el peso específico.
- Revisar los conceptos de temperatura, escalas de temperatura, presión y presiones absoluta y manométrica.
- Introducir una técnica intuitiva y sistemática para resolver problemas.

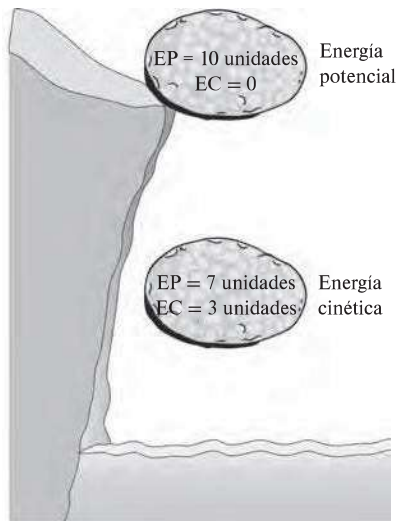


FIGURA 1-1

La energía no se crea ni se destruye; sólo se transforma (primera ley).

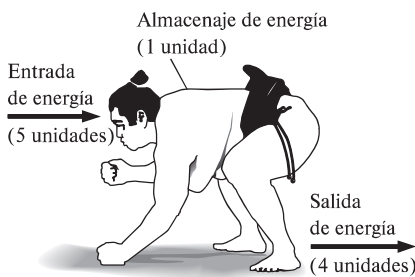


FIGURA 1-2

Principio de conservación de la energía para el cuerpo humano.



FIGURA 1-3

El calor fluye en dirección de la temperatura decreciente.

1-1 ■ TERMODINÁMICA Y ENERGÍA

La termodinámica se puede definir como la ciencia de la *energía*. Aunque todo el mundo tiene idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios.

El término *termodinámica* proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza), lo cual corresponde a lo más descriptivo de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía. En la actualidad, el concepto se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia.

Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza es el **principio de conservación de la energía**. Ésta expresa que durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye. Una roca que cae de un acantilado, por ejemplo, adquiere velocidad como resultado de su energía potencial convertida en energía cinética (Fig. 1-1). El principio de conservación de la energía también estructura la industria de las dietas: una persona que tiene un mayor consumo energético (alimentos) respecto a su gasto de energía (ejercicio) aumentará de peso (almacena energía en forma de grasa), mientras otra persona con una ingestión menor respecto a su gasto energético perderá peso (Fig. 1-2). El cambio en el contenido energético de un cuerpo o de cualquier otro sistema es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía, y el balance de ésta se expresa como $E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E$.

La **primera ley de la termodinámica** es simplemente una expresión del principio de conservación de la energía, y sostiene que la *energía* es una propiedad termodinámica. La **segunda ley de la termodinámica** afirma que la energía tiene *calidad* así como *cantidad*, y que los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía. Por ejemplo, una taza de café caliente sobre una mesa en algún momento se enfría, pero una taza de café frío en el mismo espacio nunca se calienta por sí misma (Fig. 1-3). La energía de alta temperatura del café se degrada (se transforma en una forma menos útil a otra con menor temperatura) una vez que se transfiere hacia el aire circundante.

Aunque los principios de la termodinámica han existido desde la creación del universo, esta ciencia surgió como tal hasta que Thomas Savery en 1697 y Thomas Newcomen en 1712 construyeron en Inglaterra las primeras máquinas de vapor atmosféricas exitosas, las cuales eran muy lentas e ineficientes, pero abrieron el camino para el desarrollo de una nueva ciencia.

La primera y la segunda leyes de la termodinámica surgieron de forma simultánea a partir del año de 1850, principalmente de los trabajos de William Rankine, Rudolph Clausius y lord Kelvin (antes William Thomson). El término *termodinámica* se usó primero en una publicación de lord Kelvin en 1849; y por su parte, William Rankine, profesor en la universidad de Glasgow, escribió en 1859 el primer texto sobre el tema.

Se sabe que una sustancia está constituida por un gran número de partículas llamadas *moléculas*, y que las propiedades de dicha sustancia dependen, por supuesto, del comportamiento de estas partículas. Por ejemplo, la presión de un gas en un recipiente es el resultado de la transferencia de cantidad de movimiento entre las moléculas y las paredes del recipiente. Sin embargo, no es necesario conocer el comportamiento de las partículas de gas para determinar la presión en el recipiente, bastaría con colocarle un medidor de presión al recipiente. Este enfoque macroscópico al estudio de la termodinámica que no requiere conocer el comportamiento de cada una de las partículas se llama

termodinámica clásica, y proporciona un modo directo y fácil para la solución de problemas de ingeniería. Un enfoque más elaborado, basado en el comportamiento promedio de grupos grandes de partículas individuales, es el de la **termodinámica estadística**. Este enfoque microscópico es bastante complicado y en este libro sólo se usa como apoyo.

Áreas de aplicación de la termodinámica

En la naturaleza, todas las actividades tienen que ver con cierta interacción entre la energía y la materia; por consiguiente, es difícil imaginar un área que no se relacione de alguna manera con la termodinámica. Por lo tanto, desarrollar una buena comprensión de los principios básicos de esta ciencia ha sido durante mucho tiempo parte esencial de la educación en ingeniería.

Comúnmente la termodinámica se encuentra en muchos sistemas de ingeniería y otros aspectos de la vida y no es necesario ir muy lejos para comprobar esto. De hecho no se necesita ir a ningún lado. El corazón bombea sangre en forma constante a todo nuestro cuerpo, diferentes conversiones de energía ocurren en billones de células y el calor corporal generado se emite en forma constante hacia el ambiente. El confort humano tiene estrecha relación con la tasa de esta emisión de calor metabólico. Se intenta controlar esta transferencia de calor ajustando la ropa a las condiciones ambientales.

Existen otras aplicaciones de la termodinámica en el lugar que se habita. Una casa ordinaria es, en algunos aspectos, una sala de exhibición de maravillas relacionadas con la termodinámica (Fig. 1-4). Muchos utensilios domésticos y aplicaciones están diseñados, completamente o en parte, mediante los principios de la termodinámica. Algunos ejemplos son la estufa eléctrica o de gas, los sistemas de calefacción y aire acondicionado, el refrigerador, el humidificador, la olla de presión, el calentador de agua, la regadera, la plancha e incluso la computadora y el televisor. En una escala mayor, la termodinámica desempeña una parte importante en el diseño y análisis de motores automotrices, cohetes, motores de avión, plantas de energía convencionales o nucleares, colectores solares, y en el diseño de todo tipo de vehículos desde automóviles hasta aeroplanos (Fig. 1-5). Los hogares que usan eficazmente la energía, como en el que usted probablemente vive, se diseñan con base en la reducción de pérdida de calor en invierno y ganancia de calor en verano. El tamaño, la ubicación y entrada de potencia del ventilador de su computadora también se selecciona tras un estudio en el que interviene la termodinámica.

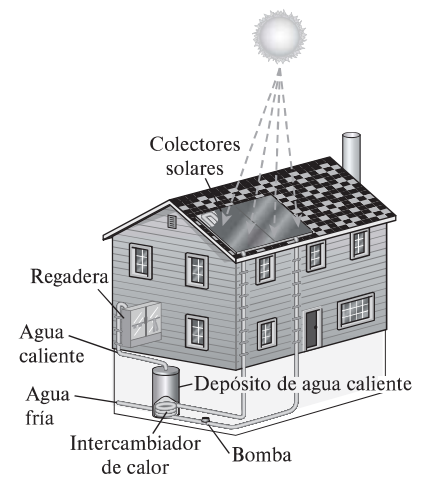


FIGURA 1-4

El diseño de muchos sistemas de ingeniería, como este sistema solar para calentar agua, tiene que ver con la termodinámica.

1-2 ■ IMPORTANCIA DE LAS DIMENSIONES Y UNIDADES

Cualquier cantidad física se caracteriza mediante **dimensiones**. Las magnitudes asignadas a las dimensiones se llaman **unidades**. Algunas dimensiones básicas, como masa m , longitud L , tiempo t y temperatura T se seleccionan como **dimensiones primarias** o **fundamentales**, mientras que otras como la velocidad V , energía E y volumen V se expresan en términos de las dimensiones primarias y se llaman **dimensiones secundarias** o **dimensiones derivadas**.

Con el paso de los años se han creado varios sistemas de unidades. A pesar de los grandes esfuerzos que la comunidad científica y los ingenieros han hecho para unificar el mundo con un solo sistema de unidades, en la actualidad aún son de uso común dos de éstos: el **sistema inglés**, que se conoce como



a) Refrigerador



b) Embarcaciones



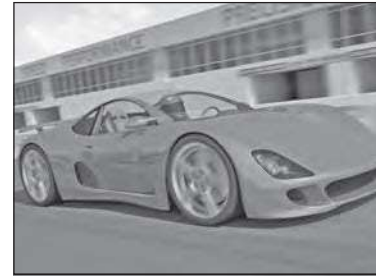
c) Aeronave y naves espaciales



d) Plantas de energía eléctrica



e) Cuerpo humano



f) Automóviles



g) Turbinas eólicas



h) Procesamiento de alimentos



i) Red de tuberías en una planta industrial

FIGURA 1-5

Algunas áreas de aplicación de la termodinámica.

a) © McGraw-Hill Education/Jill Braaten; b) © Doug Menuez/Getty Images RF; c) © Ilene MacDonald RF; d) © Malcolm Fife/Getty Images RF; e) © Ryan McVay/Getty Images RF; f) © Mark Evans/Getty Images RF; g) © Getty Images/iStockphoto RF; h) ©Glow Images RF; i) Cortesía de UMDE Engineering Contracting and Trading. Utilizada con autorización.

United States Customary System (USCS) y el **SI métrico** (de *Le Système International d' Unités*), también llamado *sistema internacional*. El SI es un sistema simple y lógico basado en una relación decimal entre las distintas unidades, y se usa para trabajo científico y de ingeniería en la mayor parte de las naciones industrializadas, incluso en Inglaterra. Sin embargo, el sistema inglés no tiene base numérica sistemática evidente y varias unidades de este sistema se relacionan entre sí de manera bastante arbitraria (12 pulgadas = 1 pie, 1 milla = 5 280 pies, 4 cuartos = 1 galón, etc.), lo cual hace que el aprendizaje sea confuso y difícil. Estados Unidos es el único país industrializado que aún no adopta por completo el sistema métrico.

Los esfuerzos sistemáticos para desarrollar un sistema de unidades universal aceptable datan de 1790 cuando la Asamblea Nacional Francesa encargó a la academia francesa de ciencias que sugiriera dicho sistema de unidades. Pronto se elaboró en Francia una primera versión del sistema métrico, pero no encontró aceptación universal hasta 1875 cuando 17 países, incluido Esta-

dos Unidos, prepararon y firmaron el *Tratado de Convención Métrica*. En este acuerdo internacional se establecieron el metro y el gramo como las unidades métricas para longitud y masa, respectivamente, además de establecerse que una *Conferencia General de Pesos y Medidas* (CGPM) se reuniera cada seis años. En 1960, la CGPM produjo el SI, el cual se basa en seis cantidades fundamentales, cuyas unidades se adoptaron en 1954 en la Décima Conferencia General de Pesos y Medidas: *metro* (m) para longitud, *kilogramo* (kg) para masa, *segundo* (s) para tiempo, *ampere* (A) para corriente eléctrica, *grado Kelvin* ($^{\circ}\text{K}$) para temperatura y *candela* (cd) para intensidad luminosa (cantidad de luz). En 1971, la CGPM añadió una séptima cantidad y unidad fundamental: *mol* (mol) para la cantidad de materia.

Con base en el esquema de notación introducido en 1967, el símbolo de grado se eliminó en forma oficial de la unidad de temperatura absoluta, y todos los nombres de unidades se escribirían con minúscula incluso si se derivaban de nombres propios (tabla 1-1). Sin embargo, la abreviatura de una unidad se escribiría con mayúscula si la unidad provenía de un nombre propio. Por ejemplo, la unidad SI de fuerza, nombrada en honor a sir Isaac Newton (1647-1723), es el *newton* (no Newton), y se abrevia como N. Asimismo, es posible pluralizar el nombre completo de una unidad, no así su abreviatura. Por ejemplo, la longitud de un objeto puede ser 5 m o 5 metros, *no* 5 ms o 5 metro. Por último, no se usará punto en abreviaturas de unidades a menos que aparezcan al final de un enunciado. Por ejemplo, la abreviatura apropiada de metro es m (*no* m.).

En Estados Unidos, el reciente cambio hacia el sistema métrico empezó en 1968 cuando el Congreso, en respuesta a lo que estaba sucediendo en el resto del mundo, aprobó un Decreto de estudio métrico. El Congreso continuó con este impulso hacia un cambio voluntario al sistema métrico al aprobar el Decreto de conversión métrica en 1975. Una ley comercial aprobada en 1988 fijó el mes de septiembre de 1992 como plazo para que todas las agencias federales pasaran al sistema métrico. Sin embargo, los plazos se relajaron sin establecer planes claros para el futuro.

Las industrias con una participación intensa en el comercio internacional (como la automotriz, la de bebidas carbonatadas y la de licores) se han apresurado en pasar al sistema métrico por razones económicas (tener un solo diseño mundial, menos tamaños e inventarios más pequeños, etc.). En la actualidad, casi todos los automóviles fabricados en Estados Unidos obedecen al sistema métrico. Es probable que la mayoría de los dueños de automóviles no se percaten hasta que utilicen una llave con medida en pulgadas sobre un tornillo métrico. No obstante, la mayor parte de las industrias se resisten al cambio, lo cual retrasa el proceso de conversión.

En la actualidad, Estados Unidos es una sociedad con doble sistema y permanecerá así hasta que se complete la transición al sistema métrico. Esto agrega una carga extra a los actuales estudiantes de ingeniería, puesto que se espera que retengan su comprensión del sistema inglés mientras aprenden, piensan y trabajan en términos del SI. Dada la posición de los ingenieros en el periodo de transición, en este libro se usan ambos sistemas de unidades, con especial énfasis en las unidades del SI.

Como se señaló, el SI se basa en una relación decimal entre unidades. Los prefijos usados para expresar los múltiplos de las distintas unidades se enumeran en la tabla 1-2, se usan como estándar para todas éstas y se alienta al estudiante a memorizarlos debido a su uso extendido (Fig. 1-6).

TABLA 1-1

Las siete dimensiones fundamentales (o primarias) y sus unidades en el SI

Dimensión	Unidad
Longitud	metro (m)
Masa	kilogramo (kg)
Tiempo	segundo (s)
Temperatura	kelvin (K)
Corriente eléctrica	ampere (A)
Cantidad luminosa	candela (cd)
Cantidad de materia	mol (mol)

TABLA 1-2

Prefijos estándar en unidades SI

Múltiplos	Prefijo
10^{24}	yotta, Y
10^{21}	zetta, Z
10^{18}	exa, E
10^{15}	peta, P
10^{12}	tera, T
10^9	giga, G
10^6	mega, M
10^3	kilo, k
10^2	hecto, h
10^1	deca, da
10^{-1}	deci, d
10^{-2}	centi, c
10^{-3}	mili, m
10^{-6}	micro, μ
10^{-9}	nano, n
10^{-12}	pico, p
10^{-15}	femto, f
10^{-18}	atto, a
10^{-21}	zepto, z
10^{-24}	yocto, y

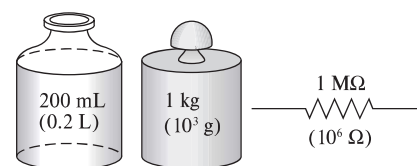


FIGURA 1-6

Los prefijos de las unidades SI se usan en todas las ramas de la ingeniería.

Algunas unidades SI e inglesas

En el SI, las unidades de masa, longitud y tiempo son kilogramo (kg), metro (m) y segundo (s), respectivamente. Las unidades correspondientes en el sistema inglés son libra-masa (lbm), pie (ft) y segundo (s). El símbolo de libra *lb* es en realidad la abreviatura de *libra*, la cual era en la antigua Roma la unidad adaptada para expresar el peso. El sistema inglés mantuvo este símbolo incluso después de haber finalizado la ocupación romana de Bretaña en el año 410. Las unidades de masa y longitud en los dos sistemas se relacionan entre sí mediante

$$1 \text{ lbm} = 0.45356 \text{ kg}$$

$$1 \text{ pie} = 0.3048 \text{ m}$$

En el sistema inglés, la fuerza es considerada comúnmente como una de las dimensiones primarias y se le asigna una unidad no derivada. Esto es una fuente de confusión y error que requiere el uso de una constante dimensional (g_c) en muchas fórmulas. Para evitar esta molestia se considera a la fuerza como una dimensión secundaria cuya unidad se deriva de la segunda ley de Newton, es decir,

$$\text{Fuerza} = (\text{masa})(\text{aceleración})$$

o

$$F = ma \quad (1-1)$$

En el SI, la unidad de fuerza es el newton (N), y se define como la *fuerza requerida para acelerar una masa de 1 kg a razón de 1 m/s²*. En el sistema inglés, la unidad de fuerza es la **libra-fuerza** (lbf) y se define como la *fuerza requerida para acelerar una masa de 32.174 lbm (1 slug) a razón de 1 pie/s²* (Fig. 1-7). Es decir,

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

$$1 \text{ lbf} = 32.174 \text{ lbm} \cdot \text{pie/s}^2$$

Una fuerza de 1 N equivale aproximadamente al peso de una manzana pequeña ($m = 102 \text{ g}$), mientras que una fuerza de 1 lbf es equivalente a más o menos el peso de cuatro manzanas medianas ($m_{\text{total}} = 454 \text{ g}$), como se ilustra en la figura 1-8. Otra unidad de fuerza de uso común en muchos países europeos es el *kilogramo-fuerza* (kgf), que es el peso de 1 kg de masa al nivel del mar ($1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$).

El término **peso** con frecuencia se usa de modo incorrecto para expresar masa, en particular por los “weight watchers”. A diferencia de la masa, el peso W es una *fuerza*: la fuerza gravitacional aplicada a un cuerpo, y su magnitud se determina a partir de la segunda ley de Newton,

$$W = mg \quad (\text{N}) \quad (1-2)$$

donde m es la masa del cuerpo y g es la aceleración gravitacional local (g es 9.807 m/s^2 o 32.174 pie/s^2 al nivel del mar y latitud 45°). Una báscula de baño ordinaria mide la fuerza gravitacional que actúa sobre un cuerpo.

La masa de un cuerpo es la misma sin importar su ubicación en el universo; sin embargo, su peso se modifica con un cambio en la aceleración gravitacional. Un cuerpo pesa menos en la cima de una montaña puesto que g

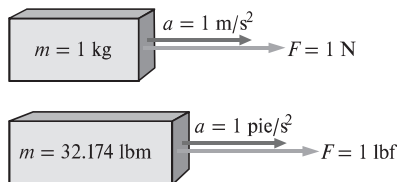


FIGURA 1-7

Definición de unidades de fuerza.

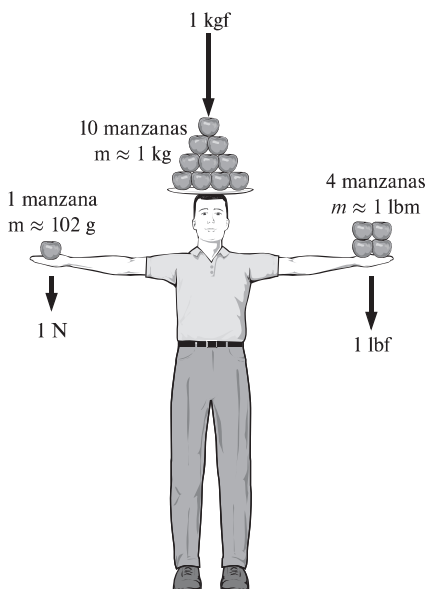


FIGURA 1-8

Magnitudes relativas de las unidades de fuerza newton (N), kilogramo-fuerza (kgf) y libra fuerza (lbf).

disminuye con la altitud. En la superficie de la Luna, una astronauta pesa alrededor de un sexto de lo que pesa en la Tierra (Fig. 1-9).

Al nivel del mar una masa de 1 kg pesa 9.807 N, como se ilustra en la figura 1-10; no obstante, una masa de 1 lbm pesa 1 lbf, lo que lleva a las personas a creer que libra-masa y libra-fuerza se pueden usar de forma indistinta como libra (lb), lo cual es una fuente principal de errores en el sistema inglés.

Se debe observar que la *fuerza de gravedad* que actúa sobre una masa se debe a la *atracción* entre las masas y, por lo tanto, es proporcional a las magnitudes de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Por consiguiente, la aceleración gravitacional g en un lugar depende de la *latitud*, la *distancia* al centro de la Tierra y, en un menor grado, de las posiciones de la Luna y el Sol. El valor de g varía con la ubicación desde 9.832 m/s^2 en los polos (9.789 en el ecuador) hasta 7.322 m/s^2 a 1 000 km sobre el nivel del mar. Sin embargo, a altitudes de hasta 30 km, la variación de g del valor a nivel del mar de 9.807 m/s^2 es menor a 1 por ciento. Entonces, para la mayor parte de los propósitos prácticos, la aceleración gravitacional se supone como *constante* en 9.807 m/s^2 , que suele redondearse a 9.81 m/s^2 . Es interesante notar que en lugares situados bajo el nivel del mar el valor de g se incrementa con la distancia desde el nivel del mar, alcanza un máximo próximo a los 4 500 m y luego empieza a disminuir. (¿Cuál cree que es el valor de g en el centro de la Tierra?)

La principal causa que provoca la confusión entre masa y peso es que la masa se mide generalmente de *modo indirecto* al calcular la *fuerza de gravedad* que ejerce. Con este enfoque se supone también que las fuerzas ejercidas causadas por otros efectos como la flotabilidad en el aire y el movimiento del fluido son insignificantes. Esto es como medir la distancia a una estrella midiendo su transición hacia el color rojo o determinar la altitud de un aeroplano por medio de la presión barométrica: ambas son mediciones indirectas. La forma correcta *directa* de medir la masa es compararla con otra conocida. Sin embargo, esto es difícil y se usa sobre todo para calibración y medición de metales preciosos.

El *trabajo*, que es una forma de energía, se puede definir simplemente como la fuerza multiplicada por la distancia; por lo tanto, tiene la unidad “newtonmetro (N · m)”, llamado **joule (J)**. Es decir,

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1-3)$$

Una unidad más común para la energía en el SI es el kilojoule ($1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$). En el sistema inglés, la unidad de energía es el **Btu (British thermal unit)**, que se define como la energía requerida para elevar en 1°F la temperatura de 1 lbm de agua a 68°F . En el sistema métrico, la cantidad de energía necesaria para elevar en 1°C la temperatura de 1 gramo de agua a 14.5°C se define como 1 **caloría (cal)**, y $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$. Las magnitudes de kilojoule y Btu son casi idénticas ($1 \text{ Btu} = 1.0551 \text{ kJ}$). Hay una buena manera de apreciar intuitivamente estas unidades: si enciende un fósforo y lo deja consumir, produce cerca de un Btu (o un kJ) de energía (Fig. 1-11).

La unidad para la razón de tiempo de energía es el joule por segundo (J/s) que se conoce como **watt (W)**. En el caso de trabajo la razón de tiempo de energía se llama *potencia*. Una unidad de potencia comúnmente usada es el caballo de fuerza (hp), que es equivalente a 746 W . La energía eléctrica se expresa típicamente en la unidad kilowatt-hora (kWh), que es equivalente a $3\,600 \text{ kJ}$. Un aparato eléctrico con una potencia nominal de 1 kW consume 1 kWh de electricidad cuando trabaja continuamente durante una hora. Cuando se habla de



FIGURA 1-9
Un cuerpo que en la Tierra pesa 150 lbf pesará sólo 25 lbf en la Luna.

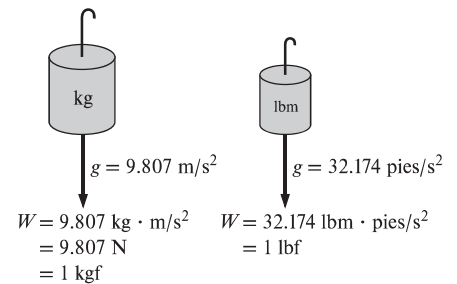


FIGURA 1-10
El peso de una masa unitaria al nivel del mar.

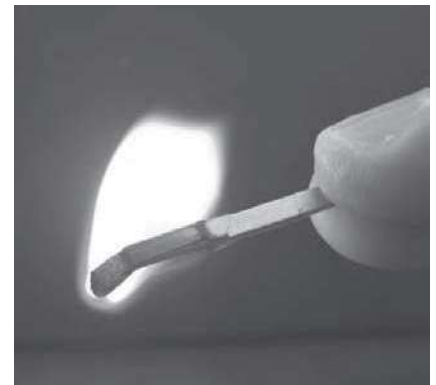


FIGURA 1-11
Un fósforo típico produce alrededor de un Btu (o un kJ) de energía si se quema por completo.

© John M. Cimbala

generación de potencia eléctrica, con frecuencia se confunden las unidades kW y kWh. Observe que kW o kJ/s es una unidad de potencia, mientras que kWh es una unidad de energía. Por lo tanto, frases como “la nueva turbina de viento generará 50 kW de electricidad por año” no tienen sentido y son incorrectas. Una expresión correcta sería algo así como “la nueva turbina de viento, con una potencia nominal de 50 kW, generará 120 000 kWh de electricidad por año”.

Homogeneidad dimensional

Todos sabemos que manzanas y naranjas no se suman, pero de algún modo nos las arreglamos para hacerlo (por error, por supuesto). En ingeniería, las ecuaciones deben ser *dimensionalmente homogéneas*. Es decir, cada término de una ecuación debe tener la misma unidad. Si en alguna etapa de un análisis se está en posición de sumar dos cantidades que tienen unidades distintas, es una indicación clara de que se ha cometido un error en una etapa anterior. Así que comprobar las dimensiones puede servir como una herramienta valiosa para detectar errores.



FIGURA 1-12

Turbina eólica, como se analizó en el ejemplo 1-1.

© Bear Dancer Studios/Mark Dierker RF

EJEMPLO 1-1 Generación de potencia eléctrica mediante una turbina eólica

Una escuela paga \$0.12/kWh. Para reducir sus costos de energía, la escuela instala una turbina de viento (Fig. 1-12) con una potencia nominal de 30 kW. Si la turbina trabaja 2 200 horas por año a su potencia nominal, determine la cantidad de energía eléctrica generada por la turbina y el dinero que ahorra la escuela por año.

SOLUCIÓN Se instala una turbina de viento (aerogenerador) para generar electricidad. Se deben determinar la cantidad de energía eléctrica que se genera y el dinero que se ahorra por año.

Análisis La turbina de viento genera energía eléctrica a razón de 30 kW, o 30 kJ/s. Entonces, la cantidad total de energía eléctrica generada por año es:

$$\begin{aligned} \text{Energía total} &= (\text{Energía por unidad de tiempo})(\text{Intervalo de tiempo}) \\ &= (30 \text{ kW})(2\,200 \text{ h}) \\ &= \mathbf{66\,000 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

La cantidad que se ahorra por año es el valor monetario de esta energía determinada como:

$$\begin{aligned} \text{Dinero ahorrado} &= (\text{Energía total})(\text{costo unitario de energía}) \\ &= (66\,000 \text{ kWh})(\$0.12/\text{kWh}) \\ &= \mathbf{\$7\,920} \end{aligned}$$

Comentario La producción anual de energía eléctrica también se podría determinar en kJ mediante manipulación de las unidades, como

$$\text{Energía total} = (30 \text{ kW})(2\,200 \text{ h}) \left(\frac{3\,600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) \left(\frac{1 \text{ kJ/s}}{1 \text{ kW}} \right) = 2.38 \times 10^8 \text{ kJ}$$

que es equivalente a 66 000 kWh (1 kWh = 3 600 kJ).

Se sabe por experiencia que las unidades pueden causar terribles dolores de cabeza si no se usan con cuidado al resolver un problema. Sin embargo, con cierta atención y habilidad las unidades se pueden usar de modo provechoso. Sirven para comprobar fórmulas e incluso se pueden usar para *deducir* fórmulas, como se explica en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 1-2 Obtención de fórmulas a partir de consideraciones de unidades

Se llena un depósito con aceite cuya densidad es $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$. Si el volumen del depósito es $V = 2 \text{ m}^3$, determine la cantidad de masa m en el depósito.

SOLUCIÓN Se tiene el volumen del depósito y se va a determinar la masa del aceite.

Suposiciones El aceite es una sustancia no compresible y, por lo tanto, su densidad es constante.

Análisis Un bosquejo del sistema descrito se presenta en la figura 1-13. Suponga que olvida la fórmula que relaciona la masa con la densidad y el volumen; sin embargo, se sabe que la unidad de la masa es el kilogramo. Es decir, sin importar los cálculos que se realicen se debe obtener al final la unidad de kilogramos. Entendiendo mejor la información proporcionada, se tiene

$$\rho = 850 \text{ kg/m}^3 \quad \text{y} \quad V = 2 \text{ m}^3$$

Es evidente que se puede eliminar m^3 y finalizar con kg al multiplicar estas dos cantidades. Por lo tanto, la fórmula que se busca debe ser

$$m = \rho V$$

Así,

$$m = (850 \text{ kg/m}^3)(2 \text{ m}^3) = 1\,700 \text{ kg}$$

Comentario Observe que existe la posibilidad de que este enfoque no funcione para fórmulas más complejas. Las fórmulas constantes no dimensionales pueden estar presentes también, y éstas no se pueden deducir sólo por consideraciones de unidades.

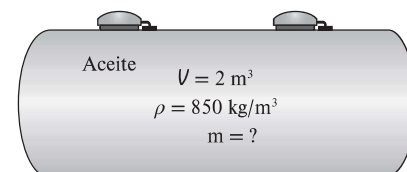


FIGURA 1-13

Esquema para el ejemplo 1-2.



FIGURA 1-14

Siempre verifique las unidades en sus cálculos.

Es importante recordar que una fórmula que no es dimensionalmente homogénea es en definitiva errónea (Fig. 1-14), pero una fórmula con homogeneidad dimensional no necesariamente es correcta.

Relaciones de conversión de unidades

Así como es posible formar dimensiones no primarias mediante combinaciones adecuadas de dimensiones primarias, *todas las unidades no primarias (unidades secundarias) se forman a través de combinaciones de unidades primarias*. Las unidades de fuerza, por ejemplo, es posible expresarlas como

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{y} \quad 1 \text{ lbf} = 32.174 \text{ lbm} \frac{\text{pie}}{\text{s}^2}$$

Asimismo, se pueden expresar de modo más conveniente como **relaciones unitarias de conversión** como

$$\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} = 1 \quad \text{y} \quad \frac{1 \text{ lbf}}{32.174 \text{ lbm} \cdot \text{pie/s}^2} = 1$$

Las relaciones unitarias de conversión son iguales a 1 y no tienen unidades; por lo tanto, tales relaciones (o sus inversos) se pueden insertar en forma conveniente en cualquier cálculo para convertir unidades de manera adecuada (Fig. 1-15). Se recomienda a los estudiantes que siempre usen relaciones unitarias de conversión como las que se proporcionan aquí. Algunos libros incluyen en las ecuaciones la constante gravitacional arcaica g_c definida como $g_c = 32.174 \text{ lbm} \cdot \text{pie/lbf} \cdot \text{s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/N} \cdot \text{s}^2 = 1$ con la finalidad de que concuerden las unidades de fuerza. Esta práctica produce una confusión innecesaria y los autores de este libro consideran que no es aconsejable. En cambio, se recomienda que los estudiantes usen relaciones unitarias de conversión.

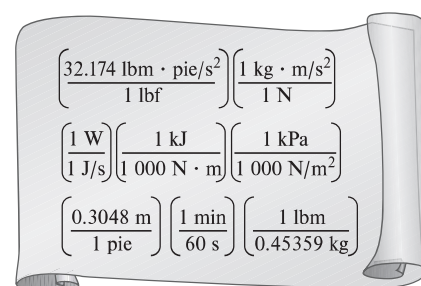


FIGURA 1-15

Toda relación de conversión unitaria (así como su inverso) es exactamente igual a uno. Aquí se muestran unas pocas relaciones de conversión unitarias que se usan comúnmente, cada una dentro de sus propios paréntesis.



FIGURA 1-16

En la Tierra, una masa de 1 lbm pesa 1 lbf.



FIGURA 1-17

Una peculiaridad del sistema métrico de unidades.

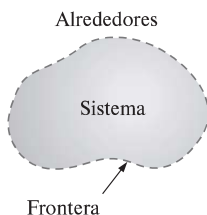


FIGURA 1-18

Sistema, alrededores y frontera.

EJEMPLO 1-3 El peso de una libra-masa

Por medio de las relaciones de conversión de unidades, muestre que 1.00 lbm pesa 1.00 lbf en la Tierra (Fig. 1-16).

SOLUCIÓN Una masa de 1.00 lbm se somete a la gravedad terrestre estándar. Se determinará su peso en lbf.

Suposiciones Se consideran condiciones estándar al nivel del mar.

Propiedades La constante gravitacional es $g = 32.174 \text{ pie/s}^2$.

Análisis Se aplica la segunda ley de Newton para calcular el peso (fuerza) que corresponde a la masa y aceleración conocidas. El peso de cualquier objeto es igual a su masa multiplicada por el valor local de la aceleración debida a la gravedad. Así,

$$W = mg = (1.00 \text{ lbm})(32.174 \text{ pie/s}^2) \left(\frac{1 \text{ lbf}}{32.174 \text{ lbm} \cdot \text{pie/s}^2} \right) = 1.00 \text{ lbf}$$

Comentario La cantidad dentro del paréntesis grande de esta ecuación es una relación de conversión unitaria. La masa es la misma sin importar su ubicación. Sin embargo, en algún otro planeta cuyo valor de la aceleración gravitacional es diferente, el peso de 1 lbm diferiría del valor calculado aquí.

Cuando se compra una caja de cereal en la impresión se lee “Peso neto: una libra (454 gramos)” (Fig. 1-17). En términos técnicos, esto significa que el cereal dentro de la caja pesa 1.00 lbf en la Tierra y tiene una *masa* de 453.6 g (0.4536 kg). Usando la segunda ley de Newton, el peso real del cereal en el sistema métrico es

$$W = mg = (453.6 \text{ g})(9.81 \text{ m/s}^2) \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 4.49 \text{ N}$$

1-3 ■ SISTEMAS Y VOLÚMENES DE CONTROL

Un sistema se define como una *cantidad de materia o una región en el espacio elegida para análisis*. La masa o región fuera del sistema se conoce como **alrededores**. La superficie real o imaginaria que separa al sistema de sus alrededores se llama **frontera** (Fig. 1-18). La frontera de un sistema puede ser *fija* o *móvil*. Note que la frontera es la superficie de contacto que comparten sistema y alrededores. En términos matemáticos, la frontera tiene espesor cero y, por lo tanto, no puede contener masa ni ocupar un volumen en el espacio.

Los sistemas se pueden considerar *cerrados* o *abiertos*, dependiendo de si se elige para estudio una masa fija o un volumen fijo en el espacio. Un **sistema cerrado** (conocido también como una **masa de control** o simplemente *sistema* cuando su naturaleza se entiende por el contexto) consta de una cantidad fija de masa y ninguna otra puede cruzar su frontera. Es decir, ninguna masa puede entrar o salir de un sistema cerrado, como se ilustra en la figura 1-19. Pero la energía, en forma de calor o trabajo puede cruzar la frontera; y el volumen de un sistema cerrado no tiene que ser fijo. Si, como caso especial, incluso se impide que la energía cruce la frontera, entonces se trata de un **sistema aislado**.

Considérese el dispositivo de cilindro-émbolo mostrado en la figura 1-20. Suponga que se desea saber qué pasa con el gas encerrado cuando se calienta. Puesto que el interés se centra en el gas, éste es el sistema. Las superficies internas del émbolo y el cilindro forman la frontera, y como ninguna masa la cruza, se trata de un sistema cerrado. La energía puede cruzar la frontera y par-

te de la frontera (la superficie interna del émbolo, en este caso) se puede mover. Todo lo que se halla fuera del gas, incluso el émbolo y el cilindro, son los alrededores.

Un **sistema abierto**, o un **volumen de control**, como suele llamarse, es una región elegida apropiadamente en el espacio. Por lo general encierra un dispositivo que tiene que ver con flujo másico, como un compresor, turbina o tobera. El flujo por estos dispositivos se estudia mejor si se selecciona la región dentro del dispositivo como el volumen de control. Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control.

Un gran número de problemas de ingeniería tiene que ver con flujo de masa dentro y fuera de un sistema y, por lo tanto, se modelan como *volúmenes de control*. Un calentador de agua, un radiador de automóvil, una turbina y un compresor se relacionan con el flujo de masa y se deben analizar como volúmenes de control (sistemas abiertos) en lugar de como masas de control (sistemas cerrados). En general, *cualquier región arbitraria en el espacio* se puede seleccionar como volumen de control; no hay reglas concretas para esta selección, pero una que sea apropiada hace más fácil el análisis. Por ejemplo, si se necesitara analizar el flujo de aire por una tobera, una buena elección para el volumen de control sería la región dentro de la tobera.

Las fronteras de un volumen de control se conocen como *superficie de control*, y pueden ser reales o imaginarias. En el caso de una tobera, la superficie interna de ésta constituye la parte real de la frontera, mientras que las áreas de entrada y salida forman la parte imaginaria, puesto que allí no hay superficies físicas (Fig. 1-21a).

Un volumen de control puede ser fijo en tamaño y forma, como en el caso de una tobera, o bien podría implicar una frontera móvil, como se ilustra en la figura 1-21b). Sin embargo, la mayor parte de los volúmenes de control tienen fronteras fijas y, por lo tanto, no involucran fronteras móviles. Al igual que en un sistema cerrado, en un volumen de control también puede haber interacciones de calor y trabajo, además de interacción de masa.

Considere el calentador de agua mostrado en la figura 1-22 como ejemplo de un sistema abierto y suponga que se quiere determinar cuánto calor debe transferirse al agua dentro del recipiente con la finalidad de proveer un flujo estacionario de agua caliente. Puesto que el agua caliente saldrá del recipiente y será reemplazada por agua fría, no es conveniente elegir una masa fija como sistema para el análisis. En cambio, se centra la atención en el volumen que se forma por las superficies interiores del recipiente y se considera a los flujos de agua caliente y fría como la masa que sale y entra al volumen de control.

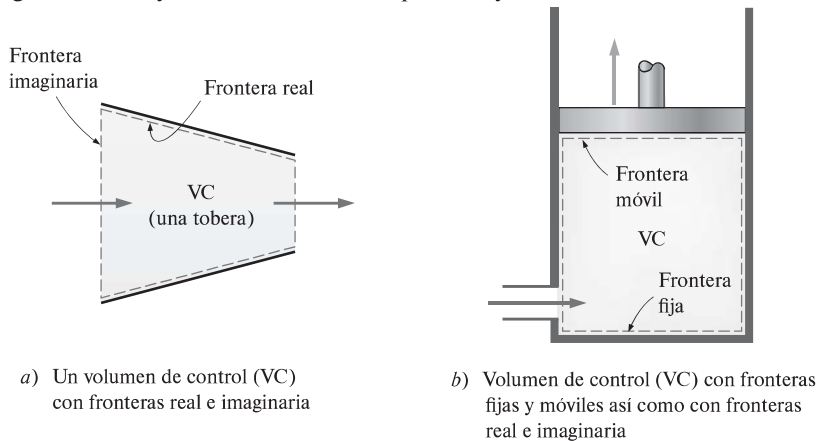


FIGURA 1-21

Un volumen de control puede tener fronteras fijas, móviles, reales o imaginarias.

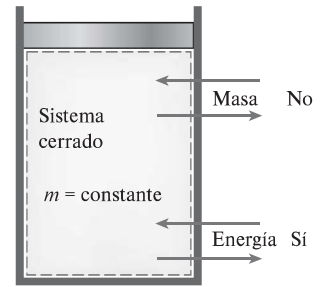


FIGURA 1-19

La masa no puede cruzar las fronteras de un sistema cerrado, pero la energía sí.

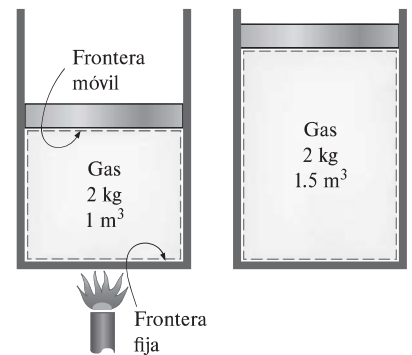


FIGURA 1-20

Un sistema cerrado con una frontera móvil.



FIGURA 1-22

Un sistema abierto (o volumen de control) con una entrada y una salida.

En este caso, las paredes interiores del recipiente forman la superficie de control la cual es cruzada en dos lugares por la masa.

En un análisis de ingeniería, el sistema bajo estudio *se debe* definir con cuidado. En la mayor parte de los casos, el sistema analizado es bastante simple y obvio, y definirlo podría parecer una tarea tediosa e innecesaria. Sin embargo, en otros casos el sistema bajo análisis podría ser bastante complejo, de modo que su apropiada elección puede simplificar en gran medida el análisis.

1-4 ■ PROPIEDADES DE UN SISTEMA

Cualquier característica de un sistema se llama **propiedad**. Algunas propiedades muy familiares son presión P , temperatura T , volumen V y masa m . La lista se puede ampliar para incluir propiedades menos familiares como viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica e incluso velocidad y elevación.

Se considera que las propiedades son *intensivas* o *extensivas*. Las **propiedades intensivas** son aquellas independientes de la masa de un sistema, como temperatura, presión y densidad. Las **propiedades extensivas** son aquellas cuyos valores dependen del tamaño o extensión del sistema. La masa total, volumen total y cantidad de movimiento total son algunos ejemplos de propiedades extensivas. Una forma fácil de determinar si una propiedad es intensiva o extensiva es dividir el sistema en dos partes iguales mediante una partición imaginaria, como se ilustra en la figura 1-23; cada parte tendrá el mismo valor de propiedades intensivas que el sistema original, pero la mitad del valor de las propiedades extensivas.

Comúnmente, las letras mayúsculas se usan para denotar propiedades extensivas (con la importante excepción de la masa m) y las minúsculas para las intensivas (con las excepciones obvias de la presión P y la temperatura T).

Las propiedades extensivas por unidad de masa se llaman **propiedades específicas**. Algunos ejemplos de éstas son el volumen específico ($v = V/m$) y la energía total específica ($e = E/m$).

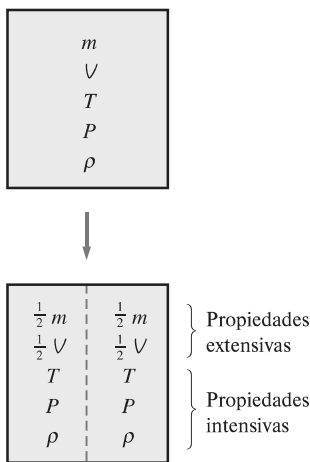


FIGURA 1-23

Criterio para diferenciar propiedades intensivas y extensivas.

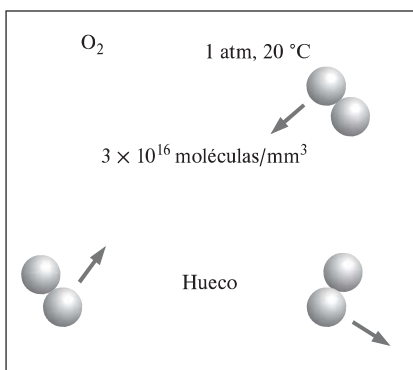


FIGURA 1-24

A pesar de los grandes espacios entre moléculas, una sustancia puede ser tratada como un continuo, como resultado de la gran cantidad de moléculas, incluso en un volumen extremadamente pequeño.

Continuo

La materia está constituida por átomos que están ampliamente espaciados en la fase gas. Sin embargo, es muy conveniente no tomar en cuenta la naturaleza atómica de una sustancia y considerarla como materia continua, homogénea y sin ningún hueco, es decir, un **continuo**. La idealización de continuo permite tratar a las propiedades como funciones puntuales y suponer que varían en forma continua en el espacio sin saltos discontinuos. Esta idealización es válida siempre y cuando el tamaño del sistema analizado sea grande en relación con el espacio entre moléculas. Éste es el caso en casi todos los problemas a excepción de algunos especializados. La idealización del continuo está implícita en muchos enunciados, como "la densidad del agua en un vaso es la misma en cualquier punto".

Para tener una idea de la distancia que hay a nivel molecular, considere un recipiente lleno de oxígeno en condiciones atmosféricas. El diámetro de la molécula de oxígeno es de alrededor de 3×10^{-10} m y su masa es de 5.3×10^{-26} kg. Asimismo, la *trayectoria libre media* del oxígeno a una presión de 1 atm y 20 °C es 6.3×10^{-8} m. Es decir, una molécula de oxígeno viaja, en promedio, una distancia de 6.3×10^{-8} m (unas 200 veces su diámetro) antes de chocar con otra molécula.

También, hay cerca de 3×10^{16} moléculas de oxígeno en el pequeño volumen de 1 mm³ a 1 atm de presión y 20 °C (Fig. 1-24). El modelo del continuo

es aplicable siempre y cuando la longitud característica del sistema (por ejemplo, su diámetro) sea mucho más grande que la trayectoria libre media de las moléculas. En vacíos muy altos o elevaciones muy altas, la trayectoria libre media podría volverse grande (por ejemplo, su valor es de alrededor de 0.1 m para aire atmosférico a una elevación de 100 km). En esos casos se debe usar la **teoría del flujo de gas enrarecido** y debe considerarse el impacto de cada una de las moléculas. En este libro sólo se consideran sustancias que es posible modelar como un continuo.

1-5 ■ DENSIDAD Y DENSIDAD RELATIVA

La **densidad** se define como la *masa por unidad de volumen* (Fig. 1-25).

$$\text{Densidad:} \quad \rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-4)$$

El recíproco de la densidad es el **volumen específico** ν , que se define como el *volumen por unidad de masa*. Es decir,

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-5)$$

Para un elemento de volumen diferencial de masa δm y volumen δV , la densidad se puede expresar como $\rho = \delta m / \delta V$.

En general, la densidad de una sustancia depende de la temperatura y la presión. La densidad de la mayoría de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. Por otro lado, los líquidos y sólidos son en esencia sustancias no compresibles y la variación de su densidad con la presión es por lo regular insignificante. A 20 °C, por ejemplo, la densidad del agua cambia de 998 kg/m³ a 1 atm, a 1 003 kg/m³ a 100 atm, un cambio de sólo 0.5 por ciento. La densidad de líquidos y sólidos depende más de la temperatura que de la presión. A 1 atm, por ejemplo, la densidad del agua cambia de 998 kg/m³ a 20 °C a 975 kg/m³ a 75 °C, esto significa un cambio de 2.3 por ciento, lo cual puede ignorarse en muchos análisis de ingeniería.

Algunas veces la densidad de una sustancia se da como relativa a la densidad de una sustancia bien conocida. Entonces, se llama **gravedad específica**, o **densidad relativa**, y se define como el *cociente de la densidad de una sustancia entre la densidad de alguna sustancia estándar a una temperatura especificada* (normalmente agua a 4 °C, para la que $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$). Es decir,

$$\text{Densidad relativa:} \quad \text{DR} = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1-6)$$

La densidad relativa de una sustancia es una cantidad adimensional. Sin embargo, en unidades SI, el valor numérico de la densidad relativa de una sustancia es exactamente igual a su densidad en g/cm³ o kg/L (o bien, 0.001 veces la densidad en kg/m³) puesto que la densidad del agua a 4 °C es de 1 g/cm³ = 1 kg/L = 1 000 kg/m³. La densidad relativa del mercurio a 0 °C, por ejemplo, es 13.6. Por lo tanto, su densidad a 0 °C es 13.6 g/cm³ = 13.6 kg/L = 13 600 kg/m³. En la tabla 1-3 se dan las densidades relativas de algunas sustancias a 0 °C; observe que las sustancias con densidades relativas menores a 1 son más ligeras que el agua y, por lo tanto, flotarían en ésta.

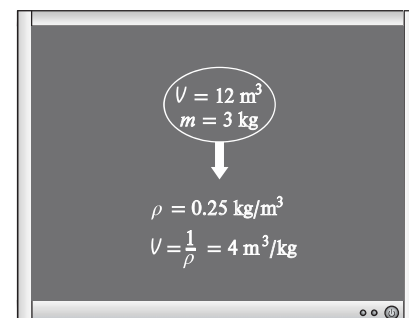


FIGURA 1-25

La densidad es la masa por unidad de volumen; el volumen específico es el volumen por unidad de masa.

TABLA 1-3

Densidades relativas de algunas sustancias a 0 °C

Sustancia	DR
Agua	1.0
Sangre	1.05
Agua de mar	1.025
Gasolina	0.7
Alcohol etílico	0.79
Mercurio	13.6
Madera	0.3-0.9
Oro	19.2
Huesos	1.7-2.0
Hielo	0.92
Aire (a 1 atm)	0.0013

El peso de un volumen unitario de una sustancia se llama **peso específico** y se expresa como

$$\text{Peso específico: } \gamma_s = \rho g \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-7)$$

donde g es la aceleración gravitacional.

Las densidades de líquidos en esencia son constantes y, por consiguiente, se pueden aproximar como sustancias no compresibles durante la mayor parte de los procesos sin sacrificar mucho en precisión.

1-6 ■ ESTADO Y EQUILIBRIO

Hay que considerar un sistema que no experimenta ningún cambio; en estas circunstancias, todas las propiedades se pueden medir o calcular en el sistema, lo cual da un conjunto de propiedades que describe por completo la condición, o el **estado**, del sistema. En un estado específico, todas las propiedades de un sistema tienen valores fijos, y si se cambia el valor de una propiedad, el estado cambia a otro diferente. En la figura 1-26 se muestra un sistema en dos estados diferentes.

La termodinámica trata con estados de *equilibrio*. La palabra **equilibrio** define un estado de balance. En un estado de equilibrio no hay potenciales desbalanceados (o fuerzas impulsoras) dentro del sistema, y éste no experimenta cambios cuando es aislado de sus alrededores.

Hay muchos tipos de equilibrio, y un sistema no está en equilibrio termodinámico a menos que se satisfagan las condiciones de todos los tipos necesarios de equilibrio. Por ejemplo, un sistema está en **equilibrio térmico** si tiene la misma temperatura en todo él, como se muestra en la figura 1-27. Es decir, el sistema no implica diferencias de temperatura, que es la fuerza impulsora para el flujo de calor. El **equilibrio mecánico** se relaciona con la presión, y un sistema lo posee si con el tiempo no hay cambio de presión en alguno de sus puntos. Sin embargo, en el interior del sistema la presión puede variar con la elevación como resultado de efectos gravitacionales.

Por ejemplo, la mayor presión en una capa inferior se equilibra mediante el peso extra que debe soportar y, por lo tanto, no hay desequilibrio de fuerzas. La variación de la presión como resultado de la gravedad en la mayor parte de los sistemas termodinámicos es relativamente pequeña y por lo general se ignora. Si en un sistema hay dos fases, se encuentra en la **fase de equilibrio** cuando la masa de cada fase alcanza un nivel de equilibrio y permanece allí. Por último, un sistema está en **equilibrio químico** si su composición química no cambia con el tiempo, es decir, si no ocurren reacciones químicas. Un sistema no estará en equilibrio a menos que se satisfagan los criterios de equilibrio necesarios.

Postulado de estado

Como se mencionó, el estado de un sistema se describe mediante sus propiedades, pero se sabe por experiencia que no es necesario especificarlas todas con la finalidad de fijarlo. Una vez especificadas suficientes propiedades, el resto asume automáticamente ciertos valores; es decir, especificar cierto número de propiedades es suficiente para fijar un estado. El número de propiedades requeridas para fijar el estado de un sistema se determina mediante el **postulado de estado**:

El estado de un sistema compresible simple se especifica por completo mediante dos propiedades intensivas independientes.

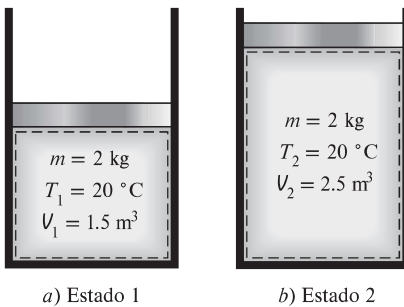


FIGURA 1-26

Un sistema en dos estados diferentes.

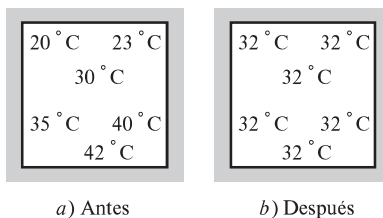


FIGURA 1-27

Un sistema cerrado que alcanza el equilibrio térmico.

Se trata de un **sistema compresible simple** cuando carece de efectos eléctricos, magnéticos, gravitacionales, de movimiento y tensión superficial. Estos efectos se deben a campos de fuerza externos y son insignificantes para la mayor parte de los problemas de ingeniería, porque de lo contrario sería necesario especificar una propiedad adicional para cada efecto importante. Si se van a considerar los efectos gravitacionales, por ejemplo, se requiere especificar la elevación z además de las dos propiedades necesarias para fijar el estado.

El postulado de estado requiere que las dos propiedades especificadas sean independientes para fijar el estado; y son **independientes** si una de ellas puede variar mientras la otra se mantiene constante. Por ejemplo, la temperatura y el volumen específico son siempre propiedades independientes, y juntas fijan el estado de un sistema compresible simple (Fig. 1-28). Sin embargo, la temperatura y la presión son propiedades independientes para sistemas de una sola fase, pero son propiedades dependientes para sistemas multifase. A nivel del mar ($P = 1 \text{ atm}$), el agua hierve a 100 °C , pero en la cima de una montaña donde la presión es menor, el agua hierve a una temperatura más baja. Es decir, $T = f(P)$ durante un proceso de cambio de fase; así, la temperatura y la presión no son suficientes para fijar el estado de un sistema de dos fases. Los procesos de cambio de fase se analizan con detalle en el capítulo 3.

1-7 ■ PROCESOS Y CICLOS

Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un **proceso**, y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es una **trayectoria** del proceso (Fig. 1-29). Para describir completamente un proceso se deben especificar sus estados inicial y final, así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores.

Cuando un proceso se desarrolla de tal manera que todo el tiempo el sistema permanece infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio, estamos ante un **proceso cuasiestático**, o de **cuasiequilibrio**. Un proceso de este tipo puede considerarse lo suficientemente lento como para permitirle al sistema ajustarse de forma interna de modo que las propiedades de una de sus partes no cambien más rápido que las de otras.

Esto se ilustra en la figura 1-30. Cuando un gas en un dispositivo de cilindro-émbolo se comprime de forma repentina, las moléculas cercanas a la superficie del émbolo no tendrán suficiente tiempo para escapar y se concentrarán en una pequeña región frontal del émbolo, de modo que ahí se creará una región de alta presión. Como resultado de esta diferencia de presión, ya no se puede decir que el sistema está en equilibrio, lo cual hace que todo el proceso no sea de cuasiequilibrio. Sin embargo, si el émbolo se mueve lentamente, las moléculas tendrán tiempo suficiente para redistribuirse y no habrá concentración de moléculas al frente del émbolo. Como resultado, la presión dentro del cilindro siempre será uniforme y aumentará con la misma rapidez en todos los lugares. Puesto que el equilibrio se mantiene todo el tiempo, se trata de un proceso de cuasiequilibrio.

Se debe señalar que un proceso de cuasiequilibrio es un caso idealizado y no corresponde a una representación auténtica de un proceso real. No obstante, muchos procesos reales se aproximan bastante y es posible modelarlos como de cuasiequilibrio con un margen de error insignificante. Los ingenieros se interesan en este tipo de procesos por dos razones: primera, son fáciles de

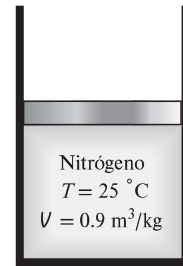


FIGURA 1-28

El estado del nitrógeno se fija mediante dos propiedades intensivas independientes.

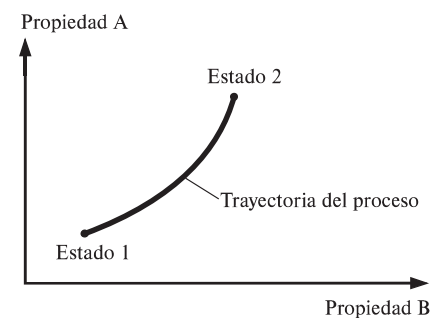


FIGURA 1-29

Un proceso entre los estados 1 y 2 y la trayectoria del proceso.

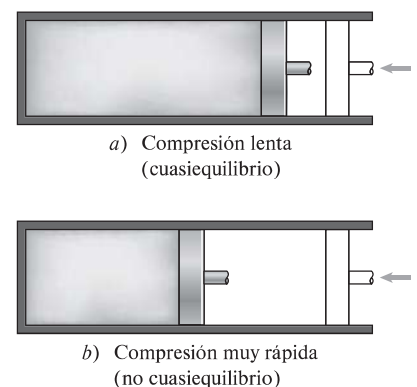


FIGURA 1-30

Procesos de compresión con y sin cuasiequilibrio.

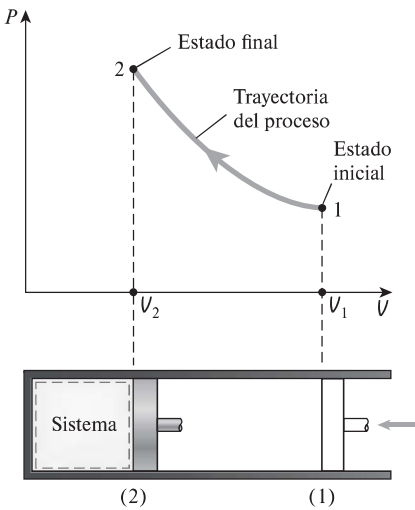


FIGURA 1-31

Diagrama P - V de un proceso de compresión.

analizar, y segunda, los dispositivos que producen trabajo tienen un mejor rendimiento cuando operan con procesos de cuasiequilibrio. Por lo tanto, sirven como estándares con los que se puede comparar a los reales.

Los diagramas de proceso trazados mediante el empleo de propiedades termodinámicas en forma de coordenadas son muy útiles para tener una representación visual del proceso. Algunas propiedades comunes usadas como coordenadas son temperatura T , presión P y volumen V (o volumen específico v). En la figura 1-31 se muestra el diagrama P - V de un proceso de compresión de un gas.

Observe que la trayectoria del proceso indica una serie de estados de equilibrio por los que pasa el sistema durante un proceso, y que únicamente tiene importancia para procesos de cuasiequilibrio; para otros procesos no es posible caracterizar el sistema completo mediante un solo estado, por lo que carece de sentido hablar de una trayectoria del proceso para un sistema como un todo. Un proceso sin cuasiequilibrio se denota con una línea discontinua entre los estados inicial y final en lugar de una línea continua.

El prefijo *iso* se usa con frecuencia para designar un proceso en el que una propiedad particular permanece constante. Por ejemplo, un **proceso isotérmico** es aquel durante el cual la temperatura T permanece constante; un **proceso isobárico** es en el que la presión P se mantiene constante, y un **proceso isocórico** (o **isométrico**) es aquel donde el volumen específico v permanece constante.

Se dice que un sistema ha experimentado un **ciclo** si regresa a su estado inicial al final del proceso, es decir, para un ciclo los estados inicial y final son idénticos.

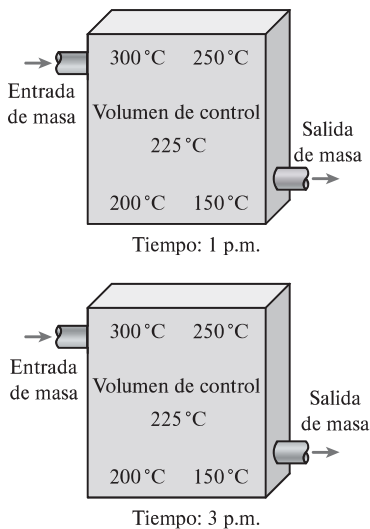


FIGURA 1-32

Durante un proceso de flujo estacionario, las propiedades del fluido dentro del volumen de control podrían cambiar con la posición pero no con el tiempo.

Proceso de flujo estacionario

Los términos *estacionario* y *uniforme* se usan con frecuencia en ingeniería, y es importante comprender claramente sus significados. *Estacionario* significa que *no hay cambio con el tiempo* y su contrario es *no estacionario* o *transitorio*. Sin embargo, *uniforme* significa *ningún cambio con la ubicación* en una región específica. Estos significados son congruentes con su uso cotidiano (pequeña, estable, propiedades uniformes, etc.).

En ingeniería, un gran número de dispositivos operan por largos periodos bajo las mismas condiciones y se clasifican como *dispositivos de flujo estacionario*. Los procesos en los que se utilizan tales dispositivos se pueden representar razonablemente bien mediante un proceso un poco idealizado, llamado **proceso de flujo estacionario**, que es posible definir como un *proceso durante el cual un fluido fluye de forma estacionaria por un volumen de control* (Fig. 1-32). Es decir, las propiedades del fluido pueden cambiar de un punto a otro dentro del volumen de control, pero en algún punto fijo permanecen sin cambio durante todo el proceso. Por lo tanto, el volumen V , la masa m y el contenido total de energía E del volumen de control permanecen constantes durante un proceso de flujo estacionario (Fig. 1-33).

Es posible aproximarse a las condiciones de flujo estacionario mediante dispositivos diseñados para operar constantemente, como turbinas, bombas, calderas, condensadores, intercambiadores de calor, plantas de energía o sistemas de refrigeración. Algunos dispositivos cíclicos, como máquinas o compresores alternativos, no satisfacen ninguna de las condiciones antes mencionadas puesto que el flujo en las entradas y salidas será pulsante y no estacionario. Sin embargo, las propiedades del fluido varían con el tiempo de una manera periódica y el flujo en estos dispositivos aún se puede analizar como un proce-

so de flujo estacionario mediante valores promediados respecto al tiempo para las propiedades.

1-8 ■ TEMPERATURA Y LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA

Aun cuando estamos familiarizados con la temperatura como una medida del “calor” y el “frío”, no es fácil ofrecer una definición exacta de este concepto. Con base en nuestras sensaciones fisiológicas, se expresa el nivel de temperatura de modo cualitativo con palabras como *frío helador*, *frío*, *tibio*, *caliente* y *al rojo vivo*; sin embargo, no es posible asignar valores numéricos a temperaturas basándose únicamente en las sensaciones. Además, en ocasiones los sentidos engañan. Una silla metálica, por ejemplo, se sentirá mucho más fría que una silla de madera aun cuando ambas estén a la misma temperatura.

Por fortuna, varias propiedades de los materiales cambian con la temperatura de una manera *repetible* y *predecible*, y esto establece una base para la medición precisa de la temperatura. Por ejemplo, el termómetro de mercurio utilizado comúnmente se rige por la expansión del mercurio con la temperatura. Ésta se mide también por medio de otras propiedades dependientes de ella.

Una experiencia común es que una taza de café caliente colocada sobre una mesa se enfría con el tiempo, y que una bebida fría se entibie en algún momento. Cuando un cuerpo se pone en contacto con otro que está a una temperatura diferente, el calor se transfiere del que está caliente al frío hasta que ambos alcanzan la misma temperatura (Fig. 1-34). En ese punto se detiene la transferencia de calor y se dice que los dos cuerpos han alcanzado el **equilibrio térmico**. Para ello el único requerimiento es la igualdad de temperatura.

La **ley cero de la termodinámica** establece que si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí. Podría parecer tonto que un hecho tan obvio se conozca como una de las leyes básicas de la termodinámica; sin embargo, no es posible concluir esta ley de las otras leyes de la termodinámica, además de que sirve como base para la validez de la medición de la temperatura. Si el tercer cuerpo se sustituye por un termómetro, la ley cero se puede volver a expresar como *dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto*.

R. H. Fowler fue el primero que formuló y nombró la ley cero en 1931. Como su nombre indica, su valor como principio físico fundamental se reconoció más de medio siglo después de la formulación de la primera y segunda leyes de la termodinámica y se llamó ley cero puesto que debía preceder a éstas.

Escalas de temperatura

Estas escalas permiten usar una base común para las mediciones de temperatura. A través de la historia se han introducido varias y todas se basan en ciertos estados fácilmente reproducibles como los puntos de congelación y ebullición del agua, llamados también *punto de hielo* y *punto de vapor*, respectivamente. Una mezcla de hielo y agua que está en equilibrio con aire saturado con vapor a 1 atm de presión está en el punto de hielo, mientras que una mez-

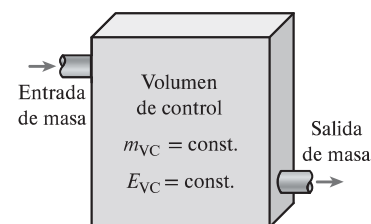


FIGURA 1-33

En condiciones de flujo estacionario, el contenido de masa y energía de un volumen de control permanece constante.

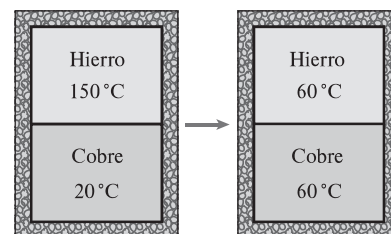


FIGURA 1-34

Dos cuerpos que alcanzan el equilibrio térmico después de ser puestos en contacto dentro de un recinto aislado.

cla de agua líquida y vapor de agua (sin aire) en equilibrio a 1 atm de presión se encuentra en el punto de vapor.

Las escalas de temperatura usadas actualmente en el SI y en el sistema inglés son la **escala Celsius** (antes llamada *escala centígrada*; en 1948 se le cambió el nombre en honor de quien la diseñó, el astrónomo sueco A. Celsius, 1702-1744) y la **escala Fahrenheit** (en honor al fabricante de instrumentos alemán G. Fahrenheit, 1686-1736), respectivamente. En la primera, a los puntos de hielo y de vapor se les asignaron al principio los valores de 0 y 100 °C, respectivamente. Los valores correspondientes en la segunda son 32 y 212 °F. Ambas se conocen por lo regular como *escalas de dos puntos* dado que los valores de temperatura se asignan en dos puntos distintos.

En termodinámica es muy conveniente tener una escala de temperatura independiente de las propiedades de cualquier sustancia o sustancias. Tal escala es la **escala de temperatura termodinámica**, desarrollada posteriormente junto con la segunda ley de la termodinámica. La escala de temperatura termodinámica en el SI es la **escala Kelvin**, llamada así en honor a lord Kelvin (1824-1907), cuya unidad de temperatura es el **kelvin**, designado por K (no °K; el símbolo de grado se eliminó de forma oficial del kelvin en 1967). La temperatura mínima en esta escala es el cero absoluto, o 0 K. Se deduce entonces que sólo se requiere asignar un punto de referencia diferente a cero para establecer la pendiente de esta escala lineal. Por medio de técnicas de refrigeración poco comunes los científicos se han aproximado al cero absoluto kelvin (en 1989 lograron alcanzar 0.000000002 K).

La escala de temperatura termodinámica en el sistema inglés es la **escala Rankine**, nombrada en honor a William Rankine (1820-1872), cuya unidad de temperatura es el **rankine**, el cual se designa mediante R.

Otra escala de temperatura que resulta ser casi idéntica a la Kelvin es la **escala de temperatura del gas ideal**, ya que en ésta las temperaturas se miden por medio de un **termómetro de gas a volumen constante**, el cual es básicamente un recipiente rígido lleno de gas a baja presión, por lo general hidrógeno o helio. Este termómetro funciona bajo el principio de que *a bajas presiones, la temperatura de un gas es proporcional a su presión a volumen constante*. Es decir, a presiones suficientemente bajas la temperatura de un gas de volumen fijo varía *de forma lineal* con la presión. Entonces la relación entre la temperatura y la presión del gas en el recipiente se expresa como

$$T = a + bP \quad (1-8)$$

donde los valores de las constantes a y b para un termómetro de gas se determinan de forma experimental. Una vez conocidas a y b la temperatura de un medio se calcula a partir de esta relación al sumergir dentro del medio el recipiente rígido del termómetro de gas y medir la presión del gas cuando se establece el equilibrio térmico entre el medio y el gas del recipiente cuyo volumen se mantiene constante.

Es posible obtener una escala de temperatura de gas ideal si se miden las presiones de éste dentro del recipiente en dos puntos reproducibles (como los puntos de hielo y de vapor) y asignar valores adecuados a las temperaturas en estos dos puntos. Considerando que sólo una recta pasa por dos puntos fijos en un plano, estas dos mediciones son suficientes para determinar las constantes a y b en la ecuación 1-8. Entonces la temperatura desconocida T de un medio que corresponde a una lectura de presión P se determina de esa ecuación mediante un cálculo simple. Los valores de las constantes serán diferen-

tes para cada termómetro, dependiendo del tipo y la cantidad de gas en el recipiente y los valores de temperatura asignados en los dos puntos de referencia. Si a los puntos de hielo y de vapor se les asigna el valor $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, entonces la escala de temperatura del gas coincidirá con la escala Celsius. En este caso el valor de la constante a (que corresponde a una presión absoluta de cero) se determina como $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin importar el tipo y la cantidad de gas en el recipiente del termómetro. Es decir, en un diagrama P - T todas las rectas que pasan por los puntos de datos en este caso cruzan el eje de temperatura en $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando se extrapolan, como se ilustra en la figura 1-35. Ésta es la temperatura más baja que se puede obtener mediante un termómetro de gas, por lo que se puede obtener una *escala absoluta de temperatura de gas* al asignar un valor de cero a la constante a en la ecuación 1-8. En ese caso, la ecuación 1-8 se reduce a $T = bP$, por lo tanto, se requiere especificar la temperatura en sólo *un* punto para definir una escala de temperatura de gas absoluta.

La escala absoluta de temperatura de gas no es una escala de temperatura termodinámica, puesto que no es posible usarla a muy bajas temperaturas (debido a la condensación) ni tampoco a muy altas (debido a la disociación e ionización). Sin embargo, la temperatura de gas absoluta es idéntica a la temperatura termodinámica en el intervalo en el que es posible usar el termómetro de gas, con lo cual en este punto se puede considerar a la escala de temperatura termodinámica como una escala de temperatura de gas absoluta que utiliza un gas “ideal” o “imaginario” que siempre actúa como un gas de baja presión sin importar la temperatura. Si existiera tal termómetro de gas, marcaría cero kelvin a la presión cero absoluta, que corresponde a $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la escala Celsius (Fig. 1-36).

La escala Kelvin se relaciona con la Celsius mediante

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-9)$$

La escala Rankine se relaciona con la Fahrenheit mediante

$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67 \quad (1-10)$$

Es una práctica común redondear la constante en la ecuación 1-9 a 273 y la de la ecuación 1-10 a 460.

Las escalas de temperatura en los dos sistemas de unidades se relacionan mediante

$$T(\text{R}) = 1.8T(\text{K}) \quad (1-11)$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1-12)$$

En la figura 1-37 se muestra una comparación de varias escalas de temperatura.

La temperatura de referencia elegida en la escala Kelvin original fue 273.15 K (o $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), que es la temperatura a la que se congela el agua (o se funde el hielo), sustancia que existe como una mezcla sólida-líquida en equilibrio a presión atmosférica estándar (el *punto de hielo*). En la Décima Conferencia General de Pesos y Medidas de 1954, el punto de referencia se cambió a un punto reproducible con mucha mayor precisión, el *punto triple* del agua (el estado en el cual coexisten en equilibrio las tres fases del agua), al cual se le asigna el valor de 273.16 K . La escala Celsius también se volvió a definir en esta conferencia en términos de la escala de temperatura del gas ideal y un

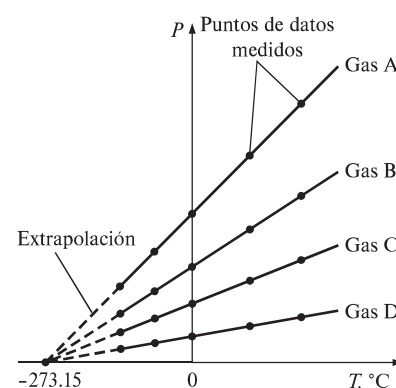


FIGURA 1-35

Gráficas P en función de T de los datos experimentales de un termómetro de gas de volumen constante con cuatro gases distintos a diferentes presiones (bajas).

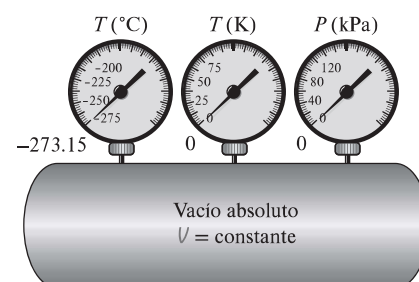


FIGURA 1-36

Un termómetro de gas de volumen constante marcaría $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a presión absoluta cero.

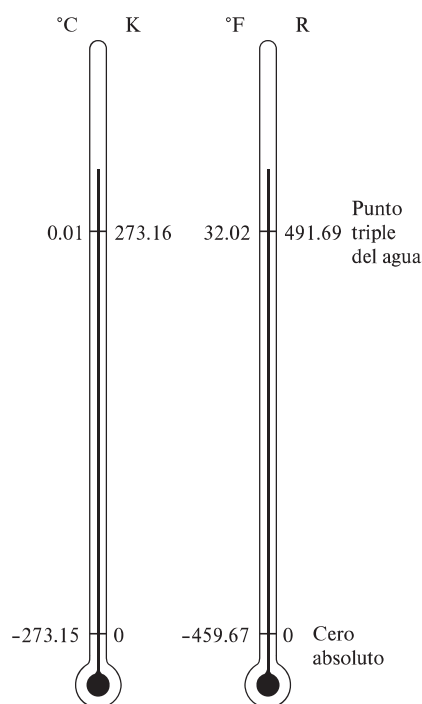


FIGURA 1-37

Comparación de escalas de temperatura.

solo punto fijo, que es de nuevo el punto triple del agua con un valor asignado de $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura de ebullición del agua (el *punto de vapor*) se determinó nuevamente de forma experimental como $100.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ y, por consiguiente, hubo una buena concordancia entre la anterior y la nueva escala Celsius.

Escala internacional de temperatura de 1990 (ITS-90)

La *escala internacional de temperatura de 1990*, que sustituye a las escalas prácticas internacionales de temperaturas de 1968 (IPTS-68), 1948 (IPTS-48) y 1927 (ITS-27), fue adoptada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas en 1989 a solicitud de la Decimoctava Conferencia General de Pesos y Medidas. La ITS-90 es similar a sus predecesoras pero posee valores más actualizados de temperaturas fijas, tiene un alcance amplio y se ajusta con mayor precisión a la escala de temperatura termodinámica. En la IPTS-90 la unidad de temperatura termodinámica T es también el kelvin (K), definida como la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua, el cual es el único punto fijo de definición de esta escala y la Kelvin, además de funcionar como el punto fijo termométrico más importante usado en la calibración de termómetros para ITS-90.

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que por definición es igual en magnitud al kelvin (K). Una diferencia de temperatura se puede expresar en kelvin o grados Celsius. El punto de hielo es el mismo en $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (273.15 K) tanto en ITS-90 como en IPTS-68, pero el punto de vapor es $99.975\text{ }^{\circ}\text{C}$ en ITS-90 (con una incertidumbre de $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$) mientras que éste fue $100.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ en IPTS-68. El cambio se debe a mediciones precisas realizadas mediante termometría de gas con particular atención en el efecto de absorción (las impurezas de un gas absorbidas por las paredes de un bulbo a la temperatura de referencia que se desabsorben a temperaturas más altas, lo cual provoca que se incremente la presión medida del gas).

La ITS-90 se extiende hacia arriba desde 0.65 K hasta la temperatura más alta medible prácticamente en términos de la ley de radiación de Planck mediante radiación monocromática. Se basa en especificar valores de temperatura definidos en varios puntos fijos reproducibles con facilidad para que sirvan como referencia y así expresar de forma funcional la variación de temperatura en cierto número de intervalos y semiintervalos.

En la ITS-90, la escala de temperatura está considerada en cuatro intervalos: en el de 0.65 a 5 K , la escala se define en términos de la presión de vapor, relaciones de temperatura para ^3He y ^4He . Entre 3 y 24.5561 K (el punto triple del neón) se define por medio de un termómetro de gas helio calibrado apropiadamente; de 13.8033 K (el punto triple del hidrógeno) a $1\ 234.93\text{ K}$ (el punto de congelación de la plata) se define a través de termómetros de resistencia de platino calibrados en conjuntos especificados de puntos fijos de definición; arriba de $1\ 234.93\text{ K}$ se define en términos de la ley de radiación de Planck y un punto fijo de definición adecuado como el punto de congelación del oro ($1\ 337.33\text{ K}$).

Se remarca que las magnitudes de cada división de 1 K y $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ son idénticas (Fig. 1-38); por lo tanto, cuando se trata con diferencias de temperatura ΔT , el intervalo de temperatura en ambas escalas es el mismo. Elevar la temperatura de una sustancia en $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ es lo mismo que elevarla en 10 K . Es decir,

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) \quad (1-13)$$

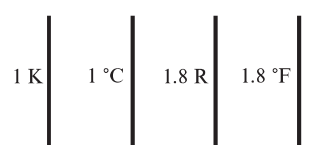


FIGURA 1-38

Comparación de magnitudes de varias unidades de temperatura.

$$\Delta T(\text{R}) = \Delta T(^{\circ}\text{F}) \quad (1-14)$$

Algunas relaciones termodinámicas tienen que ver con la temperatura T y con frecuencia surge la pregunta de si está en K o en $^{\circ}\text{C}$. Si la relación implica diferencias de temperatura (como $a = b\Delta T$), entonces no tiene importancia y se puede usar cualquiera, pero si la relación implica sólo temperaturas en lugar de diferencias de temperatura (como $a = bT$) entonces debe usarse K. Cuando haya duda, siempre es seguro usar K porque casi no existen situaciones en las que su uso sea incorrecto; en cambio, hay muchas relaciones termodinámicas que producirán un resultado erróneo si se utiliza $^{\circ}\text{C}$.

EJEMPLO 1-4 Cómo expresar el aumento de temperatura en unidades distintas

Los humanos nos sentimos más cómodos cuando la temperatura se encuentra entre 65 y 75 $^{\circ}\text{F}$. Exprese estos límites de temperatura en $^{\circ}\text{C}$. Convierta el tamaño de este rango de temperatura (10 $^{\circ}\text{F}$) a K, $^{\circ}\text{C}$ y R. ¿Hay alguna diferencia en el tamaño de este rango cuando se mide en unidades relativas y absolutas?

SOLUCIÓN Se va a convertir un rango de temperatura dado en $^{\circ}\text{F}$ a $^{\circ}\text{C}$, y la diferencia de temperatura en $^{\circ}\text{F}$ se debe expresar en K, $^{\circ}\text{C}$ y R.

Análisis Los límites inferior y superior de confort en $^{\circ}\text{C}$ son

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{1.8} = \frac{65 - 32}{1.8} = 18.3^{\circ}\text{C}$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{T(^{\circ}\text{F}) - 32}{1.8} = \frac{75 - 32}{1.8} = 23.9^{\circ}\text{C}$$

Un cambio de temperatura de 10 $^{\circ}\text{F}$ en varias unidades es

$$\Delta T(\text{R}) = \Delta T(^{\circ}\text{F}) = 10 \text{ R}$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \frac{\Delta T(^{\circ}\text{F})}{1.8} = \frac{10}{1.8} = 5.6^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) = 5.6 \text{ K}$$

Por consiguiente, las unidades $^{\circ}\text{C}$ y K en el sistema SI y $^{\circ}\text{F}$ y R en el sistema inglés son intercambiables cuando se trata de diferencias de temperatura.

Comentario Los estudiantes deben ser cuidadosos cuando realicen conversiones de unidades de temperatura. Primero deben identificar si la conversión implica un valor de temperatura o un valor de cambio de temperatura.

1-9 ■ PRESIÓN

La **presión** se define como la *fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área*. Se habla de presión sólo cuando se trata de gas o líquido, mientras que la contraparte de la presión en los sólidos es el *esfuerzo normal*. Sin embargo, hay que destacar que la presión es una cantidad escalar mientras que el esfuerzo es un tensor. Puesto que la presión se define como la fuerza por unidad de área, tiene como unidad los newton por metro cuadrado (N/m^2), también conocida como **pascal** (Pa). Es decir,

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$

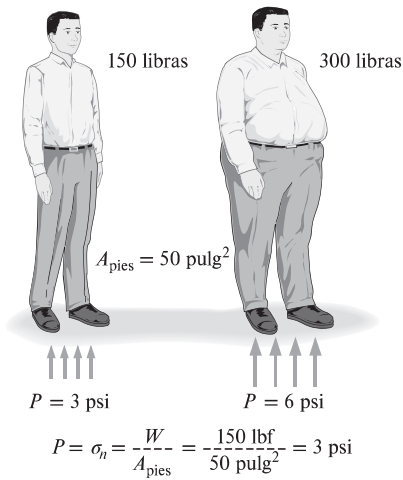


FIGURA 1-39

El esfuerzo normal (o "presión") en los pies de una persona regordeta es mucho mayor que en los pies de una persona delgada.



FIGURA 1-40

Algunos medidores de presión básicos.

Dresser Instruments, Dresser, Inc. Fotografía utilizada con permiso.

La unidad de presión pascal es demasiado pequeña para las presiones que se suscitan en la práctica. De ahí que sus múltiplos *kilopascal* ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$) y *megapascal* ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$) se usen más comúnmente. Otras tres unidades de presión de uso extendido, principalmente en Europa, son *bar*, *atmósfera estándar* y *kilogramo fuerza por centímetro cuadrado*:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgf/cm}^2 &= 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} \\ &= 0.9807 \text{ bar} \\ &= 0.9679 \text{ atm} \end{aligned}$$

Observe que las unidades de presión bar, atm y kgf/cm^2 son casi equivalentes entre sí. En el sistema inglés, la unidad de presión es la *libra fuerza por pulgada cuadrada* (lbf/pulg^2 , o psi), y $1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psi}$. Las unidades de presión kgf/cm^2 y lbf/pulg^2 también se denotan por kg/cm^2 y lb/pulg^2 , respectivamente, y se usan regularmente en medidores de presión de llantas. Se puede demostrar que $1 \text{ kgf/cm}^2 = 14.223 \text{ psi}$.

La presión también se usa para sólidos como sinónimo de *esfuerzo normal*, el cual es la fuerza que actúa perpendicularmente a la superficie por unidad de área. Por ejemplo, una persona de 150 libras cuya área total de 50 pulg^2 dejada por la huella de su zapato ejerce una presión en el piso de $150 \text{ lbf}/50 \text{ pulg}^2 = 3.0 \text{ psi}$ (Fig. 1-39). Si la persona se apoya en un pie, la presión se duplica. Si la persona aumenta de peso es probable que sienta incomodidad en el pie como resultado del aumento de presión (el tamaño de la superficie del pie no aumenta con la ganancia de peso). Esto explica también por qué una persona puede caminar en la nieve recién caída sin hundirse si usa raquetas para nieve grandes, y por qué si una persona usa un cuchillo afilado puede cortar con poco esfuerzo.

La presión real en una determinada posición se llama **presión absoluta**, y se mide respecto al vacío absoluto (es decir, presión cero absoluta). Sin embargo, la mayor parte de los dispositivos para medir la presión se calibran a cero en la atmósfera (Fig. 1-40), por lo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica local; esta diferencia es la **presión manométrica**. La $P_{\text{manométrica}}$ puede ser positiva o negativa pero las presiones por debajo de la atmosférica se conocen como **presiones de vacío** y se miden mediante medidores de vacío que indican la diferencia entre las presiones atmosférica y absoluta. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío se relacionan entre sí mediante

$$P_{\text{manométrica}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} \quad (1-15)$$

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}} \quad (1-16)$$

Esto se ilustra en la figura 1-41.

Al igual que otros medidores de presión, el usado para medir la presión del aire en una llanta de automóvil indica la presión manométrica, de manera que una lectura común de 32 psi (2.25 kgf/cm^2) indica una presión de 32 psi por arriba de la presión atmosférica. En un lugar donde ésta es de 14.3 psi, por ejemplo, la presión absoluta en la llanta es $32 + 14.3 = 46.3 \text{ psi}$.

En las relaciones y tablas termodinámicas casi siempre se usa la presión absoluta; en este libro la presión P denotará *presión absoluta* a menos que se especifique lo contrario. Con frecuencia se agregan las letras "a" (para presión

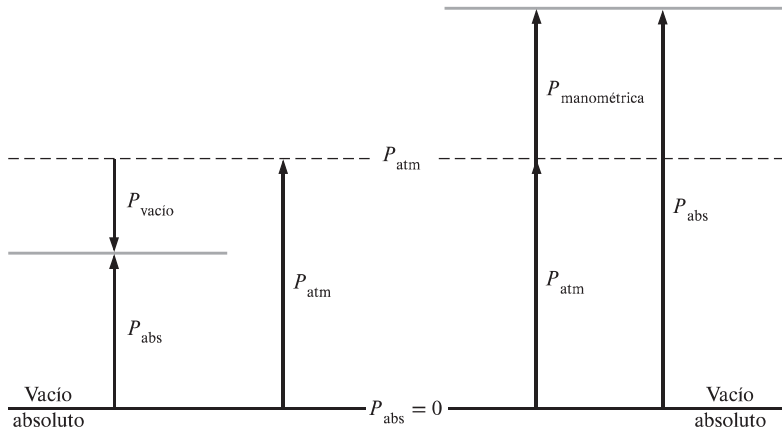


FIGURA 1-41

Presiones absoluta, manométrica y de vacío.

absoluta) y “g” (para presión manométrica) a las unidades de presión (lo que resulta en psia y psig) para especificar esto.

EJEMPLO 1-5 Presión absoluta de una cámara de vacío

Un medidor de vacío conectado a una cámara marca 5.8 psi en un lugar donde la presión atmosférica es de 14.5 psi. Determine la presión absoluta en la cámara.

SOLUCIÓN Se tiene la presión manométrica de una cámara de vacío y se determinará la presión absoluta de la cámara.

Análisis La presión absoluta se determina fácilmente a partir de la ecuación 1-16

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vacío} = 14.5 - 5.8 = 8.7 \text{ psi}$$

Comentario Observe que para determinar la presión absoluta se usa el valor *local* de la presión atmosférica.

Variación de la presión con la profundidad

Es de esperar que la presión en un fluido en reposo no cambie en la dirección horizontal. Esto se comprueba fácilmente al considerar una delgada capa horizontal de fluido y hacer un balance de fuerzas en cualquier dirección horizontal. Sin embargo, en dirección vertical éste no es el caso en un campo de gravedad. La presión de un fluido se incrementa con la profundidad debido a que una mayor cantidad de éste descansa sobre las capas más profundas y el efecto de este “peso extra” en una capa inferior se equilibra mediante un aumento de presión (Fig. 1-42).

A fin de obtener una relación para la variación de presión con la profundidad, se considera un elemento rectangular de fluido de altura Δz , longitud Δx y profundidad unitaria ($\Delta y = 1$ dentro de la página) en equilibrio, como se

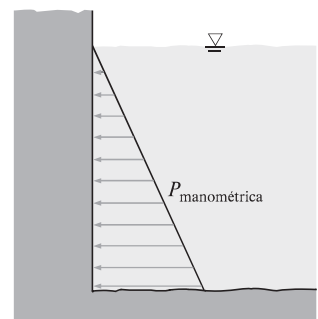


FIGURA 1-42

La presión de un fluido en reposo aumenta con la profundidad (como resultado del peso agregado).

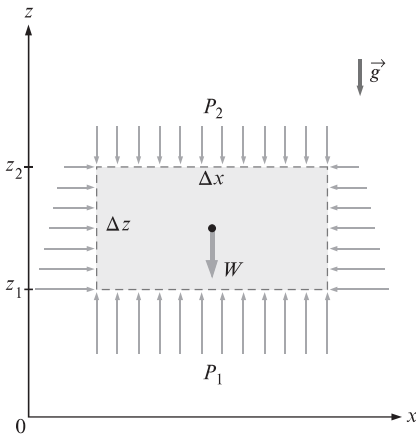


FIGURA 1-43

Diagrama de cuerpo libre de un elemento de fluido rectangular en equilibrio.

ilustra en la figura 1-43. Suponiendo que la densidad del fluido ρ es constante, un balance de fuerzas en la dirección vertical z da

$$\sum F_z = ma_z = 0: \quad P_1 \Delta x \Delta y - P_2 \Delta x \Delta y - \rho g \Delta x \Delta y \Delta z = 0$$

donde $W = mg = \rho g \Delta x \Delta y \Delta z$ es el peso del elemento fluido y $\Delta z = z_2 - z_1$. Al dividir entre $\Delta x \Delta y$ y reordenar se tiene

$$\Delta P = P_2 - P_1 = -\rho g \Delta z = -\gamma_s \Delta z \tag{1-17}$$

donde $\gamma_s = \rho g$ es el *peso específico* del fluido. Por consiguiente, se concluye que la diferencia de presión entre dos puntos en un fluido de densidad constante es proporcional a la distancia vertical Δz entre los puntos y la densidad ρ del fluido. Teniendo en cuenta el signo negativo se puede decir que *la presión en un fluido estático aumenta linealmente con la profundidad*. Esto es lo que un buzo experimenta al sumergirse cada vez a más profundidad en un lago.

Una sencilla ecuación para recordar y aplicar entre dos puntos cualesquiera en el mismo fluido bajo condiciones hidrostáticas es

$$P_{\text{abajo}} = P_{\text{arriba}} + \rho g |\Delta z| = P_{\text{arriba}} + \gamma_s |\Delta z| \tag{1-18}$$

donde “abajo” se refiere al punto en la elevación mínima (en la profundidad del fluido) y “arriba” se refiere al punto de elevación máxima. Si utiliza esta ecuación de manera consistente, deberá evitar equivocarse los símbolos.

Para un determinado líquido, la distancia vertical Δz se usa a veces como medida de la presión, y se llama *carga de presión*.

De la ecuación 1-17 también se concluye que para distancias pequeñas a moderadas la variación de la presión con el peso es insignificante para gases debido a su baja densidad. Por ejemplo, la presión en un depósito que contiene gas se puede considerar uniforme puesto que el peso del gas es demasiado pequeño como para que constituya una diferencia importante. También, la presión en una habitación llena de aire se puede suponer constante (Fig. 1-44).

Si se considera que el punto “superior” está sobre la superficie libre de un líquido abierto a la atmósfera (Fig. 1-45), donde la presión es la presión atmosférica P_{atm} , entonces de la ecuación 1-18 la presión a la profundidad h desde la superficie libre se convierte en

$$P = P_{\text{atm}} + \rho gh \quad \text{o} \quad P_{\text{manométrica}} = \rho gh \tag{1-19}$$

Los líquidos son en esencia sustancias no compresibles y por lo tanto la variación de densidad con la profundidad es insignificante. Éste también es el caso para los gases cuando el cambio de elevación no es muy grande. La variación de densidad de líquidos o gases con la temperatura puede ser importante y necesitaría ser considerada cuando se desea obtener precisión alta. Asimismo, a grandes profundidades como las de los océanos, el cambio en la densidad de un líquido puede ser importante como resultado de la compresión ocasionada por la tremenda cantidad de peso del líquido situado arriba.

La aceleración gravitacional g varía de 9.807 m/s^2 al nivel del mar, a 9.764 m/s^2 a una elevación de 14 000 m, donde se desplazan los grandes aviones de pasajeros. En este caso extremo, el cambio es de sólo 0.4 por ciento. Por lo que se puede suponer que g es constante con error insignificante.

Para los fluidos cuyas densidades cambian de manera importante con la altura se puede obtener una relación para la variación de presión con la eleva-

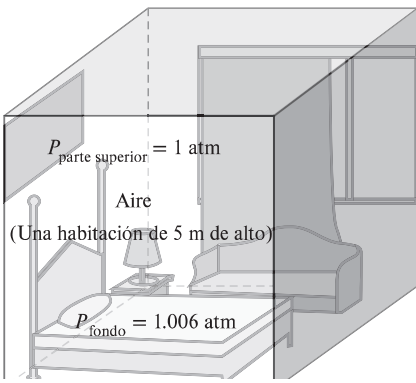


FIGURA 1-44

En una habitación llena de gas la variación de presión con la altura es insignificante.

ción al dividir la ecuación 1-17 entre Δz , y tomar el límite conforme $\Delta z \rightarrow 0$. Esto da

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (1-20)$$

Observe que dP es negativa cuando dz es positiva, dado que la presión disminuye en dirección ascendente. Cuando se conoce la variación de la densidad con la elevación, la diferencia de presión entre los puntos 1 y 2 se determina por integración como

$$\Delta P = P_2 - P_1 = - \int_1^2 \rho g \, dz \quad (1-21)$$

Para densidad constante y aceleración gravitacional constante, esta relación se reduce a la ecuación 1-17, como se esperaba.

La presión en un fluido en reposo no depende de la forma o sección transversal del recipiente. Cambia con la distancia vertical, pero permanece constante en otras direcciones. De ahí que en un determinado fluido la presión sea la misma en todos los puntos de un plano horizontal. El matemático holandés Simon Stevin (1548-1620) publicó en 1586 el principio ilustrado en la figura 1-46, donde se observa que las presiones en los puntos A, B, C, D, E, F y G son las mismas puesto que están a la misma profundidad e interconectados por el mismo fluido estático. Sin embargo, las presiones en los puntos H e I no son las mismas puesto que estos dos puntos no pueden estar interconectados por el mismo fluido (es decir, no se puede trazar una curva del punto I al punto H mientras estén en el mismo fluido todo el tiempo), aunque se hallen a la misma profundidad. (¿Es posible decir en qué punto la presión es mayor?) Asimismo, la fuerza de presión ejercida por el fluido siempre es normal a la superficie en los puntos especificados.

Una consecuencia de la presión en un fluido que permanece constante en la dirección horizontal es que *la presión ejercida sobre un fluido incompresible dentro de un recipiente rígido, se transmite a todos los puntos del mismo con el mismo valor*. Esto se llama **ley de Pascal**, en honor a Blaise Pascal (1623-1662), quien también sabía que la fuerza ejercida por un fluido es proporcional al área superficial. Comprendió que dos cilindros hidráulicos de áreas diferentes podían ser conectados y que el más grande se podía usar para ejercer una fuerza proporcionalmente mayor que la aplicada al menor. La “máquina de Pascal” ha sido el

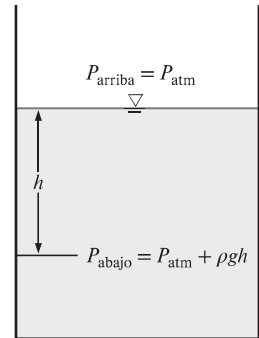


FIGURA 1-45

La presión en un líquido en reposo incrementa de forma lineal con la profundidad desde la superficie libre.

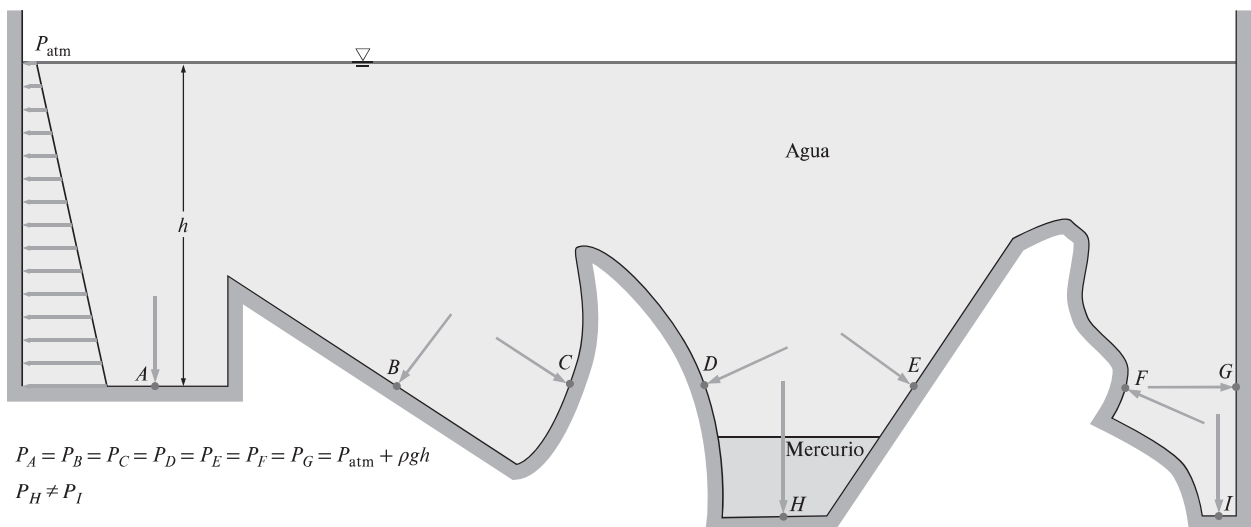


FIGURA 1-46

La presión ejercida por un determinado fluido es la misma en todos los puntos de un plano horizontal, sin considerar la configuración geométrica, siempre y cuando los puntos estén interconectados por el mismo fluido.

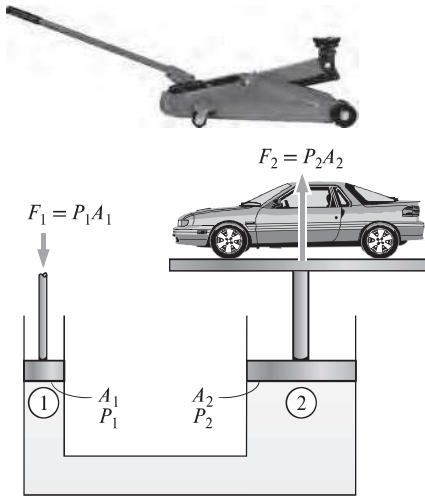


FIGURA 1-47

Elevación de un gran peso mediante una fuerza pequeña con la aplicación de la ley de Pascal. Un ejemplo típico es un gato hidráulico.

(Figura superior) © Stockbyte/Getty Images RF

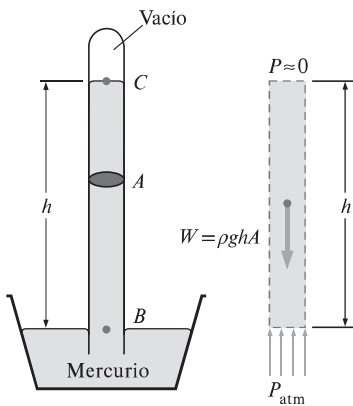


FIGURA 1-48

Barómetro básico.

origen de muchas invenciones que son parte de la vida cotidiana actual, como los frenos y ascensores hidráulicos. Esto es lo que permite levantar fácilmente un automóvil mediante un brazo, como se muestra en la figura 1-47, donde $P_1 = P_2$ puesto que ambos émbolos están al mismo nivel (las pequeñas diferencias de altura son insignificantes, en particular a altas presiones), la relación de fuerza de salida a fuerza de entrada se determina como

$$P_1 = P_2 \rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow \frac{F_2}{F_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1-22)$$

La relación de área A_2/A_1 se llama *ventaja mecánica ideal* del elevador hidráulico. Por ejemplo, con un gato hidráulico que tiene una relación de área de émbolo de $A_2/A_1 = 100$, una persona puede levantar un automóvil de 1 000 kg al aplicar una fuerza de sólo 10 kgf (= 90.8 N).

1-10 ■ DISPOSITIVOS PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN

Barómetro

La presión atmosférica se mide mediante un dispositivo conocido como **barómetro**; así, la presión atmosférica se denomina por lo común *presión barométrica*.

El italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) fue el primero en probar de manera concluyente que la presión atmosférica se puede medir al invertir un tubo lleno de mercurio en un recipiente con mercurio y abierto a la atmósfera, como se ilustra en la figura 1-48. La presión en el punto B es igual a la presión atmosférica, y la presión en C se puede considerar como cero puesto que sólo hay vapor de mercurio arriba del punto C y la presión es muy baja en relación con P_{atm} lo que permite ignorarla y obtener una excelente aproximación. Al escribir un balance de fuerzas en la dirección vertical, se obtiene

$$P_{\text{atm}} = \rho gh \quad (1-23)$$

donde ρ es la densidad del mercurio, g es la aceleración gravitacional local y h es la altura de la columna de mercurio arriba de la superficie libre. Observe que la longitud y el área de la sección transversal del tubo no causan efecto en la altura de la columna del fluido de un barómetro (Fig. 1-49).

Una unidad de presión de uso común es la *atmósfera estándar*, que se define como la presión producida por una columna de mercurio de 760 mm de altura a 0 °C ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,595 \text{ kg/m}^3$) bajo la aceleración gravitacional estándar ($g = 9.807 \text{ m/s}^2$). Si se usa agua en lugar de mercurio para medir la presión atmosférica estándar, sería necesaria una columna de agua de casi 10.3 metros. La presión se expresa a veces (en particular esto lo hacen los pronosticadores del clima) en términos de la altura de la columna de mercurio. La presión atmosférica estándar, por ejemplo, es 760 mm Hg (29.92 pulg Hg) a 0 °C. La unidad mm Hg se llama también **torr** en honor a Torricelli. Por lo tanto, 1 atm = 760 torr y 1 torr = 133.3 Pa.

La presión atmosférica estándar P_{atm} cambia de 101.325 kPa al nivel del mar, a 89.88, 79.50, 54.05, 26.5 y 5.53 kPa a altitudes de 1 000, 2 000, 5 000, 10 000 y 20 000 metros, respectivamente. Por ejemplo, la presión atmosférica en Denver (altura de 1 610 m) es 83.4 kPa. Recuerde que la presión atmosférica de un sitio es simplemente el peso del aire que se halla arriba de ese lugar por área

superficial unitaria. Por lo tanto, cambia no sólo con la altura sino también con las condiciones climáticas.

La disminución de la presión atmosférica con la altura tiene ramificaciones de largo alcance en lo cotidiano. Por ejemplo, cocinar lleva más tiempo a grandes altitudes puesto que el agua hierve a menor temperatura bajo presiones atmosféricas más bajas. Una hemorragia por la nariz es una experiencia común a grandes altitudes puesto que la diferencia entre la presión arterial y la presión atmosférica es mayor en este caso, y las delicadas paredes de las venas de la nariz a menudo no soportan este esfuerzo extra.

Para una temperatura dada, la densidad del aire es menor a grandes altitudes y, por lo tanto, un determinado volumen contiene menos aire y menos oxígeno. Así, no es sorprendente sentirse cansado con más facilidad y experimentar problemas de respiración a grandes altitudes. Para compensar este efecto, las personas que viven en poblaciones altas desarrollan pulmones más eficaces. De manera similar, el motor de un auto de 2.0 L funcionará como un motor de 1.7 L a 1 500 m de altitud (a menos que sea turbocargado) como resultado de la caída de presión de 15 por ciento y, por ende, una caída de 15 por ciento en la densidad del aire (Fig. 1-50). Un ventilador o compresor desplazará 15 por ciento menos aire a esa altitud para el mismo volumen de desplazamiento. Por lo tanto, mayores ventiladores de enfriamiento deben seleccionarse para operar a elevadas altitudes y asegurar el flujo másico especificado. La presión menor, y en consecuencia la menor densidad, afecta también la fuerza de sustentación y la resistencia aerodinámica: los aviones necesitan las pistas más largas para tomar más vuelo a grandes altitudes logrando la fuerza de sustentación requerida, y ascienden a grandes alturas a fin de lograr una menor resistencia aerodinámica y, por ende, mejor rendimiento de combustible.

EJEMPLO 1-6 Medición de la presión atmosférica con un barómetro

Determine la presión atmosférica en un lugar donde la lectura barométrica es 740 mm Hg y la aceleración gravitacional es $g = 9.805 \text{ m/s}^2$. Suponga que la temperatura del mercurio es de 10°C , a la cual su densidad es $13\,570 \text{ kg/m}^3$.

SOLUCIÓN Se tiene como dato la lectura barométrica de un lugar en altura de columna de mercurio y se determinará la presión atmosférica.

Suposiciones La temperatura del mercurio es 10°C .

Propiedades La densidad del mercurio es de $13\,570 \text{ kg/m}^3$.

Análisis De la ecuación 1-23, la presión atmosférica se determina como

$$\begin{aligned} P_{\text{atm}} &= \rho gh \\ &= (13\,570 \text{ kg/m}^3)(9.805 \text{ m/s}^2)(0.740 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1\,000 \text{ N/m}^2} \right) \\ &= \mathbf{98.5 \text{ kPa}} \end{aligned}$$

Comentario Observe que la densidad cambia con la temperatura, por lo que este efecto debe considerarse en los cálculos.

EJEMPLO 1-7 Flujo por gravedad de un suero intravenoso

Las infusiones intravenosas suelen administrarse por gravedad colgando la botella del fluido a una altura tal que contrarreste la presión sanguínea en la vena y obligue al fluido a entrar al cuerpo (figura 1-51). Cuanto más se eleve

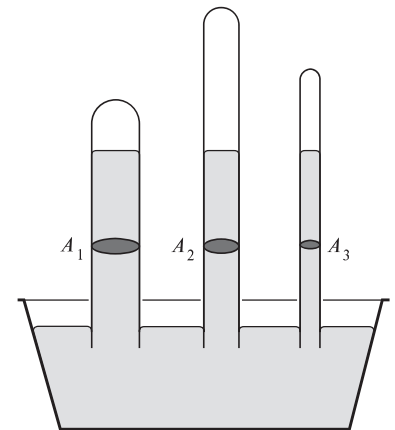


FIGURA 1-49

La longitud o el área de la sección transversal del tubo no tiene efecto en la altura de la columna de fluido de un barómetro, siempre y cuando el diámetro del tubo sea lo suficientemente grande para evitar efectos (capilares) de tensión superficial.

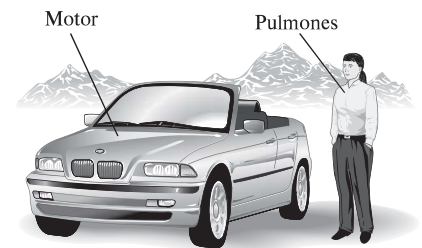


FIGURA 1-50

A grandes altitudes un motor de automóvil genera menos potencia y una persona obtiene menos oxígeno como resultado de la menor densidad del aire.

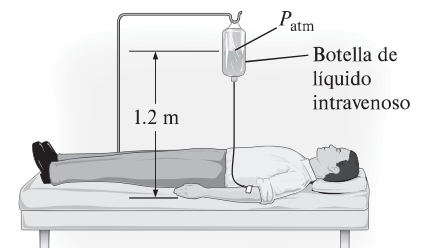


FIGURA 1-51

Esquema para el ejemplo 1-7.

la botella, mayor será la velocidad de flujo del fluido. *a)* Si se observa que las presiones del fluido y de la sangre se equilibran entre sí cuando la botella está a 1.2 m por encima del nivel del brazo, determine la presión manométrica de la sangre. *b)* Si la presión manométrica del fluido al nivel del brazo necesita ser de 20 kPa para una velocidad de flujo suficiente, determine la altura a la que debe colocarse la botella. Considere la densidad del fluido como de 1 020 kg/m³.

SOLUCIÓN Se sabe que las presiones del fluido intravenoso y de la sangre se equilibran entre sí cuando la botella está a cierta altura. Se deben determinar la presión manométrica de la sangre y la elevación de la botella necesarias para mantener el flujo a la velocidad deseada.

Suposiciones **1** El fluido intravenoso es incompresible. **2** La botella de líquido intravenoso está abierta a la atmósfera.

Propiedades La densidad del fluido intravenoso es de $\rho = 1\,020\text{ kg/m}^3$.

Análisis *a)* Tomando en cuenta que las presiones del fluido intravenoso y la sangre se equilibran entre sí cuando la botella está a 1.2 m por encima del nivel del brazo, la presión manométrica de la sangre en el brazo es simplemente igual a la presión manométrica del fluido intravenoso a una profundidad de 1.2 m,

$$\begin{aligned} P_{\text{manométrica, brazo}} &= P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} = \rho g h_{\text{brazo-botella}} \\ &= (1\,020\text{ kg/m}^3)(9.81\text{ m/s}^2)(1.20\text{ m}) \left(\frac{1\text{ kN}}{1\,000\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1\text{ kPa}}{1\text{ kN/m}^2} \right) \\ &= 12.0\text{ kPa} \end{aligned}$$

b) Para determinar la presión manométrica de 20 kPa a nivel del brazo, la altura de la superficie del fluido intravenoso en la botella con respecto al nivel del brazo se determina nuevamente a partir de $P_{\text{manométrica, brazo}} = \rho g h_{\text{brazo-botella}}$ para ser

$$\begin{aligned} h_{\text{brazo-botella}} &= \frac{P_{\text{manométrica, brazo}}}{\rho g} \\ &= \frac{20\text{ kPa}}{(1\,020\text{ kg/m}^3)(9.81\text{ m/s}^2)} \left(\frac{1\,000\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1\text{ kN}} \right) \left(\frac{1\text{ kN/m}^2}{1\text{ kPa}} \right) \\ &= 2.00\text{ m} \end{aligned}$$

Comentario Observe que es posible utilizar la altura de un contenedor para controlar las velocidades del flujo en flujos impulsados por la gravedad. También se debe considerar el descenso de presión en el tubo debido a los efectos friccionales del flujo. Para obtener una velocidad específica del flujo se requerirá elevar la botella un poco más para contrarrestar el descenso de la presión.

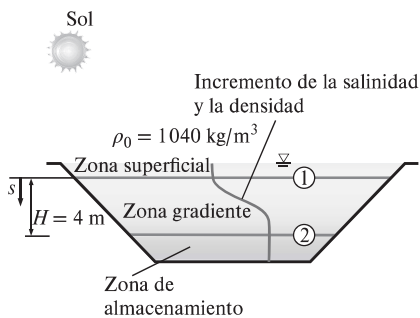


FIGURA 1-52

Esquema para el ejemplo 1-8.

EJEMPLO 1-8 Presión hidrostática en un estanque solar con densidad variable

Los estanques solares son pequeños lagos artificiales de pocos metros de profundidad que se usan para almacenar energía solar. Para evitar que el agua caliente (menos densa) suba a la superficie se agrega sal al fondo. En un estanque solar característico con gradiente salino la densidad del agua se incrementa en la zona gradiente, como se muestra en la figura 1-52, de manera que la densidad puede expresarse como

$$\rho = \rho_0 \sqrt{1 + \tan^2 \left(\frac{\pi s}{4 H} \right)}$$

donde ρ_0 es la densidad en la superficie del agua, s es la distancia vertical medida hacia abajo desde la parte superior de la zona gradiente ($s = -z$) y H es el espesor de la zona gradiente. Para $H = 4$ m, $\rho_0 = 1\,040$ kg/m³ y un espesor de 0.8 m para la zona superficial, calcule la presión manométrica en el fondo de la zona gradiente.

SOLUCIÓN Se conoce la variación de la densidad del agua salina en la zona gradiente de un estanque solar con la profundidad. Se determinará la presión manométrica en el fondo de la zona gradiente.

Suposiciones La densidad de la zona superficial del estanque es constante.

Propiedades La densidad de la salmuera en la superficie es 1 040 kg/m³.

Análisis Se identifican la parte superior y el fondo de la zona gradiente como 1 y 2, respectivamente. A sabiendas que la densidad de la zona superficial es constante, la presión manométrica en el fondo de la zona superficial (es decir, la parte superior de la zona gradiente) es

$$P_1 = \rho g h_1 = (1\,040 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.8 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 8.16 \text{ kPa}$$

puesto que $1 \text{ kN/m}^2 = 1 \text{ kPa}$. Dado que $s = -z$, el cambio diferencial en la presión hidrostática en una distancia vertical de ds está dado por

$$dP = \rho g ds$$

Al integrar desde la parte superior de la zona gradiente (punto 1, donde $s = 0$) a cualquier ubicación s en la zona gradiente (sin subíndice), se obtiene

$$P - P_1 = \int_0^s \rho g ds \quad \rightarrow \quad P = P_1 + \int_0^s \rho_0 \sqrt{1 + \tan^2 \left(\frac{\pi s}{4 H} \right)} g ds$$

Al llevar a cabo la integración se obtiene que la variación de presión manométrica en la zona gradiente es

$$P = P_1 + \rho_0 g \frac{4H}{\pi} \sinh^{-1} \left(\tan \frac{\pi s}{4 H} \right)$$

Entonces la presión en el fondo de la zona gradiente ($s = H = 4$ m) es

$$\begin{aligned} P_2 &= 8.16 \text{ kPa} + (1\,040 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2) \frac{4(4 \text{ m})}{\pi} \\ &\quad \times \sinh^{-1} \left(\tan \frac{\pi 4}{4 4} \right) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \\ &= 54.0 \text{ kPa (manométrica)} \end{aligned}$$

Comentario La variación de presión manométrica en la zona gradiente con la profundidad se grafica en la figura 1-53. La línea discontinua indica la presión hidrostática en el caso de densidad constante de 1 040 kg/m³ y se da como referencia. Observe que la variación de presión con la profundidad no es lineal cuando la densidad varía con la profundidad. Esto explica por qué se requirió la integración.

Manómetro

En la ecuación 1-17 se observa que un cambio de elevación de $-\Delta z$ en un fluido en reposo corresponde a $\Delta P/\rho g$, lo cual indica que es posible usar una columna de fluido para medir diferencias de presión. Un dispositivo basado en este principio se llama **manómetro**, y comúnmente se usa para medir diferencias de presión pequeñas y moderadas. Un manómetro consta principalmente de un tubo en U de vidrio o plástico que contiene uno o más fluidos como

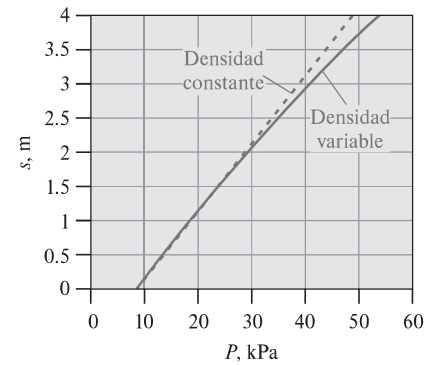


FIGURA 1-53

Variación de la presión manométrica con la profundidad en la zona de gradiente del estanque solar.



FIGURA 1-54

Un sencillo manómetro de tubo en forma de U, con una presión alta aplicada sobre el lado derecho.

© John M. Cimbala

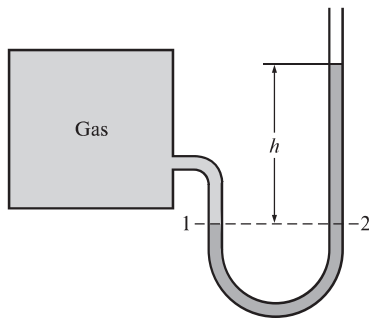


FIGURA 1-55
Manómetro básico.

mercurio, agua, alcohol o aceite (figura 1-54). Para que el manómetro tenga un tamaño manejable se usan fluidos pesados como el mercurio, si se anticipan grandes diferencias de presión.

Observe el manómetro que aparece en la figura 1-55, el cual se utiliza para medir la presión en el recipiente. Puesto que los efectos gravitacionales de gases son insignificantes, la presión en cualquier parte del recipiente y en la posición 1 tiene el mismo valor. Además, dado que la presión en un fluido no varía dentro de éste en dirección horizontal, la presión en el punto 2 es la misma que la presión en el punto 1, $P_2 = P_1$.

La columna diferencial de fluido de altura h está en equilibrio estático y se halla abierta a la atmósfera; por lo tanto, a partir de la ecuación 1-18 la presión en el punto 2 se determina de forma directa, como

$$P_2 = P_{\text{atm}} + \rho gh \quad (1-24)$$

donde ρ es la densidad del fluido en el tubo. Note que el área de sección transversal del tubo no tiene efecto en la altura diferencial h , y por lo tanto, en la presión que ejerce el fluido. Sin embargo, el diámetro del tubo debe ser suficientemente grande (mayor a unos cuantos milímetros) para asegurar que el efecto de la tensión superficial, y por ende el aumento debido a la capilaridad, sea insignificante.

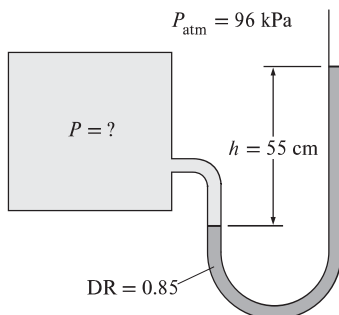


FIGURA 1-56
Esquema para el ejemplo 1-9.

EJEMPLO 1-9 Medición de la presión con un manómetro

Un manómetro se usa para medir la presión de un gas en un recipiente. El fluido que se emplea tiene una densidad relativa de 0.85 y la altura de la columna del manómetro es de 55 cm, como se ilustra en la figura 1-56. Si la presión atmosférica local es de 96 kPa, determine la presión absoluta dentro del recipiente.

SOLUCIÓN La lectura de un manómetro unido al recipiente y la presión atmosférica están dadas, así que se determinará la presión absoluta en el recipiente.

Suposiciones El fluido en el recipiente es un gas cuya densidad es mucho menor que la densidad del fluido en el manómetro.

Propiedades La densidad relativa del fluido del manómetro es de 0.85. Se toma la densidad estándar del agua, la cual es $1\,000\text{ kg/m}^3$.

Análisis La densidad del fluido se obtiene al multiplicar su densidad relativa por la densidad del agua,

$$\rho = \text{DR} (\rho_{\text{H}_2\text{O}}) = (0.85)(1\,000\text{ kg/m}^3) = 850\text{ kg/m}^3$$

Entonces, de la ecuación 1-24,

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{atm}} + \rho gh \\ &= 96\text{ kPa} + (850\text{ kg/m}^3)(9.81\text{ m/s}^2)(0.55\text{ m}) \left(\frac{1\text{ N}}{1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1\text{ kPa}}{1\,000\text{ N/m}^2} \right) \\ &= \mathbf{100.6\text{ kPa}} \end{aligned}$$

Comentario Observe que la presión manométrica en el recipiente es de 4.6 kPa.

Algunos manómetros utilizan un tubo inclinado para incrementar su resolución (precisión) al leer la altura del fluido. Tales dispositivos se conocen como *manómetros inclinados*.

Muchos problemas de ingeniería y algunos manómetros tienen que ver con varios fluidos inmiscibles de densidades diferentes apilados unos sobre otros. Este tipo de sistemas se pueden analizar fácilmente recordando que 1) el cambio de presión en una columna de fluido de altura h es $\Delta P = \rho gh$, 2) la presión se incrementa hacia abajo en un determinado fluido y disminuye hacia arriba (es decir, $P_{\text{fondo}} > P_{\text{parte superior}}$) y 3) dos puntos a la misma elevación en un fluido continuo en reposo están a la misma presión.

El último principio, resultado de la *ley de Pascal*, permite “saltar” en los manómetros de una columna de fluido a la siguiente sin preocuparse del cambio de presión, siempre y cuando no se salte sobre un fluido diferente y éste se encuentre en reposo. Entonces la presión en cualquier punto se determina iniciando en un punto de presión conocida y sumando o restando los términos ρgh conforme se avanza hacia el punto de interés. Por ejemplo, la presión en el fondo del recipiente de la figura 1-57 se puede determinar si se inicia en la superficie libre donde la presión es P_{atm} , moviéndose hacia abajo hasta alcanzar el punto 1 en el fondo, e igualando el resultado a P_1 . Se obtiene

$$P_{\text{atm}} + \rho_1 gh_1 + \rho_2 gh_2 + \rho_3 gh_3 = P_1$$

En un caso especial donde estén implicados fluidos con la misma densidad, esta relación se reduce a $P_{\text{atm}} + \rho g(h_1 + h_2 + h_3) = P_1$.

Particularmente, los manómetros son adecuados para medir caídas de presión en una sección de flujo horizontal entre dos puntos especificados, debidas a la presencia de un dispositivo como una válvula, intercambiador de calor o cualquier resistencia al flujo. Esto se hace conectando las dos ramas de un manómetro a estos dos puntos, según se ilustra en la figura 1-58. El fluido de trabajo puede ser un gas o un líquido cuya densidad es ρ_1 . La densidad del fluido del manómetro es ρ_2 y la altura diferencial del fluido es h . Los dos fluidos deben ser inmiscibles y ρ_2 debe ser mayor que ρ_1 .

Una relación para la diferencia de presión $P_1 - P_2$ se obtiene si se inicia en el punto 1 con P_1 , se sigue a lo largo del tubo sumando o restando los términos ρgh hasta llegar al punto 2, e igualando el resultado a P_2 :

$$P_1 + \rho_1 g(a + h) - \rho_2 gh - \rho_1 ga = P_2 \quad (1-25)$$

Observe que se saltó horizontalmente del punto A al B y se ignoró la parte de abajo puesto que la presión en ambos puntos es la misma. Al simplificar, se obtiene

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1)gh \quad (1-26)$$

Note que la distancia a no tiene efecto en el resultado, pero se debe incluir en el análisis. Asimismo, cuando el fluido dentro de la tubería es un gas, entonces $\rho_1 \ll \rho_2$ y la relación en la ecuación 1-26 se simplifica a $P_1 - P_2 \cong \rho_2 gh$.

EJEMPLO 1-10 Medición de la presión con un manómetro de varios fluidos

El agua en un recipiente se presuriza con aire y la presión se mide por medio de un manómetro de varios fluidos, como se muestra en la figura 1-59. El recipiente se localiza en una montaña a una altitud de 1 400 m donde la presión atmosférica es 85.6 kPa. Determine la presión del aire en el recipiente si $h_1 = 0.1$ m, $h_2 = 0.2$ m y $h_3 = 0.35$ m. Tome las densidades del agua, aceite y mercurio iguales a 1 000 kg/m³, 850 kg/m³ y 13 600 kg/m³, respectivamente.

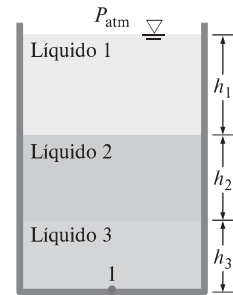


FIGURA 1-57

En capas de líquido apiladas, el cambio de presión en una de éstas con densidad ρ y altura h es ρgh .

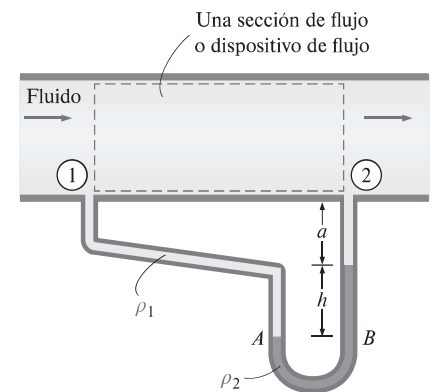


FIGURA 1-58

Medición de la caída de presión a través de una sección de flujo o de un dispositivo de flujo mediante un manómetro diferencial.

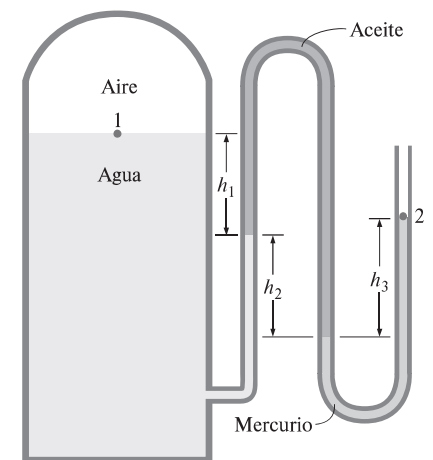


FIGURA 1-59

Esquema para el ejemplo 1-10. (El dibujo no está a escala.)

SOLUCIÓN La presión en un recipiente de agua presurizada se mide mediante un manómetro de varios fluidos. Se determinará la presión del aire en el recipiente.

Suposición La presión del aire en el recipiente es uniforme (es decir, su variación con la elevación es insignificante debido a su baja densidad) y, por consiguiente, se puede determinar la presión en la interfaz aire-agua.

Propiedades Las densidades del agua, el aceite y el mercurio son de $1\,000\text{ kg/m}^3$, 850 kg/m^3 y $13\,600\text{ kg/m}^3$, respectivamente.

Análisis Si se empieza con la presión del punto 1 en la interfaz aire-agua, y moviéndose a lo largo del tubo sumando o restando los términos ρgh hasta llegar al punto 2 e igualando el resultado a P_{atm} puesto que el tubo está abierto a la atmósfera, se obtiene

$$P_1 + \rho_{\text{agua}}gh_1 + \rho_{\text{aceite}}gh_2 - \rho_{\text{mercurio}}gh_3 = P_2 = P_{\text{atm}}$$

Al despejar P_1 y sustituir,

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{atm}} - \rho_{\text{agua}}gh_1 - \rho_{\text{aceite}}gh_2 + \rho_{\text{mercurio}}gh_3 \\ &= P_{\text{atm}} + g(\rho_{\text{mercurio}}h_3 - \rho_{\text{agua}}h_1 - \rho_{\text{aceite}}h_2) \\ &= 85.6\text{ kPa} + (9.81\text{ m/s}^2)[(13\,600\text{ kg/m}^3)(0.35\text{ m}) - 1\,000\text{ kg/m}^3(0.1\text{ m}) \\ &\quad - (850\text{ kg/m}^3)(0.2\text{ m})] \left(\frac{1\text{ N}}{1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1\text{ kPa}}{1\,000\text{ N/m}^2} \right) \\ &= 130\text{ kPa} \end{aligned}$$

Comentario Observe que al saltar horizontalmente de un tubo al siguiente y entender que la presión es la misma en el mismo fluido se simplifica el análisis de manera considerable. Note también que el mercurio es una sustancia tóxica, y los manómetros y termómetros de mercurio son reemplazados por otros con sustancias más seguras debido al riesgo de exposición al vapor de mercurio en caso de accidente.

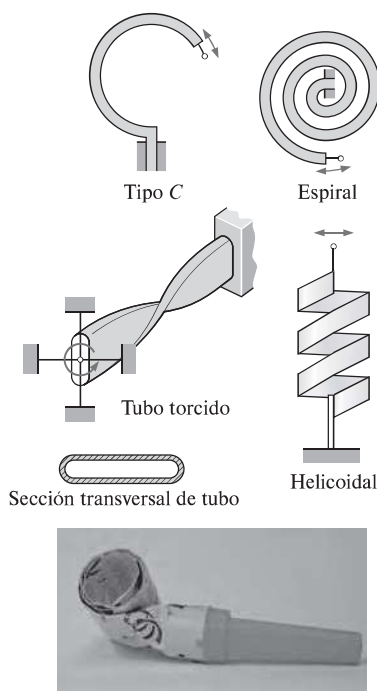


FIGURA 1-60

Varios tipos de tubos de Bourdon usados para medir la presión. Funcionan bajo el mismo principio que las cornetas de fiestas (foto inferior) debido a la sección transversal del tubo plano.

Foto: © John M. Cimbala

Otros dispositivos de medición de presión

Otro tipo de dispositivo mecánico de medición de presión de uso común es el **tubo de Bourdon**, nombrado así en honor del ingeniero e inventor francés Eugene Bourdon (1808-1884). Este instrumento consiste en un tubo metálico hueco y curvado como un gancho, cuyo extremo está cerrado y conectado a una aguja indicadora de disco (Fig. 1-60). Cuando el tubo se encuentra abierto a la atmósfera no tiene desviación y la aguja indicadora de disco en este estado se calibra a cero (presión manométrica). Cuando se incrementa la presión del fluido dentro del tubo, éste se alarga y mueve la aguja en proporción a la presión aplicada.

La electrónica ha abierto camino en cada aspecto de la vida y los dispositivos de medición de presión no son la excepción. Los modernos sensores de presión, llamados **transductores de presión**, utilizan varias técnicas para convertir el efecto producido por la presión a otro de tipo eléctrico como el cambio de voltaje, resistencia o capacitancia. Los transductores de presión son más pequeños y más rápidos y pueden ser más sensibles, confiables y precisos que sus contrapartes mecánicas. Además, con ellos es posible medir presiones inferiores a una millonésima de 1 atm hasta varios miles de atm.

Una amplia variedad de transductores de presión está disponible para presiones manométricas, absolutas y diferenciales en una amplia diversidad de aplica-

ciones. Los *transductores de presión manométrica* usan la presión atmosférica como una referencia al tener descubierto hacia la atmósfera el lado posterior del diafragma sensible a la presión, y dan una salida de señal cero a presión atmosférica sin importar la altitud. Los *transductores de presión absoluta* se calibran para tener una salida de señal cero en vacío absoluto. Los *transductores de presión diferencial* miden la diferencia de presión entre dos lugares de modo directo en lugar de usar dos transductores de presión y tomar su diferencia.

Los *transductores de presión con medidor de deformación* funcionan mediante una desviación del diafragma entre dos cámaras abiertas a las entradas de presión. Cuando el diafragma se alarga en respuesta a un cambio en la diferencia de presión, el medidor de deformación se alarga y un circuito con puente de Wheatstone amplifica la señal. Un transductor de capacitancia funciona de modo similar, pero cuando se alarga el diafragma mide el cambio de capacitancia en lugar del de resistencia.

Los **transductores piezoeléctricos**, llamados también transductores de presión de estado sólido, funcionan basados en el principio de que un potencial eléctrico se genera en una sustancia cristalina cuando ésta se somete a una presión mecánica. Este fenómeno, descubierto en 1880 por los hermanos Pierre y Jacques Curie, se conoce como efecto piezoeléctrico (o efecto eléctrico por presión). Los transductores de presión piezoeléctricos tienen una respuesta de frecuencia mucho más rápida en comparación con las unidades de diafragma y son muy adecuados para aplicaciones de alta presión, pero generalmente no son tan sensibles como los transductores tipo diafragma, especialmente a bajas presiones.

Otro tipo de medidor mecánico de presión es el **comprobador de peso muerto**, utilizado principalmente para la *calibración* y es capaz de medir presiones extremadamente altas (figura 1-61). Como su nombre implica, este tipo de medidor mide la presión *directamente* a través de la aplicación de un peso que aplica una fuerza por unidad de área (la definición fundamental de presión). Está construido con una cámara interna llena con un fluido (por lo general aceite), junto con un pistón muy ajustado, un cilindro y un émbolo. Las pesas se aplican sobre la parte superior del pistón, lo cual ejerce una fuerza sobre el aceite contenido en la cámara. La fuerza total F que actúa sobre el aceite en la interfaz pistón-aceite es la suma del peso del pistón más las pesas aplicadas. Dado que se conoce el área transversal del pistón A_e , la presión se puede calcular como $P = F/A_e$. La única fuente de error significativa es la que corresponde a la fricción estática a lo largo de la interfaz entre el pistón y el cilindro, pero es un error casi inexistente. El puerto de presión de referencia se conecta a la presión desconocida que se va a medir o al sensor de presión que se va a calibrar.

1-11 ■ TÉCNICA PARA RESOLVER PROBLEMAS

El primer paso para aprender cualquier ciencia es comprender los fundamentos y obtener un conocimiento sólido; el siguiente paso es dominar los fundamentos al probar este conocimiento. Esto se hace resolviendo problemas importantes reales, ya que esta clase de problemas, en particular los que son complicados, requieren para su resolución un método sistemático. Si se usa un método paso a paso, un ingeniero puede simplificar la solución de un problema complicado a una serie de problemas simples (Fig. 1-62). Cuando haya que resolver un problema, se recomienda usar los pasos siguientes según sea pertinente, ya que esto ayudará a evitar algunas de las más comunes dificultades que suelen presentarse.

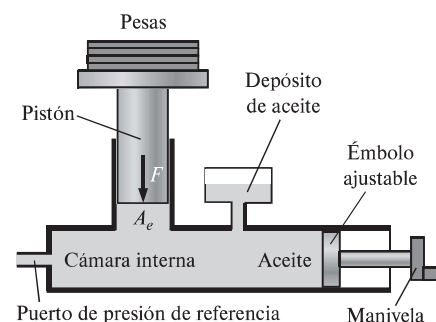


FIGURA 1-61

Un comprobador de peso muerto puede medir presiones extremadamente altas (hasta de 10 000 libras por pulgada cuadrada en algunas aplicaciones).

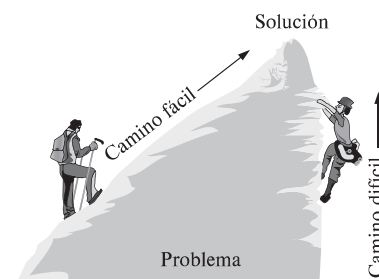


FIGURA 1-62

Un método paso a paso puede simplificar en gran medida la resolución de un problema.

<input type="radio"/>	Dato: temperatura del aire en Denver
<input type="radio"/>	Por determinar: densidad del aire
	Información faltante: presión atmosférica
<input type="radio"/>	Suposición #1: considere $P = 1$ atm (Inapropiado: ignora el efecto de la altitud. Causará un error de más de 15 por ciento)
<input type="radio"/>	Suposición #2: considere $P = 0.83$ atm (Apropiado: ignora sólo efectos menores, como el clima)
<input type="radio"/>	
<input type="radio"/>	

FIGURA 1-63

Las suposiciones hechas mientras se resuelve un problema de ingeniería deben ser razonables y justificables.

Paso 1: enunciado del problema

Expresé brevemente y con sus propias palabras el problema, la información dada y las cantidades por determinar. Esto asegura el entendimiento y los objetivos antes de intentar resolver el problema.

Paso 2: esquema

Trace un esquema real del sistema físico en cuestión y anote la información pertinente en la figura. El bosquejo no tiene que ser muy elaborado, sino que debe parecerse al sistema real y mostrar sus características importantes. Indique las interacciones de energía y masa con los alrededores. Listar la información proporcionada en el bosquejo ayuda a ver todo el problema a la vez. Asimismo, compruebe las propiedades que permanecen constantes durante un proceso (por ejemplo, la temperatura en un proceso isotérmico) e indíquelas en el bosquejo.

Paso 3: suposiciones y aproximaciones

Enuncie las suposiciones y aproximaciones adecuadas para simplificar el problema con la finalidad de que sea posible obtener la solución. Justifique las suposiciones cuestionables. Considere valores razonables para las cantidades restantes que son necesarias; por ejemplo, en ausencia de datos específicos para la presión atmosférica, ésta se puede tomar como una atmósfera. Sin embargo, debe considerarse en el análisis que la presión atmosférica disminuye con el aumento de la elevación. Por ejemplo, se reduce a 0.83 atm en Denver (elevación 1 610 m) (Fig. 1-63).

Paso 4: leyes físicas

Aplique las leyes físicas y principios básicos pertinentes (como la conservación de la masa) y redúzcalas a su forma más simple utilizando las consideraciones hechas. Sin embargo, la región a la cual se aplica la ley física se debe identificar primero de manera clara; por ejemplo, el incremento en la velocidad del aire que fluye por una tobera se analiza aplicando la conservación de masa entre la entrada y la salida de la tobera.

Paso 5: propiedades

Determine las propiedades desconocidas en estados conocidos necesarias para resolver el problema a partir de relaciones o tablas de propiedades. Anote por separado las propiedades e indique su fuente, si es el caso.

Paso 6: cálculos

Sustituya las cantidades conocidas en las relaciones simplificadas y lleve a cabo los cálculos para determinar las incógnitas. Ponga especial atención en las unidades y las eliminaciones de éstas y recuerde que una cantidad dimensional sin una unidad carece de sentido. Asimismo, no dé una implicación falsa de alta precisión al copiar todos los dígitos que aparecen en la pantalla de la calculadora, sino que redondee los resultados a un número apropiado de dígitos significativos (véase la subsección sobre dígitos significativos al final de esta sección).

Paso 7: razonamiento, comprobación y análisis

Compruebe para asegurarse de que los resultados obtenidos son razonables e intuitivos, y corrobore la validez de las suposiciones cuestionables. Repita los cálculos cuando obtenga como resultado valores poco razonables; por ejemplo, aislar un calentador de agua que gasta \$80 de gas natural al año no puede dar como resultado ahorros de \$200 al año (Fig. 1-64).

Señale también el significado de los resultados y analice sus implicaciones. Exprese las conclusiones posibles y cualquier recomendación que se pueda hacer a partir de éstas. Subraye las limitaciones en las que son aplicables los resultados y realice prevenciones contra cualquier mala interpretación y uso inadecuado de los resultados en situaciones donde las suposiciones subyacentes no tienen aplicación. Por ejemplo, si determina que envolver un calentador de agua con una camisa de aislamiento de \$30 reducirá el costo de la energía en \$40 al año, indica que el aislamiento se paga por sí mismo con la energía ahorrada en menos de un año. Sin embargo, también indica que en el análisis no se consideran los costos de mano de obra, lo cual será el caso si usted mismo instala el aislamiento.

Tome en cuenta que las soluciones que presente a sus profesores y cualquier análisis de ingeniería presentado a otras personas, son una forma de comunicación. Así, la pulcritud, organización, integridad y apariencia visual son de suma importancia para la máxima eficacia (Fig. 1-65). Además, la pulcritud sirve también como una gran herramienta de comprobación dado que es muy fácil localizar errores e inconsistencias en el trabajo limpio. La falta de cuidado y la omisión de pasos para ahorrar tiempo con frecuencia terminan costando más tiempo, además de que acarrearán ansiedad innecesaria.

El método descrito aquí se usó en los ejemplos resueltos sin expresar de forma explícita cada paso, al igual que en el manual de soluciones de este texto. Para algunos problemas, es posible que ciertos pasos no sean aplicables o necesarios; por ejemplo, a menudo es impráctico anotar las propiedades por separado. Sin embargo, no se puede insistir demasiado en la importancia de un método lógico y ordenado para resolver problemas, ya que la mayor parte de las dificultades encontradas en la resolución de un problema no se deben a la falta de conocimiento, sino a la falta de organización. Se recomienda seguir estos pasos en la solución de problemas hasta contar con un método propio que considere el más adecuado.

Paquetes de software de ingeniería

Quizá se pregunta por qué se está a punto de profundizar en los fundamentos de otra área de ingeniería. Después de todo, casi todos los problemas de este tipo que probablemente se encontrarán en la práctica se pueden resolver por medio de varios paquetes de software complejos que se consiguen fácilmente en el mercado actual. Estos paquetes no sólo dan los resultados numéricos deseados, sino también proveen los resultados en forma gráfica y a color para conseguir presentaciones impresionantes. En la actualidad es impensable practicar ingeniería sin usar algunos de estos paquetes. Esta tremenda capacidad de cálculo disponible con sólo tocar un botón es tanto una bendición como una maldición; de hecho permite a los ingenieros resolver problemas de manera fácil y rápida, pero también abre la posibilidad para que se susciten los abusos y la desinformación. En manos de personas con deficiente educación este software es tan peligroso como armas poderosas y complejas confiadas a soldados con escaso adiestramiento.

Crear que una persona que usa los paquetes de software sin el adecuado conocimiento de los fundamentos puede practicar ingeniería es como pensar que cualquiera que manipule una llave puede trabajar como mecánico auto-

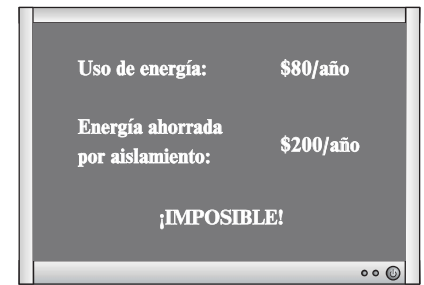


FIGURA 1-64

Debe comprobarse que los resultados obtenidos de un análisis de ingeniería expresan sensatez.



FIGURA 1-65

La pulcritud y la organización son muy valoradas por los empleadores.

**FIGURA 1-66**

Un excelente programa procesador de palabras no convierte a una persona en un buen escritor; simplemente hace que un buen escritor sea más eficiente.

© Caia Images/Glow Images RF

motriz. Si fuera cierto que los estudiantes de ingeniería no necesitan todos los cursos que toman porque es posible hacer casi todo con las computadoras fácil y rápidamente, entonces también sería verdad que los empleadores ya no necesitarían ingenieros con salarios altos puesto que cualquier persona que utilice un procesador de palabras también puede aprender cómo usar paquetes complejos de software. De hecho, las estadísticas muestran que cada vez se requieren más ingenieros a pesar de la disponibilidad de estos poderosos paquetes.

Es necesario recordar siempre que toda la capacidad de cálculo posible y los paquetes de software de ingeniería actualmente disponibles son sólo *herramientas*, las cuales sólo cobran relevancia en manos de maestros. Tener el mejor procesador de palabras no convierte a alguien en un buen escritor, sino que solamente facilita y hace más productivo el trabajo de un buen escritor (Fig. 1-66). Las calculadoras portátiles no eliminan la necesidad de enseñar a los niños cómo sumar o restar, y los complejos paquetes de software sobre medicina no sustituyen la capacitación formal médica. Tampoco los paquetes de software de ingeniería sustituyen a la educación tradicional en esta ciencia, simplemente provocan un cambio en el énfasis otorgado a los cursos de matemáticas o física. Es decir, en éstos se dedicará más tiempo al análisis dentro del aula para explicar con mayor detalle los aspectos físicos de los problemas, y menos tiempo en la mecánica de los procedimientos de solución.

Todas estas maravillosas y poderosas herramientas agregan una carga extra a los actuales ingenieros, quienes deben tener una comprensión completa de los fundamentos, desarrollar un sentido extra para con los fenómenos físicos, capacidad para colocar los datos en la perspectiva adecuada y hacer juicios de ingeniería sólidos, al igual que sus antecesores. Sin embargo, deben hacerlo mucho mejor y mucho más rápido, con modelos más reales resultantes de las poderosas herramientas disponibles hoy día. En el pasado, los ingenieros primero tuvieron que confiar en cálculos manuales, después en reglas de cálculo y más adelante en calculadoras portátiles y computadoras; actualmente dependen de paquetes de software. El fácil acceso a tal poder y la posibilidad de una simple comprensión errónea o una mala interpretación de graves consecuencias hacen hoy más importante que nunca tener una sólida capacitación acerca de los fundamentos de la ingeniería. En este libro se hace un esfuerzo extra para hacer énfasis en el desarrollo de una comprensión intuitiva y física de los fenómenos naturales en lugar de enfocarse en los detalles matemáticos de los procedimientos de solución.

Solucionadores de ecuaciones

Puede que esté familiarizado con las capacidades de solución de ecuaciones de las hojas de cálculo como Microsoft Excel. A pesar de su simplicidad, Excel es de uso común en sistemas de solución de sistemas de ecuaciones en el campo de la ingeniería y las finanzas. Permite al usuario realizar estudios paramétricos, graficar resultados y plantearse preguntas "qué pasa si". También es capaz de resolver ecuaciones simultáneas si se configura de forma apropiada. También hay muchos solucionadores de ecuaciones complejos, como el Engineering Equation Solver (EES), el cual es un programa que resuelve con facilidad sistemas de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales o ecuaciones diferenciales. Dispone de una gran biblioteca de funciones de propiedades termodinámicas y funciones matemáticas que permiten al usuario contar con datos de propiedades adicionales.

A diferencia de algunos paquetes de software, los solucionadores de ecuaciones no resuelven problemas de ingeniería; proporcionan respuestas sólo a las ecuaciones suministradas por el usuario. Por consiguiente, éste debe entender el problema y formularlo aplicando las relaciones y leyes físicas pertinentes. Los solucionadores de ecuaciones permiten al usuario ahorrar tiempo y esfuerzo considerables con sólo resolver las ecuaciones matemáticas resultantes. Esto hace posible intentar solucionar problemas de ingeniería complejos que son difíciles de solucionar de forma manual y realizar estudios paramétricos con rapidez y acierto.

EJEMPLO 1-11 Resolución numérica de un sistema de ecuaciones

La diferencia de dos números es 4 y la suma de los cuadrados de estos dos números es igual a la suma de los mismos más 20. Determine estos dos números.

SOLUCIÓN Se dan las relaciones para la diferencia y la suma de los cuadrados de dos números, los cuales se determinarán.

Análisis Primero se resuelve el problema con EES, y éste se ejecuta haciendo doble clic en su ícono, se abre un archivo nuevo y se escribe lo siguiente en la pantalla en blanco que aparece:

$$\begin{aligned}x - y &= 4 \\x^2 + y^2 &= x + y + 20\end{aligned}$$

que son expresiones matemáticas exactas del enunciado del problema con x y y las cuales denotan a los números desconocidos. La solución de este sistema de ecuaciones (una lineal y otra no lineal) con dos incógnitas se obtiene con un clic en el ícono de la “calculadora” en la barra de tareas. Las respuestas que aparecen son (fig. 1-67):

$$x = 5 \quad y = 1$$

Ahora se resuelve el mismo problema con Excel. *File/Options/Add-Ins/Solver Add-In/Ok* donde el subrayado significa hacer clic en esa opción y la barra diagonal separa cada opción. Elija una celda para x y una celda para y e ingrese allí las suposiciones iniciales (se eligen las celdas C25 y D25 y se escribe 0.5 y 0.5). Se vuelven a escribir las dos ecuaciones sin variables en el lado derecho (LD): $x - y = 4$ y $x^2 + y^2 - x - y = 20$. Se elige una celda para el lado derecho de cada ecuación para anotar la fórmula (se escogen las celdas D20 y D21; las ecuaciones aparecen en la figura 1-68a). *Data Solver*. Establezca la celda para el lado derecho de la primera ecuación (D20) como “Objective” con un valor de 4, y las celdas para x y y (C25:D25) como las que van a estar sujetas a restricciones, y establezca la restricción de modo que la celda para el lado derecho de la segunda ecuación (D21) sea igual a 20. *Solve/Ok*. La solución itera hasta que llega a las soluciones finales de $x = 5$ y $y = 1$, respectivamente (Fig 1-68b). *Nota:* Para una mejor convergencia, la precisión, el número de interacciones permitidas, etc., se pueden cambiar en *Data/Solver/Options*.

Comentario Observe que todo lo que se hizo fue formular el problema como se habría hecho en papel; EES o Excel se ocupa de los detalles matemáticos de la solución. Observe también que estas ecuaciones suelen ser lineales o no lineales, y que se pueden introducir en cualquier orden ubicando las incógnitas en cualquier lado. Los programas sencillos para resolver ecuaciones como EES permiten al usuario centrar la atención en la física del problema sin tener que preocuparse acerca de las complejidades matemáticas relacionadas con la solución del sistema resultante de ecuaciones.

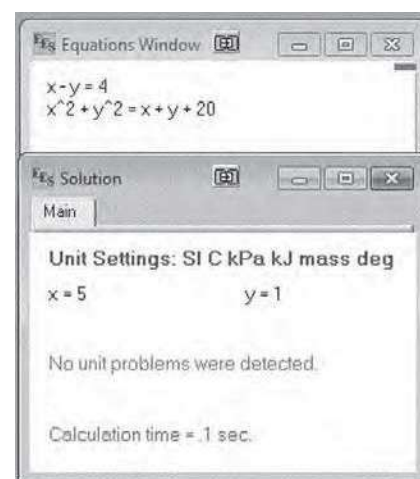


FIGURA 1-67

Imágenes que aparecen en la pantalla con EES para el ejemplo 1-11.

	A	B	C	D
19		Ecuación		LD de ec.
20		$x - y = 4$		=C25-D25
21		$x^2 + y^2 - x - y = 20$		=C25^2 + D25^2 - C25 - D25
23		Valores de variables:		
24			x	y
25			0.5	0.5

a)

	A	B	C	D
19		Ecuación		LD de ec.
20		$x - y = 4$		4
21		$x^2 + y^2 - x - y = 20$		20
23		Valores de variables:		
24			x	y
25			5	1

b)

FIGURA 1-68

Imágenes generadas por Excel para el ejemplo 1-11. a) Ecuaciones con suposiciones iniciales resaltadas. b) Resultados finales obtenidos con Excel resaltados.

<input type="radio"/>	Datos: Volumen: $V = 3.75$ L
<input type="radio"/>	Densidad: $\rho = 0.845$ kg/L (3 dígitos significativos)
	También, $3.75 \times 0.845 = 3.16875$
	Hallar: Masa: $m = \rho V = 3.16875$ kg
<input type="radio"/>	Si se redondea a tres dígitos significativos: $m = 3.17$ kg
<input type="radio"/>	
<input type="radio"/>	

FIGURA 1-69

Un resultado con más dígitos significativos que los de un dato implica, falsamente, mayor precisión.

Observación acerca de los dígitos significativos

En los cálculos de ingeniería, la información ofrecida en forma de datos suele presentarse hasta cierto número de dígitos significativos, comúnmente tres. En consecuencia, los resultados obtenidos no pueden darse con mayor exactitud que el número de dígitos significativos. Dar resultados con mayor número de dígitos significativos implica falsamente una mayor exactitud de la que existe, y esto se debe evitar.

Por ejemplo, considere un recipiente de 3.75 L lleno de gasolina con una densidad de 0.845 kg/L e intente determinar su masa. Es probable que lo primero que viene a la mente sea multiplicar el volumen y la densidad para obtener 3.16875 kg para la masa, lo cual indica en apariencia que la masa determinada es exacta en hasta seis dígitos significativos. Sin embargo, en realidad la masa no puede ser más exacta que tres dígitos significativos, puesto que tanto el volumen como la densidad son exactos solamente hasta tres dígitos significativos. Por lo tanto, el resultado se debe redondear a tres dígitos y escribir el valor de la masa como 3.17 kg en lugar de lo que aparece en la pantalla de la calculadora. El resultado 3.16875 kg sería correcto sólo si el volumen y la densidad se dieran como 3.75000 L y 0.845000 kg/L, respectivamente. El valor de 3.75 L indica que hay bastante confianza de que el volumen sea exacto dentro de ± 0.01 L, y que no pueda ser 3.74 o 3.76 L. Sin embargo, el volumen puede ser 3.746, 3.750, 3.753, etc., ya que todos se redondean a 3.75 L (Fig. 1-69). Es más apropiado retener todos los dígitos durante los cálculos intermedios y hacer el redondeo en el paso final, dado que esto es lo que normalmente hace una computadora.

Al resolver problemas se supondrá que la información dada es exacta hasta por lo menos en tres dígitos significativos, de manera que si la longitud de una tubería es de 40 m, se supone que es de 40.0 m a fin de justificar el uso de tres dígitos significativos en los resultados finales. También se debe recordar que todos los valores determinados experimentalmente están sujetos a errores de medición que se reflejarán en los resultados. Por ejemplo, si la densidad de una sustancia tiene una incertidumbre de 2 por ciento, entonces la masa determinada con este valor de densidad también tendrá una incertidumbre de 2 por ciento.

Es necesario estar consciente de que a veces se introducen deliberadamente pequeños errores para evitar la búsqueda de datos más exactos. Por ejemplo, cuando se utiliza agua, se usa el valor de $1\,000$ kg/m³ para la densidad, que es el valor de la densidad del agua pura a 0 °C. Usar este valor a 75 °C da como resultado un error de 2.5 por ciento puesto que la densidad a esta temperatura es de 975 kg/m³. Además, los minerales e impurezas del agua introducen un error adicional; en este caso no debe dudarse en redondear los resultados finales a un número razonable de dígitos significativos. Aún más: tener cierto porcentaje de incertidumbre en los resultados del análisis de ingeniería es comúnmente la norma, no la excepción.

RESUMEN

En este capítulo se introducen y analizan los conceptos básicos de la *termodinámica*, la ciencia que trata sobre todo con la energía. La *primera ley de la termodinámica* es simplemente una expresión del principio de la conservación de la energía y afirma que la *energía* es una propiedad termodinámica. La *segunda ley de la termodinámica* sostiene que la energía tiene tanto *calidad* como *cantidad*, y que los procesos reales ocurren en dirección de la disminución de la calidad de la energía.

Un sistema de masa fija se llama *sistema cerrado* o *masa de control*, y un sistema donde hay transferencia de masa en sus fronteras se denomina *sistema abierto* o *volumen de control*. Las propiedades de un sistema que dependen de la masa se llaman *propiedades extensivas* y las demás *propiedades intensivas*. La *densidad* es masa por unidad de volumen y el *volumen específico* es volumen por unidad de masa.

Se dice que un sistema está en *equilibrio termodinámico* si mantiene el equilibrio térmico, mecánico, de fase y químico. Cualquier cambio de un estado a otro recibe el nombre de *proceso*. Un proceso con estados finales idénticos se denomina *ciclo*. Durante un proceso *cuasiestático* o de *cuasiequilibrio*, el sistema permanece prácticamente en equilibrio todo el tiempo. El estado de un sistema compresible simple se especifica completamente mediante dos propiedades intensivas independientes.

La *ley cero de la termodinámica* establece que dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura aun cuando no están en contacto.

Las escalas de temperatura utilizadas en la actualidad en el SI y en el sistema inglés son la *Celsius* y la *Fahrenheit*, respectivamente, las cuales se relacionan con las escalas de temperatura absolutas por

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67$$

Las magnitudes de cada división de 1 K y de 1 °C son idénticas, lo mismo que las magnitudes de cada división de 1 R y 1 °F. Por lo tanto,

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) \quad \text{y} \quad \Delta T(\text{R}) = \Delta T(^{\circ}\text{F})$$

La fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área se llama *presión*, y su unidad es el *pascal*, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. La presión relativa al vacío absoluto se llama *presión absoluta*, y la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local se llama *presión manométrica*. Las presiones por debajo de la presión atmosférica se llaman *presiones de vacío*. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío se relacionan por

$$P_{\text{manométrica}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} \quad (\text{para presiones por arriba de } P_{\text{atm}})$$

$$P_{\text{vacío}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}} \quad (\text{para presiones por debajo de } P_{\text{atm}})$$

La presión en un punto de un fluido tiene la misma magnitud en todas direcciones. La variación de la presión con la elevación está dada por

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

donde la dirección z positiva es hacia arriba. Cuando la densidad del fluido es constante, la diferencia de presión en una capa de fluido de espesor Δz es

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g \Delta z$$

Las presiones absoluta y manométrica en un líquido abierto a la atmósfera a una profundidad h desde la superficie libre son

$$P = P_{\text{atm}} + \rho g h \quad \text{o} \quad P_{\text{manométrica}} = \rho g h$$

Las diferencias de presión, pequeñas a moderadas, se miden con un *manómetro*. La presión en un fluido permanece constante en la dirección horizontal. El *principio de Pascal* establece que la presión aplicada a un fluido confinado aumenta la presión en todos los puntos en la misma cantidad. La presión atmosférica se mide con un *barómetro* y está dada por

$$P_{\text{atm}} = \rho g h$$

donde h es la altura del líquido de la columna.

REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

1. American Society for Testing and Materials, *Standards for Metric Practice*, ASTM E 380-79, enero de 1980.
2. A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics* (3a. ed.), Nueva York, Wiley, 2006.
3. J. A. Schooley, *Thermometry*, Boca Ratón, FL, CRC Press, 1986.

PROBLEMAS*

Termodinámica

1-1C ¿Por qué un ciclista acelera al ir pendiente abajo, aun cuando no esté pedaleando? ¿Viola eso el principio de la conservación de la energía?

1-2C Una de las cosas más divertidas que puede experimentar una persona es que un automóvil inmóvil, al ponerlo en punto muerto, sube por una pendiente cuando quita el freno. ¿Puede realmente suceder eso, o es alguna ilusión óptica? ¿Cómo se puede verificar si la carretera realmente es de subida o de bajada?

1-3C Un oficinista dice que una taza de café frío en su escritorio se calentó hasta 80 °C, al tomar energía del aire que lo rodea, que está a 25 °C. ¿Hay algo de verdad en su aseveración? ¿Viola ese proceso alguna de las leyes de la termodinámica?

1-4C ¿Cuál es la diferencia entre el enfoque clásico y el enfoque estadístico en la termodinámica?

Masa, fuerza y unidades

1-5C Explique por qué la dimensión del año-luz es longitud.

1-6C ¿Cuál es la diferencia entre libra-masa y libra-fuerza?

1-7C ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un automóvil que va a la velocidad constante de 70 km/h *a*) en un camino horizontal y *b*) en un camino de subida?

1-8 ¿Cuál es el peso, en N, de un objeto con una masa de 200 kg, en una ubicación en la que $g = 9.6 \text{ m/s}^2$?


1-9E Si la masa de un objeto es de 10 lbm, ¿cuál es su peso, en un lugar donde $g = 32.0 \text{ pie/s}^2$?

1-10 La aceleración de un avión de alta velocidad en ocasiones se expresa en *fuerzas g* (es decir, en múltiplos de la aceleración estándar de la gravedad). Determine la fuerza hacia arriba, en N, que un hombre de 90 kg experimentaría en un avión cuya aceleración es de 6 *g*.

1-11 El valor de la aceleración gravitacional g^2 disminuye con la elevación desde 9.807 m/s² al nivel del mar hasta 9.767 m/s² a una altitud de 13 000 m, donde los grandes aviones de pasajeros se desplazan. Determine la disminución del peso de un avión en porcentaje que viaja a 13 000 m con respecto a su peso al nivel del mar.

1-12 Un tanque de plástico de 3 kg con un volumen de 0.2 m³ está lleno de agua líquida. Suponiendo que la densidad del agua es de 1 000 kg/m³, determine el peso del sistema combinado.

1-13 Una piedra de 2 kg es lanzada hacia arriba con 200 N de fuerza, en un lugar donde la aceleración gravitacional local es 9.79 m/s². Determine la aceleración de la piedra, en m/s².

1-14  Resuelva el problema 1-13 con un software apropiado. Imprima la solución completa, incluyendo los resultados numéricos con sus unidades correctas.

1-15 Una resistencia de calentamiento de 4 kW en un calentador de agua trabaja durante tres horas para elevar la temperatura del agua al nivel deseado. Determine la cantidad de energía eléctrica que se usa, tanto en kWh como en kJ.

1-16E Un astronauta de 150 lbm lleva consigo la báscula de su baño (una báscula de resorte) y una báscula mecánica (que compara masas) a la Luna, donde la gravedad local es $g = 5.48 \text{ pies/s}^2$. Determine cuánto pesará el astronauta *a*) en la báscula de resortes y *b*) en la báscula mecánica.

Respuestas: a) 25.5 lbf, b) 150 lbf

1-17 El tanque de gasolina de un automóvil se llena con una boquilla que descarga gasolina a caudal constante. Con base en consideraciones de unidades de cantidades, obtenga una relación para el tiempo de llenado en términos del volumen V del tanque (en L), y el caudal de descarga de gasolina \dot{V} (en L/s).

Sistemas, propiedades, estado y procesos


1-18C ¿Cómo definiría un sistema para determinar la tasa de emisión de bióxido de carbono a la atmósfera de un automóvil?

1-19C Una gran fracción de la energía térmica generada en el motor de un automóvil es expulsada al aire gracias al agua que circula en el radiador. ¿El radiador debe analizarse como un sistema cerrado o abierto? Explique.



FIGURA P1-19C

© McGraw-Hill Education/Christopher Kerrigan

* Los problemas marcados con "C" son preguntas de concepto, y se exhorta a los alumnos a contestarlas todas. Los problemas marcados con una "E" están en unidades inglesas, y quienes utilizan unidades SI pueden ignorarlos. Los problemas con un ícono  son extensos y se recomienda emplear un software apropiado para resolverlos.

1-20C Una lata de refresco a temperatura ambiente se mete al refrigerador para enfriarla. ¿Analizaría la lata de refresco como un sistema abierto o un sistema cerrado? Explique.

1-21C ¿Cómo definiría un sistema para determinar la elevación de temperatura que ocurre en un lago cuando una parte de su agua se usa para enfriar una planta eléctrica cercana?

1-22C ¿Como describiría el estado del aire en la atmósfera? ¿Qué clase de proceso experimenta este aire desde una mañana fresca hasta una tarde cálida?

1-23C ¿Cuál es la diferencia entre propiedades intensivas y extensivas?

1-24C El peso específico se define como peso por unidad de volumen (observe que esta definición viola la convención de nombramiento normal de una propiedad específica). ¿Es el peso específico una propiedad extensiva o intensiva?


1-25C ¿Es el número de moles de una sustancia contenida en un sistema una propiedad extensiva o intensiva?

1-26C ¿Especifica por completo la temperatura y la presión el estado del aire en una habitación aislada?

1-27C ¿Qué es un proceso de cuasiequilibrio? ¿Cuál es su importancia en la ingeniería?

1-28C Defina los procesos isotérmico, isobárico e isocórico.

1-29C ¿Qué es la gravedad específica? ¿Cómo se relaciona con la densidad?

1-30  La densidad del aire atmosférico varía con la elevación, disminuye al aumentar la altura. *a)* Use los datos de la tabla siguiente para obtener una ecuación de la variación de la densidad con la altura, y calcule la densidad a una altura de 7 000 m. *b)* Calcule la masa de la atmósfera usando la correlación que obtuvo. Suponga que la Tierra es una esfera perfecta, con 6 377 km de radio, y suponga que el espesor de la atmósfera es 25 km.

z , km	ρ , kg/m ³
6 377	1.225
6 378	1.112
6 379	1.007
6 380	0.9093
6 381	0.8194
6 382	0.7364
6 383	0.6601
6 385	0.5258
6 387	0.4135
6 392	0.1948
6 397	0.08891
6 402	0.04008

Temperatura

1-31C ¿Cuáles son las escalas ordinaria y absoluta de temperatura, en el SI y en el sistema inglés?

1-32C Un termómetro de alcohol y uno de mercurio indican exactamente 0 °C en el punto de congelación, y 100 °C en el punto de evaporación. La distancia entre los dos puntos se divide en 100 partes iguales, en ambos termómetros. ¿Cree usted que esos termómetros indicarán exactamente lo mismo a una temperatura de, por ejemplo, 60 °C? Explique por qué.

1-33C Considere dos sistemas cerrados A y B. El sistema A contiene 3 000 kJ de energía térmica a 20 °C, mientras que el sistema B contiene 200 kJ de energía térmica a 50 °C. Se hace que estos dos sistemas entren en contacto uno con el otro. Determine la dirección de la transferencia de calor, en caso de haberla, entre los dos sistemas.

1-34E Considere un sistema cuya temperatura es de 18 °C. Exprese esta temperatura en R, K y °F.

1-35E Entra vapor a un intercambiador de calor a 300 K. ¿Cuál es la temperatura de este vapor en °F?

1-36 La temperatura de un sistema aumenta en 130 °C durante un proceso de calentamiento. Exprese en kelvin ese aumento de temperatura.

1-37E La temperatura de un sistema desciende 45 °F durante un proceso de enfriamiento. Exprese este descenso en la temperatura en K, R y °C.

1-38E La temperatura del aceite lubricante en el motor de un automóvil es de 150 °F. ¿Cuál es la temperatura de este aceite en °C?

1-39E La temperatura de aire caliente es de 150 °F. ¿Cuál es su temperatura en °F?

Presión, manómetro y barómetro

1-40C ¿Cuál es la diferencia entre presión manométrica y presión absoluta?

1-41C Explique por qué a algunas personas les sangra la nariz y otras experimentan dificultad para respirar a alturas elevadas.

1-42C En una revista se dijo que unos médicos midieron la presión sanguínea de 100 adultos, usando dos posiciones del brazo distintas: paralelas al cuerpo (a lo largo del tronco) y perpendicular al cuerpo (hacia adelante). Las indicaciones en la posición paralela fueron hasta 10 por ciento mayores que en la posición perpendicular, independientemente si el paciente estaba parado, sentado o acostado. Explique la posible causa de esta diferencia.

1-43C Una persona dice que la presión absoluta en un líquido de densidad constante aumenta al doble cuando la profundidad aumenta al doble. ¿Está usted de acuerdo? Explique por qué.

1-44C Considere dos ventiladores idénticos, uno al nivel del mar y el otro en la cima de una alta montaña, que giran a velocidades idénticas. ¿Cómo compararía *a)* las velocidades de flujo del volumen y *b)* las velocidades de flujo de la masa de los dos ventiladores?

1-45E La presión absoluta en un tanque de aire comprimido es de 200 kPa. ¿Cuál es la presión en psia?

1-46E Un manómetro mide una diferencia de presión de 40 pulgadas de agua. ¿Cuál es esta diferencia de presión en libras fuerza por pulgada cuadrada, psi? *Respuesta:* 1.44 psi

1-47 Un medidor de vacío conectado a una cámara lee 35 kPa en un lugar donde la presión atmosférica es de 92 kPa. Determine la presión absoluta en la cámara.

1-48E La presión de aire máxima segura de una llanta viene etiquetada en ella. La etiqueta indica que la presión máxima es 35 psi (manométrica). Exprese esta presión máxima en kPa.



FIGURA P1-48E

1-49E Un medidor de presión conectado a un tanque lee 50 psi en un lugar donde la lectura barométrica es 29.1 pulg de mercurio. Determine la presión absoluta en el tanque. Considere $\rho_{\text{Hg}} = 848.4 \text{ lbm/pies}^3$. *Respuesta:* 64.3 psia.

1-50 Un medidor de presión conectado a un tanque lee 500 kPa en un lugar donde la presión atmosférica es 94 kPa. Determine la presión absoluta en el tanque.

1-51E La impresión de los pies de un hombre que pesa 200 lb tiene un área total de 72 pies². Determine la presión que este hombre ejerce sobre el suelo si *a*) está parado sobre ambos pies y *b*) si está parado sólo sobre uno.


1-52 La presión manométrica en un líquido, a 3 m de profundidad, es 42 kPa. Determine la presión manométrica en el mismo líquido a la profundidad de 9 m.

1-53 La presión absoluta en agua a 9 m de profundidad resulta ser 185 kPa. Determine *a*) la presión atmosférica local y *b*) la presión absoluta a 5 m de profundidad, en un líquido cuya gravedad específica sea 0.85, en el mismo lugar geográfico.

1-54 Considere un hombre de 1.75 m de estatura de pie totalmente sumergido en el agua en una piscina. Determine la diferencia entre la presión que actúa en la cabeza y en los dedos de los pies del hombre, en kPa.

1-55 El barómetro de un escalador indica 750 mbar cuando comienza a subir la montaña, y 650 mbar cuando termina. Sin tener en cuenta el efecto de la altitud sobre la aceleración gravitacional local, determine la distancia vertical que escaló. Suponga que la densidad promedio del aire es 1.20 kg/m^3 . *Respuesta:* 850 m

1-56 El barómetro básico se puede utilizar para medir la altura de un edificio. Si las lecturas barométricas en la parte superior y en la base del edificio son 675 y 695 mm Hg, respectivamente, determine la altura del edificio. Tome las densidades del aire y del mercurio como 1.18 kg/m^3 y $13\,600 \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

1-57  Resuelva el problema 1-59 con el software apropiado. Imprima la solución completa e incluya los resultados numéricos con las unidades apropiadas.

1-58 Un gas está contenido en un dispositivo vertical de cilindro-émbolo entre los que no hay fricción. El émbolo tiene una masa de 3.2 kg y un área de sección transversal de 35 cm². Un resorte comprimido sobre el émbolo ejerce una fuerza de 150 N. Si la presión atmosférica es de 95 kPa, calcule la presión dentro del cilindro. *Respuesta:* 147 kPa



FIGURA P1-56

© McGraw-Hill Education

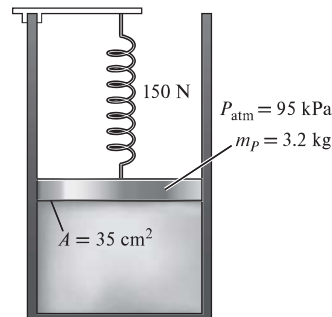



FIGURA P1-58

1-59  Vuelva al problema 1-58 y con el software apropiado investigue el efecto de la fuerza del resorte en el intervalo de 0 a 500 N sobre la presión dentro del cilindro. Represente la presión en función de la fuerza del resorte y analice los resultados.

1-60 El pistón de un dispositivo pistón y cilindro vertical contiene un gas de 60 kg de masa y área de sección transversal de 0.04 m^2 , como se ilustra en figura P1-60. La presión atmosférica local es de 0.97 bar, y la aceleración gravitacional es de 9.81 m/s^2 . *a*) Determine la presión en el interior del cilindro. *b*) Si se transfiere calor al gas y su volumen se duplica, ¿se espera que cambie la presión en el interior del cilindro?

1-61 Se conectan un medidor y un manómetro a un recipiente de gas para medir su presión. Si la lectura en el medidor es 80 kPa, determine la distancia entre los dos niveles de fluido del

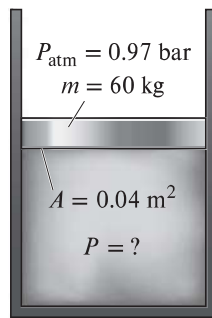


FIGURA P1-60

manómetro si éste es *a*) mercurio ($\rho = 13\,600 \text{ kg/m}^3$) o *b*) agua ($\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$).

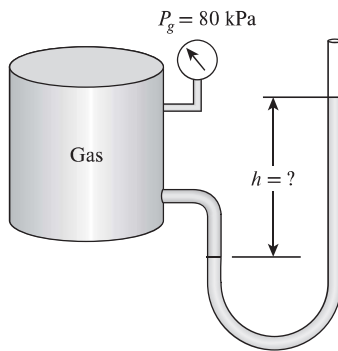



FIGURA P1-61

1-62  Vuelva al problema 1-61 y con el software apropiado investigue el efecto de la densidad del fluido del manómetro en el intervalo de 800 a 13 000 kg/m^3 sobre la diferencia de altura del manómetro. Grafique la diferencia de altura del fluido en función de la densidad y analice los resultados.

1-63 Un manómetro que contiene aceite ($\rho = 850 \text{ kg/m}^3$) se conecta a un recipiente lleno de aire. Si la diferencia del nivel de aceite entre ambas columnas es de 80 cm y la presión atmosférica es de 98 kPa, determine la presión absoluta del aire en el recipiente. *Respuesta:* 105 kPa

1-64E Se utiliza un manómetro para medir la presión del aire en un tanque. El fluido usado tiene una gravedad específica de 1.25 y la altura diferencial entre las dos ramas del manómetro es de 28 pulg. Si la presión atmosférica local es de 12.7 psia, determine la presión absoluta en el tanque cuando la rama del manómetro con *a*) el nivel de fluido más alto y *b*) más bajo se conecta al tanque.

1-65 Un manómetro de mercurio ($\rho = 13\,600 \text{ kg/m}^3$) se conecta a un ducto de aire para medir la presión en su interior. La diferencia entre los niveles del manómetro es 30 mm, y la presión manométrica es 100 kPa. *a*) De acuerdo con la figura P1-65, determine si la presión en el ducto es mayor o menor que la presión atmosférica. *b*) Determine la presión absoluta en el ducto.

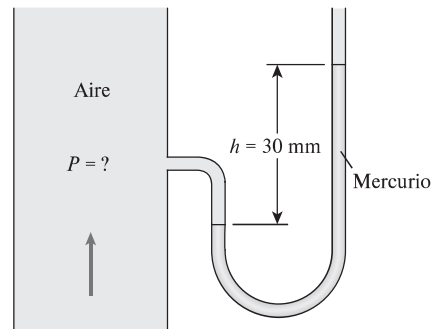


FIGURA P1-65

1-66 Repita el problema 1-65 para una diferencia de altura de mercurio de 45 mm.

1-67E El manómetro mostrado en la figura P1-67E mide la presión en un conducto de gas natural. El manómetro tiene una de sus ramas abierta a la atmósfera donde la presión atmosférica local es de 14.2 psia. Determine la presión absoluta en el conducto.

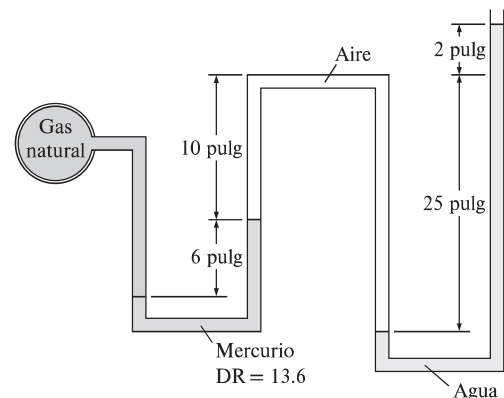


FIGURA P1-67E

1-68E Repita el problema 1-67E reemplazando el aire por aceite con una gravedad específica de 0.69.

1-69E Comúnmente la presión arterial se mide con un saco cerrado y lleno de aire provisto de un medidor de presión, el cual se enrolla alrededor de la parte superior del brazo de una persona, al nivel del corazón. Con un manómetro de mercurio y un estetoscopio, se miden la presión sistólica (la presión máxima cuando el corazón está bombeando) y la presión diastólica (la presión mínima cuando el corazón está en reposo) en mmHg. En una persona sana, estas presiones se hallan en alrededor de 120 mmHg y 80 mmHg, respectivamente, y se indican como 120/80. Expresé ambas presiones manométricas en kPa, psi y en metros columna de agua.

1-70 La presión arterial máxima en la parte superior del brazo de una persona sana es de alrededor de 120 mmHg. Si un tubo vertical abierto a la atmósfera se conecta a la vena del brazo, determine cuánto ascenderá la sangre en el tubo. Considere la densidad de la sangre como 1 050 kg/m^3 .

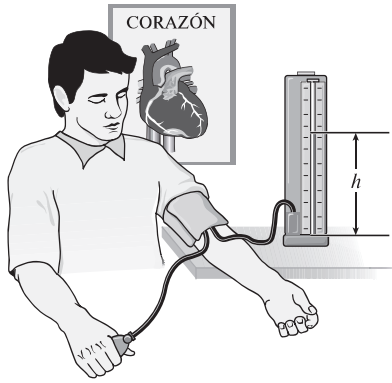


FIGURA P1-70

1-71 Considere un tubo en U cuyas ramas están abiertas a la atmósfera. Ahora se agrega agua dentro del tubo desde un extremo y aceite ligero ($\rho = 790 \text{ kg/m}^3$) desde el otro. Una de estas ramas contiene 70 cm de agua, mientras que la otra contiene ambos fluidos con una relación de altura aceite-agua de 4. Determine la altura de cada fluido en esta rama.

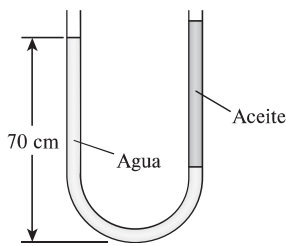


FIGURA P1-71

1-72 Considere un manómetro de doble fluido conectado al tubo de aire mostrado en la figura P1-72. Si la gravedad específica de un fluido es de 13.55, determine la gravedad específica del otro fluido para la presión absoluta del aire indicada. Sea la presión atmosférica de 100 kPa. Respuesta: 1.59

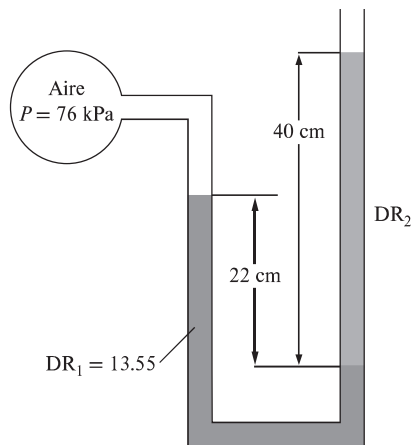


FIGURA P1-72

1-73 Calcule la presión absoluta P_1 , del manómetro de la figura P1-73, en kPa. La presión atmosférica local es 758 mmHg.

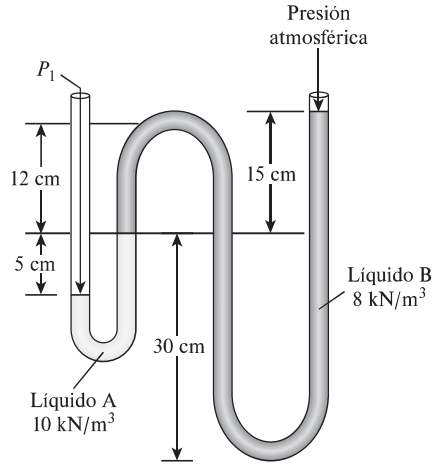


FIGURA P1-73

1-74 Considere el manómetro de la figura P1-73. Si el peso específico del fluido A es 100 kN/m^3 , ¿cuál es la presión absoluta, en kPa, indicada por el manómetro cuando la presión atmosférica local es 90 kPa?

1-75 Considere el manómetro de la figura P1-73. Si el peso específico del fluido B es 20 kN/m^3 , ¿cuál es la presión absoluta en kPa, indicada por el manómetro cuando la presión atmosférica local es 720 mmHg?

1-76 El elevador hidráulico en un taller mecánico tiene un diámetro de salida de 30 cm y debe levantar automóviles hasta de 2 500 kg. Determine la presión final del fluido que debe mantenerse en el depósito.

1-77 Examine el sistema de la figura P1-77. Si un cambio de 0.7 kPa en la presión del aire causa que baje 5 mm la interfaz entre salmuera y mercurio, en la columna derecha, mientras que la presión en el tubo de salmuera permanece constante, determine la relación A_2/A_1 .

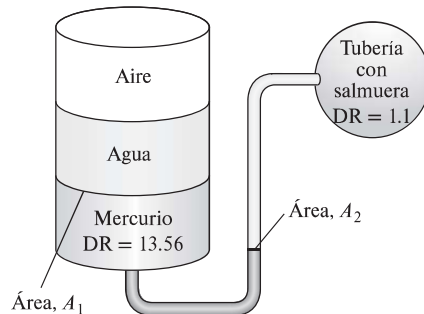


FIGURA P1-77

1-78 La presión manométrica del aire en el tanque mostrado en la figura P1-78 es 80 kPa. Determine la altura diferencial h de la columna de mercurio.

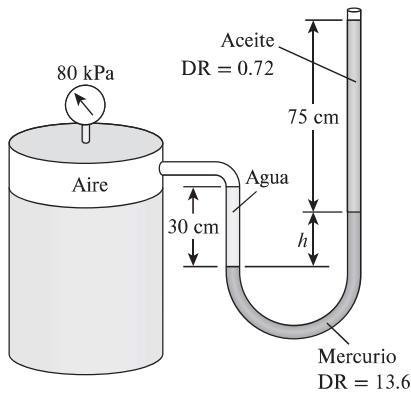


FIGURA P1-78

1-79 Repita el problema 1-78 para una presión manométrica de 40 kPa.

Solución de problemas de ingeniería y solucionadores de ecuaciones

1-80C ¿Cuál es el valor de los paquetes de software para ingeniería en a) educación de la ingeniería y b) práctica de la ingeniería?

1-81 Determine una raíz real positiva de esta ecuación con el software apropiado:

$$2x^3 - 10x^{0.5} - 3x = -3$$

1-82 Resuelva el siguiente sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas con el software apropiado:

$$x^3 - y^2 = 5.9$$

$$3xy + y = 3.5$$

1-83 Resuelva este sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas con el software apropiado:

$$2x - y + z = 7$$

$$3x^2 + 3y = z + 3$$

$$xy + 2z = 4$$

1-84 Resuelva este sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas con el software apropiado:

$$x^2y - z = 1$$

$$x - 3y^{0.5} + xz = -2$$

$$x + y - z = 2$$

Problemas de repaso

1-85E La fuerza de reacción desarrollada por un motor de reacción para impulsar un avión hacia adelante se llama empuje, y el empuje desarrollado por el motor de un Boeing 777 es aproximadamente de 85 000 lbf. Expresé este empuje en N y kgf.

1-86 El peso de los cuerpos puede cambiar algo de un lugar a otro, como resultado de la variación de la aceleración gravitacional g con la elevación. Si se toma esta variación y se utiliza la relación $g = a - bz$ donde $a = 9.807 \text{ m/s}^2$ y $b = 3.32 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$, calcule el peso de una persona de 80 kg al nivel del mar ($z = 0$), en Denver ($z = 1610 \text{ m}$) y en la cima del Monte Everest ($z = 8848 \text{ m}$).

1-87E Una persona va a un mercado tradicional, a comprar un bistec para la cena. Ve uno de 12 onzas (1 lbm = 16 oz) a \$5.50. Va entonces al supermercado y ve que un bistec de 300 g, de calidad idéntica, cuesta \$5.20. ¿Cuál es la mejor compra?

1-88E ¿Cuál es el peso de un kilogramo de sustancia en N, kN, $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$, kgf, lbm $\cdot \text{pie/s}^2$ y lbf?

1-89E La presión en una caldera de vapor es 92 kgf/cm². Expresé esta presión en psi, kPa y bars.

1-90 Con un elevador hidráulico se va a levantar un peso de 1900 kg colocando un peso de 25 kg sobre el pistón de 10 cm de diámetro. Determine el diámetro del pistón sobre el cual se va a colocar el peso.

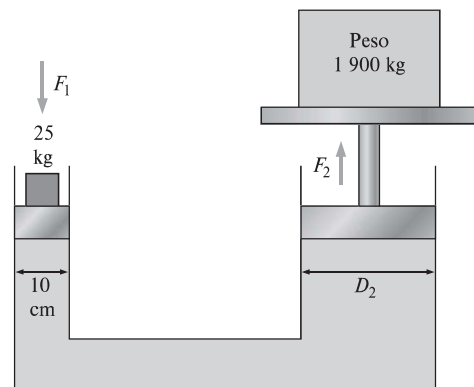


FIGURA P1-90

1-91 La presión atmosférica sobre la Tierra está dada de manera aproximada por la relación $P_{\text{atm}} = 101.325 (1 - 0.02256z)^{5.256}$ donde P_{atm} es la presión atmosférica en kPa y z es la altitud en km con $z = 0$ al nivel del mar. Determine las presiones atmosféricas en Atlanta ($z = 306 \text{ m}$), Denver ($z = 1610 \text{ m}$), ciudad de México ($z = 2309 \text{ m}$) y en la cima del Monte Everest ($z = 8848 \text{ m}$).

1-92E Se considera que una hipertermia de 5 °C (es decir, aumento de 5 °C respecto a la temperatura normal del organismo) es mortal. Expresé ese valor mortal de hipertermia en a) K, b) °F y c) R.

1-93E La temperatura de ebullición del agua se reduce aproximadamente 3 °C por cada 1 000 m de elevación de la altitud. ¿Cuál es la disminución de la temperatura de ebullición en a) K, b) °F y c) R por cada 1 000 m de elevación de la altitud.

1-94E Una casa pierde calor a razón de 1 800 kJ/h por la diferencia de °C entre las temperaturas interna y externa. Expresé la tasa de pérdida de calor de esta casa por a) K, b) °F y c) diferencia en R entre las temperaturas interna y externa.

1-95E La temperatura promedio de una persona se eleva cerca de 2 °C durante un ejercicio extenuante. ¿Cuál es la elevación de la temperatura del cuerpo en a) K, b) °F y c) R durante el ejercicio extenuante?

1-96 La temperatura promedio de la atmósfera en el mundo en función de la altitud es aproximadamente

$$T_{atm} = 288.15 - 6.5z$$

donde T_{atm} es la temperatura de la atmósfera en K y z es la altitud en km con $z = 0$ al nivel del mar. Calcule la temperatura promedio de la atmósfera afuera de un avión que viaja a una altitud de 12 000 m.

1-97 Un dispositivo de pistón-cilindro vertical libre de fricción contiene un gas a una presión absoluta de 180 kPa. La presión atmosférica en el exterior es de 100 kPa, y el área del pistón es de 25 cm². Determine la masa del pistón.

1-98 Un dispositivo de cilindro y pistón en posición vertical contiene un gas a una presión de 100 kPa. El pistón tiene una masa de 10 kg y un diámetro de 14 cm. Debe incrementarse la presión del gas colocando pesas sobre el pistón. Determine la presión atmosférica local y la masa de las pesas para duplicar la presión del gas al interior del cilindro.

Respuestas: 93.6 kPa, 157 kg

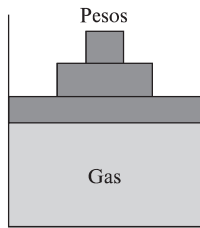


FIGURA P1-98

1-99 La fuerza generada por un resorte está dada por $F = kx$, donde k es la constante del resorte y x es la deflexión del resorte.

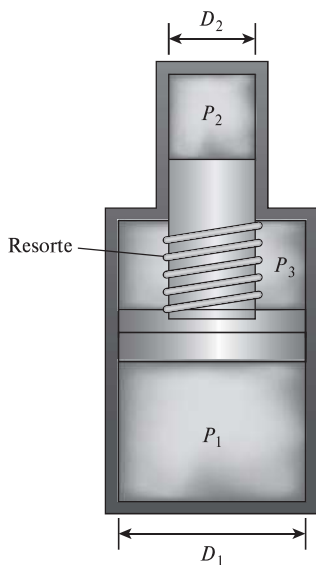


FIGURA P1-99

te. La constante del resorte de la figura P1-99 es 8 kN/cm. Las presiones son $P_1 = 5\ 000$ kPa, $P_2 = 10\ 000$ kPa y $P_3 = 1\ 000$ kPa. Si los diámetros del pistón son $D_1 = 8$ cm y $D_2 = 3$ cm, ¿cuánto se deflexionará el resorte? Respuesta: 1.72 cm

1-100 Un sistema de aire acondicionado requiere una sección de 35 m de largo de un ducto de 15 cm de diámetro que se tenderá bajo el agua. Determine la fuerza dirigida hacia arriba que el agua ejercerá en el ducto. Considere las densidades del agua como 1.3 kg/m³ y 1 000 kg/m³, respectivamente.

1-101 Con frecuencia, los globos se llenan con gas helio, porque sólo pesa la séptima parte de lo que pesa el aire bajo condiciones idénticas. La fuerza de flotación, que se puede expresar como $F_b = \rho_{aire}gV_{globo}$, impulsará de subida al globo. Si el globo tiene 12 m de diámetro y lleva dos personas de 85 kg cada una, determine su aceleración cuando se suelta por primera vez. Suponga que la densidad del aire es $\rho = 1.16$ kg/m³ e ignore el peso de sogas y la canastilla. Respuesta: 22.4 m/s²

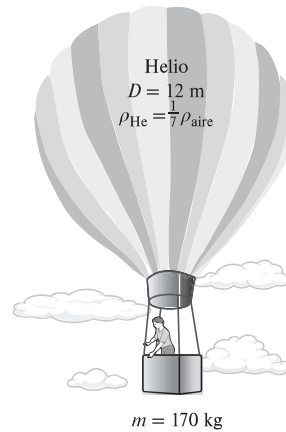



FIGURA P1-101

1-102  Reconsidere el problema 1-101. Usando un software apropiado investigue el efecto del número de personas que lleva el globo sobre la aceleración. Grafique la aceleración contra el número de personas y explique los resultados.

1-103 Determine la cantidad máxima de carga, en kg, que puede llevar el globo descrito en el problema 1-101.

Respuesta: 900 kg

1-104 La mitad inferior de un contenedor cilíndrico de 6 m de altura está llena de agua ($\rho = 1\ 000$ kg/m³), y la mitad superior está llena de aceite, que tiene una densidad relativa de 0.85. Determine la diferencia de presión entre las partes superior e inferior del cilindro. Respuesta: 54.4 kPa

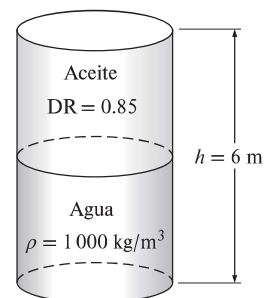


FIGURA P1-104

1-105 Una olla de presión cuece mucho más rápidamente que una olla ordinaria manteniendo una presión y una temperatura más altas en el interior. La tapa de una olla de presión está bien sellada, y el vapor sólo puede escapar por una abertura en medio de la tapa. Una pieza separada de metal, la válvula de purga, está encima de esta abertura, y evita que el vapor se escape hasta que la fuerza de la presión vence al peso de la válvula de purga. El escape periódico del vapor evita de esta manera cualquier acumulación peligrosa de presión, y mantiene la presión interna a un valor constante. Determine la masa de la válvula de purga de una olla de presión cuya presión de operación es 100 kPa manométrica y tiene un área de sección transversal de la abertura de 4 mm². Suponga una presión atmosférica de 101 kPa y dibuje el diagrama de cuerpo libre de la válvula de purga. *Respuesta:* 40.8 g

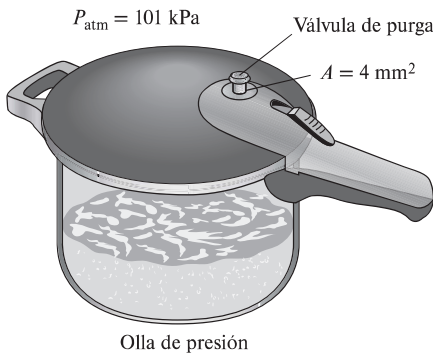


FIGURA P1-105

1-106 El piloto de un avión lee la altitud de 6 400 m y una presión absoluta de 45 kPa cuando vuela sobre una ciudad. Calcule la presión atmosférica en esa ciudad en kPa y en mmHg. Considere las densidades del aire y el mercurio como 0.828 kg/m³ y 13 600 kg/m³, respectivamente.



FIGURA P1-106

© Michał Krakowiak/Getty Images RF

1-107 Un tubo de vidrio está conectado a un tubo de agua, como se muestra en la figura P1-107. Si la presión de agua en la parte inferior del tubo de vidrio es de 107 kPa, y la presión atmosférica es de 99 kPa, determine cuánto subirá el agua en el tubo de vidrio, en m. Tome la densidad del agua como 1 000 kg/m³.

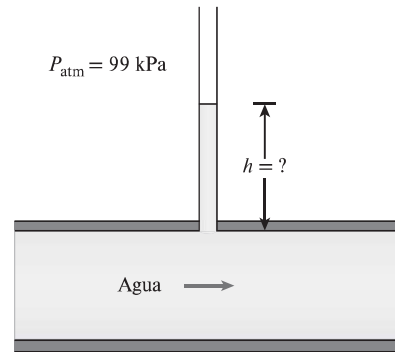


FIGURA P1-107

1-108E Un tubo en U tiene sus ramas abiertas a la atmósfera. Entonces, se vierten volúmenes iguales de agua y aceite ligero ($\rho = 49.3 \text{ lbm/pies}^3$) en las ramas. Una persona sopla por el lado del aceite del tubo en U, hasta que la superficie de contacto entre los dos líquidos se mueve hasta el fondo del tubo en U, por lo que los niveles de líquido en las dos ramas son iguales. Si la altura de líquido en cada rama es de 30 pulgadas, calcule la presión manométrica que ejerce la persona al soplar.

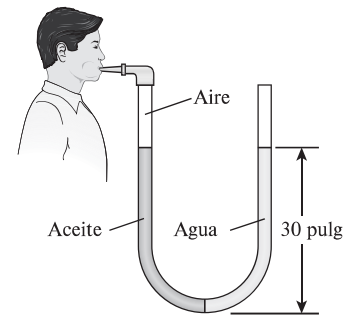


FIGURA P1-108E

1-109E Un tubo de agua está conectado a un manómetro con doble U, como se muestra en la figura P1-109E, en una ubicación en la que la presión atmosférica local es de 14.2 psia. Determine la presión absoluta en el centro del tubo.

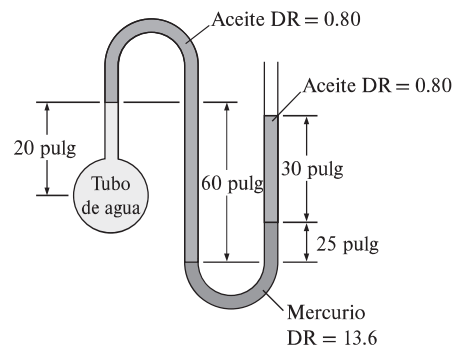


FIGURA P1-109E

1-110 Una línea de gasolina está conectada a un manómetro de presión a través de un manómetro con doble U, tal como se muestra en la figura P1-110. Si la lectura del manómetro de presión es de 370 kPa, determine la presión manométrica de la línea de gasolina.

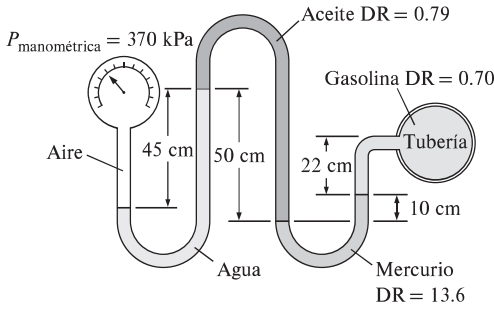


FIGURA P1-110

1-111 Repita el problema 1-110 para un manómetro de presión de 180 kPa.

1-112 Cuando se miden diferencias de presión pequeñas con un manómetro, a menudo uno de sus brazos se inclina para mejorar la precisión de la lectura. (La diferencia de presión sigue siendo proporcional a la distancia vertical y no a la longitud del tubo.) Se va a medir la presión del aire en un ducto circular con un manómetro cuyo brazo abierto está inclinado 45° con respecto a la horizontal, como se muestra en la figura P1-112. La densidad del líquido en el manómetro es 0.81 kg/L, y la distancia vertical entre los niveles de fluido en los dos brazos del manómetro es de 12 cm. Determine la presión manométrica del aire en el ducto y en la columna de fluido del brazo inclinado sobre el nivel de fluido del brazo vertical.

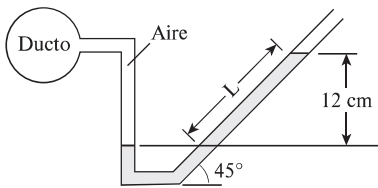


FIGURA P1-112

1-113 Con frecuencia se utilizan transductores de presión para medir presión mediante la generación de señales analógicas por lo general en el rango de 4 mA a 20 mA o 0 V-cd a 10 V-cd en respuesta a una señal aplicada. El sistema cuyo esquema aparece en la figura P1-113 se puede usar para calibrar transductores de presión. Se llena un recipiente rígido con aire presurizado, y el manómetro conectado mide la presión. Con una válvula se regula la presión en el recipiente. La presión y la señal eléctrica se miden al mismo tiempo con varios ajustes, y los resultados se tabulan. Para la serie de mediciones dada, obtenga la curva de calibración en la forma de $P = al + b$, donde a y b son constantes, y calcule la presión que corresponde a una señal de 10 mA.

Δh , mm	28.0	181.5	297.8	413.1	765.9
I , mA	4.21	5.78	6.97	8.15	11.76
Δh , mm	1027	1149	1362	1458	1536
I , mA	14.43	15.68	17.86	18.84	19.64

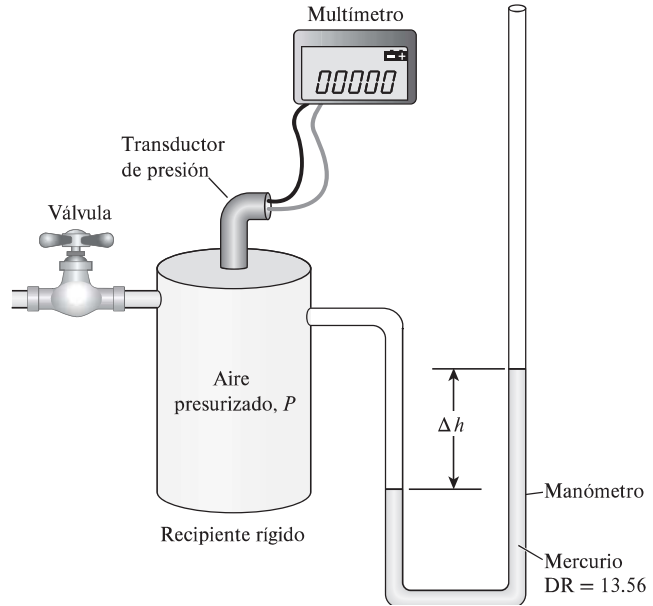


FIGURA P1-113

1-114 Considere el flujo de aire a través de un turbina de viento cuyas aspas barren un área de diámetro D (en m). La velocidad promedio del aire a través del área barrida es V (en m/s). Basado en las unidades de las cantidades implicadas, demuestre que la velocidad de flujo de la masa de aire (en kg/s) a través del área barrida es proporcional a la densidad del aire, la velocidad del viento y el cuadrado del diámetro del área barrida.

1-115 La fuerza de arrastre que ejerce el aire sobre un automóvil depende de un coeficiente adimensional de arrastre, la densidad del aire, la velocidad del auto y el área frontal del auto. Es decir, $F_D = \text{función}(C_{\text{arrastre}}, A_{\text{frontal}}, \rho, V)$. Con base solamente en consideraciones de unidades, obtenga una relación para la fuerza de arrastre.

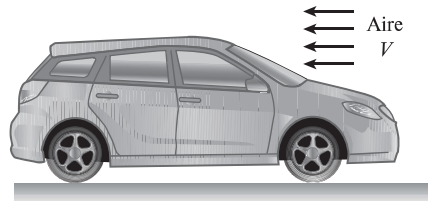


FIGURA P1-115


1-116E Se sabe que el aire frío se siente mucho más frío cuando hay viento que lo que marca el termómetro debido al "efecto de enfriamiento" del viento. Este efecto se debe al incremento

del coeficiente de transferencia de calor por convección con la velocidad del aire incrementada. La *temperatura de enfriamiento por viento equivalente* en °F está dada por [ASHRAE, Handbook of Fundamentals (Atlanta, GA, 1993, pág. 8.15)]

$$T_{\text{equiv}} = 91.4 - (91.4 - T_{\text{ambiente}}) \times (0.475 - 0.0203V + 0.304\sqrt{V})$$

donde V es la velocidad del viento en mi/h y T_{ambiente} es la temperatura del aire ambiente en °F con aire en calma, el cual se considera a velocidades hasta de 4 mi/h. La constante 91.4 °F que aparece en la ecuación es la temperatura media de la piel de una persona en reposo en un ambiente confortable. La temperatura T_{ambiente} con viento a una velocidad V se sentirá tan frío como la temperatura T_{equiv} con aire en calma. Utilizando factores de conversión apropiados, obtenga una relación equivalente en unidades SI donde V sea la velocidad del viento en km/h y T_{ambiente} sea la temperatura del aire ambiente en °C.

$$\text{Respuesta: } T_{\text{equiv}} = 33.0 - (33.0 - T_{\text{ambiente}}) \times (0.475 - 0.0126V + 0.240\sqrt{V})$$

1.117E  Reconsidere el problema 1.116E. Utilizando un software apropiado, grafique las temperaturas de enfriamiento por viento equivalentes en °F en función de la velocidad del viento en el rango de 4 a 40 mph a las temperaturas ambiente de 20, 40 y 60 °F. Analice los resultados.

Problemas de examen de fundamentos de ingeniería

1.118 Durante un proceso de calentamiento, la temperatura de un objeto se eleva 10 °C. Esta elevación de la temperatura equivale a una elevación de la temperatura de

- a) 10 °F b) 42 °F c) 18 K
d) 18 R e) 283 K

1.119 Una manzana pierde 3.6 kJ de calor por °C de reducción de su temperatura. La cantidad de pérdida de calor de la manzana por °F de reducción de su temperatura es

- a) 0.5 kJ b) 1.8 kJ c) 2.0 kJ
d) 3.6 kJ e) 6.5 kJ

1-120 Al nivel de mar, el peso de 1 kg masa en unidades SI es 9.81 N. El peso de una lb masa en unidades inglesas es

- a) 1 lbf b) 9.81 lbf c) 32.2 lbf
d) 0.1 lbf e) 0.031 lbf

1-121 Un pez nada 5 m bajo la superficie del agua. El aumento en la presión que se ejerce sobre el pez, al zambullirse hasta una profundidad de 25 m bajo la superficie, es

- a) 196 Pa b) 5 400 Pa c) 30 000 Pa
d) 196 000 Pa e) 294 000 Pa

1-122 Con un barómetro se miden las presiones atmosféricas en la azotea y al pie de un edificio, y resultan 96.0 y 98.0 kPa. Si la densidad del aire es 1.0 kg/m³, la altura del edificio es

- a) 17 m b) 20 m c) 170 m
d) 204 m e) 252 m

1-123 Considere una piscina de 2.5 m de profundidad. La diferencia de presión entre la parte superior y el fondo de la piscina es

- a) 2.5 kPa b) 12 kPa c) 19.6 kPa
d) 24.5 kPa e) 250 kPa

Problemas de diseño y ensayo

1-124 Escriba un ensayo sobre los distintos medidores de temperatura. Explique el principio de funcionamiento de cada uno, sus ventajas y desventajas, su costo y el intervalo en el que se aplica. ¿Qué instrumento recomendaría para usar en los siguientes casos: tomar la temperatura de pacientes en un consultorio médico, vigilar las variaciones de temperatura en varios lugares del bloque del motor de un automóvil y vigilar la temperatura en el hogar de la caldera en una central eléctrica?

1-125 Escriba un ensayo sobre los distintos medidores de masa y volumen que se han usado en la historia. También, explique el desarrollo de las unidades modernas de masa y volumen.