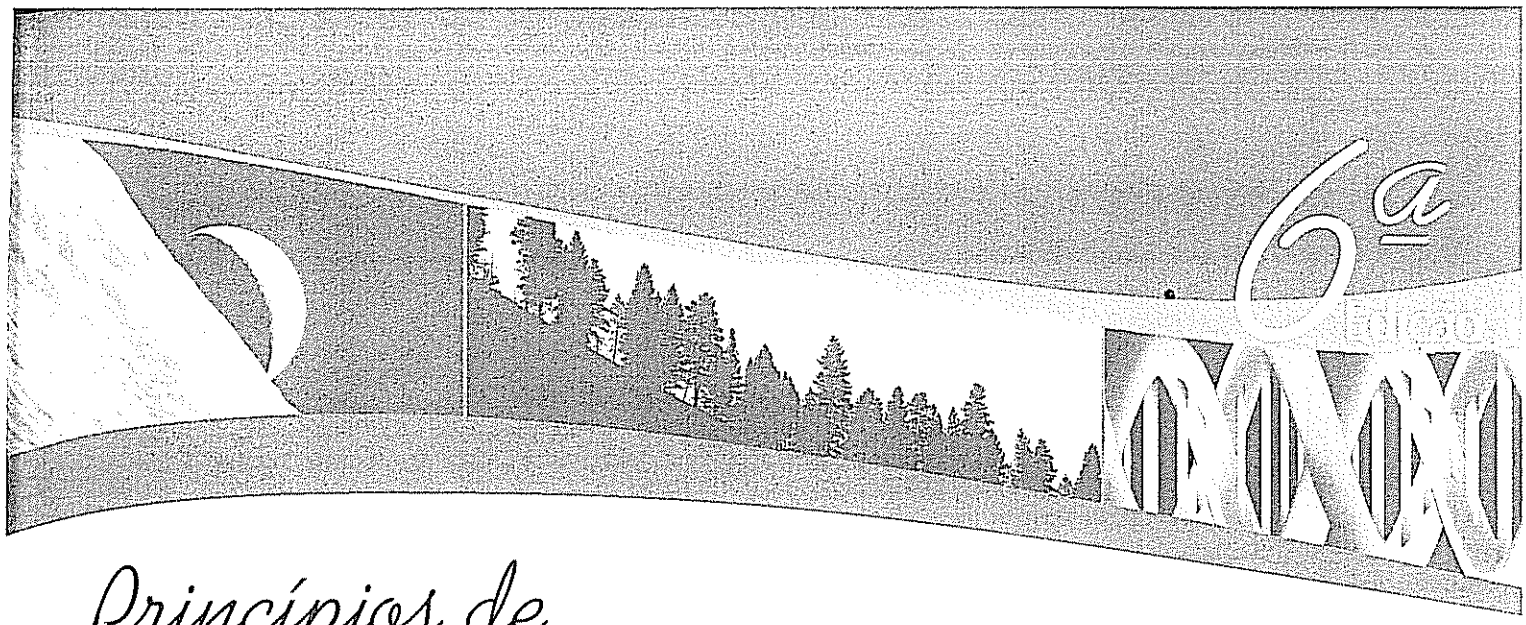


6ª edição

Princípios de Termodinâmica para Engenharia

MICHAEL J. MORAN

The Ohio State University

HOWARD N. SHAPIRO

Wayne State University

Tradução e Revisão Técnica

Gisele Maria Ribeiro Vieira, D. Sc.
Departamento de Engenharia Mecânica
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ

gen | LTC

621.1021
F981
Ex2

Fatores de Conversão

Massa e Massa Específica

1 kg = 2,2046 lb
1 g/cm^3 = 10^3 kg/m^3
1 g/cm^3 = 62,428 lb/ft^3
1 lb = 0,4536 kg
1 lb/ft^3 = 0,016018 g/cm^3
1 lb/ft^3 = 16,018 kg/m^3

Comprimento

1 cm = 0,3937 in
1 m = 3,2808 ft
1 in = 2,54 cm
1 ft = 0,3048 m

Velocidade

1 km/h = 0,62137 milha/h
1 milha/h = 1,6093 km/h

Volume

1 cm^3 = 0,061024 in^3
1 m^3 = 35,315 ft^3
1 L = 10^{-3} m^3
1 L = 0,0353 ft^3
1 in^3 = 16,387 cm^3
1 ft^3 = 0,028317 m^3
1 gal = 0,13368 ft^3
1 gal = $3,7854 \times 10^{-3}$ m^3

Força

1 N = 1 kg · m/s^2
1 N = 0,22481 lbf
1 lbf = 32,174 lb · ft/s^2
1 lbf = 4,4482 N

Pressão

1 Pa = 1 N/m^2
= $1,4504 \times 10^{-4}$ lbf/in^2
1 bar = 10^5 N/m^2
1 atm = 1,01325 bar
1 lbf/in^2 = 6894,8 Pa
1 lbf/in^2 = 144 lbf/ft^2
1 atm = 14,696 lbf/in^2

UNIFEMA
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

Energia e Energia Específica

1 J = 1 N · m = 0,73756 ft · lbf
1 kJ = 737,56 ft · lbf
1 kJ = 0,9478 Btu
1 kJ/kg = 0,42992 Btu/lb
1 ft · lbf = 1,35582 J
1 Btu = 778,17 ft · lbf
1 Btu = 1,0551 kJ
1 Btu/lb = 2,326 kJ/kg
1 kcal = 4,1868 kJ

Taxa de Transferência de Energia

1 W = 1 J/s = 3,413 Btu/h
1 kW = 1,341 HP
1 Btu/h = 0,293 W
1 hp = 2545 Btu/h
1 hp = 550 ft · lbf/s
1 hp = 0,7457 kW

Calor Específico

1 kJ/kg · K = 0,238846 Btu/lb · °R
1 kcal/kg · K = 1 Btu/lb · °R
1 Btu/lb · °R = 4,1868 kJ/kg · K

Constantes

Constante Universal dos Gases

$$\overline{R} = \begin{cases} 8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 1545 \text{ ft} \cdot \text{lbf/lbmol} \cdot {}^\circ\text{R} \\ 1,986 \text{ Btu/lbmol} \cdot {}^\circ\text{R} \end{cases}$$

Aceleração-Padrão da Gravidade

$$g = \begin{cases} 9,80665 \text{ m/s}^2 \\ 32,174 \text{ ft/s}^2 \end{cases}$$

Pressão Atmosférica Padrão

$$1 \text{ atm} = \begin{cases} 1,01325 \text{ bar} \\ 14,696 \text{ lbf/in}^2 \\ 760 \text{ mm Hg} = 29,92 \text{ in Hg} \end{cases}$$

Relações entre Temperaturas

$T(^\circ\text{R}) = 1,8\ T(\text{K})$
$T(^\circ\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$
$T(^\circ\text{F}) = T(^\circ\text{R}) - 459,67$

Prefácio

A consideração relativa à capacidade de os corpos quentes produzirem trabalho fez com que a termodinâmica se tornasse uma área formal de estudo no século XIX. Durante todo o século XX, aplicações da termodinâmica na engenharia ajudaram a abrir caminho para melhorias relativas ao bem-estar humano, com avanços em áreas essenciais, tais como transporte, geração de energia e sistemas de condicionamento de ar (aquecimento/resfriamento) de edificações. No século XXI, a termodinâmica continuará fornecendo conceitos e métodos essenciais para a detecção de questões fundamentais para a sociedade.

Entre os assuntos do século XXI em que a termodinâmica contribuirá significativamente estão incluídos o uso de combustíveis fósseis de modo mais eficaz, o apoio a tecnologias que envolvam energia renovável e o desenvolvimento de combustíveis mais eficientes para os sistemas de transporte. A termodinâmica terá papel em outras áreas críticas, atuando na atenuação do aquecimento global, da poluição atmosférica e da água. Também estão surgindo aplicações na bioengenharia, na nanotecnologia e em sistemas biomédicos. Este livro fornece as ferramentas necessárias para especialistas que trabalham em tais campos. Para não-especialistas, o livro fornece o conhecimento para a tomada de decisões que envolvam tecnologia relacionada à termodinâmica — no trabalho e como cidadãos informados.

A sexta edição leva em conta muitas dessas novas aplicações, mantendo a organização básica e o nível das edições anteriores. Foram inseridas diversas melhorias para tornar a aprendizagem do estudante mais eficaz. Entre essas, estão novos elementos de texto e aspectos particulares de projeto, que ajudam os estudantes a melhor compreender e aplicar o assunto em estudo. Com esta edição, continuamos a aplicar nossa pedagogia eficaz, mediante o uso de apresentações claras e concisas em um nível apropriado para os primeiros anos da faculdade, profundo desenvolvimento dos fundamentos e as mais recentes aplicações na engenharia.

UNIFEI
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

Características Essenciais do Texto

Este texto mantém as características essenciais que o tornaram líder global em educação com relação à termodinâmica aplicada à engenharia.

- Desenvolve uma compreensão intuitiva da termodinâmica por meio do foco em interpretações físicas. Veja, por exemplo, a introdução ao balanço de energia para volumes de controle, na Seção 4.4, e a discussão dos corolários de Carnot, na Seção 5.6.2.
- Desenvolve os princípios básicos em um texto de leitura agradável e cativante, usando aplicações de interesse contemporâneo. Veja, por exemplo, *Bio...conexões* nas Seções 1.2.2, 4.3.2 e 4.9; *Energia e Meio Ambiente* nas Seções 2.1.1, 2.6.2 e 5.7.2 e *Novos Horizontes* nas Seções 2.2, 3.13.1 e 4.5.2.
- Ensina os estudantes a modelarem sistemas e resolverem problemas de engenharia que envolvam a termodinâmica. Nossa metodologia também estimula o raciocínio sistemático e ajuda os estudantes a reduzirem seus erros. Veja a Seção 1.9 e todos os problemas resolvidos.
- Apresenta uma ampla seleção de problemas em cada capítulo, organizada para auxiliar os estudantes a desenvolverem habilidades necessárias à engenharia, por meio de três formas:
  - **Conceitual.** Veja *Exercícios: pontos de reflexão para os engenheiros*.
  - **Construção de Habilidades.** Veja *Problemas: desenvolvendo habilidades para a engenharia*.
  - **Projeto.** Veja *Projetos e problemas em aberto: explorando a prática de engenharia*.

  Muitos dos problemas conceituais e de projeto tiveram origem nas cativantes discussões intituladas *Bio...conexões, Energia e Meio Ambiente* e *Novos Horizontes*, apresentadas ao longo do texto.
- Prepara os estudantes para o uso da termodinâmica na prática de engenharia através dos seguintes itens:
  - **Sólido desenvolvimento das áreas de aplicação.** Incluídos nos Caps. 8 a 14 estão amplos desenvolvimentos de ciclos de potência e de refrigeração, psicrometria, e combustão. A disposição destes assuntos permite que os professores possam escolher o nível mais adequado para os seus estudantes, que pode ir de breves introduções a estudos mais profundos.
  - **Ênfase em projeto de engenharia e análise.** Material específico relativo à questão de projeto está incluído na Seção 1.8: *Projeto de Engenharia e Análise* e na Seção 7.7: *Termoeconomia*.

Cada capítulo fornece cuidadosas sugestões de *Projetos e Problemas em Aberto* que permitem aos estudantes desenvolver o senso crítico na prática de engenharia e fortalecer uma variedade de habilidades tais como criatividade, capacidade de formular e solucionar problemas, capacidade de julgar e capacidade de expressar idéias

- Emprega um desenvolvimento eficaz da segunda lei da termodinâmica. O texto destaca o *balanço de entropia* (Cap. 6), reconhecido mundialmente como o caminho mais eficiente para os estudantes aprenderem como aplicar a segunda lei. A apresentação da *análise exergética* (Caps. 7 e 13) também se tornou um modelo recente para a aprendizagem do assunto.
- Possibilita o uso de programas computacionais como modo de auxiliar na solução de problemas para um aprendizado mais profundo. No final de cada capítulo, os problemas identificados com um ícone de computador indicam a possibilidade de uso de programas computacionais apropriados. Todos esses problemas podem ser resolvidos por meio, por exemplo, do *Interactive Thermodynamics (IT)* ou do *Engineering Equation Solver (EES)*, que são programas computacionais interativos. Dicas para o uso de programas desse tipo, tal como o *IT*, são apresentadas em diversos locais ao longo do texto, começando na Seção 3.7. Tal como nas edições anteriores, a apresentação do texto é feita de uma forma cuidadosamente estruturada para que os professores que desejem omitir o uso de programas computacionais possam fazê-lo sem que se perca a continuidade do estudo.
- Estimula a flexibilidade nas unidades. O texto permite uma apresentação no Sistema Internacional de Unidades (SI) ou uma apresentação mista, envolvendo o Sistema Inglês e o SI. O uso cuidadoso das unidades e a aplicação sistemática dos fatores de conversão de unidades é enfatizado em todo o texto. Uma relação útil de fatores de conversão é apresentada no início do livro, para facilitar o acesso.
- Fornece muitos textos característicos que comprovadamente contribuem para um melhor aprendizado do estudante. Sabe-se que o primeiro curso de termodinâmica abrange muita matéria em um tempo curto. Para ajudar os estudantes a aprenderem e estudarem a matéria de maneira mais eficaz, foi incluída uma variedade de características para auxiliá-los. Essas características foram inseridas no início do livro, sob o título "Como Usar Este Livro de Forma Eficaz".

Novidades da Sexta Edição

- Cada capítulo inicia com um conjunto de **Objetivos de Aprendizagem**.
- Cada exemplo resolvido reforça habilidades específicas relacionadas com os objetivos de aprendizagem e é concluído com uma lista das **Habilidades Desenvolvidas** com a resolução do exemplo.
- Cada exemplo resolvido é seguido de um **Teste-Relâmpago** que possibilita ao estudante uma verificação imediata da compreensão de uma importante habilidade.
- Uma lista de **Equações Principais** foi incluída no final de cada capítulo para facilitar a referência e auxiliar no estudo.
- Novos pontos importantes e cativantes foram introduzidos ao longo do livro, denominados **Bio... conexões**, **Energia e Meio Ambiente** e **Novos Horizontes**. Esses pontos abrangem aplicações contemporâneas na biomedicina, na bioengenharia, no aproveitamento de recursos energéticos, na engenharia ambiental e em tecnologias emergentes.
- Os **problemas no final dos capítulos** foram **substancialmente atualizados**, considerando-se os três grupos em que estão dispostos: conceitual, construção de habilidades e projeto. Alguns foram construídos com base nas cativantes discussões, intituladas *Bio... conexões, Energia e Meio Ambiente* e *Novos Horizontes*, apresentadas ao longo do texto. Os problemas relativos à construção de habilidades são classificados sob títulos para facilitar sua seleção por professores e estudantes. Essa gama de problemas abrange desde exercícios para criar confiança, os quais ilustram conceitos básicos, até problemas mais desafiadores, que podem envolver diversos componentes e requerer um raciocínio mais elaborado. Assim como nas edições anteriores, uma quantidade generosa de problemas é apresentada.
- **Conteúdos novos e revistos testados em sala de aula** contribuem para a aprendizagem do estudante e a maior eficácia do professor:
  - A discussão relativa à medida de pressão foi expandida, com novos conteúdos sobre manômetros e barômetros na Seção 1.6.1.
  - Foi acrescentada a discussão sobre troca *líquida* radiante entre duas superfícies na Seção 2.4.2.

- O Exemplo 3.6 considera uma situação em que é medido o valor calórico do óleo de cozinha
- Mais considerações detalhadas sobre a modelagem de bocais e difusores, turbinas, compressores e bombas, trocadores de calor e dispositivos de estrangulamento foram fornecidas nas Seções 4.6 a 4.10
- O Exemplo 4.6 considera a análise de um sistema de bombeamento.
- Um *enunciado da segunda lei referente a entropia* foi introduzido na Seção 5.2.3. Isso permite que os professores possam escolher uma abordagem axiomática da segunda lei, suprimindo muitos detalhes do Cap. 5 e, se desejarem, indo diretamente aos desenvolvimentos relativos a entropia e ao balanço de entropia no Cap. 6.
- A discussão sobre entropia e probabilidade foi expandida com novos conteúdos nas Seções 6.1.3 e 6.8.2, de modo a fornecer uma breve introdução relacionada à tecnologia que envolve a análise microscópica.
- Com o foco em interpretações físicas e dando ênfase à relação da exergia com o uso de combustível fóssil, a introdução à análise exergética, nas Seções 7.1 a 7.5, foi feita em uma forma mais compreensível e abreviada.
- *Revisões* sobre o modelo de gás ideal foram incluídas em locais estratégicos na Seção 6.5 (Tabela 6.1) e na Seção 9.1 (Tabela 9.1).

- Em resposta às necessidades dos estudantes e dos usuários em geral, foram incluídas **mudanças testadas em sala de aula**. Muitas contribuem para uma apresentação de certos conteúdos *em um momento mais adequado*.
  - Para enfatizar o papel central de uma modelagem eficiente na análise de engenharia, foi adotada a expressão mais descritiva *Modelo de Engenharia* em nossa metodologia de solução (Seção 1.9), no lugar do termo *Hipóteses*.
  - A introdução aos *processos de quase-equilíbrio* passou do Cap. 1 para a Seção 2.2.5.
  - A introdução aos *ciclos termodinâmicos* passou do Cap. 1 para a Seção 2.6.
  - A discussão sobre *fase* e *substância pura* passou do Cap. 1 para a Seção 3.1.1.
  - As discussões sobre *termômetro a gás de volume constante* e *escala de temperatura de um gás* passaram do Cap. 1 para a Seção 5.8.2.
  - O desenvolvimento da *integral de Clausius* passou do Cap. 6 para a Seção 5.11. Isto traz todo o conteúdo introdutório de ciclo relativo à segunda lei para o Cap. 5 e permite que o Cap. 6 lide exclusivamente com entropia e balanço de entropia.

Suplementos para Professores e Estudantes

Encontram-se disponíveis no site da LTC, www.ltceditora.com.br, materiais suplementares. Para baixar estes materiais, na página do livro, clique na aba Suplementos. Você será automaticamente direcionado ao portal de relacionamentos e receberá instruções de como proceder.

Cursos para Aplicação

Este livro pode ser aplicado a diferentes cursos de graduação, tais como física, química, engenharia mecânica, engenharia química, engenharia de materiais, engenharia elétrica, entre outros. Pode ser utilizado também, de forma mais profunda, em alguns cursos de pós-graduação que envolvem o assunto. No curso de graduação em engenharia mecânica, por exemplo, pode ser utilizado como livro-texto da disciplina Termodinâmica. Esta disciplina pode ser ministrada em um semestre, em forma condensada, ou em dois semestres. Além disso, pode servir de apoio a outras disciplinas do curso, tais como Sistemas Térmicos, Máquinas Térmicas, Refrigeração e Climatização.

Agradecimentos

Agradecemos aos muitos usuários de nossas edições anteriores, estabelecidos em mais de 200 universidades e faculdades nos Estados Unidos e no Canadá, bem como em todo o mundo, que contribuíram para esta revisão através de seus comentários e críticas construtivas. Devemos agradecimentos especiais a Stephen McClain, da University of Alabama, em Birmingham, e a Margaret Drake, da Ohio State University, pelas contribuições com relação aos problemas desta edição. Agradecemos

também a Daren Daugaard, da University of Texas em San Antonio, pela ajuda no desenvolvimento do curso *WileyPLUS*.

Outros que contribuíram para o desenvolvimento desta edição estão listados a seguir. Apreciamos profundamente as contribuições recebidas.

John Abraham, *Purdue University*
Suresh Aggarwal, *University of Illinois, Chicago*
Gregory A. Buck, *South Dakota School of Mines and Technology*
Seth Butler, *Ohio State University*
Sahraoui Chaieb, *University of Illinois, Urbana Champaign*
Ashley Emery, *University of Washington*
David Erickson, *Cornell University*
Andrei G. Fedorov, *Georgia Institute of Technology*
Donald L. Fenton, *Kansas State University*
Mohamed A. Gaballa, *University of Arizona*
Afshin Ghajar, *Oklahoma State University*
S. Mostafa Ghiaasiaan, *Georgia Institute of Technology*
Sarah Gong, *University of Wisconsin, Milwaukee*
Matthew R. Jones, *Brigham Young University*
A. Murty Kanury, *Oregon State University*
Amir Karimi, *University of Texas, San Antonio*
Andrew Kean, *Cal Poly San Luis Obispo*
Joseph Kmec, *Purdue University*
Wayne B. Krause, *South Dakota School of Mines and Technology*
John R. Lloyd, *Michigan State University*
Edward Lumsdaine, *Michigan Technological University*
Adam Mahaffey, *Ohio State University*
Sandip Mazumder, *Ohio State University*
Donna J. Michalek, *Michigan Technological University*
Sohail Murad, *University of Illinois, Chicago*
Keiko Nomura, *University of California, San Diego*
Laurent Pilon, *University of California, Los Angeles*
R. P. Roy, *Arizona State University, Tempe*
Harry J. Sauer, *University of Missouri, Rolla*
Brian Savilonis, *Worcester Polytechnic Institute*
Enrico Sciubba, *University of Rome (Italy)*
Ahmad K. Sleiti, *University of Central Florida*
Paul Sojka, *Purdue University*
Charles Stanier, *University of Iowa*
George Tsatsaronis, *Technical University of Berlin (Alemanha)*
Etim Ubong, *Kettering University*
Antonio Valero, *University of Zargoza (Espanha)*
Jon Van Gerpen, *University of Idaho*
R. J. Watkins, *United States Naval Academy*
Ebtisam S. Wilkins, *University of New Mexico, Albuquerque*
Nathan Williams, *United States Naval Academy*
Nicholas Zabaras, *Cornell University*

Também reconhecemos os esforços de diversos membros da John Wiley and Sons, Inc., organização que contribuiu com seus talentos e sua energia para esta edição. Aplaudimos o profissionalismo e o compromisso de todos eles.

Sentimo-nos extremamente gratificados pela boa acolhida deste livro, e nos empenhamos para torná-lo ainda mais eficaz nesta sexta edição. Como sempre, comentários, críticas e sugestões dos leitores serão muito bem-vindos. Finalmente, deve ser do interesse de muitos leitores ter conhecimento de que, durante o desenvolvimento desta edição, Howard Shapiro passou a trabalhar na *Wayne State University*, onde atua como vice-presidente associado nos Programas de Graduação e Educação Geral e como Professor de Engenharia Mecânica.

Michael J. Moran
moran.4@osu.edu

Howard N. Shapiro
hshapiro@wayne.edu

Comentários e Sugestões

Apesar dos melhores esforços dos autores, da tradutora, do editor e dos revisores, é inevitável que surjam erros no texto. Assim, são bem-vindas as comunicações de usuários sobre correções ou sugestões referentes ao conteúdo ou ao nível pedagógico que auxiliem o aprimoramento de edições futuras. Encorajamos os comentários dos leitores que podem ser encaminhados à LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., uma editora integrante do GEN | Grupo Editorial Nacional, no endereço: Travessa do Ouvidor 11 – Rio de Janeiro, RJ – CEP 20040-040 ou ao endereço eletrônico ltc@grupogen.com.br.

UNIFENAS - Centro Universitário
de Alfenas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

Sumário

1 Conceitos Introdutórios e Definições 1

1.1 Usando a Termodinâmica 2
1.2 Definindo Sistemas 2
1.3 Descrevendo Sistemas e Seus Comportamentos 5
1.4 Medindo Massa, Comprimento, Tempo e Força 7
1.5 Volume Específico 9
1.6 Pressão 10
1.7 Temperatura 13
1.8 Projeto de Engenharia e Análise 16
1.9 Metodologia para a Solução de Problemas de Termodinâmica 17
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 20

2 Energia e a Primeira Lei da Termodinâmica 27

2.1 Revendo os Conceitos Mecânicos de Energia 28
2.2 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Trabalho 31
2.3 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Energia 40
2.4 Transferência de Energia por Calor 40
2.5 Contabilizando a Energia: Balanço de Energia para Sistemas Fechados 44
2.6 Análise de Energia para Ciclos 55
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 57

3 Avaliando Propriedades 69

3.1 Conceitos Introdutórios 70
Avaliando Propriedades: Considerações Gerais 71
3.2 Relação p—v—T 71
3.3 Estudando Mudança de Fase 74
3.4 Obtendo Propriedades Termodinâmicas 76
3.5 Avaliando Pressão, Volume Específico e Temperatura 77
3.6 Avaliando a Energia Interna Específica e a Entalpia 82
3.7 Avaliando Propriedades Utilizando Programas de Computador 84
3.8 Aplicando o Balanço de Energia Usando Propriedades Tabeladas e Programas de Computador 85
3.9 Apresentando os Calores Específicos C_v e C_p 90
3.10 Avaliando Propriedades de Líquidos e Sólidos 91
3.11 Diagrama Generalizado de Compressibilidade 94
Avaliando Propriedades com o Uso do Modelo de Gás Ideal 99
3.12 Apresentando o Modelo de Gás Ideal 99
3.13 Energia Interna, Entalpia e Calores Específicos de Gases Ideais 102
3.14 Aplicando o Balanço de Energia Utilizando Tabelas de Gás Ideal, Calores Específicos Constantes e Programas de Computador 104
3.15 Relações de Processos Politrópicos 111
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 113

4 Análise do Volume de Controle Utilizando Energia 125

4.1 Conservação de Massa para um Volume de Controle 126
4.2 Formas do Balanço de Massa em Termos de Taxa 127
4.3 Aplicações do Balanço da Taxa de Massa 129
4.4 Conservação de Energia para um Volume de Controle 133
4.5 Análise de Volumes de Controle em Regime Permanente 135
4.6 Bocais e Difusores 138
4.7 Turbinas 140
4.8 Compressores e Bombas 142
4.9 Trocadores de Calor 146
4.10 Dispositivos de Estrangulamento 151
4.11 Integração de Sistemas 153
4.12 Análise Transiente 156
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 165

5 A Segunda Lei da Termodinâmica 181

5.1 Introduzindo a Segunda Lei 182
5.2 Enunciados da Segunda Lei 184
5.3 Identificando Irreversibilidades 187
5.4 Interpretando o Enunciado de Kelvin-Planck 190
5.5 Aplicando a Segunda Lei a Ciclos Termodinâmicos 191
5.6 Aspectos da Segunda Lei de Ciclos de Potência Interagindo com Dois Reservatórios 191
5.7 Aspectos da Segunda Lei Relativos aos Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor Interagindo com Dois Reservatórios 192
5.8 As Escalas de Temperatura Kelvin e Internacional 195
5.9 Medidas de Desempenho Máximo para Ciclos Operando entre Dois Reservatórios 197
5.10 Ciclo de Carnot 202
5.11 A Desigualdade de Clausius 204
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 206

6 Utilizando a Entropia 217

6.1 Entropia — Uma Propriedade do Sistema 218
6.2 Obtendo Valores de Entropia 219
6.3 Utilizando as Equações $T\,dS$ 222
6.4 Variação de Entropia para uma Substância Incompressível 223
6.5 Variação de Entropia de um Gás Ideal 223
6.6 Variação de Entropia em Processos Internamente Reversíveis 226
6.7 Balanço de Entropia para Sistemas Fechados 229
6.8 Sentido dos Processos 235

6.9 Balanço da Taxa de Entropia para Volumes de Controle 239
6.10 Balanços de Taxas para Volumes de Controle em Regime Permanente 240
6.11 Processos Isoentrópicos 247
6.12 Eficiências Isoentrópicas de Turbinas, Bocais, Compressores e Bombas 252
6.13 Calor e Trabalho em Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente 259
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 263

7 Análise da Exergia 281
7.1 Apresentação da Exergia 282
7.2 Conceituação de Exergia 282
7.3 Exergia de um Sistema 284
7.4 Balanço de Exergia para Sistemas Fechados 289
7.5 Balanço da Taxa de Exergia para Volumes de Controle em Regime Permanente 296
7.6 Eficiência Exergética (ou da Segunda Lei) 306
7.7 Termoeconomia 311
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 316

8 Sistemas de Potência a Vapor 331
8.1 Modelagem dos Sistemas de Potência a Vapor 332
8.2 Análise dos Sistemas de Potência a Vapor — Ciclo de Rankine 333
8.3 Melhora do Desempenho — Superaquecimento e Reaquecimento 344
8.4 Melhora do Desempenho — Ciclo de Potência a Vapor Regenerativo 349
8.5 Outros Aspectos do Ciclo a Vapor 358
8.6 Estudo de Caso: Considerações sobre a Exergia de uma Planta de Potência a Vapor 360
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 367

9 Sistemas de Potência a Gás 377
Motores de Combustão Interna 378
9.1 Apresentação da Terminologia do Motor 378
9.2 Ciclo de Ar-Padrão Otto 379
9.3 Ciclo de Ar-Padrão Diesel 384
9.4 Ciclo de Ar-Padrão Dual 388
Instalações de Potência com Turbinas a Gás 390
9.5 Modelando Instalações de Potência com Turbinas a Gás 390
9.6 Ciclo de Ar-Padrão Brayton 391
9.7 Turbinas a Gás Regenerativas 400
9.8 Turbinas a Gás Regenerativas com Reaquecimento e Inter-Resfriamento 403
9.9 Turbinas a Gás para Propulsão de Aeronaves 412
9.10 Ciclo de Potência Combinado de Turbina a Gás e a Vapor 416
9.11 Ciclos Ericsson e Stirling 420
Escoamento Compressível através de Bocais e Difusores 421
9.12 Conceitos Preliminares do Escoamento Compressível 421
9.13 Análise do Escoamento Unidimensional Permanente em Bocais e Difusores 425
9.14 Escoamento de Gases Ideais com Calores Específicos Constantes em Bocais e Difusores 429
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 437

10 Sistemas de Refrigeração e de Bombas de Calor 449
10.1 Sistemas de Refrigeração a Vapor 450
10.2 Análise dos Sistemas de Refrigeração por Compressão de Vapor 452
10.3 Propriedades dos Refrigerantes 458
10.4 Sistemas de Compressão de Vapor em Cascata e em Multiestágio 459
10.5 Refrigeração por Absorção 461
10.6 Sistemas de Bombas de Calor 462
10.7 Sistemas de Refrigeração a Gás 464
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 469

11 Relações Termodinâmicas 477
11.1 Utilização das Equações de Estado 478
11.2 Relações Matemáticas Importantes 483
11.3 Desenvolvimento de Relações entre Propriedades 486
11.4 Cálculo das Variações de Entropia, Energia Interna e Entalpia 491
11.5 Outras Relações Termodinâmicas 499
11.6 Construção das Tabelas de Propriedades Termodinâmicas 504
11.7 Diagramas Generalizados para Entalpia e Entropia 508
11.8 Relações p—v—T para Misturas de Gases 514
11.9 Análise dos Sistemas Multicomponentes 518
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 528

12 Mistura de Gases Ideais e Aplicações à Psicrometria 539
Misturas de Gases Ideais: Considerações Gerais 540
12.1 Descrição da Composição da Mistura 540
12.2 Relacionando p, V e T para Misturas de Gases Ideais 543
12.3 Estimativa de U, H, S e Calores Específicos 544
12.4 Análise de Sistemas que Envolvem Misturas 546
Aplicações da Psicrometria 557
12.5 Apresentação dos Princípios da Psicrometria 558
12.6 Psicrômetros: Medição das Temperaturas de Bulbo Úmido e de Bulbo Seco 567
12.7 Cartas Psicrométricas 568
12.8 Análise de Processos de Condicionamento de Ar 569
12.9 Torres de Resfriamento 583
Resumo do Capítulo e Guia de Estudo 585

13 Misturas Reagentes e Combustão 597

Fundamentos de Combustão 598

13.1 Introdução à Combustão **598**

13.2 Conservação da Energia — Sistemas Reagentes **605**

13.3 Determinação da Temperatura Adiabática de Chama **616**

13.4 Células de Combustível **619**

13.5 Entropia Absoluta e Terceira Lei da Termodinâmica **621**

Exergia Química 628

13.6 Introdução à Exergia Química **628**

13.7 Exergia Química-Padrão **631**

13.8 Resumo de Exergia **634**

13.9 Eficiências Exergéticas (Segunda Lei) de Sistemas Reagentes **637**

Resumo do Capítulo e Guia de Estudo **640**

14 Equilíbrio de Fases e Químico 651

Fundamentos do Equilíbrio 652

14.1 Introduzindo Critérios de Equilíbrio **652**

14.2 Equação de Reação de Equilíbrio **656**

14.3 Cálculo de Composições de Equilíbrio **657**

14.4 Mais Exemplos da Utilização da Constante de Equilíbrio **665**

Equilíbrio de Fases 673

14.5 Equilíbrio entre Duas Fases de uma Substância Pura **674**

14.6 Equilíbrio de Sistemas Multicomponentes e Multifásicos **675**

Resumo do Capítulo e Guia de Estudo **679**

Apêndice Tabelas, Figuras e Diagramas 685

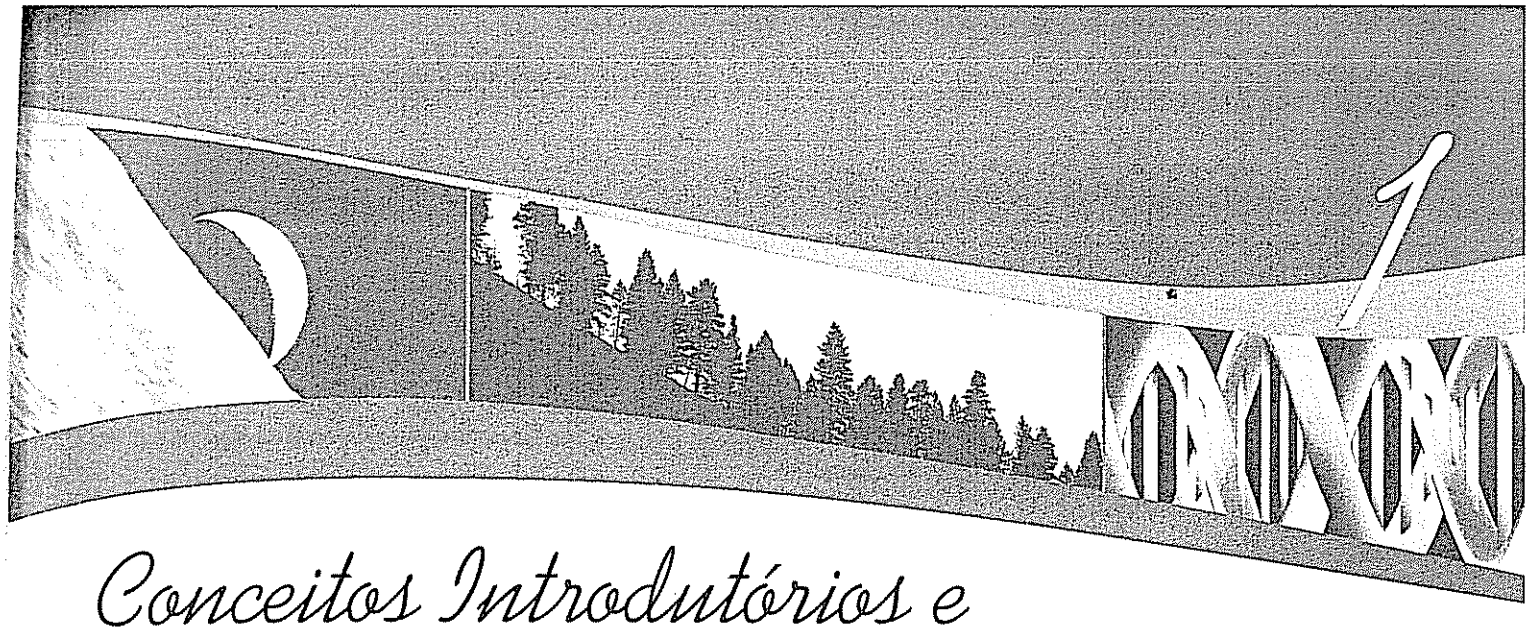
Índice de Tabelas em Unidades do SI **685**

Índice de Tabelas em Unidades Inglesas **733**

Índice de Figuras e Diagramas **781**

Respostas **793**

Índice **796**



Conceitos Introdutórios e Definições

Contexto de Engenharia

Embora aspectos da termodinâmica tenham sido estudados desde os tempos antigos, seu estudo formal começou nos primórdios do século XIX através da consideração relativa à capacidade de os corpos quentes produzirem trabalho. Hoje o escopo é mais abrangente. Atualmente a termodinâmica fornece conceitos e métodos essenciais para detectar questões críticas para o século XXI, tais como o uso de combustíveis fósseis de forma mais eficaz, o apoio a tecnologias envolvendo energia renovável e o desenvolvimento de mais combustíveis eficientes para os meios de transporte. Também são críticas as questões referentes às emissões de gases de efeito estufa e à poluição do ar e da água.

A termodinâmica é simultaneamente um ramo da física e das ciências da engenharia. O cientista está normalmente interessado em obter uma compreensão básica do comportamento físico e químico de quantidades fixas de matéria em repouso, e utiliza os princípios da termodinâmica para relacionar as propriedades da matéria. Os engenheiros estão geralmente interessados em estudar *sistemas* e como eles interagem com as suas *vizinhanças*. Assim, para facilitar, a termodinâmica abrange o estudo de sistemas que admitem fluxo de massa, incluindo bioengenharia e sistemas biomédicos.

O **objetivo** deste capítulo é o de apresentar ao leitor alguns dos conceitos e definições fundamentais usados no nosso estudo de termodinâmica aplicada à engenharia. Na maioria dos casos a apresentação é breve, e explicações adicionais podem ser encontradas nos capítulos subseqüentes.

Objetivos de Aprendizagem

Quando você completar o estudo deste capítulo estará apto a....

☑ demonstrar conhecimento de diversos conceitos fundamentais usados ao longo deste livro... incluindo sistema fechado, volume de controle, fronteira e vizinhanças, propriedade, estado, processo, a distinção entre propriedades extensivas e intensivas, e equilíbrio.

☑ aplicar as unidades SI e as unidades inglesas de Engenharia, incluindo as unidades para o volume específico, a pressão e a temperatura.

☑ trabalhar com as escalas de temperatura Kelvin, Rankine, Celsius e Fahrenheit.

☑ aplicar a metodologia de solução de problemas usada neste livro.

1.1 Usando a Termodinâmica

Os engenheiros utilizam os princípios extraídos da termodinâmica e de outras ciências da engenharia, tais como a mecânica dos fluidos e a transmissão de calor e massa, para analisar e projetar sistemas com o objetivo de atender às necessidades humanas. O amplo espectro de aplicações desses princípios está sugerido na Tabela 1.1, que lista algumas das áreas em que a termodinâmica aplicada à engenharia é relevante.

Os engenheiros buscam obter projetos otimizados e de melhor desempenho, medido por fatores como o aumento na produção de algum produto desejado, uma redução na demanda de um produto escasso, uma diminuição nos custos totais ou um menor impacto ambiental. Os princípios da termodinâmica aplicada à engenharia exercem papel importante no atendimento dessas metas.

1.2 Definindo Sistemas

Um passo importante em qualquer análise em engenharia consiste em descrever de forma precisa o que está sendo estudado. Em mecânica, se a trajetória de um corpo deve ser determinada, normalmente o primeiro passo é definir um *corpo livre* e identificar todas as forças exercidas por outros corpos sobre ele. A segunda lei do movimento de Newton é então aplicada. Na termodinâmica o termo *sistema* é usado para identificar o objeto da análise. Uma vez que o sistema é definido e as interações relevantes com os outros sistemas são identificadas, uma ou mais leis ou relações físicas são aplicadas.

sistema

O ***sistema*** é tudo aquilo que desejamos estudar. Ele pode ser tão simples como um corpo livre ou tão complexo como uma refinaria química inteira. Podemos desejar estudar uma quantidade de matéria contida em um tanque fechado e de paredes rígidas, ou considerar algo como o escoamento de gás natural em um gasoduto. A composição da matéria dentro de um sistema pode ser fixa ou variar em função de reações químicas ou nucleares. A forma ou o volume do sistema que está sendo analisado não é necessariamente constante, como no caso de um gás no interior de um cilindro comprimido por um pistão ou quando um balão é inflado.

vizinhanças
fronteira

Tudo o que é externo ao sistema é considerado parte das ***vizinhanças*** do sistema. O sistema é distinguido de suas vizinhanças por uma ***fronteira*** especificada, que pode estar em repouso ou em movimento. Você verá que as interações entre o sistema e suas vizinhanças, que ocorrem ao longo da fronteira, representam uma parte importante na termodinâmica aplicada à engenharia.

Dois tipos básicos de sistema são estudados neste livro. Eles são denominados, respectivamente, *sistemas fechados* e *volumes de controle*. Um sistema fechado refere-se a uma quantidade fixa de matéria, enquanto um volume de controle é uma região do espaço através da qual pode ocorrer fluxo de massa. O termo *massa de controle* é usado algumas vezes no lugar de sistema fechado, e o termo *sistema aberto* é usado como alternativa para volume de controle. Quando os termos massa de controle e volume de controle são usados a fronteira do sistema é freqüentemente chamada de *superfície de controle*.

1.2.1 Sistemas Fechados

sistema fechado

Um ***sistema fechado*** é definido quando uma determinada quantidade de matéria encontra-se em estudo. Um sistema fechado sempre contém a mesma quantidade de matéria. Não pode ocorrer fluxo de massa através de suas fronteiras. Um tipo especial de sistema fechado que não interage de modo

sistema isolado

algum com suas vizinhanças é denominado ***sistema isolado***.

A Fig. 1.1 mostra um gás em um conjunto cilindro-pistão. Quando as válvulas estão fechadas podemos considerar o gás como um sistema fechado. A fronteira encontra-se somente no interior das paredes do cilindro e do pistão, como mostram as linhas tracejadas na figura. Como a fronteira entre o gás e o pistão se move com o pistão, o volume do sistema varia. Nenhuma massa atravessa essa fronteira ou qualquer outra parte do contorno. Se a combustão ocorrer, a composição do sistema muda conforme a mistura inicial de combustível se transforma nos produtos da combustão.

1.2.2 Volumes de Controle

Nas seções subseqüentes deste livro as análises termodinâmicas serão realizadas em dispositivos como turbinas e bombas através das quais a massa flui. Essas análises podem ser conduzidas, a princípio, estudando-se uma certa quantidade de matéria, um sistema fechado, à medida que ela passa através do dispositivo. No entanto, em vez da análise anterior, na maioria dos casos é mais simples pensar em termos de uma certa região do espaço através da qual há fluxo de massa. Nessa abordagem estuda-se uma *região* delimitada por uma fronteira prescrita. Essa região é chamada de ***volume de controle***. A massa pode cruzar a fronteira de um volume de controle.

volume de controle

A Fig. 1.2*a* mostra o diagrama de uma máquina. As linhas tracejadas definem o volume de controle que envolve a máquina. Observe que ar, combustível e gases de exaustão atravessam a fronteira. Um esquema como o da Fig. 1.2*b* usualmente é suficiente para a análise de engenharia.

Tabela 1.1

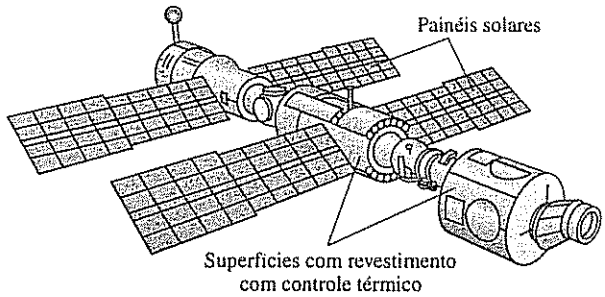
Algumas Áreas de Utilização da Termodinâmica Aplicada à Engenharia

Sistemas de propulsão de aeronaves e foguetes
Sistemas alternativos de energia
- Células combustíveis
- Sistemas geotérmicos
- Conversores magneto-hidrodinâmicos (MHD)
- Geração de potência por energia térmica dos oceanos, energia das ondas e marés
- Geração de potência, aquecimento e resfriamento ativados por energia solar
- Dispositivos termoelétricos e termoiônicos
- Turbinas eólicas

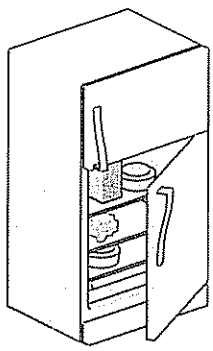
Motores de automóveis
Aplicações na bioengenharia
Aplicações biomédicas
Sistemas de combustão
Compressores, bombas
Resfriamento de equipamentos eletrônicos
Sistemas criogênicos, separação e liquefação de gases
Usinas de força movidas a combustível fóssil e nuclear
Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado
- Refrigeração por absorção e bombas de calor
- Refrigeração por compressão de vapor e bombas de calor

Turbinas a gás e a vapor
- Produção de potência
- Propulsão

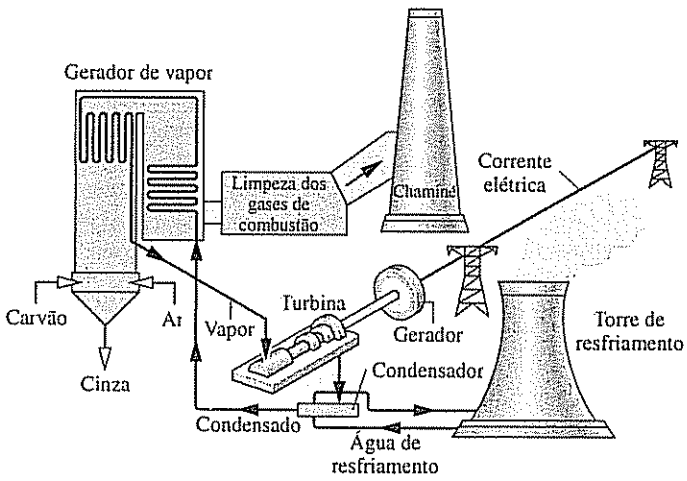
UNIFEMM - Centro Universitário de Sete Lagoas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos



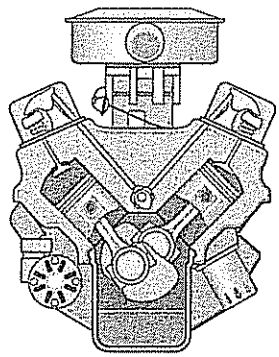
Estação Espacial Internacional



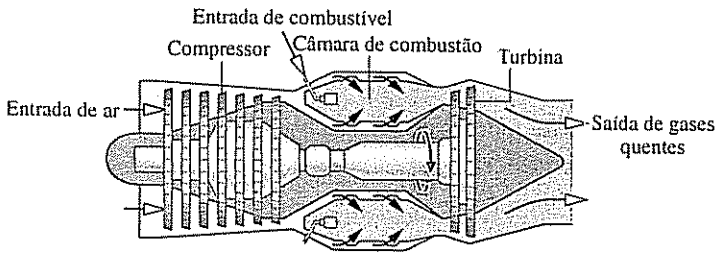
Refrigerador



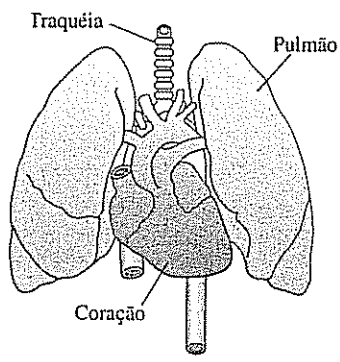
Termoelétrica



Motor de automóvel



Motor turbojato



Aplicações biomédicas

Bio conexões

Os seres vivos e seus órgãos podem ser estudados como volumes de controle. Para o animal de estimação mostrado na Fig. 1.3*a*, ar, comida e bebida são essenciais para manter a vida e as atividades que entram através da fronteira, e para a saída dos produtos que não serão utilizados. Um esquema como o da Fig. 1.3*b* pode ser suficiente para uma análise biológica. Órgãos particulares, como o coração, também podem ser estudados como volumes de controle. Conforme está ilustrado na Fig. 1.4, as plantas podem ser estudadas sob o ponto de vista de um volume de controle. A radiação solar é usada para a produção de substâncias químicas essenciais nas plantas por meio da *fotossíntese*. Durante a fotossíntese as plantas retiram dióxido de carbono da atmosfera e liberam oxigênio para a mesma. As plantas também absorvem água e nutrientes através de suas raízes.

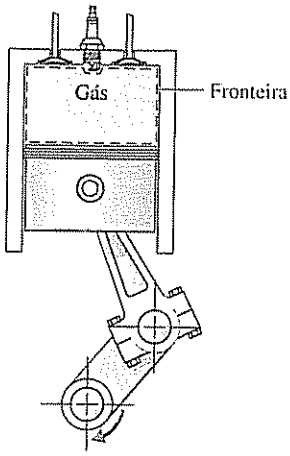


Fig. 1.1 Sistema fechado: um gás em um conjunto cilindro-pistão.

1.2.3 Selecionando a Fronteira do Sistema

É essencial que a fronteira do sistema seja cuidadosamente delineada antes do procedimento da análise termodinâmica. Entretanto, o mesmo fenômeno físico freqüentemente pode ser analisado com escolhas alternativas do sistema, fronteira e vizinhanças. A escolha de uma determinada fronteira que define um certo sistema depende profundamente da conveniência que essa escolha proporciona à análise subseqüente.

Em geral, a escolha da fronteira de um sistema é determinada por duas considerações: (1) o que é conhecido sobre o possível sistema, particularmente nas suas fronteiras, e (2) o objetivo da análise. ➥ **POR EXEMPLO...** A Fig. 1.5 mostra um esboço de um compressor de ar conectado a um tanque de armazenamento. A fronteira do sistema mostrado na figura engloba o compressor, o tanque e toda a tubulação. Essa fronteira poderia ser selecionada se a corrente elétrica de alimentação fosse conhecida e o objetivo da análise fosse determinar quanto tempo o compressor deve operar até que a pressão no tanque alcance um valor especificado. Como a massa atravessa a fronteira, o sistema pode ser um volume de controle. Um volume de controle englobando apenas o compressor poderia ser escolhido se a condição de entrada e saída de ar do compressor fosse conhecida e o objetivo fosse determinar a potência elétrica de acionamento. ⇦

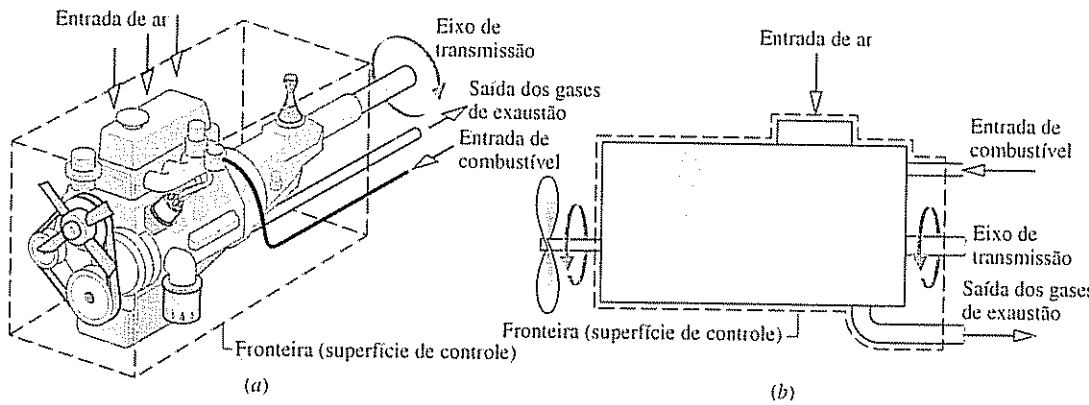


Fig. 1.2 Exemplo de um volume de controle (sistema aberto). Um motor de automóvel

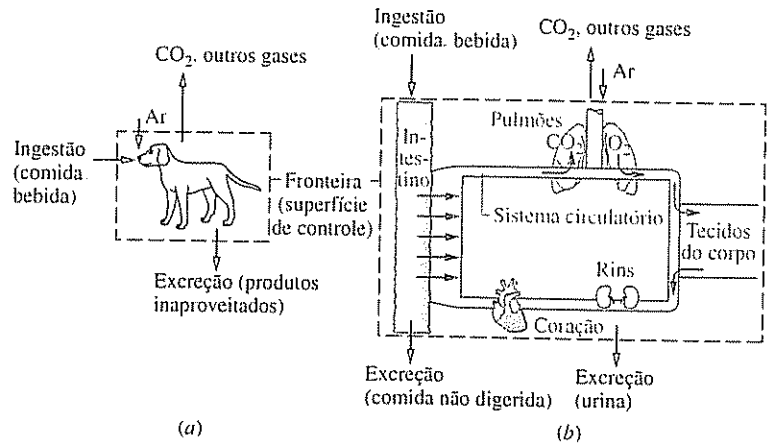


Fig. 1.3 Exemplo de um volume de controle (sistema aberto) em biologia

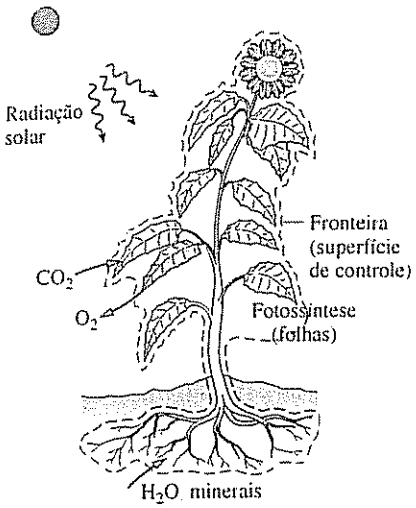


Fig. 1.4 Exemplo de um volume de controle (sistema aberto) em botânica.

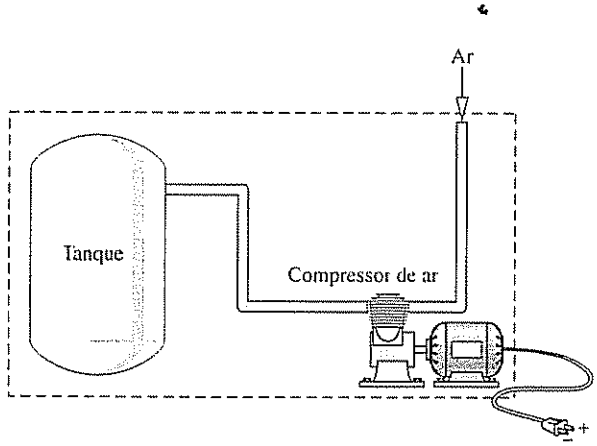


Fig. 1.5 Compressor de ar e tanque de armazenamento

1.3 Descrevendo Sistemas e Seus Comportamentos

Os engenheiros estão interessados em estudar sistemas e como eles interagem com suas vizinhanças. Nesta seção, introduziremos diversos termos e conceitos usados para descrever sistemas e como eles se comportam.

1.3.1 Pontos de Vista Macroscópico e Microscópico da Termodinâmica

Os sistemas podem ser estudados sob o ponto de vista macroscópico ou microscópico. A abordagem macroscópica da termodinâmica está preocupada com o comportamento geral ou global. Isso algumas vezes é chamado de termodinâmica *clássica*. Nenhum modelo da estrutura da matéria em níveis molecular, atômico e subatômico é utilizado diretamente na termodinâmica clássica. Embora o comportamento dos sistemas seja afetado pela estrutura molecular, a termodinâmica clássica permite que importantes aspectos do comportamento de um sistema sejam avaliados partindo da observação do sistema global.

A abordagem microscópica da termodinâmica, conhecida como termodinâmica *estatística*, se preocupa diretamente com a estrutura da matéria. O objetivo da termodinâmica estatística é caracterizar por meios estatísticos o comportamento médio das partículas que compõem o sistema de interesse e relacionar essa informação com o comportamento macroscópico observado do sistema. Para aplicações envolvendo *lasers*, plasmas, escoamento de gases em alta velocidade, cinética química, temperaturas extremamente baixas (criogenia) e outras, os métodos da termodinâmica estatística são essenciais. A abordagem microscópica é utilizada neste livro para interpretar a *energia interna* no Cap. 2 e a *entropia* no Cap. 6. Além disso, conforme é mencionado no Cap. 3, a abordagem microscópica exerce um papel fundamental no desenvolvimento de certos dados, como, por exemplo, os *calores específicos de gases ideais*.

Para uma vasta gama de aplicações na engenharia, a termodinâmica clássica não apenas fornece uma abordagem consideravelmente mais direta para a análise e o projeto, mas também requer menor complexidade matemática. Por essas razões, o ponto de vista macroscópico é o adotado neste livro. Finalmente, efeitos relativísticos não são significativos para os sistemas considerados neste livro.

1.3.2 Propriedade, Estado e Processo

Para descrever um sistema e prever seu comportamento é necessário o conhecimento de suas propriedades e de como estas propriedades estão relacionadas. Uma ***propriedade*** é uma característica macroscópica de um sistema, tal como massa, volume, energia, pressão e temperatura, para as quais um valor numérico pode ser atribuído em um dado tempo sem o conhecimento do comportamento prévio (*história*) do sistema. ***propriedade***

A palavra ***estado*** refere-se à condição de um sistema como descrito por suas propriedades. Já que existem normalmente relações entre as propriedades de um sistema, com freqüência o estado pode ser especificado fornecendo-se o valor de um subconjunto dessas propriedades. Todas as outras propriedades podem ser determinadas a partir dessas poucas. ***estado***

processo

regime permanente

Quando qualquer uma das propriedades de um sistema é alterada, ocorre uma mudança de estado e diz-se que o sistema percorreu um ***processo*** Um processo é uma transformação de um estado a outro Entretanto, se um sistema exibe o mesmo valor de suas propriedades em dois tempos distintos ele está no mesmo estado nesses tempos Um sistema é dito em ***regime permanente*** se nenhuma de suas propriedades varia com o tempo

Muitas propriedades são consideradas no decorrer de nosso estudo sobre termodinâmica aplicada à engenharia A termodinâmica também trata de grandezas que não são propriedades, como taxas de vazões mássicas e transferência de energia por trabalho e calor Exemplos adicionais de grandezas que não são propriedades são fornecidos nos capítulos subseqüentes Uma maneira de distinguir propriedades de *não*-propriedades pode ser encontrada no boxe a seguir

Distinguindo Propriedades de Não-Propriedades

Em um dado estado, cada propriedade possui um valor definido que pode ser atribuído sem o conhecimento de como o sistema alcançou aquele estado Logo, a mudança no valor de uma propriedade quando o sistema é alterado de um estado para outro é determinada somente pelos dois estados extremos, e é independente do caminho particular pelo qual a variação de estado ocorreu Ou seja, a mudança é independente dos detalhes do processo Reciprocamente, se o valor de uma grandeza é independente do processo entre dois estados, então essa grandeza corresponde à variação de uma propriedade Isso fornece um teste para determinar se uma grandeza é uma propriedade: ***Uma grandeza é uma propriedade se, e somente se, sua mudança de valor entre dois estados é independente do processo.*** Segue-se que, se o valor de uma determinada grandeza depende dos detalhes do processo e não apenas dos estados extremos, essa grandeza não pode ser uma propriedade

1.3.3 Propriedades Extensivas e Intensivas

propriedade extensiva

As propriedades termodinâmicas podem ser classificadas em duas classes gerais: extensivas e intensivas Uma propriedade é chamada ***extensiva*** se seu valor para o sistema como um todo é a soma de seus valores para as partes nas quais o sistema é dividido Massa, volume, energia e muitas outras propriedades que serão apresentadas posteriormente são extensivas As propriedades extensivas dependem do tamanho ou da extensão de um sistema As propriedades extensivas de um sistema podem variar com o tempo, e muitas análises termodinâmicas consistem basicamente em avaliar cuidadosamente as variações de propriedades extensivas, tais como massa e energia, à medida que um sistema interage com suas vizinhanças

propriedade intensiva

Propriedades ***intensivas*** não são aditivas no sentido considerado anteriormente Seus valores são independentes do tamanho ou da extensão de um sistema, e podem variar de local para local no interior de um sistema em qualquer momento Assim, propriedades intensivas podem ser funções da posição e do tempo, enquanto propriedades extensivas podem variar somente com o tempo O volume específico (Seção 1 5), a pressão e a temperatura são propriedades intensivas importantes; muitas outras propriedades intensivas serão introduzidas em capítulos subseqüentes

⇨ **POR EXEMPLO...** para ilustrar a diferença entre propriedades intensivas e extensivas, considere uma porção de matéria com temperatura uniforme e imagine que ela é composta de várias partes, como ilustrado na Fig 1 6 A massa do conjunto é a soma das massas das partes, e o volume total é a soma dos volumes das partes No entanto, a temperatura do todo não é a soma da temperatura das partes; é a mesma para cada parte A massa e o volume são propriedades extensivas, mas a temperatura é uma propriedade intensiva. ⇦

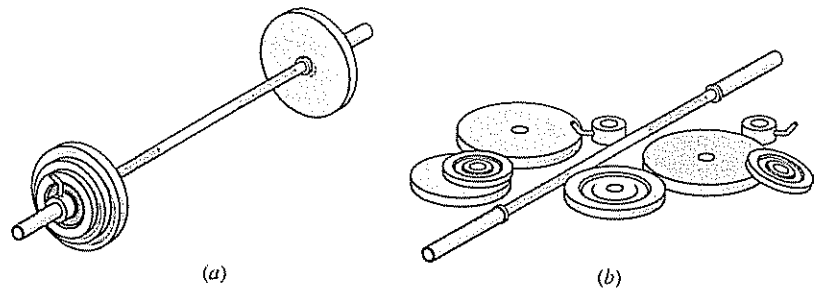
1.3.4 Equilíbrio

equilíbrio

A termodinâmica clássica enfatiza principalmente os estados de equilíbrio e as mudanças de um estado de equilíbrio a outro Assim, o conceito de ***equilíbrio*** é fundamental Em mecânica equilíbrio significa uma condição de estabilidade mantida por uma igualdade de forças que se opõem Em termodinâmica esse conceito é mais abrangente, incluindo não apenas um equilíbrio de forças, mas também um equilíbrio de outras influências Cada tipo de influência refere-se a um aspecto particular ou geral do equilíbrio termodinâmico Consoante com esse fato, vários tipos de equilíbrio devem existir individualmente para se estabelecer a condição de total equilíbrio; entre estes estão os equilíbrios mecânico, térmico, de fase e químico

Os critérios para esses quatro tipos de equilíbrio serão considerados em discussões subseqüentes Pode-se fazer um teste para verificar se o sistema está em equilíbrio termodinâmico através do seguinte procedimento: isole o sistema de suas vizinhanças e aguarde por mudanças em suas propriedades observáveis Se não ocorrerem mudanças, concluímos que o sistema estava em equilíbrio no momento em que foi isolado Pode-se dizer que o sistema está em um ***estado de equilíbrio***

estado de equilíbrio



(a) (b)

Fig. 1.6 Figura utilizada para discutir os conceitos de propriedade extensiva e intensiva.

Quando um sistema está isolado ele não pode interagir com suas vizinhanças; entretanto, seu estado pode mudar como uma conseqüência de eventos espontâneos que estejam ocorrendo internamente, à medida que suas propriedades intensivas, tais como a temperatura e a pressão, tendam a valores uniformes. Quando todas essas mudanças cessam o sistema está em equilíbrio. No equilíbrio a temperatura é uniforme ao longo do sistema. Também a pressão pode ser considerada uniforme, desde que o efeito da gravidade não seja significativo; caso contrário, pode existir uma variação de pressão, como em uma coluna vertical de líquido.

Não há exigência de que um sistema que passa por um processo esteja em equilíbrio *durante* o processo. Alguns ou todos os estados intermediários podem ser estados de não-equilíbrio. Para muitos desses processos estamos limitados ao conhecimento do estado antes de o processo ocorrer e do estado depois que o processo é completado.

1.4 Medindo Massa, Comprimento, Tempo e Força

Quando os cálculos de engenharia são efetuados é necessário preocupar-se com as *unidades* das grandezas físicas envolvidas. Uma unidade é uma certa quantidade de uma grandeza através da qual, por comparação, qualquer outra grandeza do mesmo tipo é medida. Por exemplo, metros, centímetros, quilômetros, pés, polegadas e milhas são todas *unidades de comprimento*. De forma semelhante, segundos, minutos e horas são *unidades de tempo*.

Como as grandezas físicas estão relacionadas por meio de definições e leis, um número relativamente pequeno dessas grandezas físicas é suficiente para conceber e mensurar todas as outras. Estas são chamadas de *dimensões primárias*. As outras são mensuradas em termos das dimensões primárias, e são chamadas de *secundárias*. Por exemplo, se o comprimento e o tempo fossem considerados primários, a velocidade e a área seriam consideradas secundárias.

Um conjunto de dimensões primárias adequado para aplicações em *mecânica* consiste em massa, comprimento e tempo. Outras dimensões primárias são necessárias quando fenômenos físicos adicionais são levados em consideração. A temperatura é incluída para a termodinâmica, e a corrente elétrica é introduzida para aplicações que envolvem eletricidade.

Uma vez que um conjunto de dimensões primárias é adotado, especifica-se uma ***unidade básica*** para cada dimensão primária. As unidades para todas as outras grandezas são então obtidas em termos das unidades básicas. Vamos ilustrar essas idéias considerando brevemente dois sistemas de unidades: as unidades SI e as Unidades Inglesas de Engenharia.

unidade básica

1.4.1 Unidades SI

Na presente discussão vamos analisar o sistema de unidades chamado SI, que considera a massa, o comprimento e o tempo como dimensões primárias e a força como secundária. SI é a abreviação para Système International d'Unités (Sistema Internacional de Unidades), que é o sistema legalmente aceito na maioria dos países. As convenções para o SI são publicadas e controladas por tratados de uma organização internacional. As ***unidades básicas do SI*** para massa, comprimento e tempo encontram-se listadas na Tabela 1.2 e são discutidas no parágrafo a seguir. A unidade básica SI para a temperatura é o kelvin, K.

unidades básicas do SI

A unidade básica SI de massa é o quilograma, kg. Ele é igual à massa de um determinado cilindro de uma liga platina-irídio mantida pelo Escritório Internacional de Pesos e Medidas, próximo a Paris. A massa-padrão para os Estados Unidos é mantida pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia. O quilograma é a única unidade básica definida por associação a um objeto fabricado.

A unidade básica SI de comprimento é o metro, m, definido como o comprimento percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo especificado. A unidade básica de tempo é o segundo, s. O segundo é definido como a duração de 9.192.631.770 ciclos da radiação associada a uma transição especificada do átomo de césio.

A unidade SI de força, denominada newton, é uma unidade secundária, definida em termos de unidades básicas para massa, comprimento e tempo. A segunda lei do movimento de Newton esta-

Tabela 1.2
Unidades para Massa, Comprimento, Tempo e Força

	SI		Sistema Inglês	
Grandeza	Unidade	Símbolo	Unidade	Símbolo
massa	quilograma	kg	libra-massa	lb
comprimento	metro	m	pé	ft
tempo	segundo	s	segundo	s
força	newton (= 1 kg · m/s²)	N	libra-força (= 32,1740 lb · ft/s²)	lbf

belece que a força líquida agindo em um corpo é proporcional ao produto da massa pela aceleração, escrito por $F \propto ma$. O newton é definido de forma que a constante de proporcionalidade na expressão é igual à unidade. Assim, a segunda lei de Newton é expressa pela igualdade

$$F = ma \tag{1.1}$$

O newton, N, é a força necessária para acelerar uma massa de 1 quilograma a uma taxa de 1 metro por segundo por segundo. Utilizando a Eq. 1.1

$$1\ \text{N} = (1\ \text{kg})(1\ \text{m/s}^2) = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2 \tag{1.2}$$

➥ **POR EXEMPLO...** para ilustrar o uso das unidades SI introduzidas até aqui, vamos determinar o peso em newtons de um objeto cuja massa é 1000 kg, em um local na superfície da Terra onde a aceleração devida à gravidade é igual a um valor-*padrão* definido como 9,80665 m/s². Recordando que o *peso* de um corpo refere-se à força da gravidade e é calculado usando a massa do corpo, m, e a aceleração local devida à gravidade, g, partindo da Eq. 1.1, obtemos

$$\begin{aligned} F &= mg \\ &= (1000\ \text{kg})(9{,}80665\ \text{m/s}^2) = 9806{,}65\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

Esta força pode ser expressa em termos de newtons usando a Eq. 1.2 como um *fator de conversão de unidades*. Assim,

$$F = \left(9806{,}65\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}\right)\left|\frac{1\ \text{N}}{1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2}\right| = 9806{,}65\ \text{N} \hookleftarrow$$

Tome Nota...
Observe que no cálculo da força em newtons o fator de conversão de unidades é identificado por um par de linhas verticais. Esse dispositivo é usado ao longo do texto para identificar conversões de unidades.

Como o peso é calculado em termos da massa e da aceleração local devida à gravidade, o peso de um objeto pode mudar em função do local, devido à variação da aceleração da gravidade, mas a sua massa permanece constante. ➥ **POR EXEMPLO...** se o objeto considerado anteriormente estivesse na superfície de um planeta em um local onde a aceleração da gravidade fosse um décimo do valor usado no cálculo anterior, a massa permaneceria a mesma, mas o peso seria um décimo do valor calculado. ↩

Tabela 1.3
Prefixos das Unidades SI

Fator	Prefixo	Símbolo
10^{12}	tera	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	mega	M
10^{3}	quilo	k
10^{2}	hecto	h
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p

As unidades SI para outras grandezas físicas também são obtidas em função das unidades SI básicas. Algumas dessas unidades ocorrem tão freqüentemente que são dados nomes e símbolos especiais, como no caso do newton. As unidades SI para as grandezas pertinentes à termodinâmica serão apresentadas conforme forem introduzidas no texto. Já que freqüentemente se torna necessário trabalhar com valores extremamente grandes ou pequenos quando se usa o sistema SI de unidades, um conjunto de prefixos-padrão encontra-se listado na Tabela 1.3, de modo a simplificar o assunto. Por exemplo, km significa quilômetro, ou seja, 10^3 m.

1.4.2 Unidades Inglesas de Engenharia

Embora as unidades SI sejam um padrão mundial, atualmente muitos segmentos da comunidade de engenharia nos Estados Unidos usam regularmente algumas outras unidades. Uma grande parte do estoque de ferramentas e máquinas industriais americanas, bem como muitos dados valiosos de engenharia, utiliza outras unidades além das unidades SI. Ainda por muitos anos os engenheiros nos Estados Unidos deverão estar familiarizados com os vários sistemas de unidades.

unidades básicas inglesas

Nesta seção consideraremos um sistema de unidades geralmente utilizado nos Estados Unidos, denominado sistema inglês de engenharia. As ***unidades básicas inglesas*** para massa, comprimento e tempo estão listadas na Tabela 1.2, e serão discutidas nos parágrafos seguintes. As unidades inglesas para outras grandezas pertinentes à termodinâmica serão apresentadas conforme forem introduzidas ao longo do texto.

A unidade básica para o comprimento é o pé, ft, definido em termos do metro por

$$1\ \text{ft} = 0{,}3048\ \text{m} \tag{1.3}$$

A polegada, in, é definida em termos do pé

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}$$

Uma polegada é igual a 2,54 cm. Embora unidades como o minuto e a hora sejam comumente usadas em engenharia, é conveniente selecionar o segundo como unidade básica de tempo para o sistema inglês de engenharia.

A unidade básica de massa no sistema inglês de engenharia é a libra-massa, lb, definida em termos do quilograma por

$$1 \text{ lb} = 0{,}45359237 \text{ kg} \tag{1.4}$$

O símbolo lbm também pode ser usado para indicar a libra-massa.

Uma vez que as unidades básicas de massa, comprimento e tempo do sistema inglês de engenharia tenham sido especificadas, a unidade de força pode ser definida como para o newton, através da segunda lei de Newton, conforme a Eq. 1.1. Sob esse ponto de vista, a unidade inglesa de força, a libra-força, lbf, é a força necessária para acelerar uma libra-massa de 32,1740 ft/s², que é a aceleração-padrão da gravidade. Substituindo esses valores na Eq. 1.1

$$1 \text{ lbf} = (1 \text{ lb})(32{,}1740 \text{ ft/s}^2) = 32{,}1740 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2 \tag{1.5}$$

Nessa abordagem a força é considerada *secundária*.

A libra-força, lbf, não é igual à libra-massa, lb, apresentada anteriormente. Força e massa são fundamentalmente diferentes, assim como suas unidades. Contudo, os dois usos da palavra "libra" podem causar confusão, e deve-se tomar cuidado para evitar erros.

➥ **POR EXEMPLO...** para ilustrar o uso dessas unidades em um único cálculo determinaremos o peso de um objeto cuja massa é de 1000 lb (453,6 kg) em um local onde a aceleração local da gravidade é de 32,0 ft/s² (9,7 m/s²). Inserindo os valores na Eq. 1.1 e usando a Eq. 1.5 como um fator unitário de conversão, obtemos

$$F = mg = (1000 \text{ lb})\left(32{,}0 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}\right)\left|\frac{1 \text{ lbf}}{32{,}1740 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2}\right| = 994{,}59 \text{ lbf}$$

Este cálculo ilustra que a libra-força é uma unidade de força, diferente da libra-massa, que é uma unidade de massa ⬅

1.5 Volume Específico

Três propriedades intensivas mensuráveis particularmente importantes na termodinâmica aplicada à engenharia são o volume específico, a pressão e a temperatura. O volume especifico será discutido nesta seção. A pressão e a temperatura serão consideradas nas Seções 1.6 e 1.7, respectivamente.

Em uma perspectiva macroscópica, a descrição da matéria é simplificada quando se considera que ela é uniformemente distribuída ao longo de uma região. A validade dessa idealização, conhecida como hipótese do *contínuo*, pode ser inferida pelo fato de que, para uma classe extremamente ampla de fenômenos de interesse para a engenharia, o comportamento da matéria obtido por essa descrição encontra-se em conformidade com dados medidos.

Quando as substâncias podem ser tratadas como meios contínuos é possível falar de suas propriedades termodinâmicas intensivas "em um ponto". Assim, em qualquer instante a massa específica ρ em um ponto é definida por

$$\rho = \lim_{V \to V'} \left(\frac{m}{V}\right) \tag{1.6}$$

onde V' é o menor volume no qual existe um valor definido para essa razão. O volume V' contém um número de partículas suficiente para que as médias estatísticas sejam significativas. Ele é o menor volume para o qual a matéria pode ser considerada um meio contínuo, e é normalmente pequeno o suficiente para ser considerado um "ponto". A massa específica definida pela Eq. 1.6 pode ser descrita matematicamente por uma função contínua da posição e do tempo.

A massa específica, ou a massa local por unidade de volume, é uma propriedade intensiva que pode variar de ponto a ponto em um sistema. Assim, a massa associada a um certo volume V é, em princípio, determinada por integração

$$m = \int_V \rho \, dV \tag{1.7}$$

e *não* simplesmente pelo produto entre a massa especifica e o volume.

O ***volume específico*** v é definido como o inverso da massa específica, $v = 1/\rho$. Ele é o volume por unidade de massa. Assim como a massa específica, o volume específico é uma propriedade intensi-

volume específico

va e pode variar ponto a ponto. As unidades SI para a massa específica e o volume específico são, respectivamente, kg/m³ e m³/kg. No entanto, elas também são expressas, freqüentemente, por g/cm³ e cm³/g, respectivamente. As unidades inglesas para a massa específica e o volume específico neste texto são lb/ft³ e ft³/lb, respectivamente.

Em certas aplicações é conveniente exprimir propriedades como o volume específico em uma base molar, em vez de uma base mássica. O mol corresponde a uma quantidade de uma determinada substância numericamente igual ao seu peso molecular. Neste livro expressaremos a quantidade de uma substância em uma ***base molar***, em termos do quilomol (kmol) ou da libra-mol (lbmol), como for mais adequado. Em cada caso será usado

base molar

$$n = \frac{m}{M} \tag{1.8}$$

O número de quilomols, n, de uma substância é obtido dividindo-se a massa, m, em quilogramas pelo peso molecular, M, em kg/kmol. Analogamente, o número de libra-mols, n, é obtido dividindo-se a massa, m, em libra-massa pelo peso molecular, M, em lb/lbmol. Quando m é dado em gramas, a Eq. 1.8 fornece n em grama-mol, ou *mol*, para abreviar. Recordando da química, sabe-se que o número de moléculas em um grama-mol, denominado número de Avogrado, é $6{,}022 \times 10^{23}$. As Tabelas A-1 e A-1E, do Apêndice, fornecem os pesos moleculares de diversas substâncias.

Para assinalar que uma propriedade está em base molar, uma barra é utilizada acima do símbolo. Assim, $\bar{v}$ significa volume por kmol ou por lbmol, conforme o caso. Neste texto, as unidades usadas para $\bar{v}$ são m³/kmol e ft³/lbmol. Com base na Eq. 1.8, a relação entre $\bar{v}$ e v é

$$\bar{v} = Mv \tag{1.9}$$

na qual M é o peso molecular em kg/kmol ou lb/lbmol, conforme o caso.

1.6 Pressão

A seguir, apresentaremos o conceito de pressão sob o ponto de vista do contínuo. Vamos iniciar considerando uma pequena área A associada a um ponto em um fluido em repouso. O fluido em um lado dessa área exerce uma força compressiva que é normal à área, F_{normal}. Uma força igual, mas em sentido contrário, é exercida sobre a área pelo fluido situado no outro lado. Para um fluido em repouso não existem outras forças além dessas agindo nessa área. A ***pressão*** p no ponto especificado é definida como o limite

pressão

$$p = \lim_{A \to A'} \left(\frac{F_{\text{normal}}}{A} \right) \tag{1.10}$$

no qual A′ é a área no "ponto" com a mesma percepção de limite usada na definição de massa específica.

Se a área A′ estivesse associada a novas orientações oriundas da rotação no ponto considerado e se a pressão fosse determinada para cada nova orientação, iríamos concluir que a pressão no ponto seria a mesma em todas as direções, *desde que o fluido esteja em repouso*. Isso é uma conseqüência do equilíbrio de forças em um elemento de volume circundando o ponto. No entanto, a pressão pode variar de ponto a ponto em um fluido estático; exemplos são a variação da pressão atmosférica com a altura e a variação da pressão com a profundidade de oceanos, lagos e outros corpos d'água.

Grandes Esperanças para a Nanotecnologia

A *nanociência* é o estudo das moléculas e estruturas moleculares, chamadas nanoestruturas, tendo uma ou mais dimensões menores do que cerca de 100 nanômetros. Um nanômetro é um bilionésimo do metro: 1 nm = 10^{-9} m. Para alcançar esse nível de pequenez uma pilha de 10 átomos de hidrogênio teria a altura de 1 nm, enquanto o cabelo humano possui um diâmetro de cerca de 50.000 nm. *Nanotecnologia* é a engenharia da nanoestrutura em produtos úteis. Na escala relativa à nanotecnologia o comportamento pode diferir das nossas expectativas macroscópicas. Por exemplo, a *média* usada para atribuir valores a propriedades em um ponto no modelo contínuo não pode mais ser aplicada, devido às interações entre os átomos em consideração. Também, nessas escalas, a natureza do fenômeno físico tal como um fluxo corrente pode depender de forma explícita do tamanho físico dos dispositivos. Depois de uma década de pesquisa a nanotecnologia está agora pronta para fornecer novos produtos com uma ampla gama de utilização, incluindo dispositivos implantáveis de quimioterapia, biossensores para a detecção da glicose em diabéticos, dispositivos eletrônicos modernos, novas tecnologias de conversão de energia e 'materiais inteligentes', como, por exemplo, tecidos que permitem que vapor de água escape enquanto a água líquida é conservada.

Considere, em seguida, um fluido em movimento. Nesse caso, a força exercida sobre uma área associada a um ponto do fluido pode ser determinada em função de três componentes mutuamente perpendiculares: um normal à área e dois no plano da área. Quando expressos em termos de uma área unitária, a componente normal à área é chamada de *tensão normal*, e os dois componentes no plano da área são denominados *tensões cisalhantes*. As magnitudes dessas tensões geralmente variam de acordo com a orientação da área. O estado de tensão em um fluido em movimento é um tópico que normalmente é tratado em detalhes em *Mecânica dos Fluidos*. A diferença entre uma tensão normal e a pressão, que seria a tensão normal caso o fluido estivesse em repouso, é normalmente muito pequena. Neste livro admitiremos que a tensão normal em um ponto é igual à pressão naquele ponto. Essa hipótese conduz a resultados de precisão aceitável para as aplicações consideradas. O termo pressão, a não ser que seja afirmado algo em contrário, refere-se à ***pressão absoluta***: a pressão que adota como zero o vácuo absoluto.

pressão absoluta

1.6.1 Medidas de Pressão

Os manômetros e os barômetros medem a pressão em termos de um comprimento de uma coluna de líquido, tal como o mercúrio, a água ou o óleo. O manômetro mostrado na Fig. 1.7 possui um lado aberto para a atmosfera e o outro ligado a um tanque que contém um gás a pressão uniforme. Como pressões relativas à mesma altura em uma massa *contínua* de um líquido ou um gás em repouso são iguais, as pressões nos pontos a e b, da Fig. 1.7, são iguais. Aplicando um balanço elementar de forças, a pressão do gás é

$$p = p_{atm} + \rho g L \tag{1.11}$$

na qual p_{atm} é a pressão atmosférica local, ρ é a massa específica do líquido do manômetro, g é a aceleração da gravidade e L é a diferença entre os níveis do líquido.

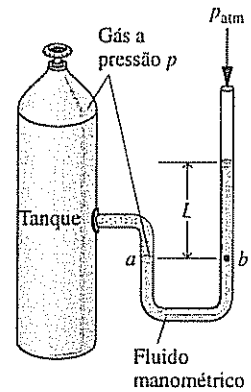


Fig. 1.7 Manômetro.

O barômetro mostrado na Fig. 1.8 é formado por um tubo fechado com mercúrio líquido e uma quantidade pequena de vapor de mercúrio, invertido e colocado em um recipiente aberto com mercúrio líquido. Como as pressões nos pontos a e b são iguais, um balanço de forças fornece a pressão atmosférica, dada por

$$p_{atm} = p_{vapor} + \rho_m g L \tag{1.12}$$

sendo que ρ_m é a massa específica do líquido mercúrio. Como a pressão do vapor do mercúrio é muito menor do que a da atmosfera, a Eq. 1.12 pode ser aproximada por $p_{atm} = \rho_m g L$. Para colunas pequenas de líquidos, ρ e g podem ser tomados como constantes na Eqs. 1.11 e 1.12.

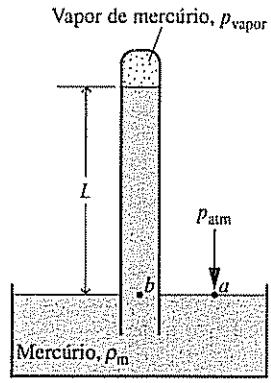


Fig. 1.8 Barômetro.

As pressões medidas com manômetros e barômetros são freqüentemente expressas em termos do comprimento L em mililitros de mercúrio (mmHg), polegadas de mercúrio (inHg), polegadas de água (inH_2O), e assim por diante. ➥ **POR EXEMPLO...** um barômetro registra 750 mmHg. Se ρ_m = 13,59 g/cm³ e g=9,81 m/s², a pressão atmosférica, em N/m², é calculada como a seguir:

$$\begin{aligned} p_{atm} &= \rho_m g L \\ &= \left[\left(13{,}59\frac{g}{cm^3}\right)\left|\frac{1\ kg}{10^3\ g}\right|\left|\frac{10^2\ cm}{1\ m}\right|^3\right]\left[9{,}81\frac{m}{s^2}\right]\left[(750\ mmHg)\left|\frac{1\ m}{10^3\ mm}\right|\right]\left|\frac{1\ N}{1\ kg\cdot m/s^2}\right| \\ &= 10^5\ N/m^2 \end{aligned}$$

Um manômetro do tipo tubo de Bourdon é mostrado na Fig. 1.9. A figura apresenta um tubo curvo, que possui uma seção reta elíptica com uma extremidade associada à pressão que se deseja medir e uma outra conectada a um ponteiro por um mecanismo. Quando o fluido sob pressão preenche o tubo, a seção elíptica tende a se tornar circular e o tubo se torna reto. Esse movimento é transmitido pelo mecanismo ao ponteiro. Calibrando-se a deflexão do ponteiro para pressões conhecidas, uma escala graduada pode ser elaborada através da qual uma pressão aplicada pode ser lida em unidades convenientes. Devido à sua construção, o tubo de Bourdon mede a pressão relativa às vizinhanças do instrumento. Conseqüentemente, o mostrador indica zero quando as pressões interna e externa ao tubo são as mesmas.

A pressão também pode ser medida por outros procedimentos. Uma classe importante de sensores utiliza o *efeito piezoelétrico*: uma carga é gerada no interior de materiais sólidos quando estes se deformam. Essa entrada mecânica/saída elétrica fornece a base para a medição de pressão, assim como medidas de deslocamento e de força. Um outro tipo importante de sensor emprega um diafragma que se deflete quando uma força é aplicada, alterando uma indutância, resistência ou capacitância. A Fig. 1.10 mostra um sensor de pressão piezoelétrico juntamente com um sistema automático de aquisição de dados.

1.6.2 Unidades de Pressão

A unidade de pressão e de tensão no SI é o pascal

$$1\ pascal = 1\ N/m^2$$

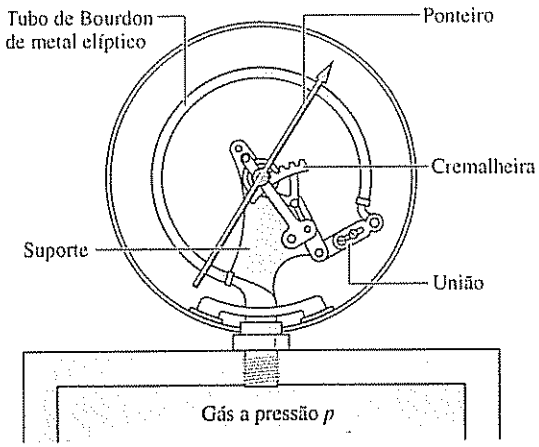


Fig. 1.9 Medição de pressão por um medidor do tipo tubo de Bourdon.

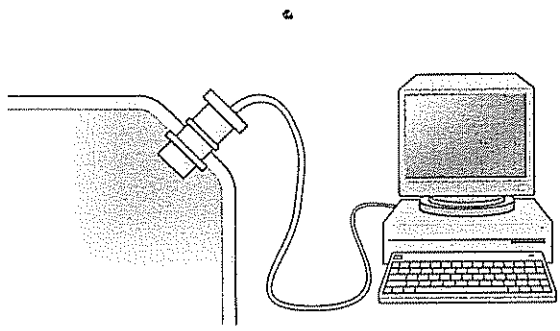


Fig. 1.10 Sensor de pressão com aquisição de dados automática.

Entretanto, múltiplos do pascal são freqüentemente utilizados: o kPa, o bar e o MPa.

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ N/m}^2$$
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$
$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

As unidades inglesas de uso corrente para a pressão e a tensão são a libra-força por pé quadrado, lbf/ft^2, e a libra-força por polegada quadrada, lbf/in^2.

Embora a pressão atmosférica varie com a localização na Terra, um valor-padrão de referência pode ser definido e utilizado para expressar outras pressões

$$1 \text{ atmosfera-padrão (atm)} = \begin{cases} 1{,}01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ 14{,}696 \text{ lbf/in}^2 \\ 760 \text{ mmHg} = 29{,}92 \text{ inHg} \end{cases} \tag{1.13}$$

Como 1 bar (10^5 N/m^2) é aproximadamente igual a uma atmosfera-padrão, pode-se considerá-lo uma unidade de pressão conveniente, apesar de não ser uma unidade-padrão SI. Quando se está trabalhando no SI, o bar, o MPa e o kPa são utilizados neste texto.

Embora as pressões absolutas devam ser utilizadas nas relações termodinâmicas, dispositivos de medição de pressão freqüentemente indicam a *diferença* entre a pressão absoluta de um sistema e a pressão absoluta da atmosfera existente, externa ao dispositivo de medida. A magnitude dessa diferença é chamada de ***pressão manométrica*** ou ***pressão de vácuo***. O termo pressão manométrica é aplicado quando a pressão do sistema é maior do que a pressão atmosférica local, p_{atm}.

pressão manométrica
pressão de vácuo

$$p(\text{manométrica}) = p(\text{absoluta}) - p_{atm}(\text{absoluta}) \tag{1.14}$$

Quando a pressão atmosférica local é maior do que a pressão do sistema é utilizado o termo pressão de vácuo.

$$p(\text{vácuo}) = p_{atm}(\text{absoluta}) - p(\text{absoluta}) \tag{1.15}$$

Os engenheiros nos Estados Unidos freqüentemente utilizam as letras a (*absolute*) e g (*gage*) para distinguir a pressão absoluta da manométrica. Por exemplo, as pressões absoluta e manométrica em libra-força por polegada quadrada são escritas como psia e psig, respectivamente. A relação entre os vários modos de expressar medidas de pressão é apresentada na Fig. 1.11.

Bio conexões

Um em cada três americanos apresenta pressão alta. Como isso pode causar doenças do coração, derrames e outras complicações médicas sérias, os médicos recomendam a todos que a pressão sanguínea seja aferida de forma regular. A aferição da pressão consiste em determinar a pressão máxima (pressão sistólica) em uma artéria, quando o coração está bombeando sangue, e a pressão mínima (pressão diastólica), quando o coração está relaxado, cada uma expressa em milímetros de mercúrio, mmHg. As pressões sistólica e diastólica de pessoas saudáveis deveriam ser inferiores a cerca de 120 mmHg e 80 mmHg, respectivamente.

O aparato-padrão para aferir a pressão usado por décadas, envolvendo uma braçadeira inflável, um manômetro de mercúrio e um estetoscópio, está sendo gradualmente substituído devido à preocupação com a toxicidade do mercúrio em resposta às exigências especiais, incluindo o monitoramento durante o exercício clínico e durante a anestesia. Também para o uso domiciliar e o moni-

toramento próprio muitos pacientes acham mais fácil usar dispositivos automáticos, que exibem os dados da pressão sanguínea de forma digital. Isso tem levado engenheiros biomédicos a repensar os equipamentos para aferir a pressão sanguínea e a desenvolver novas abordagens, livres de mercúrio e livres de estetoscópios. Uma delas utiliza um transdutor de pressão altamente sensível para detectar oscilações na pressão com uma braçadeira inflável colocada em torno do braço do paciente. O programa de monitoramento usa esses dados para calcular as pressões sistólica e diastólica, as quais são exibidas digitalmente.

1.7 Temperatura

Nesta seção a propriedade intensiva temperatura será considerada juntamente com as formas de mensurá-la. O conceito de temperatura, assim como o de força, se origina das nossas percepções sensoriais. Ele se encontra enraizado nas noções de corpo "quente" ou "frio". Usamos nosso sentido do tato para distinguir corpos quentes de frios e organizar os corpos em uma escala em função da ordem em que ele é "mais quente", decidindo que 1 é mais quente do que 2, que 2 é mais quente do que 3, e assim por diante. No entanto, por mais sensível que seja o tato humano, somos incapazes de avaliar essa qualidade de modo preciso.

É difícil estabelecer uma definição de temperatura em termos de conceitos que sejam definidos independentemente ou aceitos como básicos. Entretanto, é possível chegar a um objetivo entendendo a *igualdade* de temperatura levando em conta o fato de que, quando a temperatura de um corpo muda, outras propriedades também mudam.

Para ilustrar isso, considere dois blocos de cobre e suponha que nosso sentido nos diga que um é mais quente do que o outro. Se os blocos fossem colocados em contato e isolados de suas vizinhanças, eles iriam interagir de uma maneira que pode ser descrita como uma ***interação térmica (calórica)***. Durante essa interação seria observado que o volume do bloco mais aquecido decresceria um pouco com o tempo, enquanto o volume do bloco mais frio aumentaria com o tempo. No devido tempo não seriam observadas mudanças de volume, e os blocos quando sujeitos ao tato produziriam a mesma sensação térmica. De modo similar, seríamos capazes de observar que a resistência elétrica do bloco mais quente decresce com o tempo e que aquela do bloco mais frio aumenta com o tempo; no devido tempo, as resistências elétricas tornar-se-iam também constantes. Quando todas as mudanças em tais propriedades observáveis cessarem, a interação termina. Os dois blocos estão, dessa forma, em ***equilíbrio térmico***. Considerações desse tipo nos levam a concluir que os blocos possuem uma propriedade física que determina se eles estão em equilíbrio térmico. Essa propriedade é chamada ***temperatura***, e podemos postular que, quando os dois blocos estão em equilíbrio térmico, suas temperaturas são iguais.

interação térmica (calórica)

equilíbrio térmico

temperatura

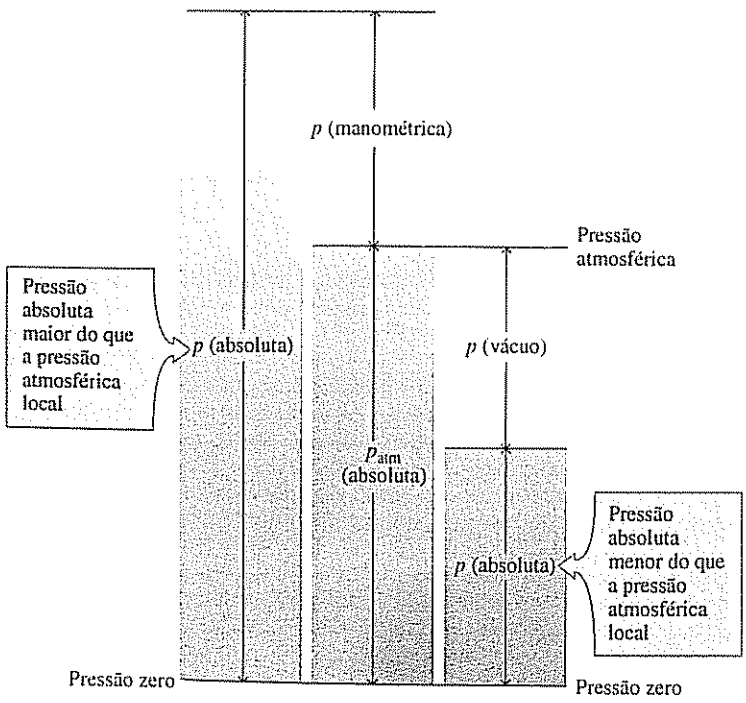


Fig. 1.11 Relação entre as pressões absoluta, atmosférica, manométrica e de vácuo.

lei zero da termodinâmica

É tópico de experiência verificar que, quando dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si. Este enunciado, que algumas vezes é denominado ***lei zero da termodinâmica***, é tacitamente admitido em toda medição de temperatura. Então, se desejamos saber se dois corpos apresentam a mesma temperatura não é necessário colocá-los em contato e verificar se suas propriedades observáveis mudam com o tempo, como foi descrito anteriormente. É apenas necessário verificar se eles estão individualmente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo. O terceiro corpo é usualmente um *termômetro*.

1.7.1 Termômetros

propriedade termométrica

Qualquer corpo com pelo menos uma propriedade mensurável que varia conforme sua temperatura evolui pode ser usado como um termômetro. Tal propriedade é chamada de ***propriedade termométrica***. A substância específica que exibe mudanças na sua propriedade termométrica é conhecida como substância *termométrica*.

Um dispositivo familiar para a medição da temperatura é o termômetro de bulbo, ilustrado na Fig. 1.12*a*, que consiste em um tubo de vidro capilar conectado a um bulbo cheio de um líquido, como o mercúrio ou o álcool, e selado na outra extremidade. O espaço acima do líquido é ocupado pelo vapor do líquido ou por um gás inerte. Conforme a temperatura aumenta, o líquido se expande em volume e se eleva no capilar. O comprimento L do líquido no capilar depende da temperatura. Conseqüentemente, o líquido é a substância termométrica e L é a propriedade termométrica. Embora esse tipo de termômetro seja geralmente utilizado para medições rotineiras de temperatura, ele não é muito adequado para aplicações em que uma extrema precisão é necessária.

Sensores mais precisos, conhecidos como *termopares*, estão baseados no princípio de que quando dois metais distintos são unidos uma força eletromotriz (fem), que é basicamente função da temperatura, será estabelecida em um circuito. Em certos termopares um dos fios é feito de platina com uma pureza especificada e o outro é uma liga de platina e ródio. Os termopares também utilizam cobre e constantan (uma liga de cobre e níquel) e ferro e constantan, e vários outros conjuntos de materiais. Uma outra classe importante de dispositivos de medição de temperatura é a dos sensores eletrorresistivos. Esses sensores são baseados no fato de que a resistência elétrica de uma série de materiais varia de uma maneira previsível com a temperatura. Os materiais usados com esse propósito são normalmente condutores (como platina, níquel ou cobre) ou semicondutores. Os dispositivos que usam condutores são conhecidos como *bulbos de resistência*. Os que utilizam semicondutores são chamados de *termistores*. A Fig. 1.12*b* mostra um termômetro de resistência elétrica a bateria usado atualmente.

Uma variedade de instrumentos mede a temperatura através da radiação, tal como o termômetro de ouvido mostrado na Fig. 1.12*c*. Eles são conhecidos pelos termos *termômetros de radiação* e *pirômetros ópticos*. Este tipo de termômetro difere daqueles considerados anteriormente, já que não é necessário que ele entre em contato com o corpo cuja temperatura deve ser determinada, o que é uma vantagem quando se lida com corpos em movimento ou corpos com temperaturas extremamente altas.

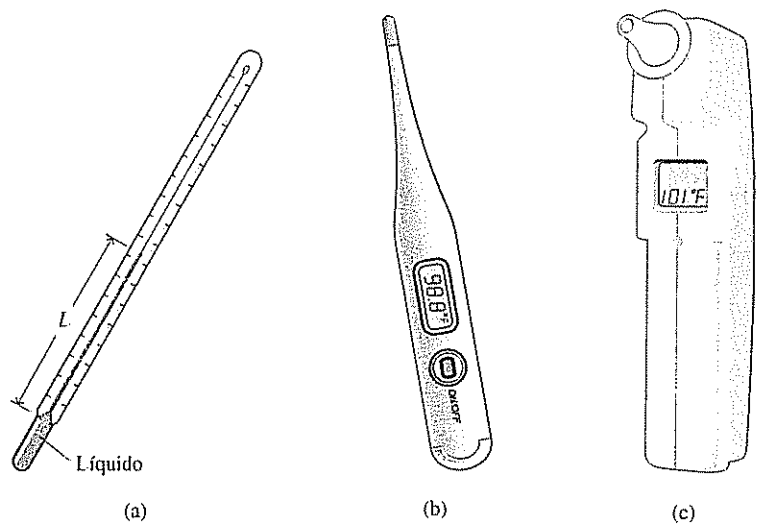


Fig. 1.12 Termômetros. (*a*) De bulbo. (*b*) Resistência elétrica. (*c*) Termômetro infravermelho de ouvido.

Energia e Meio Ambiente

Os termômetros de bulbo de mercúrio utilizados para a verificação de febre, antigamente usados por quase todos os médicos, são coisa do passado. A Academia Americana de Pediatria considerou o mercúrio como uma substância muito tóxica para estar presente nos domicílios familiares. Famílias estão adotando alternativas mais seguras e se livrando dos seus termômetros de mercúrio. O próprio ato de se livrar dos termômetros gera um problema, afirmam os peritos.

O descarte seguro de milhões de termômetros de bulbo de mercúrio obsoletos surgiu devido à preocupação com o meio ambiente. Para um descarte apropriado, os termômetros devem ser levados às estações de coleta de materiais de risco e não simplesmente ser jogados na lixeira, onde podem facilmente se quebrar, liberando o mercúrio. Fragmentos perdidos de termômetros quebrados e qualquer coisa que tenha entrado em contato com o mercúrio deveriam ser transportados para locais apropriados para descarte em recipientes fechados.

A presente geração de termômetros de bulbo para a verificação de febre e uso domiciliar contém misturas líquidas patenteadas não-tóxicas, alternativas seguras para o mercúrio. Outros tipos de termômetros também são utilizados em domicílios, incluindo os termômetros de resistência elétrica de bateria.

UNIFEMM - Centro Universitário de Sete Lagoas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

1.7.2 Escalas de Temperatura Kelvin e Rankine

Formas empíricas de medir a temperatura, tais como as consideradas na Seção 1.7.1, possuem limitações inerentes ⇨ **POR EXEMPLO...** A tendência de o líquido congelar em um termômetro de bulbo sujeito a baixas temperaturas impõe um limite inferior na gama de temperaturas que podem ser medidas. Em altas temperaturas os líquidos evaporam, e dessa forma essas temperaturas também não podem ser determinadas por um termômetro de bulbo. Conseqüentemente, diversos termômetros *diferentes* seriam necessários para cobrir um amplo intervalo de temperatura. ⇦

Tendo em vista as limitações dos meios empíricos para a medição da temperatura é desejável ter-se um procedimento de atribuição de valores para a temperatura, independente das propriedades de qualquer substância em particular ou de classes de substâncias. Tal escala é denominada escala *termodinâmica* de temperatura. A ***escala Kelvin*** é uma escala termodinâmica absoluta que fornece uma definição contínua de temperatura, válida em todos os intervalos de temperatura. A unidade de temperatura na escala Kelvin é o kelvin (K). O kelvin é a unidade-base SI para a temperatura.

escala Kelvin

Para o desenvolvimento da escala Kelvin é necessário o uso do princípio da conservação de energia e da segunda lei da termodinâmica; assim, discussões adicionais sobre esse tópico serão adiadas para a Seção 5.8, depois que esses princípios tiverem sido apresentados. No entanto, podemos notar que a escala Kelvin parte de 0 K, e valores inferiores a este não são definidos.

Por definição, a ***escala Rankine***, cuja unidade é o grau Rankine (°R), é proporcional à temperatura Kelvin de acordo com

escala Rankine

$$T(°R) = 1{,}8T(K) \tag{1.16}$$

Conforme evidenciado pela Eq. 1.16, a escala Rankine também é uma escala termodinâmica absoluta, com um zero absoluto que coincide com o zero absoluto da escala Kelvin. Nas relações termodinâmicas a temperatura é sempre colocada em termos das escalas Rankine ou Kelvin, a não ser que seja estabelecido algo em contrário. Ainda assim, as escalas Celsius e Fahrenheit, consideradas a seguir, são freqüentemente encontradas.

1.7.3 Escalas Celsius e Fahrenheit

A Fig. 1.13 mostra a relação entre as escalas Kelvin, Rankine, Celsius e Fahrenheit, assim como os valores de temperatura correspondentes a três pontos fixos: o ponto triplo, o ponto de gelo e o ponto de vapor.

Com base em um acordo internacional, as escalas de temperatura são definidas por um valor numérico associado a um ponto fixo padrão, que é facilmente reproduzível. Trata-se do ***ponto triplo*** da água: o estado de equilíbrio entre vapor, gelo e água líquida (Seção 3.2). Por questão de conveniência, a temperatura neste ponto fixo padrão é definida como 273,16 kelvins, abreviado por 273,16 K. Isso faz com que o intervalo de temperatura entre o *ponto de gelo*[1] (273,15 K) e o *ponto de vapor*[2] seja igual a 100 K e, conseqüentemente, esteja em acordo com o intervalo na escala Celsius, que assinala 100 graus Celsius para essa diferença.

ponto triplo

A ***escala de temperatura Celsius*** usa como unidade o grau Celsius (°C), que possui a mesma magnitude do kelvin. Assim, as *diferenças* de temperatura em ambas as escalas são idênticas. No entanto,

escala Celsius

[1] O estado de equilíbrio entre gelo e água saturada à pressão de 1 atm
[2] O estado de equilíbrio entre vapor e água líquida à pressão de 1 atm

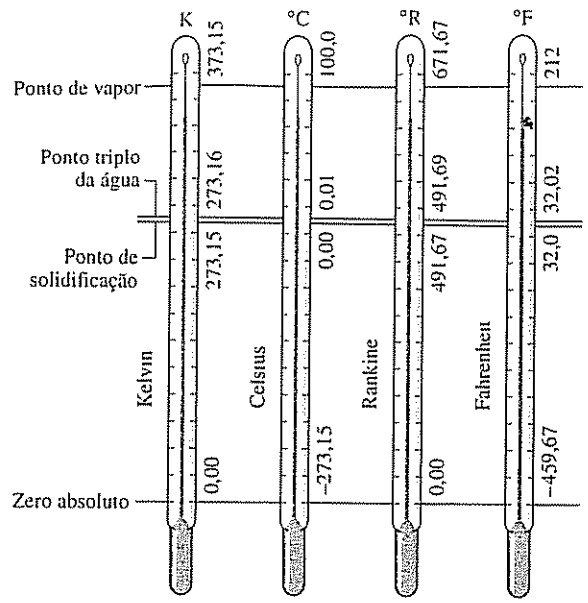


Fig. 1.13 Comparação entre escalas de temperaturas.

o ponto zero na escala Celsius é deslocado para 273,15 K, como ilustrado na seguinte relação entre a temperatura Celsius e a temperatura Kelvin

$$T(°C) = T(K) - 273{,}15 \tag{1.17}$$

Disso pode-se concluir que na escala Celsius o *ponto triplo* da água é 0,01°C e que 0 K corresponde a −273,15°C. Esses valores estão apresentados na Fig. 1.13.

escala Fahrenheit

Um grau com a mesma magnitude do utilizado na escala Rankine é usado na ***escala Fahrenheit***, mas o ponto zero é transladado de acordo com a relação

$$T(°F) = T(°R) - 459{,}67 \tag{1.18}$$

Tome Nota

Nos cálculos de engenharia é comum arredondar os últimos números das Eqs. 1.17 e 1.18 para 273 e 460, respectivamente. Isso é feito freqüentemente neste livro.

Substituindo as Eqs. 1.17 e 1.18 na Eq. 1.16, segue-se que

$$T(°F) = 1{,}8T(°C) + 32 \tag{1.19}$$

Essa equação mostra que a temperatura Fahrenheit do ponto de solidificação (0°C) é 32°F e o do ponto de vapor (100°C) é 212°F. Os 100 graus Celsius ou Kelvin entre o ponto de gelo e o ponto de vapor correspondem a 180 graus Fahrenheit ou Rankine, como mostra a Fig. 1.13.

Bio conexões

A *criobiologia*, a ciência da vida a baixas temperaturas, compreende o estudo biológico de materiais e sistemas (proteínas, células, tecidos e órgãos) a temperaturas que vão desde a criogenia (abaixo de aproximadamente 120 k) até a hipotermia (temperatura baixa do corpo). Aplicações incluem liofilização na indústria farmacêutica, criocirurgias para remover tecido doente, estudo da adaptação de animais e plantas ao frio e armazenamento a longo prazo de células e tecidos (chamado de *criopreservação*).

A criobiologia possui aspectos desafiadores para a engenharia devido às necessidades de refrigeradores capazes de alcançar as baixas temperaturas requeridas pelos pesquisadores. Refrigeradores que suportem as temperaturas criogênicas requeridas pela pesquisa em ambiente de baixa gravidade da Estação Espacial Internacional, mostrada na Tabela 1.1, são ilustrativos. Tais refrigeradores necessitam ser extremamente compactos e econômicos em termos de potência. Além do mais, eles não devem causar riscos. Pesquisas de ponta que requerem um congelador devem incluir o crescimento de cristais de proteína quase perfeitos, importante para a compreensão da estrutura e da função das proteínas e, por fim, para o projeto de novos medicamentos.

1.8 Projeto de Engenharia e Análise

Uma importante função da engenharia é a de projetar e analisar sistemas que tenham por objetivo atender às necessidades humanas. O projeto e a análise são considerados nesta seção.

1.8.1 Projeto

Um projeto de engenharia é um processo de tomada de decisão em que princípios extraídos da engenharia e de outros campos, como economia e estatística, são aplicados, usualmente de forma interativa, de modo a planejar um sistema, um componente de um sistema ou um processo. Os elementos básicos de um projeto incluem o estabelecimento de objetivos, síntese, análise, construção, testes e avaliações. Os projetos normalmente estão sujeitos a uma variedade de ***condicionantes*** associados a fatores econômicos, de segurança, de impacto ambiental, entre outros.

condicionantes de projeto

Os projetos geralmente têm origem a partir do reconhecimento de uma necessidade ou de uma oportunidade que, no começo, é apenas parcialmente entendida. Assim, antes da busca de soluções é importante definir os objetivos de um projeto. Os primeiros passos em um projeto de engenharia incluem a determinação quantitativa do desempenho e a identificação de projetos alternativos *factíveis* que atendam às especificações. Entre esses projetos factíveis existem, geralmente, um ou mais que são "melhores" de acordo com alguns critérios: custo mais baixo, maior eficiência, menor tamanho, menor peso etc. Outros fatores importantes na seleção de um projeto final incluem a confiabilidade, a possibilidade de manufatura e de manutenção e as considerações de mercado. Conseqüentemente, deve ser buscado um compromisso entre os vários critérios, e podem existir soluções alternativas de projeto que são viáveis.[3]

1.8.2 Análise

Um projeto demanda uma síntese: a seleção e a reunião de componentes de modo a formar um conjunto coordenado. No entanto, como cada componente individual pode variar em tamanho, desempenho, custo etc., é geralmente necessário submeter cada componente a um estudo ou a uma análise considerável antes que seja feita a escolha final. ⇨ **POR EXEMPLO...** um projeto proposto para um sistema de prevenção de incêndio poderia exigir uma tubulação correndo pelo teto juntamente com numerosos *sprinklers*. Uma vez que uma configuração global tenha sido determinada, uma análise detalhada de engenharia seria necessária para especificar o número e o tipo de *sprinklers*, o material da tubulação e os diâmetros dos tubos para os vários ramos do sistema. A análise deve também assegurar que todos os componentes formem um conjunto homogêneo de trabalho, ao mesmo tempo em que restrições importantes de custo, códigos e normas técnicas sejam atendidas. ⇦

Os engenheiros freqüentemente realizam análises, seja explicitamente, em função de um procedimento de projeto, seja por algum outro propósito. As análises envolvendo os tipos de sistemas considerados neste livro usam, direta ou indiretamente, uma ou mais de três leis básicas. Essas leis, que independem da substância ou do conjunto de substâncias em consideração, são:

1. princípio da conservação de massa
2. princípio da conservação de energia
3. segunda lei da termodinâmica

Além dessas leis, normalmente é necessário que se utilizem relações entre as propriedades da substância ou das substâncias em questão (Caps. 3, 6, 11 a 14). A segunda lei do movimento de Newton (Caps. 1, 2 e 9), relações como o modelo de Fourier para condução (Cap. 2) e os princípios de engenharia econômica (Cap. 7) também podem ser empregados.

Os primeiros passos em uma análise termodinâmica são a definição do sistema e a identificação das interações relevantes com as vizinhanças. O foco então se volta para as leis físicas pertinentes e para as relações que permitam que o comportamento do sistema seja descrito em termos de um ***modelo de engenharia***. O objetivo da modelagem é o de obter uma representação simplificada do comportamento do sistema que seja suficientemente fiel para o propósito da análise, mesmo que muitos aspectos exibidos pelo sistema real sejam ignorados. Por exemplo, idealizações comumente usadas em mecânica para simplificar a análise e obter um modelo tratável incluem hipóteses de massas pontuais, polias sem atrito e vigas rígidas. Uma modelagem adequada demanda experiência, e é uma parte da *arte* da engenharia.

modelo de engenharia

A análise de engenharia é mais eficiente quando é feita de forma sistemática. Isso será considerado a seguir.

1.9 Metodologia para a Solução de Problemas de Termodinâmica

A meta principal deste livro-texto é o de ajudá-lo a aprender a resolver problemas de engenharia que envolvam os princípios da termodinâmica. Para atingir esse objetivo são fornecidos numerosos

[3]Para discussões adicionais, veja A. Bejan, G. Tsatsaronis e M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 1996, Cap. 1.

exemplos resolvidos, assim como problemas propostos ao final dos capítulos É extremamente importante que você estude os exemplos *e* resolva os problemas, já que o domínio dos fundamentos decorre unicamente da prática

De modo a maximizar os resultados de seu esforço, é necessário desenvolver uma abordagem sistemática Você deve pensar cuidadosamente sobre sua solução e evitar a tentação de começar os problemas *pelo meio*, com a seleção de uma equação aparentemente apropriada, substituindo números de modo a extrair rapidamente um resultado com sua calculadora Essa abordagem ao acaso de solução de problemas pode conduzir a dificuldades à medida que os problemas se tornarem mais complicados Dessa forma, recomendamos enfaticamente que as soluções dos problemas sejam organizadas usando os *cinco passos* a seguir, que são empregados nos exemplos resolvidos deste texto

1. **Dado:** enuncie de forma sucinta, com suas próprias palavras, o que se conhece Isto requer que você leia o problema cuidadosamente *e* pense sobre ele.

2. **Pede-se:** enuncie concisamente, com suas próprias palavras, o que deve ser determinado.

3. **Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:** desenhe um esboço do sistema a ser considerado Decida se a análise mais apropriada deve ser feita utilizando-se o conceito de sistema fechado ou de volume de controle, e identifique cuidadosamente a fronteira. Adicione ao diagrama informações do enunciado do problema que sejam relevantes

   Liste todos os valores de propriedades que são fornecidos ou antecipe aqueles que podem ser necessários para cálculos subseqüentes Esboce diagramas de propriedades apropriados (veja Seção 3 2), localizando pontos-chave de estado e indicando, se possível, os processos executados pelo sistema

   A importância de bons esboços do sistema e de diagramas de propriedades não deve ser subestimada. Freqüentemente eles são instrumentos que o ajudam a pensar claramente sobre o problema

4. **Modelo de Engenharia:** para formar um registro de como você *modela* o problema, liste todas as *hipóteses simplificadoras* e as *idealizações* feitas a fim de tornar o problema viável. Algumas vezes essa informação pode ser adicionada aos esboços do passo anterior O desenvolvimento de um modelo apropriado é um aspecto-chave para o sucesso da solução do problema

5. **Análise:** usando as hipóteses e idealizações adotadas, simplifique as equações de governo e as relações adequadas, colocando-as nas formas que irão produzir os resultados desejados.

   É aconselhável trabalhar com as equações o máximo possível antes de substituir os dados numéricos Após as equações serem simplificadas e colocadas em suas formas finais, analise-as de modo a determinar quais informações adicionais podem ser necessárias Identifique as tabelas, os gráficos ou as equações de propriedades que forneçam os valores desejados Esboços de diagramas de propriedades adicionais podem ser úteis neste ponto para esclarecer estados e processos

   Quando todas as equações e dados estiverem disponíveis, substitua os valores numéricos nas equações Cuidadosamente verifique se o sistema de unidades empregado é consistente e apropriado Realize, então, os cálculos necessários.

   Finalmente, avalie se as magnitudes dos valores numéricos são razoáveis e se os sinais algébricos associados aos valores numéricos estão corretos

O formato de solução de problemas usados neste texto tem por objetivo *guiar* o seu raciocínio, e não substituí-lo Dessa forma, você deve evitar a aplicação mecânica desses cinco passos, já que isso por si só traria poucos benefícios Realmente, à medida que uma certa solução avança, você pode ter que retornar a um passo anterior e revisá-lo tendo em vista um melhor entendimento do problema Por exemplo, poderia ser necessário adicionar ou suprimir uma hipótese, rever um esboço, determinar dados adicionais de propriedades, e assim por diante

Os exemplos resolvidos fornecidos neste livro freqüentemente possuem notas com vários comentários para ajudar na aprendizagem, inclusive comentários sobre o que foi aprendido, identificando aspectos-chave da solução e discutindo como resultados melhores podem ser obtidos mediante a eliminação de certas hipóteses Tais comentários são opcionais nas suas soluções.

Em alguns exemplos anteriores e problemas no final dos capítulos o roteiro de solução de problemas pode parecer desnecessário ou difícil No entanto, à medida que os problemas se tornam mais complexos você verá que ele ajuda a reduzir erros, economiza tempo e fornece uma compreensão mais profunda do problema em questão

O exemplo que se segue ilustra o uso dessa metodologia de solução, juntamente com importantes conceitos sobre sistema introduzidos previamente, incluindo a identificação das interações que ocorrem na fronteira

Exemplo 1.1 USANDO A METODOLOGIA DE SOLUÇÃO E O CONCEITO DE SISTEMAS

Um gerador eólico turboelétrico é montado no topo de uma torre. A eletricidade é gerada à medida que o vento incide constantemente através das pás da turbina. A saída elétrica do gerador alimenta uma bateria.

(a) Considerando apenas o gerador eólico turboelétrico como o sistema, identifique as posições nas fronteiras do sistema, onde o sistema interage com as vizinhanças. Descreva as mudanças que ocorrem no sistema com o tempo.
(b) Repita a análise para um sistema que inclui apenas a bateria.

Solução

Dado: um gerador eólico turboelétrico fornece eletricidade para uma bateria.

Pede-se: para um sistema que consiste em (a) um gerador eólico turboelétrico, (b) uma bateria, identifique os locais onde o sistema interage com as vizinhanças e descreva as mudanças que ocorrem no sistema com o tempo.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

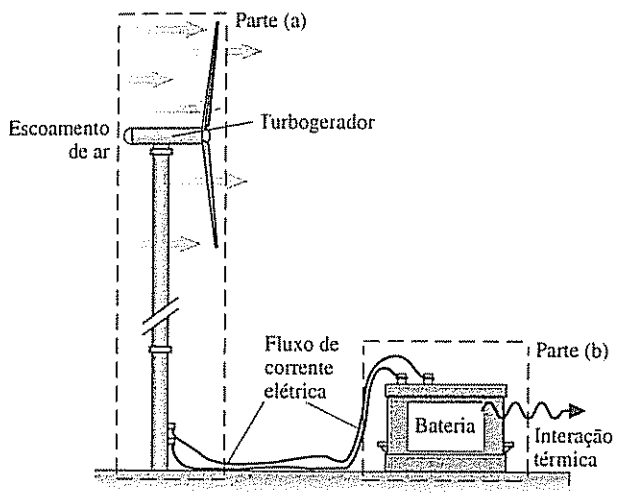


Fig. E1.1.

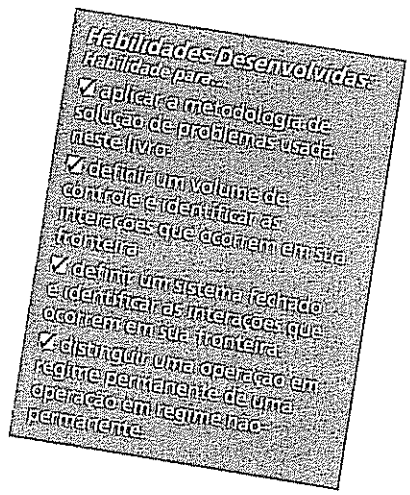
Modelo de Engenharia:

1. Na parte (a), o sistema é o volume de controle mostrado pela linha tracejada na figura.
2. Na parte (b), o sistema é o sistema fechado mostrado pela linha tracejada na figura.
3. A velocidade do vento é constante.

Análise:

(a) Neste caso, a turbina eólica é estudada como um volume de controle, com fluxo de ar através da fronteira. Uma outra interação principal entre o sistema e as suas vizinhanças é a corrente elétrica que passa pelos fios. No entanto, sob um ponto de vista macroscópico essa interação não é considerada uma transferência de massa. Com um vento uniforme, o turbogerador possivelmente atingirá um regime permanente de operação, em que a velocidade de rotação das pás é constante e é gerada uma corrente elétrica constante.

(b) Neste caso, a bateria é estudada como um sistema fechado. A principal interação entre o sistema e suas vizinhanças é a corrente elétrica que passa pela bateria através da fiação. Conforme discutido na parte (a), esta interação não é considerada uma transferência de massa. À medida que a bateria é carregada e ocorrem reações químicas em seu interior, a temperatura da superfície da bateria pode se tornar um pouco elevada, e uma interação térmica entre a ba-



teria e suas vizinhanças pode ocorrer. Essa interação possui possivelmente uma importância secundária. Além disso, conforme a bateria é carregada, seu estado muda com o tempo. A bateria não está em regime permanente.

Usando termos familiares vistos no curso de Física, o sistema da parte (a) envolve a *conversão* de energia cinética em eletricidade, enquanto o sistema da parte (b) envolve o *armazenamento* de energia no interior da bateria.

Teste-Relâmpago

Pode-se considerar que um sistema *geral*, que consiste no turbogerador e na bateria, opera em regime permanente? Explique.

Resposta Não. Um sistema está em regime permanente apenas se nenhuma de suas propriedades varia com o tempo.

Resumo do Capítulo e Guia de Estudo

Neste capítulo apresentamos alguns dos conceitos fundamentais e definições usados no estudo da termodinâmica. Os princípios da termodinâmica são aplicados por engenheiros para analisar e projetar uma grande variedade de dispositivos destinados a atender às necessidades humanas.

Um aspecto importante da análise termodinâmica é o de identificar sistemas e descrever o comportamento de sistemas em termos de propriedades e de processos. Três propriedades importantes discutidas neste capítulo são: o volume específico, a pressão e a temperatura.

Em termodinâmica consideramos sistemas em estados de equilíbrio e sistemas que passam por processos (mudanças de estado). Estudamos processos nos quais os estados intermediários não são estados de equilíbrio e processos em que o desvio do equilíbrio é desprezível.

Neste capítulo, introduzimos as unidades de massa, comprimento, tempo, força e temperatura no SI e no sistema inglês de engenharia. É necessário se familiarizar com ambos os sistemas de unidades durante o uso deste livro. Os *fatores de conversão* podem ser encontrados no início do livro.

O Cap. 1 foi finalizado com discussões sobre como a termodinâmica pode ser usada em um projeto de engenharia e como resolver problemas de termodinâmica de uma forma sistemática.

Este livro possui várias características que facilitam o estudo e contribuem para uma melhor compreensão. Para uma visão geral, veja *Como Usar Este Livro de Forma Eficaz*, no início do livro.

Os itens a seguir fornecem um guia de estudo para este capítulo. Ao término do estudo do texto e dos exercícios dispostos no final do capítulo você estará apto a

- ✓ descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subseqüentes
- ✓ usar as unidades de massa, comprimento, tempo, força e temperatura no SI e no sistema inglês de engenharia e aplicar apropriadamente a segunda lei de Newton, Eqs. 1.16-1.19
- ✓ trabalhar em uma base molar utilizando a Eq. 1.8
- ✓ identificar uma fronteira apropriada de um sistema e descrever as interações entre o sistema e suas vizinhanças
- ✓ aplicar a metodologia de solução de problemas discutida na Seção 1.9

Conceitos Fundamentais na Engenharia

vizinhanças ***fronteira*** ***sistema fechado*** ***volume de controle*** ***propriedade*** ***estado*** ***processo*** ***propriedade extensiva*** ***propriedade intensiva*** ***equilíbrio*** ***volume específico*** ***pressão*** ***temperatura*** ***escala Kelvin*** ***escala Rankine***

Equações Principais

$n = m/M$	(1.8)	Relação entre quantidades de matéria em uma base mássica, m, e uma base molar, n.
$T(°R) = 1{,}8\,T(K)$	(1.16)	Relação entre as temperaturas Rankine e Kelvin.
$T(°C) = T(K) - 273{,}15$	(1.17)	Relação entre as temperaturas Celsius e Kelvin.
$T(°F) = T(°R) - 459{,}67$	(1.18)	Relação entre as temperaturas Fahrenheit e Rankine
$T(°F) = 1{,}8T(°C) + 32$	(1.19)	Relação entre as temperaturas Fahrenheit e Celsius

Exercícios: pontos de reflexão para os engenheiros

1. Considere como sistema um soprador de folhas impulsionado por um motor a gasolina. A análise mais correta deve ser feita utilizando-se o conceito de sistema fechado ou por meio de um volume de controle? Há algum impacto ambiental associado a um soprador de folhas? Repita esta análise para um soprador de folhas *elétrico*.

2. Que componentes seriam requeridos para um projeto de laboratório para o ensino médio de uma escola, visando determinar a eletricidade gerada por um *hamster* correndo em sua roda de exercícios?

3. Baseado em uma análise macroscópica, uma quantidade de ar a 100 kPa e 20°C encontra-se em equilíbrio. No entanto, os átomos e moléculas que compõem o ar encontram-se em constante movimento. Como você pode resolver essa aparente contradição?

4. Ar a 1 atm (101 325 Pa) e 70°F (21,1°C), contido em um tanque fechado, satisfaz a hipótese de meio contínuo. No entanto, quando uma quantidade suficiente de ar é extraída do tanque esta hipótese não se aplica ao ar restante. Por quê?

5. O que é um *nanotubo*?

6. O valor de uma propriedade intensiva, tal como a pressão ou a temperatura, pode ser uniforme em relação à posição ao longo de um sistema? Ele pode ser constante com o tempo? Ele pode ser constante com ambos?

7. Você já deve ter usado em outras matérias da engenharia ou da Física a unidade de massa *slug* (14,6 kg). Qual a relação entre o slug e a massa (libra-massa)? O slug é uma unidade de massa conveniente?

8. Laura toma o elevador no décimo andar do prédio em que trabalha para descer ao saguão. Ela deveria esperar que a pressão do ar entre os dois níveis fosse muito diferente?

9. As pressões *sistólica* e *diastólica* registradas na aferição da pressão sanguínea são absolutas, manométricas ou de vácuo?

10. Uma folha de dados indica que a pressão na entrada de uma bomba é de −15 kPA. O que indica essa pressão negativa?

11. Quando edifícios possuem grandes ventiladores de exaustão, as portas externas podem apresentar dificuldade para serem abertas devido à diferença de pressão entre os lados interno e externo. Você acredita que seria possível abrir uma porta de 4 por 7 ft (1,2 por 2,1 m) se a pressão interna fosse de 0,04 lbf/in² (275,8 Pa)(vácuo)?

12. Como fazem os dermatologistas para remover lesões pré-cancerosas na pele através da *criocirurgia*?

13. Quando o painel de instrumentos de um carro fornece a temperatura do ar externo, onde está localizado o sensor de temperatura?

Problemas: desenvolvendo habilidades para a engenharia

Explorando Conceitos sobre Sistemas

1.1 Usando a Internet, obtenha informações sobre a operação de uma aplicação listada na Tabela 1.1. Obtenha informações suficientes para fornecer uma descrição completa da aplicação, juntamente com os aspectos relevantes da termodinâmica. Apresente os resultados de sua pesquisa em um memorando.

1.2 Conforme ilustrado na Fig. P1.2, água circula através de um sistema de tubulação, suprindo várias necessidades domésticas. Considerando o aquecedor de água como um sistema, identifique os locais na fronteira do sistema, onde o sistema interage com suas vizinhanças e descreva o que acontece no interior do sistema. Repita a análise para a lavadora de louças e para o chuveiro. Apresente suas conclusões em um memorando.

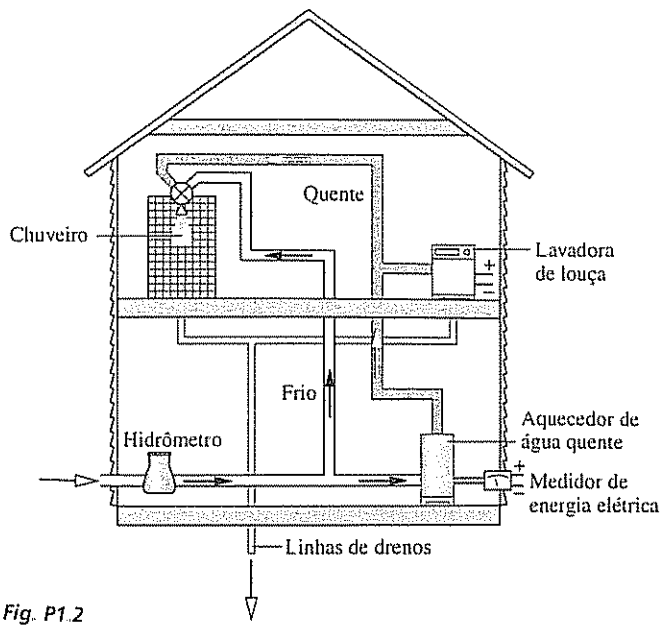


Fig. P1.2

1.3 Aquários de recife, como o ilustrado na Fig. P1.3, são atrações populares. Tais instalações empregam uma variedade de dispositivos, incluindo aquecedores, bombas, filtros e controladores, para criar um ambiente saudável para os seres vivos que residem no aquário, os quais incluem tipicamente espécies de peixes, juntamente com corais, mariscos e anêmonas. Considerando um aquário de recife como um sistema, identifique os locais na fronteira do sistema onde este interage com suas vizinhanças. Usando a Internet, descreva o que acontece no interior do sistema e comente medidas para manter a saúde e a segurança da vida aquática. Repita a análise para a lavadora de louças e para o chuveiro. Apresente suas conclusões em um memorando.

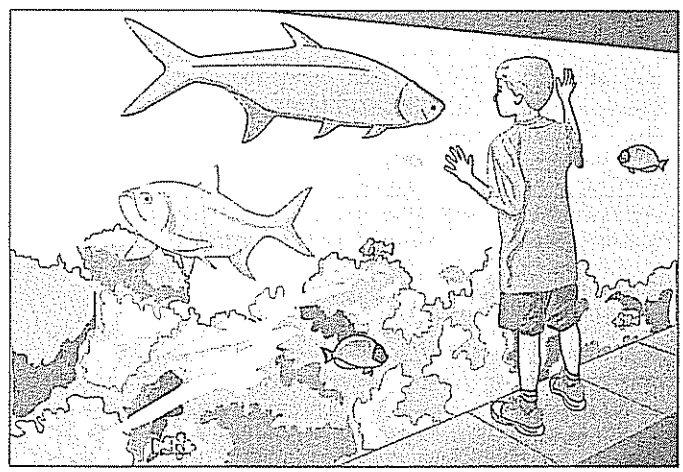


Fig. P1.3

Trabalhando com Força e Massa

1.4 Um objeto possui uma massa de 10 lb (4,5 kg). Determine o seu peso, em lbf, em um local onde a aceleração da gravidade é 31,0 ft/s² (9,4 m/s²).

1.5 Um objeto pesa 25 kN em um local onde a aceleração da gravidade é 9,8 m/s². Determine sua massa em kg.

1.6 Se o Super-Homem possui uma massa de 100 kg no planeta onde nasceu, chamado Krypton, onde a aceleração da gravidade é 25 m/s², determine (a) seu peso em Krypton, em N, e (b) sua massa, em kg, e seu peso, em N, na Terra, onde $g = 9{,}81$ m/s².

1.7 Uma pessoa cuja massa é 150 lb (68,0 kg) pesa 144,4 lbf (642,3 N) Determine (a) a aceleração *local* da gravidade em ft/s² e (b) a massa da pessoa, em lb, e o peso, em lbf, se g = 32,174 ft/s² (9,8 m/s²)

1.8 Um gás ocupa um volume de 25 ft³ (0,71 m³)e pesa 3,5 lbf (15,6 N) na Lua, onde a aceleração da gravidade é de 5,47 ft/s² (1,7 m/s²) Determine o seu peso, em lbf, e sua massa específica, em lb/ft³, em Marte, onde g = 12,86 ft/s² (3,9 m/s²)

1.9 Em vários acidentes frontais severos de automóveis uma desaceleração de 60 g ou mais (1 g = 32,2 ft/s² = 9,8 m/s²) freqüentemente resulta em uma fatalidade Que força, em lbf, age sobre uma criança cuja massa é de 50 lb (22,7 kg), quando sujeita a uma desaceleração de 60 g?

1.10 Os pesos atômico e molecular de algumas substâncias de uso corrente estão listados nas tabelas do Apêndice A-1 e A-1E Usando os dados da tabela apropriada, determine

(a) a massa, em kg, de 10 kmol de cada uma das seguintes substâncias: ar, H_2O, Cu e SO_2

(b) o número de lbmol em 20 lb (9,1 kg) de cada uma das seguintes substâncias: Ar, H_2, N_2 e C

1.11 Quando um objeto de 5 kg de massa é suspenso por uma mola, observa-se uma distensão de 8 cm A deflexão da mola possui uma relação linear com o peso da massa suspensa Quanto vale a constante de proporcionalidade, em newtons por cm, se g = 9,81 m/s²?

1.12 Uma mola se comprime de 0,12 in (0,003 m) para cada 1 lbf (4,4 N) de força aplicada Determine a deflexão da mola, em polegadas, causada pelo peso de um objeto cuja massa é de 15 lb (6.8 kg) A aceleração local da gravidade é dada por g = 31,4 ft/s² (9,6 m/s²)

1.13 Um instrumento simples para medir a aceleração da gravidade emprega uma mola *linear* por meio da qual uma massa é suspensa A mola se distende de 0,291 in (0,007 m) em um local na Terra onde a aceleração é de 32,174 ft/s² (9,8 m/s²) Se a mola se distende em 0.116 in (0.003 m) quando o instrumento se encontra em Marte, qual é a aceleração da gravidade marciana? Qual seria a distensão da mola na Lua, onde g = 5,471 ft/s² (1,7 m/s²)?

1.14 Estime a magnitude da força, em lbf, exercida por um cinto de segurança em um motorista de 200 lb (90,7 kg) durante uma colisão frontal que desacelera um carro de 10 mi/h (4,5 m/s) até o repouso em 0,1 s Exprima a desaceleração deste carro em múltiplos da aceleração-padrão da gravidade, ou g

1.15 Um objeto cuja massa é 2 kg é submetido a uma força que o impulsiona para cima A única outra força agindo sobre o objeto é a força da gravidade A aceleração líquida do objeto é para cima com uma magnitude de 5 m/s² A aceleração da gravidade é de 9,81 m/s² Determine a magnitude da força que impulsiona o corpo para cima, em N

1.16 Um objeto cuja massa é 35 lb (15,9 kg) é submetido a uma força de 15 lbf (66,7 N) que o impulsiona para cima A única outra força agindo sobre o objeto é a força da gravidade Determine a aceleração líquida do objeto, em ft/s², considerando que a aceleração da gravidade é constante, g = 32,2 ft/s² (9,8 m/s²) A aceleração líquida é para cima ou para baixo?

1.17 Um astronauta pesa 700 N na Terra, onde g = 9,81 m/s² Qual o peso do astronauta, em N, em uma estação espacial em órbita, onde a aceleração da gravidade é 6 m/s²? Expresse cada peso em lbf

1.18 Se a variação da aceleração da gravidade, em m/s², com a altura z, em metros, acima do nível do mar é dada por $g = 9{,}81 - (3{,}3 \times 10^{-6})z$, determine a variação percentual do peso de um avião quando este está a 10 km altitude e se dirige a uma pista no nível do mar

1.19 O tanque de armazenamento de uma torre d'água tem um formato aproximadamente esférico com 30 ft (9,1 m) de raio Se a massa específica da água é de 62,4 lb/ft³ (999,5 kg/m³), qual é a massa de água armazenada na torre, em lb, quando o tanque está cheio? Qual é o peso, em lbf, da água se a aceleração local da gravidade é 32,1 ft/s² (9.8 m/s²)?

1.20 Conforme ilustrado na Fig P1 20, um cilindro feito de sucata compactada medindo 2 m de comprimento e 0,5 m de diâmetro é suspenso por uma balança de mola em um local onde a aceleração da gravidade é 9,78 m/s² Se a massa específica da sucata, em kg/m³, varia com a posição z de acordo com $\rho = 7800 - 360\,(z/L)^2$, determine a leitura da escala, em N

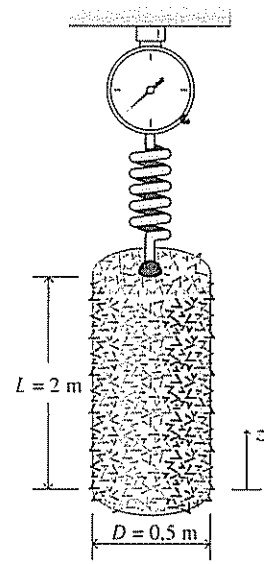


Fig. P1.20

Usando Volume Específico e Pressão

1.21 Um sistema fechado que consiste em 0,5 kmol de amônia ocupa um volume de 6 m³ Determine (a) o peso do sistema, em N, e (b) o volume específico, em m³/kmol e m³/kg Considere g = 9,81 m/s²

1.22 Um balão esférico de 10 ft (3,0 m) de diâmetro contém 35 lb (15,9 kg) de ar Determine para o ar (a) o volume específico, em ft³/lb e ft³/lbmol, e (b) o peso, em lbf Considere g = 31,0 ft/s² (9,4 m/s²)

1.23 Um recipiente fechado com volume de 1 litro contém 2,5 × 10^{22} moléculas de vapor de amônia Determine para a amônia (a) a quantidade presente, em kg e kmol, e (b) o volume específico, em m³/kg e m³/kmol

1.24 O volume específico do vapor d'água a 0,3 MPa e 160°C é dado por 0,651 m³/kg Se o vapor d'água ocupa um volume de 2 m³, determine (a) a quantidade presente, em kg e kmol, e (b) o número de moléculas

1.25 Quinze quilos de dióxido de carbono (CO_2) são introduzidos em um cilindro que possui um volume de 20 m³ e inicialmente contém 15 kg de CO_2 a uma pressão de 10 bar Mais tarde, uma pequena fratura se desenvolve, e o gás vaza lentamente do cilindro

(a) Determine o volume específico, em m³/kg, do CO_2 no cilindro em sua condição inicial Repita este cálculo após a adição de 15 kg

(b) Esboce graficamente a quantidade de CO_2 que vaza do cilindro, em kg, *versus* o volume específico do CO_2 restante no cilindro Considere que v varia até 1,0 m³/kg, no máximo

1.26 Consultando a internet, obtenha as condições do tempo em três locais de sua escolha Para cada um desses lugares expresse a pressão atmosférica local em bar e em atmosferas

1.27 Um sistema fechado que consiste em 5 kg de um gás sofre um processo durante o qual a relação entre a pressão e o volume específico é dada por $p\,v^{1.3} = constante$ O processo se inicia com p_1 = 1 bar, v_1 = 0,2 m³/kg e termina com p_2 = 0,25 bar Determine o volume final, em m³, e represente o processo em um gráfico de pressão *versus* o volume específico

1.28 Um sistema fechado que consiste em 2 lb (0,91 kg) de um gás sofre um processo durante o qual a relação entre a pressão e o volume é dada por $pV^n = constante$ O processo se inicia com p_1 = 20 lbf/in² (137 896 Pa), V_1 = 10 ft³ (0,28 m³) e termina com p_2 = 100 lbf/in² (689 480 Pa), V_2 = 2,9 ft³ (0,08 m³) Determine (a) o valor de n e (b) o volume específico nos estados 1 e 2, em ft³/lb Esboce cada um dos processos em um gráfico pressão-volume

1.29 Um sistema que consiste em nitrogênio (N_2) em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a p_1 = 20 lbf/in² (137 896 Pa), ocupa um volume de 2,5 ft³ (0,07 m³) O nitrogênio é comprimido para p_2 = 100 lbf/in² (689 480 Pa) e um volume final de 1,5 ft³ (0,04 m³) Durante o processo, a relação entre a pressão e o volume é linear Determine a pressão, em lbf/in², em um estado intermediário em que o volume é de 2,1 ft³ (0,06 m³), e esboce o processo em um gráfico de pressão *versus* volume

1.30 Um gás inicialmente a $p_1 = 1$ bar e ocupando um volume de 1 L é comprimido no interior de um conjunto cilindro-pistão até uma pressão final $p_2 = 4$ bar

(a) Se a relação entre a pressão e o volume durante a compressão é dada por $pV = constante$, determine o volume, em litros, para uma pressão de 3 bar. Trace também o processo global em um gráfico pressão *versus* volume

(b) Repita a análise para uma relação linear pressão-volume entre os mesmos estados finais.

1.31 Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão sofre três processos em série:

Processo 1-2: compressão com $pV = constante$, partindo de $p_1 = 1$ bar, $V_1 = 1{,}0$ m³ até $V_2 = 0{,}2$ m³

Processo 2-3: Expansão a pressão constante até $V_3 = 1{,}0$ m³

Processo 3-1: Volume constante

Esboce os processos em série em um diagrama p–V, atribuindo valores para pressão e volume a cada estado descrito

1.32 Conforme ilustrado na Fig 1 7, um manômetro está conectado a um tanque de gás no qual a pressão é de 104,0 kPa. O fluido manométrico é o mercúrio, com massa específica igual a 13,59 g/cm³. Considerando que $g = 9{,}81$ m/s² e a pressão atmosférica é 101,33 kPa, calcule

(a) a diferença de nível do mercúrio no manômetro, em cm

(b) a pressão manométrica do gás, em kPa

1.33 Um manômetro de vácuo instalado no duto de entrada de um ventilador fornece uma leitura de 4,2 in (0,11 m). A pressão atmosférica nas vizinhanças é de 14,5 lbf/in² (99 975 Pa). Determine a pressão absoluta no interior do duto, em lbf/in². A massa específica do fluido manométrico é de 49,94 lb/ft³ (799,9 kg/m³), e a aceleração da gravidade é de 32,2 ft/s² (9,7 m/s²)

1.34 A pressão absoluta no interior de um tanque é de 0,4 bar, e a pressão atmosférica nas vizinhanças é de 98 kPa. Que leitura, em kPa, seria fornecida por um manômetro de Bourdon instalado no tanque? Esta leitura é *manométrica* ou de *vácuo*?

1.35 O barômetro apresentado na Fig P1 35 contém mercúrio ($\rho = 13{,}59$ g/cm³). Se a pressão atmosférica local é de 100 kPa e $g = 9{,}81$ m/s², determine a altura da coluna de mercúrio, L, em mmHg e inHg

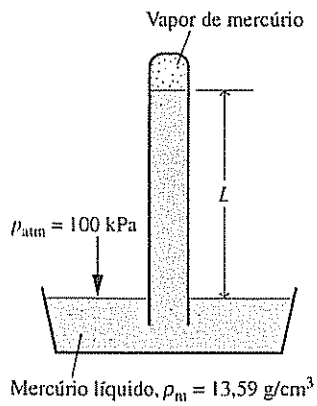


Fig. P1.35

1.36 Água escoa através de um *medidor Venturi*, conforme ilustrado na Fig P1 36. A pressão da água no tubo suporta colunas de água que diferem de 10 in (0,25 m) de altura. Determine a diferença de pressão entre os pontos a e b, em lbf/in². A pressão aumenta ou diminui na direção do escoamento? A pressão atmosférica é de 14,7 lbf/in² (101 354 Pa), o volume específico da água é de 0,01604 ft³/lb (0,001 m³/kg) e a aceleração da gravidade é $g = 32{,}0$ ft/s² (9,7 m/s²).

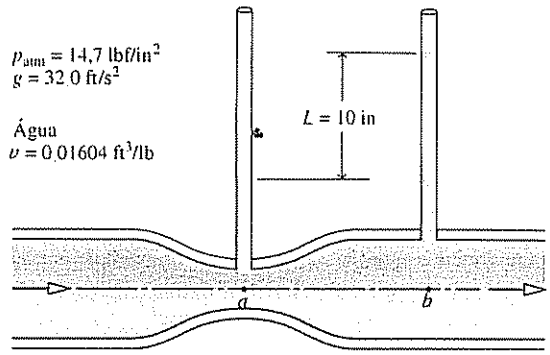


Fig. P1.36

1.37 A Fig P1 37 mostra um tanque no interior de um outro, cada um contendo ar. A pressão absoluta no tanque A é de 267,7 kPa. O manômetro A está instalado no interior do tanque B e registra 140 kPa. O manômetro de tubo em U conectado ao tanque B contém mercúrio. Usando os dados do diagrama, determine a pressão absoluta no interior do tanque B, em kPa. A pressão atmosférica nas vizinhanças do tanque B é de 101 kPa. A aceleração da gravidade é $g = 9{,}81$ m/s²

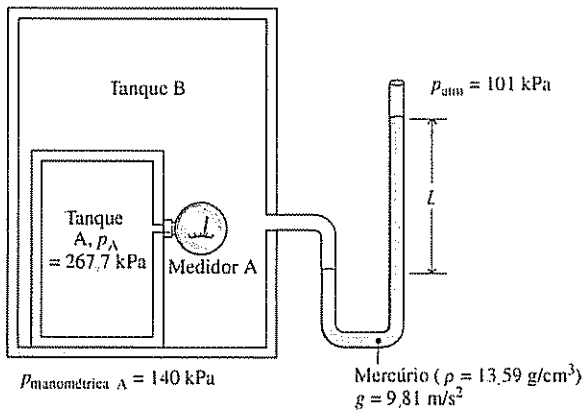


Fig. P1.37

1.38 Conforme ilustrado na Fig P1.38, um veículo de exploração submarina submerge de uma profundidade de 1000 ft (304,8 m). Considerando que a pressão atmosférica na superfície é de 1 atm, a massa específica da água é de 62,4 lb/ft³ (999,5 kg/m³) e $g = 32{,}2$ ft/s² (9,8 m/s²), determine a pressão sobre o veículo em atm

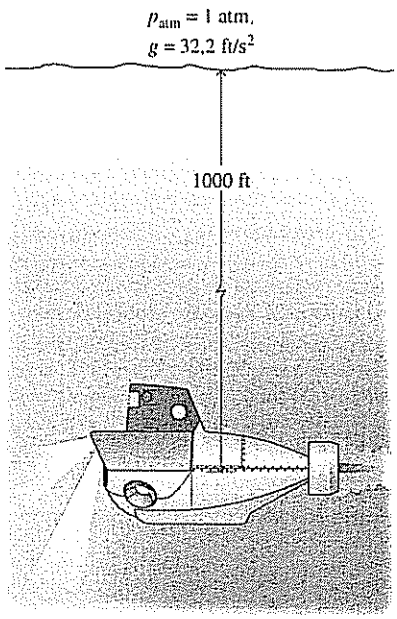


Fig. P1.38

1.39 Um manômetro de vácuo indica que a pressão do dióxido de carbono em um tanque fechado é −10 kPa. Um barômetro de mercúrio fornece a pressão atmosférica local dada por 750 mmHg. Determine a pressão absoluta do dióxido de carbono, em kPa. A massa específica do mercúrio é 13,59 g/cm³ e g = 9,81 m/s².

1.40 Refrigerante 22 entra no compressor de um sistema de refrigeração a uma pressão absoluta de 20 lbf/in² (137 896 Pa). Um medidor de pressão na saída do compressor indica uma pressão de 280 lbf/in² (1,9 × 10⁶ Pa) (manométrica). A pressão atmosférica é de 14,6 lbf/in² (100 664 Pa). Determine a variação entre a pressão absoluta de entrada e a de saída, em lbf/in² (Pa), e a razão entre a pressão de saída e a de entrada.

1.41 Conforme ilustrado na Fig. P1.41, um conjunto cilindro-pistão vertical com um resistor elétrico instalado contém ar. A atmosfera exerce uma pressão de 14,7 lbf/in² (101 354 Pa) no topo do pistão, o qual tem uma massa de 100 lb (45,4 kg) e uma área frontal correspondente a 1 ft² (0,09 m²). Conforme a corrente elétrica passa através do resistor o volume de ar aumenta, enquanto o pistão se move lentamente no cilindro. A aceleração local da gravidade é g = 32,0 ft/s² (9,7 m/s²). Determine a pressão do ar no conjunto cilindro-pistão, em lbf/in² e em psig.

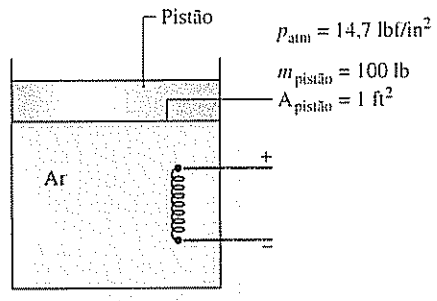


Fig. P1.41

1.42 Um conjunto cilindro-pistão orientado horizontalmente contém ar quente, conforme mostra a Fig. P1.42. O ar é resfriado lentamente partindo do volume inicial de 0,003 m³ até o volume final de 0,002 m³. Durante o processo a mola exerce uma força que varia linearmente do valor inicial de 900 N até o valor final correspondente a zero. A pressão atmosférica é de 100 kPa, e a área frontal do pistão é de 0,018 m². O atrito entre o pistão e a parede do cilindro pode ser desprezado. Para o ar contido no interior do conjunto cilindro-pistão determine a pressão inicial e a final, ambas em kPa e atm.

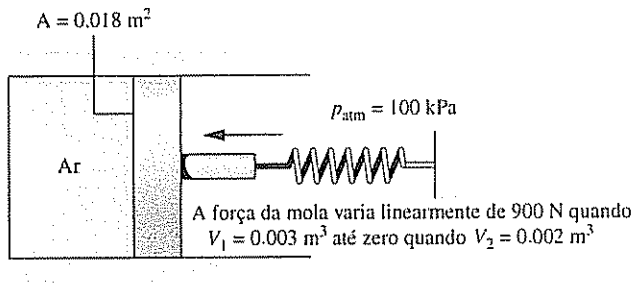


Fig. P1.42

1.43 A Fig. P1.43 mostra um conjunto vertical cilindro-pistão contendo ar. Uma mola é conectada sobre o topo do pistão de 10 kg e exposta à pressão atmosférica de 1 bar. Inicialmente, a base do pistão encontra-se em x = 0 e a mola exerce uma força desprezível sobre o mesmo. A válvula é aberta e ar entra no cilindro pela linha de alimentação, causando um aumento de volume no ar de 3,9 × 10⁻⁴ m³. A força exercida pela mola conforme o ar se expande no interior do cilindro varia linearmente com x de acordo com

$$F_{mola} = kx$$

onde k = 10 000 N/m. A área de face do pistão é de 7,8 × 10⁻³ m². Desprezando o atrito entre o pistão e as paredes do cilindro, determine a pressão do ar no interior do cilindro, em bar, quando o pistão se encontra em sua posição inicial. Repita esse cálculo para o pistão em sua posição final. A aceleração local da gravidade é 9,81 m/s².

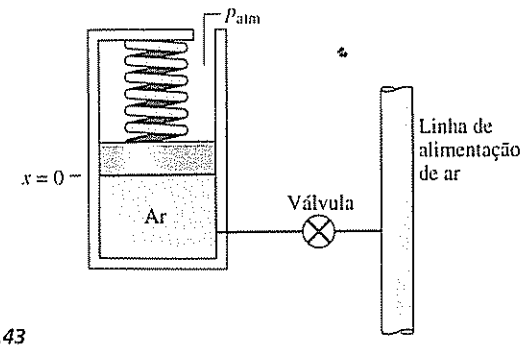


Fig. P1.43

1.44 Determine a força total, em kN, no fundo de uma piscina de 100 × 50 m. A profundidade da piscina varia linearmente ao longo do seu comprimento de 1 até 4 m. Determine também a pressão no chão no centro da piscina, em kPa. A pressão atmosférica é de 0,98 bar, a massa específica da água é de 998,2 kg/m³ e a aceleração local da gravidade é de 9,8 m/s².

1.45 A pressão da água em um encanamento geral de água localizado no nível da rua pode ser insuficiente para que a água alcance os andares superiores de edifícios altos. Nesse caso, a água pode ser bombeada para cima em direção a um tanque que abastece o edifício de água por gravidade. Para um tanque de armazenamento aberto, no topo de um edifício de 300 ft (91,4 m) de altura, determine a pressão, em lbf/in², no fundo do tanque quando contém água até uma profundidade de 20 ft (6,1 m). A massa específica da água é de 62,2 lb/ft³ (996,3 kg/m³), g = 32,0 ft/s² (9,7 m/s²), e a pressão atmosférica local é de 14,7 lbf/in² (101 354 Pa).

1.46 A Fig. P1.46 ilustra um manômetro *inclinado* usado para medir a pressão de um gás em um reservatório. (a) Usando os dados da figura, determine a pressão do gás em lbf/in². (b) Expresse a pressão manométrica ou a pressão de vácuo, conforme apropriado, em lbf/in². (c) Qual a vantagem que o manômetro inclinado apresenta sobre o manômetro do tipo tubo em U mostrado na Fig. 1.7?

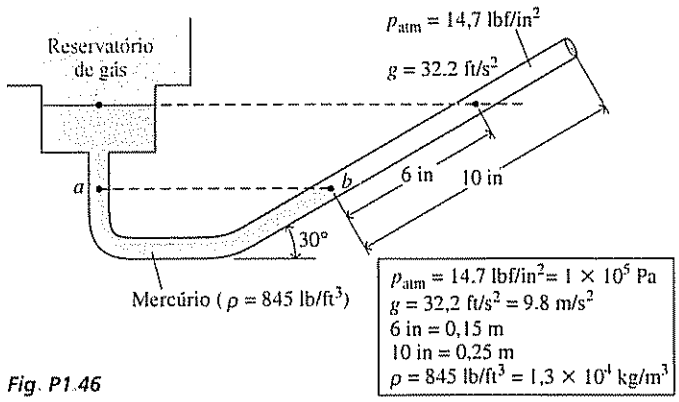


Fig. P1.46

1.47 A variação de pressão na biosfera afeta não apenas os seres vivos, mas também sistemas como aviões e veículos de exploração submarina.

(a) Represente graficamente a variação da pressão atmosférica, em atm, *versus* a elevação z acima do nível do mar, em km, no intervalo entre 0 e 10 km. Admita que o volume específico da atmosfera, em m³/kg, varie com a pressão local p, em kPa, de acordo com v = 72,435/p.

(b) Ilustre graficamente a variação da pressão, em atm, *versus* a profundidade z abaixo do nível do mar, em km, no intervalo entre 0 e 2 km. Admita que o volume específico da água do mar é constante, v = 0,956 × 10⁻³ m³/kg.

Em cada caso, considere g = 9,81 m/s² e que a pressão no nível do mar é de 1 atm.

1.48 Mil kg de gás natural a 100 bar e 255 K (−18,1°C) encontram-se armazenados em um tanque. Se a pressão, p, o volume específico, v, e a temperatura, T, do gás estão relacionados pela seguinte expressão

$$p = |(5{,}18 \times 10^{-3})T/(v - 0{,}002668)| - (8{,}91 \times 10^{-3})/v^2$$

onde v é dado em m³/kg, T em K e p em bar, determine o volume do tanque em m³. Represente graficamente também a variação da pressão *versus* o volume específico para as *isotermas* T = 250 K (−23,1°C), 500 K (226,8°C) e 1000 K (726,8°C).

1.49 Um tanque de 82,3 ft³ (2,3 m³) contém vapor d'água a 1500 lbf/in² ($10{,}3 \times 10^6$ Pa) e 1140°R (360,2°C). Se a pressão, p, o volume específico, v, e a temperatura, T, do vapor d'água estão relacionados pela expressão

$$p = |(0{,}5954)T/(v - 0{,}2708)| - (63{,}36)/v^2$$

onde v é dado em ft³/lb, T em °R e p em lbf/in², determine a massa da água no tanque. Esboce graficamente também a pressão *versus* o volume específico para as *isotermas* T = 1200°R (393,5°C), 1400°R (504,6°C) e 1600°R (615,7°C).

Explorando Temperatura

1.50 Converta as seguintes temperaturas de °C para °F: (a) 21°C, (b) −40°C, (c) 500°C, (d) 0°C, (e) 100°C, (f) −273,15°C. Converta cada temperatura para °R.

1.51 Converta as seguintes temperaturas de °F para °C: (a) 68°F, (b) −40°F, (c) 500°F, (d) 0°F, (e) 212°F, (f) −459,67°F. Converta cada temperatura para K.

1.52 A queima de gás natural com o ar resulta em produtos gasosos a 1985°C. Expresse esta temperatura em K, °R e °F.

1.53 A temperatura de uma criança doente com febre foi registrada como 40°C. A temperatura normal de uma criança é 37°C. Expresse ambas as temperaturas em °F.

1.54 O grau Rankine representa uma unidade de temperatura menor ou maior do que o grau Kelvin? Explique.

1.55 Conforme ilustrado na Fig. P1.55, um tubo d'água de pequeno diâmetro passa através da parede exterior de uma residência cuja espessura é de 6 in (0,15 m). Admitindo que a temperatura varie linearmente com a posição x ao longo da parede desde 68°F (20°C) até 20°F (−6,7°C), a água no interior da tubulação iria congelar? Explique.

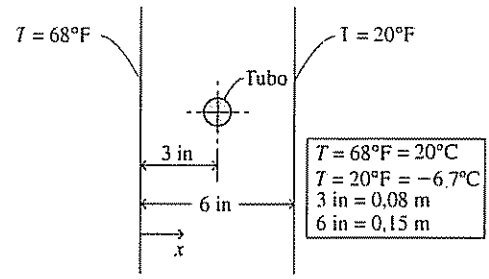


Fig. P1.55

1.56 Qual é (a) a temperatura mais baixa registrada na Terra, que ocorre *naturalmente*, (b) a temperatura mais baixa registrada em um laboratório na Terra? (c) a temperatura mais baixa registrada no sistema solar da Terra, e (d) a temperatura do espaço profundo, cada uma em K?

1.57 Qual é o aumento máximo e a diminuição máxima relativa à temperatura normal do corpo, que é de 37°C, que as pessoas podem suportar antes que ocorram complicações médicas sérias? Escreva cada uma delas em °C.

1.58 Para termômetros de bulbo, a propriedade termométrica corresponde à variação no comprimento do líquido no termômetro com a temperatura. Entretanto, outros efeitos presentes podem afetar a temperatura lida em tais termômetros. Quais são alguns deles?

Projetos e problemas em aberto: explorando a prática de engenharia

1.1P O problema do *aquecimento global* tem recebido considerável atenção atualmente. Escreva um relatório técnico que inclua pelo menos três referências acerca do tópico aquecimento global. Explique o que significa o termo aquecimento global e discuta objetivamente a evidência científica citada como base de que o aquecimento global realmente ocorre.

1.2P Barômetros e termômetros de bulbo são normalmente usados com mercúrio, o qual é reconhecido atualmente como uma substância que pode causar riscos à saúde. Investigue as complicações médicas da exposição ao mercúrio. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

1.3P Liste vários aspectos de engenharia econômica relevantes para um projeto. Com relação a custos, quais os importantes fatores que devem ser considerados em um projeto de engenharia? Discuta o que se entende por *custos anualizados*? Apresente seus resultados em um memorando.

1.4P Determine as contribuições atribuídas ao carvão, ao gás natural, ao óleo, à biomassa, à energia nuclear, à energia da água, à energia eólica e à energia solar que os serviços públicos de energia elétrica, que atendem a sua região, proporcionam aos clientes. Resuma seus resultados em um gráfico de fatias. Para cada 1% de contribuição, ou mais, do total, identifique as emissões de ar associadas, resíduos sólidos produzidos, incluindo rejeitos radioativos e os impactos na vida selvagem. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

1.5P O equipamento que registra a imagem por ressonância magnética (IRM) emprega um forte campo magnético para produzir figuras detalhadas de órgãos internos e tecidos. Conforme ilustrado na Fig. P1.5P, o paciente se recosta sobre uma mesa que desliza para dentro de uma abertura cilíndrica onde o campo é criado. Considerando um scanner IRM como um sistema, identifique os locais na fronteira do sistema em que o sistema interage com suas vizinhanças. Descreva também o que acontece no interior do sistema e as medidas tomadas para o conforto e a segurança do paciente. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

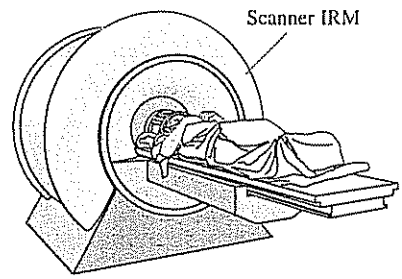


Fig. P1.5P

1.6P O *esfigmomanômetro* normalmente usado para medir a pressão sanguínea está ilustrado na Fig. P1.6P. Durante o teste a braçadeira é colocada em volta do braço do paciente e é completamente inflada, por meio de repetidas compressões no bulbo de inflação. Então, à medida que a braçadeira é gradualmente reduzida, os sons das artérias, conhecidos como sons *Korotkoff*, são monitorados com um estetoscópio. Usando esses sons como parâmetro as pressões *sistólica* e *diastólica* podem ser identificadas. Essas pressões são registradas em termos do comprimento da coluna de mercúrio. Investigue a base física para os sons Korotkoff, sua função na identificação das pressões sistólica e diastólica e por que essas pressões são significativas na prática da medicina. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

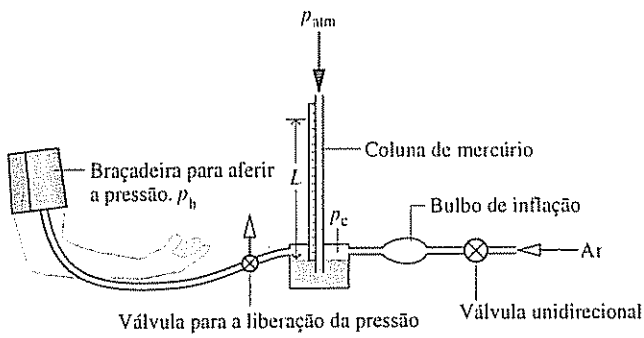


Fig. P1.6P

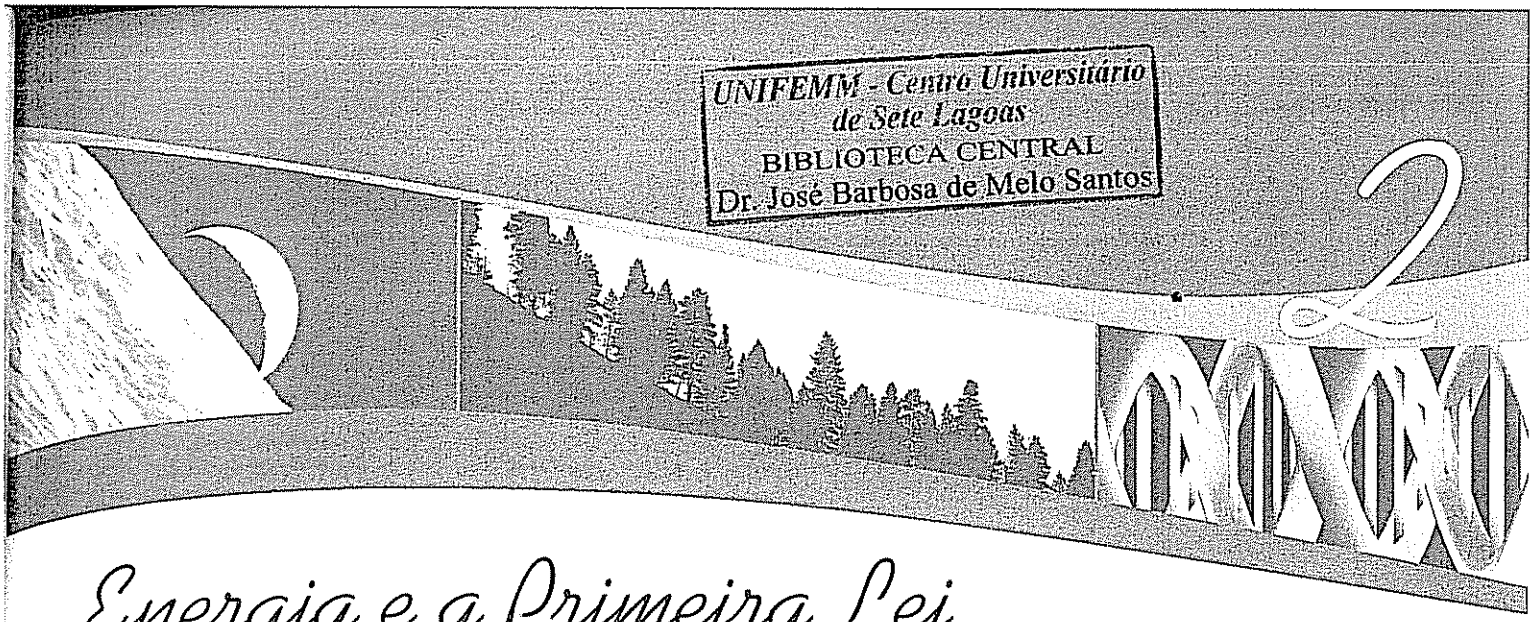
1.7P Projete uma bomba de ar de potência humana, de baixo custo, compacta, de baixo peso, portátil, capaz de direcionar uma corrente de ar para limpar teclados de computadores, placas de circuitos e alcançar locais de difícil acesso em dispositivos eletrônicos. A bomba não pode usar eletricidade, incluindo baterias, nem empregar quaisquer propelentes químicos. Todos os materiais devem ser recicláveis. Devido à proteção das patentes existentes, a bomba deve ser uma *alternativa distinta* para a bomba familiar, a bomba de ar para a bicicleta, os produtos existentes destinados a limpar o computador mencionado e as tarefas de limpeza eletrônica.

1.8P Em Bangladesh, níveis elevados de arsênico, que é um veneno sem gosto, sem odor e sem cor, estão presentes em poços de subsolos que fornecem água para beber a milhões de pessoas que moram nas áreas rurais. Identifique tecnologias de tratamento, acessíveis e fáceis de usar, para remover o arsênico dessas águas utilizadas para beber. As tecnologias consideradas podem incluir abordagens de *materiais inteligentes* e outras abordagens relativas à nanotecnologia, mas não devem estar limitadas às mesmas.

1.9P Conduza um projeto com prazo estabelecido no ramo da bioengenharia que pode ser realizado de forma independente ou em um pequeno grupo. O projeto envolve um dispositivo ou técnica para cirurgias minimamente invasivas, um dispositivo implantável para administrar medicamentos, um biossensor, sangue artificial ou algo de interesse especial para você ou seu grupo de projeto. Você pode levar diversos dias para pesquisar sobre a sua idéia de projeto e, então, preparar uma breve proposta escrita, incluindo diversas referências que forneçam uma declaração geral do conceito-base, além de uma lista de objetivos. Durante o projeto, observe os procedimentos para um bom projeto, tais como os discutidos na Seção 1.3 do *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1996, por A. Bejan, G. Tsatsaronis e M. J. Moran. Escreva um relatório final bem documentado, incluindo três referências.

1.10P Conduza um projeto com prazo estabelecido envolvendo a Estação Espacial Internacional, ilustrada na Tabela 1.1, que pode ser realizado de forma independente ou em um pequeno grupo. O projeto pode envolver um experimento cujo comportamento é melhor em um ambiente com baixa gravidade, um dispositivo para o conforto ou uso dos astronautas ou algo de interesse especial para você ou seu grupo de projeto. Você pode levar diversos dias para pesquisar sobre a sua idéia de projeto e, então, preparar uma breve proposta escrita, incluindo diversas referências que forneçam uma declaração geral do conceito-base, além de uma lista de objetivos. Durante o projeto, observe os procedimentos para um bom projeto, tais como os discutidos na Seção 1.3 do *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1996, por A. Bejan, G. Tsatsaronis e M. J. Moran. Escreva um relatório final bem documentado, incluindo três referências.

UNIFEMM - Centro Universitário
de Sete Lagoas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos



Energia e a Primeira Lei da Termodinâmica

Contexto de Engenharia

O conceito de energia é um conceito fundamental em termodinâmica, e um dos aspectos mais significativos de análise em engenharia. Neste capítulo discutimos energia e desenvolvemos equações para a aplicação do princípio da conservação de energia. A análise em questão é restrita a sistemas fechados. No Cap. 4 a discussão é estendida a volumes de controle.

A noção de energia é familiar, e você já conhece bastante sobre ela. No presente capítulo, vários aspectos importantes acerca do conceito de energia são desenvolvidos. Você já se deparou com alguns desses aspectos anteriormente. Uma idéia básica é a de que energia pode ser *armazenada* no interior de sistemas sob várias formas. A energia também pode ser *convertida* de uma forma em outra e *transferida* entre sistemas. Para sistemas fechados, a energia pode ser transferida por meio do trabalho e da *transferência de calor*. A quantidade total de energia é *conservada* em todas as transformações e transferências.

O **objetivo** deste capítulo é o de organizar essas idéias sobre energia de forma apropriada para uma análise de engenharia. A apresentação começa com uma revisão dos conceitos de energia oriundos da mecânica. O conceito termodinâmico de energia é então introduzido como uma extensão do conceito de energia em mecânica.

Objetivos de Aprendizagem

Quando você completar o estudo deste capítulo estará apto a....

☑ demonstrar conhecimento dos conceitos fundamentais relacionados à energia e à primeira lei da termodinâmica, incluindo energia interna, energia cinética e energia potencial; trabalho e potência; transferência de calor e modos de transferência de calor; taxa de transferência de calor; ciclo de potência; ciclo de refrigeração; e ciclo de bomba de calor.

☑ aplicar balanços de energia a sistemas fechados, modelando apropriadamente o caso em estudo e observando corretamente as convenções de sinais para o trabalho e a transferência de calor.

☑ conduzir análises de energia para sistemas submetidos a ciclos termodinâmicos, avaliando, conforme o caso, as eficiências térmicas dos ciclos de potência e os coeficientes de desempenho dos ciclos de refrigeração e bomba de calor.

2.1 Revendo os Conceitos Mecânicos de Energia

A partir das contribuições de Galileu e outros, Newton formulou uma descrição geral dos movimentos dos objetos sob a influência de forças aplicadas. As leis do movimento de Newton, que fornecem a base para a mecânica clássica, conduzem aos conceitos de *trabalho*, *energia cinética* e *energia potencial*, os quais eventualmente levam a um conceito mais amplo de energia. A presente discussão se inicia com uma aplicação da segunda lei do movimento de Newton

2.1.1 Trabalho e Energia Cinética

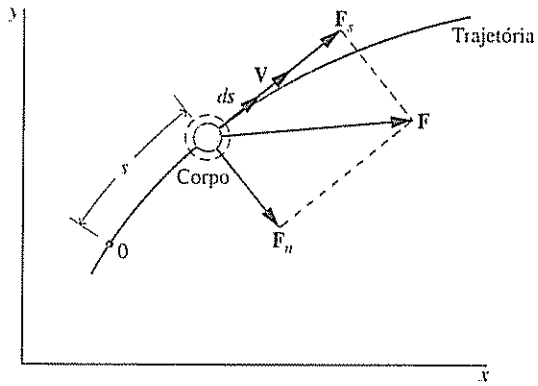


Fig. 2.1 Forças atuando sobre um sistema em movimento.

A curva na Fig. 2.1 representa a trajetória percorrida por um corpo de massa m (um sistema fechado) movendo-se em relação aos eixos coordenados x-y mostrados. A velocidade do centro de massa do corpo é denotada por $\mathbf{V}$.[1] Sobre o corpo atua uma força resultante $\mathbf{F}$, que pode variar em magnitude, de posição a posição, ao longo do caminho. A força resultante é decomposta em uma componente $\mathbf{F}_s$ tangente à trajetória e em uma componente $\mathbf{F}_n$ normal à trajetória. O efeito da componente $\mathbf{F}_s$ é o de mudar a magnitude da velocidade, enquanto o efeito da componente $\mathbf{F}_n$ é o de mudar a direção da velocidade. Conforme ilustrado na Fig. 2.1, s é a posição instantânea do corpo medida ao longo da trajetória, a partir de algum ponto fixo indicado por 0. Uma vez que a magnitude de $\mathbf{F}$ pode variar com a posição ao longo do caminho, as magnitudes de $\mathbf{F}_s$ e $\mathbf{F}_n$ são, em geral, funções de s.

Consideremos o corpo enquanto ele se move de $s = s_1$, onde a magnitude de sua velocidade é V_1, para $s = s_2$, onde sua velocidade é V_2. Para a presente discussão, admita que a única interação entre o corpo e sua vizinhança envolve a força $\mathbf{F}$. Pela segunda lei do movimento de Newton, a magnitude da componente $\mathbf{F}_s$ está relacionada com a variação da magnitude de $\mathbf{V}$ por

$$F_s = m\frac{dV}{dt} \tag{2.1}$$

Usando a regra da cadeia, a equação anterior pode ser escrita como

$$F_s = m\frac{dV}{ds}\frac{ds}{dt} = mV\frac{dV}{ds} \tag{2.2}$$

onde $V = ds/dt$. Rearranjando a Eq. 2.2 e integrando de s_1 a s_1, obtém-se

$$\int_{V_1}^{V_2} mV\,dV = \int_{s_1}^{s_2} F_s\,ds \tag{2.3}$$

A integral no lado esquerdo da Eq. 2.3 é calculada como se segue:

$$\int_{V_1}^{V_2} mV\,dV = \frac{1}{2}mV^2\Big]_{V_1}^{V_2} = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \tag{2.4}$$

energia cinética

A quantidade $\frac{1}{2}mV^2$ é a ***energia cinética***, EC, do corpo. A energia cinética é uma grandeza escalar. A *variação* da energia cinética, ΔEC, do corpo é[2]

$$\Delta EC = EC_2 - EC_1 = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \tag{2.5}$$

A integral no lado direito da Eq. 2.3 é o *trabalho* realizado pela força F_s quando o corpo se move de s_1 até s_2 ao longo da trajetória. O trabalho também é uma grandeza escalar.

Utilizando-se a Eq. 2.4, a Eq. 2.3 fica

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F}\cdot d\mathbf{s} \tag{2.6}$$

onde a expressão para o trabalho foi escrita em termos do produto escalar do vetor força $\mathbf{F}$ pelo vetor deslocamento $d\mathbf{s}$. A Eq. 2.6 estabelece que o trabalho realizado pela força resultante sobre o corpo é igual à variação da sua energia cinética. Quando o corpo é acelerado pela força resultante, o trabalho realizado sobre o corpo pode ser considerado como uma *transferência* de energia *para* o corpo, *armazenada* sob a forma de energia cinética

[1] Os símbolos em negrito indicam vetores. As magnitudes dos vetores são mostradas em tipo normal.
[2] O símbolo Δ significa sempre "o valor final menos o valor inicial". (N.T.)

Pode-se atribuir um valor à energia cinética conhecendo-se apenas a massa do corpo e a magnitude da sua velocidade instantânea em relação a um sistema de coordenadas especificado, sem considerar como essa velocidade foi atingida. Assim, a *energia cinética é uma propriedade* do corpo. Como a energia cinética está associada ao corpo como um todo, ela é uma propriedade extensiva.

Energia e Meio Ambiente

Você já desejou saber o que acontece com a energia cinética quando você pisa no pedal do freio do seu carro em movimento? Esse tipo de questionamento fez com que engenheiros de automóveis chegassem ao veículo *elétrico híbrido*, que combina um motor elétrico com um pequeno motor convencional.

Quando um veículo híbrido desse tipo é freado parte de sua energia cinética é colhida e armazenada em baterias. O motor elétrico usa a energia armazenada para ajudar o carro a dar partida novamente. Uma transmissão especialmente projetada fornece a divisão apropriada entre o motor convencional e o motor elétrico para minimizar o uso de combustível. Como a energia armazenada auxilia o motor convencional, esses carros conseguem obter uma melhor economia de combustível quando comparados aos veículos convencionais. No futuro, os veículos híbridos podem levar a uma economia de combustível até melhor, se forem desenvolvidos projetos para uma versão *plug-in*, por meio da qual as baterias são carregadas a partir de uma saída elétrica quando o veículo está parado, o que permite que os motoristas da versão híbrida *plug-in* obtenham a maior parte da energia que necessitam para o transporte a partir da rede de eletricidade – e não por meio da bomba de gasolina.

Uma melhor economia de combustível não apenas contribui para a solução do problema relativo aos escassos e caros suprimentos de petróleo, mas também reduz a emissão de CO_2 na atmosfera, o que está relacionado ao *aquecimento global*. Cada galão de gasolina queimada por um veículo produz cerca de 9 kg (20 lb) de CO_2. Anualmente um veículo convencional produz várias toneladas de CO_2. Os veículos híbridos citados produzem muito menos.

2.1.2 Energia Potencial

A Eq. 2.6 é o resultado principal da seção anterior. Oriunda da segunda lei de Newton, a equação fornece uma relação entre dois conceitos *definidos*: energia cinética e trabalho. Nesta seção ela é usada como ponto de partida para estender o conceito de energia. Para começar, dirija-se à Fig. 2.2, que mostra um corpo de massa m que se move verticalmente de uma altura z_1 até uma altura z_2 em relação à superfície da Terra. A figura mostra duas forças agindo sobre o sistema: uma força para baixo, em virtude da gravidade, com magnitude mg, e uma força vertical com magnitude R, que representa a resultante de todas as *outras* forças que agem sobre o sistema.

O trabalho realizado por cada força que atua sobre o corpo mostrado na Fig. 2.2 pode ser determinado pela definição dada anteriormente. O trabalho total é a soma algébrica desses valores tomados individualmente. De acordo com a Eq. 2.6, o trabalho total é igual à variação de energia cinética. Isto é,

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \int_{z_1}^{z_2} R\,dz - \int_{z_1}^{z_2} mg\,dz \tag{2.7}$$

Um sinal negativo é introduzido antes do segundo termo à direita, uma vez que a força gravitacional tem sentido contrário à orientação positiva de z.

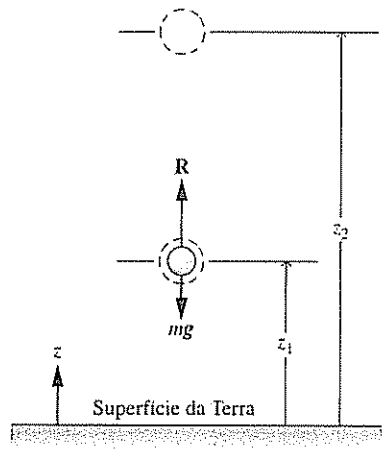


Fig. 2.2 Ilustração utilizada para apresentar o conceito de energia potencial.

A primeira integral no lado direito da Eq. 2.7 representa o trabalho realizado pela força **R** sobre o corpo conforme ele se move verticalmente de z_1 até z_2. A segunda integral pode ser calculada como se segue:

$$\int_{z_1}^{z_2} mg\,dz = mg(z_2 - z_1) \tag{2.8}$$

na qual a aceleração da gravidade foi considerada constante com a altura. Incorporando-se a Eq. 2.8 na Eq. 2.7 e rearranjando-se

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = \int_{z_1}^{z_2} R\,dz \tag{2.9}$$

A quantidade mgz é a ***energia potencial gravitacional***, EP. A *variação* na energia potencial gravitacional, ΔEP, é

energia potencial gravitacional

$$\Delta EP = EP_2 - EP_1 = mg(z_2 - z_1) \tag{2.10}$$

A energia potencial está associada à força de gravidade e é, conseqüentemente, um atributo comum ao sistema composto pelo corpo e pela Terra. No entanto, a avaliação da força de gravidade como mg permite que a energia potencial gravitacional seja determinada para um dado valor de g, conhecendo-se apenas a massa do corpo e a sua altura. Sob esse ponto de vista, a energia potencial

é considerada como uma *propriedade extensiva* do corpo. Ao longo de todo este livro, supõe-se que as diferenças de altura são suficientemente pequenas para que a força gravitacional possa ser considerada constante. Todavia, o conceito de energia potencial gravitacional pode ser formulado de forma a considerar a variação da força gravitacional com a elevação.

Para atribuir um valor à energia cinética ou à energia potencial de um sistema, é necessário definir um referencial e especificar um valor para a grandeza nesse referencial. Os valores da energia cinética e potencial são então determinados em relação a essa escolha arbitrária de referencial e ao valor de referência. Entretanto, como são necessárias somente as variações na energia cinética e potencial entre dois estados, essas especificações arbitrárias de referência se cancelam.

2.1.3 Unidades para a Energia

O trabalho possui unidade de força multiplicada pela distância. As unidades da energia cinética e da energia potencial são as mesmas do trabalho. No SI, a unidade da energia é o newton-metro, N · m, denominada joule, J. Neste livro é conveniente utilizar-se o quilojoule, kJ. As unidades inglesas geralmente utilizadas para o trabalho, a energia cinética e a energia potencial são o pé-libra-força, ft · lbf, e a unidade térmica britânica, Btu.

Quando um sistema está sujeito a um processo em que a energia cinética e a energia potencial variam, deve-se tomar um cuidado especial para obter um conjunto de unidades consistente.

➥ **POR EXEMPLO...** Para ilustrar o uso adequado das unidades nos cálculos de tais termos, considere um sistema com uma massa de 1 kg, cuja velocidade aumenta de 15 m/s para 30 m/s enquanto sua altura diminui de 10 m em um local onde $g = 9{,}7$ m/s^2. Então

$$\begin{aligned}
\Delta EC &= \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \\
&= \frac{1}{2}(1\text{ kg})\left[\left(30\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(15\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2\right]\left|\frac{1\text{ N}}{1\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}\right|\left|\frac{1\text{ kJ}}{10^3\text{ N}\cdot\text{m}}\right| \\
&= 0{,}34\text{ kJ} \\
\Delta EP &= mg(z_2 - z_1) \\
&= (1\text{ kg})\left(9{,}7\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(-10\text{ m})\left|\frac{1\text{ N}}{1\text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}\right|\left|\frac{1\text{ kJ}}{10^3\text{ N}\cdot\text{m}}\right| \\
&= -0{,}10\text{ kJ}
\end{aligned}$$

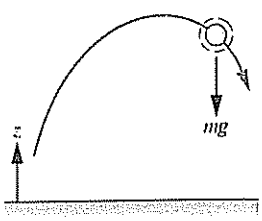
Para um sistema com uma massa de 1 lb (0,4 kg), cuja velocidade aumenta de 50 ft/s (15,2 m/s) para 100 ft/s (30,5 m/s) enquanto sua elevação diminui de 40 ft (12,2 m) em um local onde $g = 32{,}0$ ft/s^2 (9,7 m/s^2), temos

$$\begin{aligned}
\Delta EC &= \frac{1}{2}(1\text{ lb})\left[\left(100\frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^2 - \left(50\frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^2\right]\left|\frac{1\text{ lbf}}{32{,}2\text{ lb}\cdot\text{ft/s}^2}\right|\left|\frac{1\text{ Btu}}{778\text{ ft}\cdot\text{lbf}}\right| \\
&= 0{,}15\text{ Btu} \\
\Delta EP &= (1\text{ lb})\left(32{,}0\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}\right)(-40\text{ ft})\left|\frac{1\text{ lbf}}{32{,}2\text{ lb}\cdot\text{ft/s}^2}\right|\left|\frac{1\text{ Btu}}{778\text{ ft}\cdot\text{lbf}}\right| \\
&= -0{,}05\text{ Btu} \quad \hookleftarrow
\end{aligned}$$

2.1.4 Conservação de Energia em Mecânica

A Eq. 2.9 estabelece que o trabalho total realizado por todas as forças que atuam no corpo a partir de suas vizinhanças, à exceção da força gravitacional, é igual à soma das variações das energias cinética e potencial do corpo. Quando a força resultante causa um aumento na altura, uma aceleração no corpo ou ambos, o trabalho realizado pela força pode ser considerado uma *transferência* de energia *para* o corpo, onde é armazenada como energia potencial gravitacional e/ou energia cinética. A noção de que *a energia se conserva* é a base dessa interpretação.

A interpretação da Eq. 2.9 como uma expressão do princípio da conservação de energia pode ser reforçada, considerando-se o caso especial de um corpo sobre o qual a única força atuante é aquela resultante da gravidade. Dessa forma, o lado direito da equação desaparece, e ela se reduz a



$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = 0$$

ou

$$\frac{1}{2}mV_2^2 + mgz_2 = \frac{1}{2}mV_1^2 + mgz_1 \tag{2.11}$$

Sob essas condições, a *soma* das energias cinética e potencial gravitacional *permanece constante*. A Eq. 2.11 também ilustra o fato de que a energia pode ser *convertida* de uma forma em outra: para

um objeto em queda, *apenas* sob a influência da gravidade, a energia potencial decresceria, enquanto a energia cinética aumentaria da mesma quantidade.

2.1.5 Comentário Final

A apresentação até agora tem se concentrado em sistemas para os quais as forças aplicadas afetam somente sua velocidade e sua posição globais. Entretanto, os sistemas de interesse em engenharia normalmente interagem com suas vizinhanças através de formas mais complexas, com variações em outras propriedades também. Para analisar tais sistemas, os conceitos de energia cinética e potencial sozinhos não são suficientes, nem basta o princípio rudimentar da conservação de energia introduzido nesta seção. Em termodinâmica, o conceito de energia é estendido de forma a levar em conta outras variações observadas, e o princípio da *conservação de energia* é ampliado para incluir uma ampla variedade de formas de interação entre os sistemas e suas vizinhanças. Tais generalizações têm como base a evidência experimental. Essas extensões do conceito de energia são desenvolvidas no restante do capítulo, começando pela próxima seção com uma discussão mais completa sobre trabalho.

2.2 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Trabalho

O trabalho W realizado por, ou sobre, um sistema avaliado em termos de forças e deslocamentos observáveis macroscopicamente é dado por

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \tag{2.12}$$

Essa relação é importante em termodinâmica, e é usada, mais adiante, nesta seção, para calcular o trabalho realizado na compressão ou expansão de um gás (ou líquido), o alongamento de uma barra sólida e o estiramento de uma película líquida. Entretanto, a termodinâmica também lida com fenômenos fora do escopo da mecânica; assim, é necessário adotar uma interpretação mais ampla do trabalho, como a seguir.

definição termodinâmica de trabalho

Uma certa interação é classificada como trabalho se satisfizer o seguinte critério, que pode ser considerado como a ***definição termodinâmica de trabalho***: *Um sistema realiza trabalho sobre suas vizinhanças se o único efeito sobre tudo aquilo externo ao sistema puder ser o levantamento de um peso.* Note que o levantamento de um peso é, realmente, uma força que age através de uma distância, assim o conceito de trabalho em termodinâmica é uma extensão natural do conceito de trabalho em mecânica. No entanto, o teste para sabermos se uma interação sob a forma de trabalho ocorreu não está na verificação de que a elevação de um peso realmente ocorreu ou de que uma força realmente agiu através de uma distância, mas se o único efeito *poderia ser considerado* como o levantamento de um peso.

➥ **POR EXEMPLO...** considere a Fig. 2.3, que mostra dois sistemas denominados A e B. No sistema A, um gás é misturado por um agitador: o agitador realiza trabalho sobre o gás. Em princípio, o trabalho poderia ser calculado em termos das forças e dos movimentos na fronteira entre o ventilador e o gás. Tal avaliação do trabalho é consistente com a Eq. 2.12, onde trabalho é o produto da força pelo deslocamento. Em contraste, considere o sistema B, que inclui apenas a bateria. Na fronteira do sistema B, forças e movimentos não são evidentes. Em seu lugar, há uma corrente elétrica i induzida por uma diferença de potencial elétrico existente entre os terminais a e b. O motivo pelo qual esse tipo de interação pode ser classificado como trabalho advém da definição termodinâmica de trabalho dada anteriormente: podemos imaginar que a corrente alimenta um motor elétrico *hipotético* que eleva um peso na vizinhança. ⬅

Trabalho é um modo de transferir energia. Conseqüentemente, o termo trabalho não se refere ao que está sendo transferido entre sistemas ou ao que é armazenado dentro de um sistema. A energia é transferida e armazenada quando se realiza trabalho.

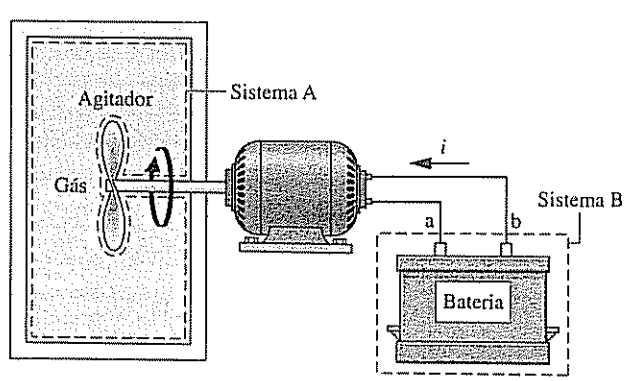


Fig. 2.3 Dois exemplos de trabalho.

2.2.1 Convenção de Sinais e Notação

A termodinâmica em engenharia está freqüentemente preocupada com dispositivos tais como motores de combustão interna e turbinas, cujo propósito é realizar trabalho. Assim, em contraste com a abordagem geralmente seguida em mecânica é conveniente considerar tal trabalho como positivo. Isto é,

$W > 0$: trabalho realizado *pelo* sistema

$W < 0$: trabalho realizado *sobre* o sistema

Novos horizontes

Máquinas em Nanoescala a Caminho

Engenheiros que trabalham no campo da nanotecnologia, a engenharia dos dispositivos de tamanho molecular, aguardam o momento em que possam ser fabricadas máquinas úteis em nanoescala capazes de se movimentar, de perceber e responder a estímulos tais como luz e som, entregando medicamentos no interior do corpo, realizando cálculos e numerosas outras funções que promovam o bem-estar humano. Esse assunto inspirou estudos biológicos de engenheiros sobre *máquinas* em nanoescala em organismos que realizam funções tais como criação e reparação de células, circulação de oxigênio e digestão de comida. Esses estudos produziram resultados positivos. Moléculas imitando a função de dispositivos mecânicos têm sido fabricadas, incluindo engrenagens, rotores, roquetes, freios, chaves e estruturas semelhantes a ábacos. Um sucesso particular é o desenvolvimento dos motores moleculares que convertem luz em movimento linear ou de rotação. Embora os dispositivos produzidos até o momento sejam rudimentares, eles demonstram a viabilidade da construção de nanomáquinas, dizem os pesquisadores.

convenção de sinais para trabalho

Essa ***convenção de sinais*** é utilizada ao longo deste livro. Em algumas situações, entretanto, é conveniente considerar o trabalho realizado *sobre* o sistema como positivo, como foi feito na discussão da Seção 2.1. Para reduzir a possibilidade de algum equívoco nesses casos, o sentido no qual a energia é transferida é mostrado por uma seta no desenho representativo do sistema, e o trabalho é considerado positivo no sentido da seta.

trabalho não é uma propriedade

Para calcular a integral na Eq. 2.12, é necessário saber como as forças variam com o deslocamento. Essa informação realça uma idéia importante sobre o trabalho: o valor de W depende dos detalhes das interações que ocorrem entre o sistema e a vizinhança durante um processo, e não apenas dos estados inicial e final do sistema. Assim, o ***trabalho não é uma propriedade*** do sistema ou da vizinhança. Além disso, os limites de integração na Eq. 2.12 significam "do estado 1 ao estado 2", e não podem ser interpretados como os *valores* do trabalho nesses estados. A noção de trabalho em um estado *não possui significado*; assim, o valor dessa integral nunca deve ser indicado como $W_2 - W_1$.

A diferencial do trabalho, ΔW, é chamada de *inexata* porque, em geral, a integral a seguir não pode ser calculada sem que sejam especificados os detalhes do processo

$$\int_1^2 \delta W = W$$

Por outro lado, a diferencial de uma propriedade é dita *exata* quando a variação de uma propriedade entre dois estados quaisquer não depende de forma alguma dos detalhes do processo que liga esses dois estados. Por exemplo, a variação do volume entre dois estados pode ser determinada pela integração da diferencial dV, sem considerar os detalhes do processo, como a seguir

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = V_2 - V_1$$

na qual V_1 é o volume *no* estado 1 e V_2 é o volume *no* estado 2. A diferencial de toda propriedade é exata. As diferenciais exatas são escritas utilizando-se o símbolo d. Para enfatizar a diferença entre diferenciais exatas e inexatas, a diferencial do trabalho é escrita como δW. O símbolo δ também é usado para identificar outras diferenciais inexatas encontradas mais tarde.

2.2.2 Potência

potência

Muitas análises termodinâmicas preocupam-se com a taxa de tempo na qual a transferência de energia ocorre. A taxa de transferência de energia por meio de trabalho é denominada ***potência***, e é representada por $\dot{W}$. Quando uma interação sob a forma de trabalho envolve uma força macroscopicamente observável, a taxa de transferência de energia sob a forma de trabalho é igual ao produto da força pela velocidade no ponto de aplicação da força

$$\dot{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{V} \tag{2.13}$$

Ao longo deste livro, para indicar uma taxa temporal, é colocado um ponto sobre o símbolo, como em $\dot{W}$. Em princípio, a Eq. 2.13 pode ser integrada do tempo t_1 até o tempo t_2 para obtermos o trabalho total realizado durante o intervalo de tempo

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W}\, dt = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} \cdot \mathbf{V}\, dt \tag{2.14}$$

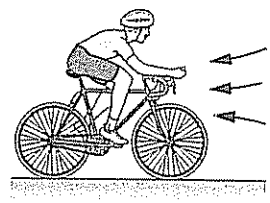
A mesma convenção de sinal aplicada para W é adotada para $\dot{W}$. Como a potência é o trabalho realizado por unidade de tempo, ela pode ser expressa em termos de quaisquer unidades de energia e tempo. No SI, a ***unidade de potência*** é o J/s, e é chamada de watt. Neste livro, é geralmente empregado o quilowatt (kW). As unidades inglesas comumente utilizadas para potência são ft · lbf/s, Btu/h e o *horsepower*, HP.

unidades para a potência

➥ **POR EXEMPLO...** para ilustrar o uso da Eq. 2.13, vamos calcular a potência necessária para um ciclista, viajando a 20 milhas por hora, superar a força de arrasto imposta pelo ar ao seu redor. Essa força de *arrasto aerodinâmico* é dada por

$$F_d = \tfrac{1}{2} C_d A \rho V^2$$

em que C_d é uma constante chamada de *coeficiente de arrasto*, A é a área frontal da bicicleta e do ciclista, e ρ é a massa específica do ar. Pela Eq. 2.13, a potência necessária é $\mathbf{F}_d \cdot \mathbf{V}$ ou



$$\begin{aligned} \dot{W} &= (\tfrac{1}{2} C_d A \rho V^2) V \\ &= \tfrac{1}{2} C_d A \rho V^3 \end{aligned}$$

Usando valores típicos: $C_d = 0{,}88$, $A = 3{,}9\ \text{ft}^2$ $(0{,}36\ \text{m}^2)$ e $\rho = 0{,}075\ \text{lb/ft}^3$ $(1{,}2\ \text{kg/m}^3)$, junto com $V = 20\ \text{mi/h} = 29{,}33\ \text{ft/s}$ e, além disso, convertendo as unidades para HP, a potência necessária é

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \frac{1}{2}(0{,}88)(3{,}9\ \text{ft}^2)\left(0{,}075\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}\right)\left(29{,}33\frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^3 \left|\frac{1\ \text{lbf}}{32{,}2\ \text{lb} \cdot \text{ft/s}^2}\right| \left|\frac{1\ \text{hp}}{550\ \text{ft} \cdot \text{lbf/s}}\right| \\ &= 0{,}183\ \text{hp} \end{aligned}$$ ⇐

2.2.3 Modelando o Trabalho de Expansão ou Compressão

Há várias maneiras pelas quais um trabalho pode ser realizado por ou sobre um sistema. No restante desta seção, vários exemplos serão considerados, começando com o importante caso do trabalho realizado quando ocorre a variação de volume de uma certa quantidade de um gás (ou líquido) devido a uma expansão ou compressão.

Vamos avaliar o trabalho realizado pelo sistema fechado ilustrado na Fig. 2.4, que consiste em um gás (ou líquido) contido em um conjunto cilindro-pistão à medida que o gás se expande. Durante o processo, a pressão do gás exerce uma força normal sobre o pistão. Considere p a pressão atuando na interface entre o gás e o pistão. A força exercida pelo gás sobre o pistão é simplesmente o produto pA, onde A é a área da face do pistão. O trabalho realizado pelo sistema à medida que o pistão é deslocado de uma distância dx é

$$\delta W = pA\,dx \tag{2.15}$$

O produto $A\,dx$ na Eq. 2.15 é igual à variação de volume do sistema, dV. Assim, a expressão para o trabalho pode ser escrita como

$$\delta W = p\,dV \tag{2.16}$$

Como dV é positivo quando o volume aumenta, o trabalho na fronteira móvel é positivo quando o gás se expande. Para uma compressão dV é negativo, assim como o trabalho calculado pela Eq. 2.16. Esses sinais estão de acordo com a convenção de sinais para o trabalho estabelecida anteriormente.

Para uma variação de volume de V_1 até V_2, o trabalho é obtido através da integração da Eq. 2.16

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\,dV \tag{2.17}$$

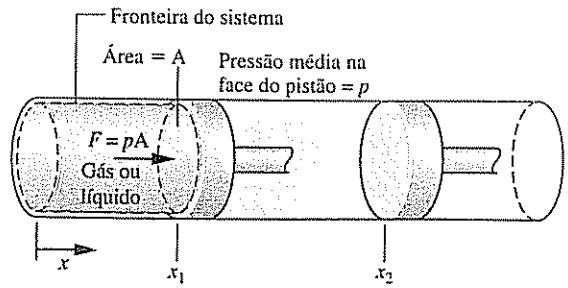


Fig. 2.4 Expansão ou compressão de um gás ou líquido.

Embora a Eq. 2.17 seja deduzida para o caso de um gás (ou líquido) em um conjunto cilindro-pistão, ela pode ser aplicada a sistemas de *qualquer* forma, contanto que a pressão seja uniforme com a posição ao longo da fronteira móvel.

2.2.4 Trabalho de Expansão ou Compressão em Processos Reais

Não há exigência de que um sistema que passa por um processo esteja em equilíbrio *durante* o processo. Alguns ou todos os estados intermediários podem ser estados de não-equilíbrio. Em muitos de tais processos, estamos limitados ao conhecimento do estado antes de o processo ocorrer e do estado após o fim do processo. Normalmente, em um estado de não-equilíbrio, as propriedades in-

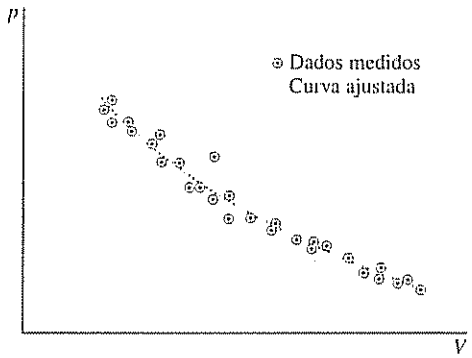


Fig. 2.5 Dados pressão-volume

tensivas variam com a posição para um dado tempo. De forma semelhante, para uma determinada posição as propriedades intensivas podem variar com o tempo, algumas vezes de forma caótica. Em certos casos, as variações espaciais e temporais das propriedades podem ser medidas, como ocorre para a temperatura, a pressão e a velocidade, ou obtidas através da solução das equações de governo apropriadas, que são em geral equações diferenciais.

A integração da Eq. 2.17 requer uma relação entre a pressão do gás *na fronteira móvel* e o volume do sistema. Entretanto, devido aos efeitos de não-equilíbrio durante um processo *real* de expansão ou compressão, essa relação pode ser difícil, ou mesmo impossível, de ser obtida. No cilindro de um motor de automóvel, por exemplo, a combustão e outros efeitos de não-equilíbrio dão lugar a não-uniformidades por todo o cilindro. Conseqüentemente, se um transdutor de pressão fosse montado na cabeça do cilindro, o sinal de saída registrado poderia fornecer apenas uma aproximação para a pressão na face do pistão requerida pela Eq. 2.17. Além disso, mesmo quando a pressão medida é essencialmente igual àquela na face do pistão, pode existir uma escassez de dados para o gráfico pressão-volume, como ilustrado na Fig. 2.5. Ainda assim a integração da Eq. 2.17, baseada na curva ajustada aos dados, forneceria uma *estimativa plausível* para o trabalho. Veremos mais tarde que, nos casos em que a falta da relação pressão-volume necessária nos impede de calcular o trabalho através da Eq. 2.17, o trabalho poderá ser calculado alternativamente a partir de um *balanço de energia* (Seção 2.5).

2.2.5 Trabalho de Expansão ou Compressão em Processos em Quase-Equilíbrio

processo em quase-equilíbrio

Os processos são algumas vezes modelados como um tipo idealizado de processo chamado de ***processo em quase-equilíbrio (ou quase-estático)***. Um processo em quase-equilíbrio é aquele em que o afastamento do equilíbrio termodinâmico é no máximo infinitesimal. Todos os estados por onde o sistema passa, em um processo de quase-equilíbrio, podem ser considerados estados de equilíbrio. Como os efeitos de não-equilíbrio estão inevitavelmente presentes durante os processos reais, os sistemas de interesse para a engenharia podem, na melhor das hipóteses, se aproximar de um processo em quase-equilíbrio, mas nunca realizá-lo. Ainda assim, o processo de quase-equilíbrio exerce um papel em nosso estudo da termodinâmica aplicada à engenharia. Para detalhes, veja o boxe na página seguinte.

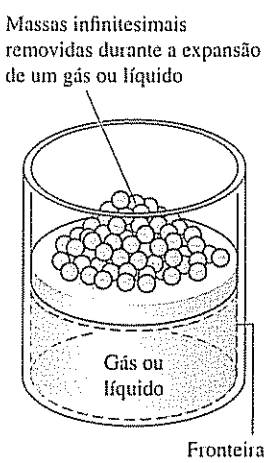


Fig. 2.6 Ilustração de uma expansão ou compressão em quase-equilíbrio

Para analisar como um gás (ou líquido) poderia ser expandido ou comprimido de uma maneira em quase-equilíbrio, considere a Fig. 2.6, que mostra um sistema que consiste em um gás inicialmente em um estado de equilíbrio. Como ilustrado na figura, a pressão do gás é mantida completamente uniforme através de pequenas massas em repouso sobre o pistão que se movimenta livremente. Imagine que uma das massas seja removida, permitindo que o pistão se mova para cima à medida que o gás se expande ligeiramente. Durante tal expansão, o estado do gás se afastaria apenas ligeiramente do equilíbrio. O sistema eventualmente atingiria um novo estado de equilíbrio, onde a pressão e todas as outras propriedades intensivas teriam novamente um valor uniforme. Além disso, se a massa fosse recolocada, o gás teria o seu estado inicial restaurado, enquanto novamente o afastamento do equilíbrio seria pequeno. Se várias das massas fossem removidas uma após a outra, o gás passaria por uma seqüência de estados de equilíbrio sem jamais se afastar do equilíbrio. No limite, à medida que os incrementos de massa fossem tornados cada vez menores, o gás passaria por um processo de expansão em quase-equilíbrio. Uma compressão em quase-equilíbrio pode ser visualizada com considerações similares.

A Eq. 2.17 pode ser aplicada para calcular o trabalho em processos de expansão ou compressão em quase-equilíbrio. Para tais processos idealizados, a pressão p na equação é a pressão da quantidade total de gás (ou líquido) que passa pelo processo, e não apenas a pressão na fronteira móvel. A relação entre a pressão e o volume pode ser gráfica ou analítica. Vamos primeiramente considerar uma relação gráfica.

Uma relação gráfica é mostrada no diagrama pressão-volume (diagrama p-V) da Fig. 2.7. Inicialmente, a face do pistão se encontra na posição x_1, e a pressão do gás é p_1; ao final do processo de expansão em quase-equilíbrio, a face do pistão está na posição x_2, e a pressão é reduzida a p_2. Em *cada* posição intermediária do pistão, a pressão uniforme em todo o gás é representada por um ponto no diagrama. A curva, ou *caminho*, que une os estados 1 e 2 no diagrama representa os estados de equilíbrio pelos quais o sistema passou durante o processo. O trabalho realizado pelo gás sobre o pistão durante a expansão é dado por $\int p\,dV$, que pode ser interpretado como a área sob a curva pressão *versus* volume. Assim, a área sombreada na Fig. 2.7 corresponde ao trabalho para o processo. Se o gás fosse *comprimido* de 2 para 1 ao longo do mesmo caminho no diagrama p-V, a *magnitude* do trabalho seria a mesma, mas o sinal seria negativo, indicando que para a compressão a transferência de energia foi do pistão para o gás.

A interpretação da área relativa ao trabalho em um processo de expansão ou compressão em quase-equilíbrio permite uma demonstração simples da idéia de que o trabalho depende do proces-

Usando o Conceito de Processo em Quase-Equilíbrio

Nosso interesse no processo de quase-equilíbrio se origina principalmente de duas considerações:

- Modelos termodinâmicos simples que fornecem no mínimo uma informação *qualitativa* sobre o comportamento de sistemas reais de interesse freqüentemente podem ser desenvolvidos usando o conceito de processo em quase-equilíbrio. Isso é semelhante ao uso de idealizações com o objetivo de simplificar a análise, tais como a massa pontual ou a polia sem atrito.
- O conceito de processo em quase-equilíbrio contribui para a dedução das relações que existem entre as propriedades dos sistemas em equilíbrio (Capítulos 3, 6 e 11).

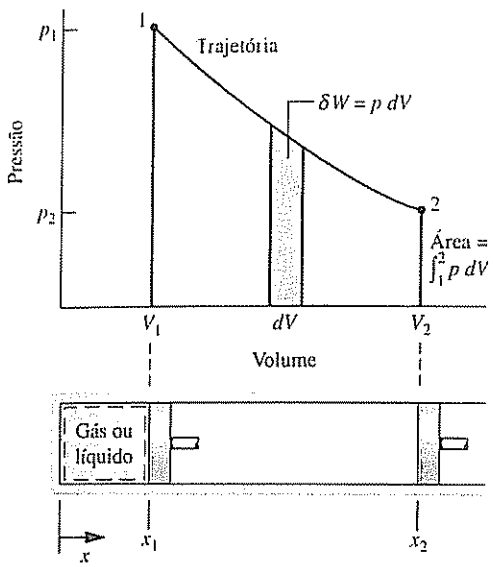


Fig. 2.7 Trabalho de um processo de expansão ou compressão em quase-equilíbrio

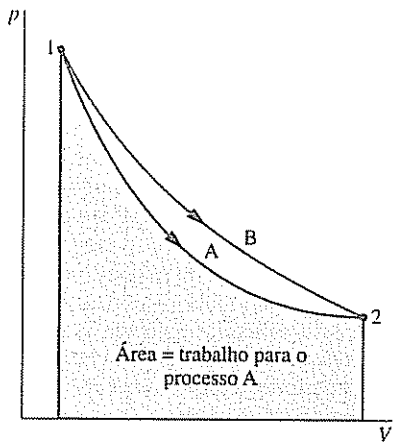


Fig. 2.8 Ilustração de que o trabalho depende do processo.

so. Isso pode ser verificado observando-se a Fig. 2.8. Suponha que um gás em um conjunto cilindro-pistão evolua de um estado inicial de equilíbrio 1 para um estado final de equilíbrio 2 por dois caminhos diferentes, denominados A e B na Fig. 2.8. Como a área abaixo de cada caminho representa o trabalho para aquele processo, o trabalho depende dos detalhes do processo definido pela curva correspondente e não apenas dos estados extremos. Usando o teste para uma propriedade apresentado na Seção 1.3, podemos concluir novamente (Seção 2.2.1) que o *trabalho não é uma propriedade*. O valor do trabalho depende da natureza do processo entre os estados inicial e final.

A relação entre a pressão e o volume, ou a pressão e o volume específico, também pode ser descrita analiticamente. Um processo de quase-equilíbrio descrito por $pV^n = constante$, ou $pv^n = constante$, onde n é uma constante, é chamado de ***processo politrópico***. Outras formas analíticas para a relação pressão-volume também podem ser consideradas. ***processo politrópico***

O exemplo a seguir ilustra a aplicação da Eq. 2.17 numa situação em que a relação entre a pressão e o volume durante uma expansão é descrita analiticamente por $pV^n = constante$.

Exemplo 2.1 AVALIANDO O TRABALHO DE EXPANSÃO

Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre a pressão e o volume é dada por

$$pV^n = constante$$

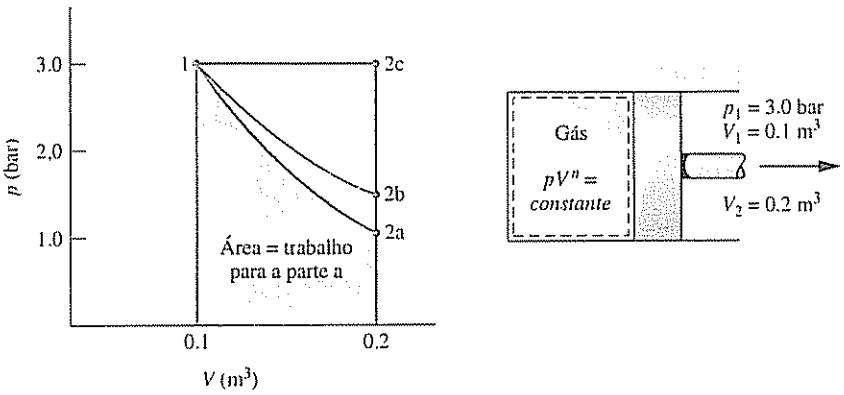
A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de 0,1 m³ e o volume final é de 0,2 m³. Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de (a) $n = 1{,}5$; (b) $n = 1{,}0$; (c) $n = 0$.

Solução

Dado: um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por uma expansão, na qual $pV^n = constante$.

Pede-se: avalie o trabalho para (a) $n = 1,5$; (b) $n = 1,0$; (c) $n = 0$

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos: a relação p-V dada e os dados fornecidos para pressão e volume podem ser usados para construir o diagrama pressão-volume do processo correspondente.



Modelo de Engenharia:

1. O gás é um sistema fechado.
2. A fronteira móvel é o único modo de trabalho.
3. A expansão é um processo politrópico.

Fig. E2.1

Análise: os valores pedidos para o trabalho são obtidos pela integração da Eq. 2.17 utilizando-se a relação pressão-volume dada.

(a) Introduzindo a relação $p = constante/V^n$ na Eq. 2.17 e realizando a integração

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\,dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{constante}{V^n}\,dV$$
$$= \frac{(constante)\,V_2^{1-n} - (constante)\,V_1^{1-n}}{1-n}$$

A constante nesta expressão pode ser fornecida por qualquer um dos estados inicial ou final: $constante = p_1V_1^n = p_2V_2^n$. A expressão para o trabalho torna-se, então,

$$W = \frac{(p_2V_2^n)\,V_2^{1-n} - (p_1V_1^n)\,V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n} \tag{1}$$

Esta expressão é válida para todos os valores de n, exceto $n = 1,0$. O caso $n = 1,0$ é tratado na parte (b).

Para calcular W a pressão no estado 2 é necessária. Esta pode ser obtida usando-se $p_1V_1^n = p_2V_2^n$ que, através de uma manipulação, fornece

$$p_2 = p_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n = (3\text{ bar})\left(\frac{0.1}{0.2}\right)^{1.5} = 1.06\text{ bar}$$

Conseqüentemente

$$W = \left(\frac{(1,06\text{ bar})(0,2\text{ m}^3) - (3)(0,1)}{1-1,5}\right)\left|\frac{10^5\text{ N/m}^2}{1\text{ bar}}\right|\left|\frac{1\text{ kJ}}{10^3\text{ N}\cdot\text{m}}\right|$$
$$= +17,6\text{ kJ}$$

(b) Para $n = 1,0$ a relação pressão-volume é $pV = constante$ ou $p = constante/V$. O trabalho é

$$W = constante\int_{V_1}^{V_2}\frac{dV}{V} = (constante)\ln\frac{V_2}{V_1} = (p_1V_1)\ln\frac{V_2}{V_1} \tag{2}$$

Substituindo os valores

$$W = (3\text{ bar})(0,1\text{ m}^3)\left|\frac{10^5\text{ N/m}^2}{1\text{ bar}}\right|\left|\frac{1\text{ kJ}}{10^3\text{ N}\cdot\text{m}}\right|\ln\left(\frac{0,2}{0,1}\right) = +20,79\text{ kJ}$$

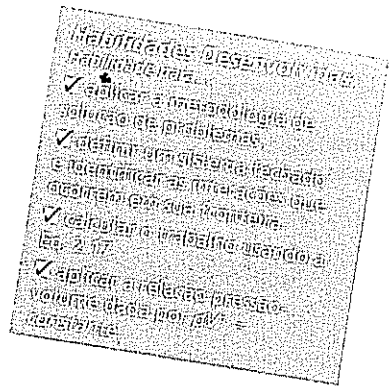
(c) Para $n = 0$, a relação pressão-volume reduz-se a $p = constante$, e a integral torna-se $W = p(V_2 - V_1)$, o que é um caso especial da expressão encontrada na parte (a). Substituindo os valores e convertendo as unidades, $W = +30$ kJ.

⑪ Em cada caso, o trabalho para o processo pode ser interpretado como a área sob a curva que representa o processo no diagrama p-V correspondente. Observe que as áreas relativas a esses processos estão de acordo com os resultados numéricos.

⑫ A hipótese de um processo politrópico é significativa. Se a relação pressão-volume fornecida fosse obtida como um ajuste de dados experimentais referentes à pressão-volume, o valor de $\int p\,dV$ forneceria uma estimativa plausível para o trabalho apenas quando a pressão medida fosse essencialmente igual àquela exercida na face do pistão.

⑬ Observe o uso dos fatores de conversão de unidades aqui e na parte (b).

⑭ Não é necessário identificar o gás (ou líquido) contido no interior do conjunto cilindro-pistão. Os valores calculados para W são determinados pelo caminho percorrido pelo processo e pelos estados inicial e final. Entretanto, se se quiser avaliar uma propriedade tal como a temperatura, tanto a natureza quanto a quantidade da substância devem ser fornecidas porque, então, seriam necessárias relações apropriadas entre as propriedades da substância em questão.



Teste-Relâmpago

Calcule o trabalho, em kJ, para um processo em duas etapas que consiste em uma expansão com $n = 1{,}0$, de $p_1 = 3$ bar, $V_1 = 0{,}1$ m³ até $V = 0{,}15$ m³, seguido por uma expansão com $n = 0$, de $V = 0{,}15$ m³ até $V_2 = 0{,}2$ m³.

Resposta 22,16 kJ.

2.2.6 Outros Exemplos de Trabalho

Para ampliar nossa compreensão do conceito de trabalho, consideraremos agora sucintamente vários outros exemplos de trabalho.

Alongamento de uma Barra Sólida

Considere um sistema que consiste em uma barra sólida sob tração, como ilustrado na Fig. 2.9. A barra está fixa em $x = 0$, e uma força F é aplicada na extremidade oposta. A força é representada por $F = \sigma A$, onde A é a área da seção transversal da barra e σ a *tensão normal que atua na extremidade* da barra. O trabalho realizado quando a extremidade da barra se move de uma distância dx é dado por $\delta W = -\sigma A\,dx$. O sinal negativo é necessário porque o trabalho é realizado *sobre* a barra quando dx é positivo. O trabalho relativo à variação do comprimento de x_1 a x_2 é dado pela integração

$$W = -\int_{x_1}^{x_2} \sigma A\,dx \tag{2.18}$$

A Eq. 2.18 para um sólido é equivalente à Eq. 2.17 para um gás submetido a uma expansão ou compressão.

Estiramento de uma Película Líquida

A Fig. 2.10 mostra um sistema formado por uma película líquida suspensa numa armação de arame. As duas superfícies da película suportam a fina camada líquida no interior da armação por meio do

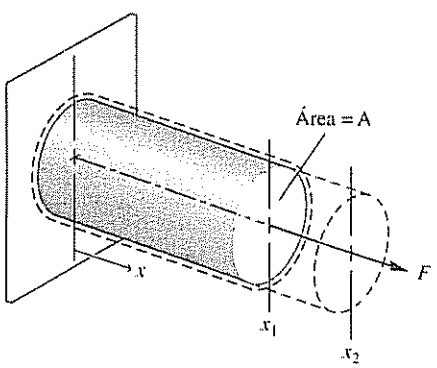


Fig. 2.9 Alongamento de uma barra sólida.

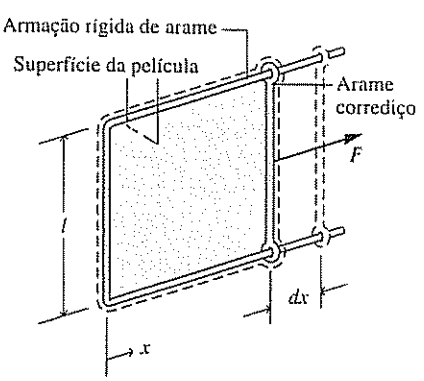
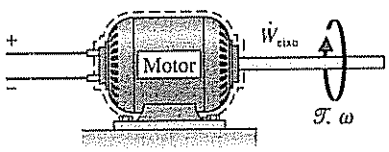


Fig. 2.10 Estiramento de uma película líquida.

efeito da *tensão superficial*, resultante de forças microscópicas entre as moléculas próximas à interface líquido-ar. Essas forças originam uma força macroscópica perpendicular a qualquer linha na superfície. A força por unidade de comprimento através de uma linha como esta é a tensão superficial. Chamando a tensão superficial que *atua no arame móvel* de τ, a força F indicada na figura pode ser expressa por $F = 2l\tau$, onde o fator 2 é introduzido porque duas películas superficiais agem no arame. Se o arame móvel é deslocado de dx, o trabalho é dado por $\delta W = -2l\tau\, dx$. O sinal negativo é necessário porque o trabalho é realizado *sobre* o sistema quando dx é positivo. Um deslocamento dx corresponde a uma alteração na área total das superfícies em contato com o arame, dada por $dA = 2l\, dx$, assim a expressão para o trabalho pode ser escrita alternativamente como $\delta W = -\tau\, dA$. O trabalho relativo a um aumento da área superficial, de A_1 até A_2, é obtido pela integração da expressão

$$W = -\int_{A_1}^{A_2} \tau\, dA \tag{2.19}$$

Potência Transmitida por um Eixo



Um eixo giratório é um elemento de máquina freqüentemente encontrado. Considere um eixo girando com uma velocidade angular ω e exercendo um torque $\mathcal{T}$ na sua vizinhança. Seja esse torque expresso em termos de uma força tangencial F_t e raio R: $\mathcal{T} = F_t R$. A velocidade no ponto de aplicação da força é $V = R\omega$, onde ω é expresso em radianos por unidade de tempo. Usando essas relações e a Eq. 2.13, obtemos uma expressão para a *potência* transmitida do eixo para a vizinhança

$$\dot{W} = F_t V = (\mathcal{T}/R)(R\omega) = \mathcal{T}\omega \tag{2.20}$$

Um caso semelhante envolvendo um gás misturado por um agitador foi considerado na discussão da Fig. 2.3.

Potência Elétrica

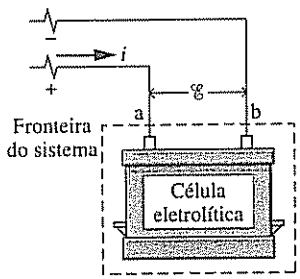


Fig. 2.11 Célula eletrolítica utilizada para discutir a potência elétrica

A Fig. 2.11 mostra um sistema constituído por uma célula eletrolítica. A célula está conectada a um circuito externo através do qual passa uma corrente elétrica i. A corrente é induzida por uma diferença de potencial elétrico $\mathscr{E}$ existente entre os terminais denominados a e b. Esse tipo de interação pode ser classificado como trabalho, como foi considerado na discussão da Fig. 2.3.

A taxa de transferência de energia por meio de trabalho, ou potência, é

$$\dot{W} = -\mathscr{E} i \tag{2.21}$$

Uma vez que a corrente i é igual a dZ/dt, o trabalho pode ser expresso na forma diferencial como

$$\delta W = -\mathscr{E}\, dZ \tag{2.22}$$

sendo dZ a quantidade de carga elétrica que flui para o sistema. O sinal negativo é necessário para que a expressão fique de acordo com nossa convenção de sinais para o trabalho. Quando a potência é calculada em termos de watt e a unidade de corrente é o ampère (uma unidade básica do SI), a unidade de potencial elétrico é o volt, definido como 1 watt por ampère.

Trabalho Devido à Polarização ou Magnetização

Vamos a seguir nos referir sucintamente aos tipos de trabalho que podem ser realizados em sistemas no interior de campos elétricos ou magnéticos, conhecidos como trabalho de polarização e magnetização, respectivamente. Do ponto de vista microscópico, dipolos elétricos no interior de dielétricos resistem à mudança de orientação e, portanto, o trabalho é realizado quando eles são alinhados por um campo elétrico. Analogamente, dipolos magnéticos resistem à mudança de orientação, e o trabalho é realizado em certos materiais quando sua magnetização é alterada. A polarização e a magnetização dão origem a variações detectáveis *macroscopicamente* no momento dipolar total à medida que as partículas que compõem o material são realinhadas. Nesses casos, o trabalho está associado a forças impostas no sistema global por campos em suas vizinhanças. As forças que atuam no material no interior do sistema são chamadas de *forças de corpo*. Para essas forças, o deslocamento apropriado a ser utilizado no cálculo do trabalho é o deslocamento da matéria sobre a qual as forças de corpo atuam.

2.2.7 Outros Exemplos de Trabalho em Processos em Quase-Equilíbrio

Outros sistemas, além de um gás ou um líquido em um conjunto cilindro-pistão, podem também ser considerados como sistemas submetidos a processos do tipo quase-equilíbrio. Para aplicarmos o conceito de processo em quase-equilíbrio em qualquer desses casos, é necessário considerar uma

situação ideal, em que as forças externas que atuam sobre o sistema podem variar tão pouco que o desequilíbrio resultante é infinitesimal. Como conseqüência, o sistema passa por um processo sem jamais afastar-se significativamente do equilíbrio termodinâmico.

O alongamento de uma barra sólida e o estiramento de uma película superficial líquida podem ser prontamente visualizados como ocorrências em quase-equilíbrio, por analogia direta com o caso do cilindro-pistão. Para a barra na Fig. 2.9, a força externa pode ser aplicada de tal maneira que ela difira apenas levemente da força oposta interna. A tensão normal é então essencialmente uniforme ao longo da seção reta e pode ser determinada como uma função do comprimento instantâneo: $\sigma = \sigma(x)$. Analogamente, para a película líquida mostrada na Fig. 2.10 a força externa pode ser aplicada à armação de arame móvel de tal forma que a força difira apenas levemente da força oposta no interior da película. Durante este processo, a tensão superficial é essencialmente uniforme ao longo de toda a película superficial e está relacionada à área instantânea: $\tau = \tau(A)$. Em cada um desses casos, uma vez conhecida a relação funcional necessária pode-se calcular o trabalho utilizando-se a Eq. 2.18 ou 2.19, respectivamente, em termos de propriedades do sistema como um todo à medida que ele passa por estados de equilíbrio.

Pode-se imaginar também outros sistemas submetidos a processos em quase-equilíbrio. Por exemplo, é possível visualizar uma bateria sendo carregada ou descarregada em quase-equilíbrio ajustando a diferença de potencial entre os terminais de forma a ser ligeiramente maior, ou ligeiramente menor, do que um potencial ideal chamado de *força eletromotriz* da bateria (fem). A transferência de energia através de trabalho para a passagem de uma quantidade diferencial de carga *para* a bateria, dZ, é dada pela relação

$$\delta W = -\mathscr{E}\, dZ \tag{2.23}$$

Nessa equação $\mathscr{E}$ representa a fem da bateria, uma propriedade intensiva da bateria, e não apenas a diferença de potencial entre os terminais, como na Eq. 2.22.

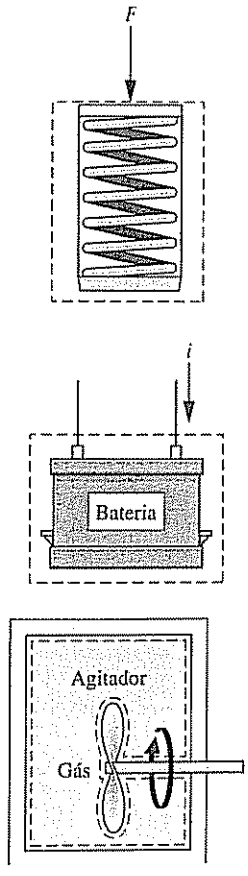
Considere a seguir um material dielétrico no interior de um *campo elétrico uniforme*. A transferência de energia por meio de trabalho do campo quando a polarização é levemente aumentada é

$$\delta W = -\mathbf{E} \cdot d(V\mathbf{P}) \tag{2.24}$$

em que o vetor $\mathbf{E}$ é a intensidade do campo elétrico no interior do sistema, o vetor $\mathbf{P}$ é o momento do dipolo elétrico por unidade de volume e V é o volume do sistema. Uma equação similar para a transferência de energia por meio de trabalho de um *campo magnético uniforme* quando a magnetização é levemente aumentada é

$$\delta W = -\mu_0 \mathbf{H} \cdot d(V\mathbf{M}) \tag{2.25}$$

na qual o vetor $\mathbf{H}$ é a intensidade do campo magnético no interior do sistema, o vetor $\mathbf{M}$ é o momento do dipolo magnético por unidade de volume e μ_0 é uma constante, a permeabilidade do espaço livre. O sinal negativo que aparece nas três últimas equações está de acordo com nossa convenção de sinais estabelecida anteriormente para o trabalho: W recebe o sinal negativo quando a transferência de energia é *para* o sistema.



2.2.8 Forças e Deslocamentos Generalizados

A semelhança entre as expressões para o trabalho em processos de quase-equilíbrio consideradas até agora é um fato que pode ser observado. Em cada caso, a expressão para o trabalho é escrita sob a forma de uma propriedade intensiva e a diferencial de uma propriedade extensiva. Isso é mostrado pela seguinte expressão, que permite que um ou mais desses modos de trabalho esteja presente em um processo

$$\delta W = p\, dV - \sigma d(Ax) - \tau\, dA - \mathscr{E}\, dZ - \mathbf{E} \cdot d(V\mathbf{P}) - \mu_0 \mathbf{H} \cdot d(V\mathbf{M}) + \cdots \tag{2.26}$$

onde as reticências representam outros produtos de uma propriedade intensiva pela diferencial de uma propriedade extensiva relacionada, responsáveis pela realização de trabalho. Por causa da noção de que o trabalho é um produto de força por deslocamento, a propriedade intensiva nessas relações é às vezes chamada de força "generalizada", e a propriedade extensiva é chamada de um deslocamento "generalizado", muito embora as quantidades que compõem as expressões para o trabalho possam não trazer à mente forças e deslocamentos factíveis.

Devido à restrição fundamental de quase-equilíbrio, a Eq. 2.26 não representa todos os tipos de trabalho de interesse prático. Um exemplo é dado por um agitador que agita um gás ou líquido considerado como sistema. Sempre que qualquer ação de cisalhamento ocorrer o sistema necessariamente passa por estados de não-equilíbrio. Para percebermos de forma mais completa as implicações do conceito de um processo em quase-equilíbrio é necessário considerar a segunda lei da termodinâmica, assim esse conceito é discutido novamente no Capítulo 5, após a apresentação da segunda lei.

2.3 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Energia

O objetivo desta seção é usar nosso profundo conhecimento sobre trabalho, obtido na Seção 2.2, para ampliar nossa compreensão sobre a energia de um sistema. Em particular, consideramos a energia *total* de um sistema, que inclui a energia cinética, a energia potencial gravitacional e outras formas de energia. Os exemplos a seguir ilustram algumas dessas formas de energia. Muitos outros exemplos poderiam ser apresentados sobre a mesma idéia.

Quando se realiza trabalho para comprimir uma mola, armazena-se energia no interior da mola. Quando uma bateria é carregada, a energia armazenada em seu interior aumenta. E quando um gás (ou líquido), inicialmente em um estado de equilíbrio em um reservatório fechado e isolado, é agitado vigorosamente e colocado em repouso até atingir um estado final de equilíbrio, a energia do gás aumenta durante o processo. Em cada um desses exemplos a variação da energia do sistema não pode ser atribuída a variações na energia cinética ou potencial gravitacional *global* do sistema, dada pelas Eqs. 2.5 e 2.10, respectivamente. A variação de energia pode ser explicada em termos de *energia interna*, como é apresentado a seguir.

Na termodinâmica aplicada à engenharia, considera-se que a variação da energia total de um sistema é composta de três contribuições *macroscópicas*. Uma é a variação da energia cinética, associada ao movimento do sistema *como um todo* em relação a um sistema de eixos coordenados externo. Outra é a variação da energia potencial gravitacional, associada à posição do sistema *como um todo* no campo gravitacional terrestre. Todas as outras variações de energia são reunidas na ***energia interna*** do sistema. Assim como a energia cinética e a energia potencial gravitacional, *a energia interna é uma propriedade extensiva* do sistema, como o é a energia total.

energia interna

A energia interna é representada pelo símbolo U, e a variação de energia interna em um processo é $U_2 - U_1$. A energia interna específica é simbolizada por u ou $\bar{u}$, dependendo de ser expressa por unidade de massa ou em base molar, respectivamente.

A variação total de energia de um sistema é

$$E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + (EC_2 - EC_1) + (EP_2 - EP_1)$$

ou

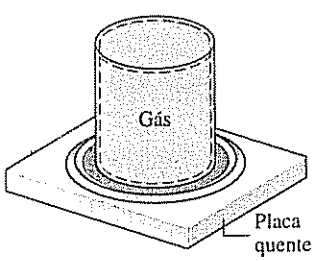
$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \tag{2.27}$$

Todas as quantidades na Eq. 2.27 são expressas em termos das unidades de energia apresentadas anteriormente.

A identificação da energia interna como uma forma macroscópica de energia é um passo significativo no desenvolvimento em questão, pois separa o conceito de energia em termodinâmica daquele da mecânica. No Cap. 3 aprenderemos a calcular variações de energia interna em casos de importância prática envolvendo gases, líquidos e sólidos utilizando dados empíricos.

Para melhorar nossa compreensão sobre energia interna, considere um sistema que freqüentemente encontraremos nas seções subseqüentes deste livro, um sistema constituído de um gás contido em um tanque. Vamos desenvolver uma ***interpretação microscópica da energia interna*** pensando na energia atribuída aos movimentos e às configurações das moléculas individuais, átomos e partículas subatômicas que compõem a matéria no sistema. As moléculas do gás movem-se de um lado para o outro, encontrando outras moléculas ou as paredes do recipiente. Parte da energia interna do gás é a energia cinética de *translação* das moléculas. Outras contribuições para a energia interna incluem a energia cinética devida à *rotação* das moléculas em relação aos seus centros de massa e a energia cinética associada aos movimentos de *vibração* dentro das moléculas. Além disso, energia é armazenada nas ligações químicas entre os átomos que compõem as moléculas. O armazenamento de energia em nível atômico inclui a energia associada aos estados orbitais dos elétrons, spin nuclear e forças de ligação no núcleo. Em gases densos, líquidos e sólidos as forças intermoleculares representam um papel importante em relação à energia interna.

interpretação microscópica da energia interna de um gás



2.4 Transferência de Energia por Calor

Até o momento, consideramos quantitativamente apenas as interações entre um sistema e sua vizinhança que podem ser classificadas como trabalho. No entanto, os sistemas fechados também podem interagir com suas vizinhanças de uma forma que não pode ser definida como trabalho. ➥ **POR EXEMPLO...** Quando um gás em um recipiente rígido interage com uma placa quente a energia do gás aumenta, mesmo que nenhum trabalho seja realizado. ⇦ Esse tipo de interação é chamado de ***transferência de energia através de calor***.

transferência de energia por calor

Com base em provas experimentais, a começar pelo trabalho de Joule no início do século XIX, sabemos que a transferência de energia por calor é induzida apenas como resultado de uma diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança, e ocorre somente no sentido decrescente de

temperatura. Devido à importância desse conceito em termodinâmica, esta seção é dedicada a uma consideração adicional sobre a transferência de energia por calor.

2.4.1 Convenção de Sinais, Notação e Taxa de Transferência de Calor

O símbolo Q indica uma quantidade de energia transferida através da fronteira de um sistema em uma interação de calor com a vizinhança do sistema. A transferência de calor *para* um sistema é considerada *positiva*, e a transferência de calor *de* um sistema é considerada *negativa*.

$Q > 0$: transferência de calor *para* o sistema

$Q < 0$: transferência de calor *do* sistema

Essa ***convenção de sinais*** é utilizada ao longo de todo este livro. Entretanto, assim como foi indicado para o trabalho, algumas vezes é conveniente mostrar o sentido da transferência de energia por uma seta no desenho do sistema. Assim, a transferência de calor é considerada positiva no sentido da seta.

convenção de sinais para transferência de calor

A convenção de sinais para a transferência de calor é justamente o *inverso* daquela adotada para o trabalho, onde o valor positivo para W significa uma transferência de energia *do* sistema para a vizinhança. Esses sinais para calor e trabalho são um legado de engenheiros e cientistas que estavam preocupados principalmente com motores a vapor e outros dispositivos que produzem trabalho na saída a partir de uma entrada de energia por meio de transferência de calor. Para tais aplicações era conveniente considerar tanto o trabalho produzido quanto a entrada de energia por transferência de calor como quantidades positivas.

A quantidade de calor transferida depende dos detalhes do processo, e não apenas dos estados inicial e final. Assim, da mesma forma que o trabalho, o ***calor não é uma propriedade***, e sua diferencial é escrita como δQ. A quantidade de energia transferida por calor durante um processo é dada pela integral

calor não é uma propriedade

$$Q = \int_1^2 \delta Q \tag{2.28}$$

na qual os limites de integração significam "do estado 1 ao estado 2" e não se referem aos valores do calor nesses estados. Assim como para o trabalho, a noção de "calor" em um estado não tem sentido, e a integral *nunca* deve ser calculada como $Q_2 - Q_1$.

A ***taxa de transferência de calor*** líquida é representada por $\dot{Q}$. A princípio, a quantidade de energia transferida sob a forma de calor durante um período de tempo pode ser calculada integrando-se do tempo t_1 ao tempo t_2

taxa de transferência de calor

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}\, dt \tag{2.29}$$

Para realizar a integração, é necessário saber como a taxa de transferência de calor varia com o tempo.

Em alguns casos é conveniente utilizar o *fluxo de calor*, $\dot{q}$, que é a taxa de transferência de calor por unidade de área de superfície do sistema. A taxa líquida de transferência de calor, $\dot{Q}$, está relacionada ao fluxo de calor $\dot{q}$ pela integral

$$Q = \int_A \dot{q}\, dA \tag{2.30}$$

em que A representa a área na fronteira do sistema onde ocorre a transferência de calor.

As unidades para a transferência de calor Q e a taxa de transferência de calor $\dot{Q}$ são as mesmas apresentadas antes para W e $\dot{W}$, respectivamente. As unidades para o fluxo de calor são as da taxa de transferência de calor por unidade de área: kW/m² ou Btu/h · ft².

A palavra ***adiabático*** significa que *não há transferência de calor*. Assim, se um sistema passa por um processo que não envolve transferência de calor com sua vizinhança esse processo é chamado de *processo adiabático*.

adiabático

Bio conexões

Pesquisadores médicos descobriram que um aumento gradual da temperatura do tecido canceroso para 41-45°C leva a uma maior eficiência da quimioterapia e da radioterapia para alguns pacientes. Diferentes abordagens podem ser usadas, incluindo o aumento da temperatura do corpo inteiro com dispositivos de aquecimento e, de forma mais seletiva, por meio de feixes de microondas ou ultra-som sobre o tumor ou órgão afetado. As especulações sobre o motivo do aumento de temperatura ser benéfico variam. Alguns dizem que isso ajuda a radioterapia a penetrar certos tumores mais facilmente por meio da dilatação dos vasos sangüíneos.

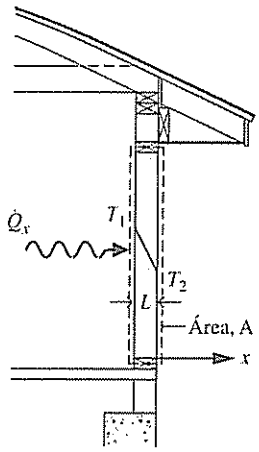


Fig. 2.12 Ilustração da lei de Fourier da condução de calor.

Outros acham que isso ajuda a radioterapia em virtude do aumento da quantidade de oxigênio nas células do tumor, fazendo com que elas fiquem mais receptivas à radiação. Os pesquisadores informam que é necessário um estudo adicional antes que seja estabelecida a eficácia dessa abordagem e os mecanismos por meio dos quais os resultados positivos são alcançados.

2.4.2 Modos de Transferência de Calor

Métodos baseados em experimentos estão disponíveis para avaliar a transferência de energia sob a forma de calor. Esses métodos identificam dois mecanismos básicos de transferência: *condução* e *radiação térmica*. Além disso, relações empíricas estão disponíveis para avaliar a transferência de energia que envolve um modo *combinado* chamado *convecção*. Uma breve descrição de cada um desses modos é dada a seguir. Considerações mais detalhadas são deixadas para um curso de transferência de calor aplicado à engenharia, onde esses tópicos são estudados em profundidade.

Condução

A transferência de energia por *condução* pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. A condução pode ser imaginada como a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas adjacentes que são menos energéticas, devido a interações entre as partículas. A taxa temporal de transferência de energia por condução é quantificada macroscopicamente pela *lei de Fourier*. Como uma aplicação elementar, considere a Fig. 2.12, que mostra uma parede plana de espessura L, em regime permanente, onde a temperatura $T(x)$ varia linearmente com a posição x. Pela ***lei de Fourier***, a taxa de transferência de calor através de qualquer plano normal à direção x, $\dot{Q}_x$, é proporcional à área da parede, A, e ao gradiente de temperatura na direção x, dT/dx.

lei de Fourier

$$\dot{Q}_x = -\kappa A \frac{dT}{dx} \tag{2.31}$$

em que a constante de proporcionalidade k é uma propriedade chamada de *condutividade térmica*. O sinal negativo é uma conseqüência da transferência de energia no sentido *decrescente* da temperatura ⇨ **POR EXEMPLO...** no caso da Fig. 2.12 a temperatura varia linearmente; assim, o gradiente de temperatura é

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} (< 0)$$

e a taxa de transferência de calor na direção x é, então,

$$\dot{Q}_x = -\kappa A \left[\frac{T_2 - T_1}{L} \right] \Leftarrow$$

Os valores para a condutividade térmica são dados na Tabela A-19 para materiais usuais. As substâncias com valores elevados de condutividade térmica, como o cobre, são boas condutoras, e aquelas com baixas condutividades (cortiça e espuma de poliestireno) são boas isolantes.

Radiação

A *radiação térmica* é emitida pela matéria como resultado de mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas no seu interior. A energia é transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons). Diferentemente da condução, a radiação térmica não necessita de nenhum meio para propagar-se, e pode até mesmo ocorrer no vácuo. As superfícies sólidas, os gases e os líquidos emitem, absorvem e transmitem radiação térmica em vários graus. A taxa na qual a energia é emitida, $\dot{Q}_e$, *a partir de* uma superfície de área A é quantificada macroscopicamente por uma forma modificada da ***lei de Stefan-Boltzmann***

lei de Stefan-Boltzmann

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \sigma A T_b^4 \tag{2.32}$$

que mostra que a radiação térmica está associada à quarta potência da temperatura absoluta da superfície, T_b. A emissividade, ε, é uma propriedade da superfície que indica a eficiência da superfície irradiante ($0 \leq \varepsilon \leq 1{,}0$), e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

$$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4} = 0{,}1714 \times 10^{-8}\ \mathrm{Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ R^4}$$

Em geral, a taxa *líquida* de transferência de energia por radiação térmica entre duas superfícies envolve relações entre as propriedades das superfícies, suas orientações, em relação uma à outra, a extensão na qual o meio de propagação espalha, emite e absorve radiação térmica, e outros fatores. Um caso especial que ocorre freqüentemente é a troca de radiação entre uma superfície à temperatura T_b e uma superfície circunvizinha muito maior a T_s, como mostra a Fig. 2.13. A taxa líquida

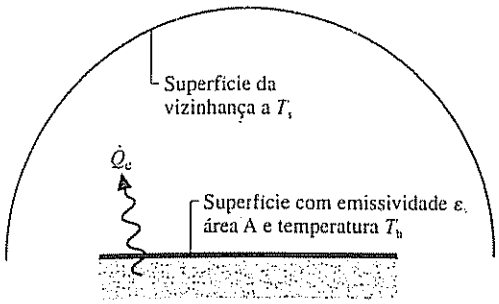


Fig. 2.13 Troca líquida de radiação.

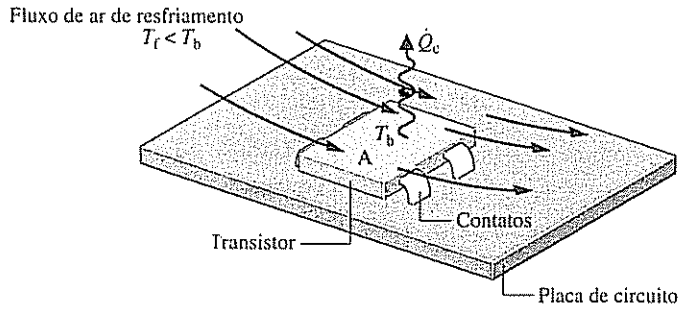


Fig. 2.14 Ilustração da lei do resfriamento de Newton.

de troca radiante entre a superfície menor, cuja área é A e a emissividade é ε, e a superfície circunvizinha muito maior é

$$\dot{Q}_e = \varepsilon\sigma A\left[T_b^4 - T_s^4\right] \tag{2.33}$$

Convecção

A transferência de energia entre uma superfície sólida a uma temperatura T_b e um gás ou líquido adjacente em movimento a uma outra temperatura T_f tem um papel importante no desempenho de muitos dispositivos de interesse prático. Essa transferência é usualmente denominada *convecção*. Como ilustração, considere a Fig. 2.14, em que $T_b > T_f$. Nesse caso, a energia é transferida *no sentido indicado pela seta* devido aos *efeitos combinados* da condução no ar e do movimento global do ar. A taxa de transferência de energia *da* superfície *para* o ar pode ser quantificada pela seguinte expressão *empírica*:

$$\dot{Q}_c = hA(T_b - T_f) \tag{2.34}$$

conhecida como ***lei do resfriamento de Newton***. Na Eq. 2.34, A é a área da superfície, e o fator de proporcionalidade h é chamado de *coeficiente de transferência de calor*. Em aplicações subseqüentes da Eq. 2.34 um sinal negativo pode ser introduzido no lado direito em conformidade com a convenção de sinais para transferência de calor apresentada na Seção 2.4.1.

lei do resfriamento de Newton

O coeficiente de transferência de calor *não* é uma propriedade termodinâmica. Ele é um parâmetro empírico que incorpora, na relação da transferência de calor, a natureza do padrão de escoamento próximo à superfície, as propriedades do fluido e a geometria. Quando os ventiladores ou bombas provocam o movimento de um fluido o valor do coeficiente de transferência de calor é geralmente maior do que quando ocorrem movimentos relativamente lentos induzidos por variação de massa específica. Essas duas categorias gerais são chamadas de convecção *forçada* e *livre* (ou natural), respectivamente. A Tabela 2.1 fornece valores típicos para o coeficiente de transferência de calor para a convecção forçada e livre.

2.4.3 Comentários Finais

O primeiro passo numa análise termodinâmica é definir o sistema. Só depois da especificação da fronteira do sistema é possível considerar as interações de calor com a vizinhança, pois estas são *sempre* avaliadas na fronteira do sistema. Na conversa diária o termo *calor* é freqüentemente utilizado quando o termo *energia* seria mais correto termodinamicamente. Por exemplo, alguém poderia ouvir: "Por favor, feche a porta ou o 'calor' será perdido". Em *termodinâmica*, o calor re-

Tabela 2.1

Valores Típicos do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

Aplicações	h (W/m² · K)	h (Btu/h · ft² · °R)
Convecção livre		
Gases	2–25	0,35–4,4
Líquidos	50–1000	8,8–180
Convecção forçada		
Gases	25–250	4,4–44
Líquidos	50–20.000	8,8–3500

fere-se apenas a um meio particular através do qual a energia é transferida. Ele não se refere ao que está sendo transferido entre os sistemas ou ao que é armazenado nos sistemas. A energia é transferida e armazenada, não o calor.

Algumas vezes a transferência de energia sob a forma de calor para ou a partir de um sistema pode ser desprezada. Isso poderia ocorrer por diversas razões relacionadas aos mecanismos para a transferência de calor discutidos anteriormente. Uma delas poderia ser que os materiais que cercam o sistema são bons isolantes, ou que a transferência de calor não seria significativa porque há uma pequena diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança. Uma terceira razão seria não haver uma área superficial suficiente para permitir que uma transferência de calor significativa ocorra. Quando a transferência de calor é desprezada, uma ou mais dessas considerações se aplica.

Nas discussões a seguir o valor de Q é fornecido ou é uma incógnita na análise. Quando Q é fornecido pode-se considerar que o valor foi determinado pelos métodos apresentados. Quando Q não é conhecido o seu valor é usualmente calculado através do *balanço de energia*, discutido em seguida.

2.5 Contabilizando a Energia: Balanço de Energia para Sistemas Fechados

Conforme nossas discussões anteriores indicaram, os *únicos caminhos* para variar a energia de um sistema fechado são através da transferência de energia por meio de trabalho ou de calor. Além disso, baseado nos experimentos de Joule e outros, um aspecto fundamental do conceito de energia é que a *energia se conserva*; chamamos esse fato de ***primeira lei da termodinâmica.*** Para mais detalhes sobre a primeira lei, veja o boxe na página seguinte.

primeira lei da termodinâmica

Essas considerações podem ser resumidas através das seguintes palavras:

variação da quantidade de energia contida no sistema durante um certo intervalo de tempo	=	quantidade *líquida* de energia transferida *para dentro* através da fronteira do sistema por transferência de *calor* durante o intervalo de tempo	−	quantidade *líquida* de energia transferida *para fora* através da fronteira do sistema por *trabalho* durante o intervalo de tempo

Essa declaração é apenas um balanço contábil para a energia, um balanço de energia. Ele requer que em qualquer processo para um sistema fechado a energia do sistema aumente ou diminua de uma quantidade igual à quantidade líquida de energia transferida através da fronteira.

A expressão *quantidade líquida* usada no enunciado do balanço de energia deve ser cuidadosamente interpretada, já que pode haver transferências de energia por meio de calor ou trabalho em muitas posições diferentes da fronteira de um sistema. Em alguns locais as transferências de energia podem ser para o sistema, enquanto em outros são para fora do sistema. Os dois termos no lado direito são responsáveis pelos resultados líquidos de todas as transferências de energia por meio de calor e de trabalho, respectivamente, que ocorrem durante o intervalo de tempo considerado.

balanço de energia

O ***balanço de energia*** pode ser descrito pela expressão

$$E_2 - E_1 = Q - W \tag{2.35a}$$

Introduzindo a Eq. 2.27, uma forma alternativa é dada por

$$\Delta EC + \Delta EP + \Delta U = Q - W \tag{2.35b}$$

que mostra que uma transferência de energia através da fronteira do sistema resulta em uma variação de uma ou mais formas macroscópicas de energia: energia cinética, energia potencial gravitacional e energia interna. Todas as referências anteriores relativas à energia como uma quantidade que se conserva estão incluídas como casos especiais das expressões da Eq. 2.35.

Observe que os sinais algébricos antes dos termos de calor e trabalho das expressões relativas à Eq. 2.35 são diferentes. Isso é conseqüência da convenção de sinais adotada anteriormente. Um sinal negativo aparece antes de W porque a transferência de energia por meio de trabalho *do* sistema *para* a vizinhança é considerada positiva. Um sinal positivo aparece antes de Q porque este é considerado positivo quando a transferência de energia por calor ocorre *da* vizinhança *para* o sistema.

2.5.1 Aspectos Importantes do Balanço de Energia

Várias formas especiais de balanço de energia podem ser escritas. Por exemplo, o balanço de energia na forma diferencial é

$$dE = \delta Q - \delta W \tag{2.36}$$

Os Experimentos de Joule e a Primeira Lei

Em experimentos clássicos conduzidos no início do século XIX, Joule estudou processos através dos quais um sistema fechado passa de um estado de equilíbrio a outro. Em particular, ele considerou processos que envolvem interações de trabalho, mas não interações térmicas, entre o sistema e sua vizinhança. Qualquer desses processos é um *processo adiabático*, de acordo com a discussão da Seção 2.4.1.

Baseado em seus experimentos, Joule deduziu que o valor do trabalho líquido é o mesmo para *todos* os processos adiabáticos entre dois estados de equilíbrio. Em outras palavras, o valor do trabalho líquido realizado por ou sobre um sistema fechado que passa por um processo adiabático entre dois estados dados *depende somente dos estados inicial e final*, e não dos detalhes do processo adiabático.

Se o trabalho líquido é o mesmo para todos os processos adiabáticos em sistemas fechados entre os estados inicial e final, pode-se concluir da definição de propriedade (Seção 1.3) que o trabalho líquido para tais processos é a variação de alguma propriedade do sistema. Essa propriedade é chamada de *energia*.

Com base no argumento de Joule, a *variação de energia* entre dois estados é *definida* por

$$E_2 - E_1 = -W_{ad} \tag{a}$$

onde o símbolo E denota a energia de um sistema e W_{ad} representa o trabalho líquido para *qualquer* processo adiabático entre os dois estados. O sinal negativo antes do termo do trabalho está de acordo com a convenção de sinais para o trabalho, estabelecida previamente. Finalmente, observe que como qualquer valor arbitrário E_1 pode ser atribuído à energia de um sistema em um dado estado 1, nenhum significado especial pode ser associado ao valor da energia no estado 1 ou em *qualquer* outro estado. Somente as *variações* de energia de um sistema possuem significado.

A discussão precedente é baseada em provas experimentais, a começar pelos experimentos de Joule. Devido a incertezas experimentais inevitáveis não é possível provar através de medidas que o trabalho líquido é *exatamente* o mesmo para *todos* os processos adiabáticos entre os mesmos estados inicial e final. Entretanto, evidências experimentais apóiam essa conclusão e, portanto, adota-se como um princípio fundamental que o trabalho é realmente o mesmo. Esse princípio é uma formulação alternativa da *primeira lei*, e foi usado pelos cientistas e engenheiros subseqüentes como um trampolim para o desenvolvimento do conceito de *conservação de energia* e do *balanço de energia* como os conhecemos hoje.

sendo que dE é a diferencial da energia, uma propriedade. Como Q e W não são propriedades, suas diferenciais são escritas como δQ e δW, respectivamente.

O ***balanço de energia na forma de taxa temporal*** é

balanço de energia na forma de taxa temporal

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \tag{2.37}$$

A forma da taxa do balanço de energia expressa em palavras é

$$\left[\begin{array}{c}\textit{taxa de variação} \text{ temporal da energia contida no sistema } \textit{no tempo } t\end{array}\right] = \left[\begin{array}{c}\textit{taxa} \text{ líquida na qual a energia está sendo transferida para dentro por transferência de calor } \textit{no tempo } t\end{array}\right] - \left[\begin{array}{c}\textit{taxa} \text{ líquida na qual a energia está sendo transferida para fora por trabalho } \textit{no tempo } t\end{array}\right]$$

Como a taxa temporal de variação de energia é dada por

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d\mathrm{EC}}{dt} + \frac{d\mathrm{EP}}{dt} + \frac{dU}{dt}$$

A Eq. 2.37 pode ser expressa alternativamente como

$$\frac{d\mathrm{EC}}{dt} + \frac{d\mathrm{EP}}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \tag{2.38}$$

As Eqs. 2.35 a 2.38 fornecem formas alternativas para o balanço de energia que podem ser pontos de partida convenientes para a aplicação do princípio da conservação da energia a sistemas fechados. No Cap. 4 o princípio da conservação de energia é expresso sob formas adequadas para a análise em volumes de controle. Quando aplicarmos o balanço de energia em *qualquer* das

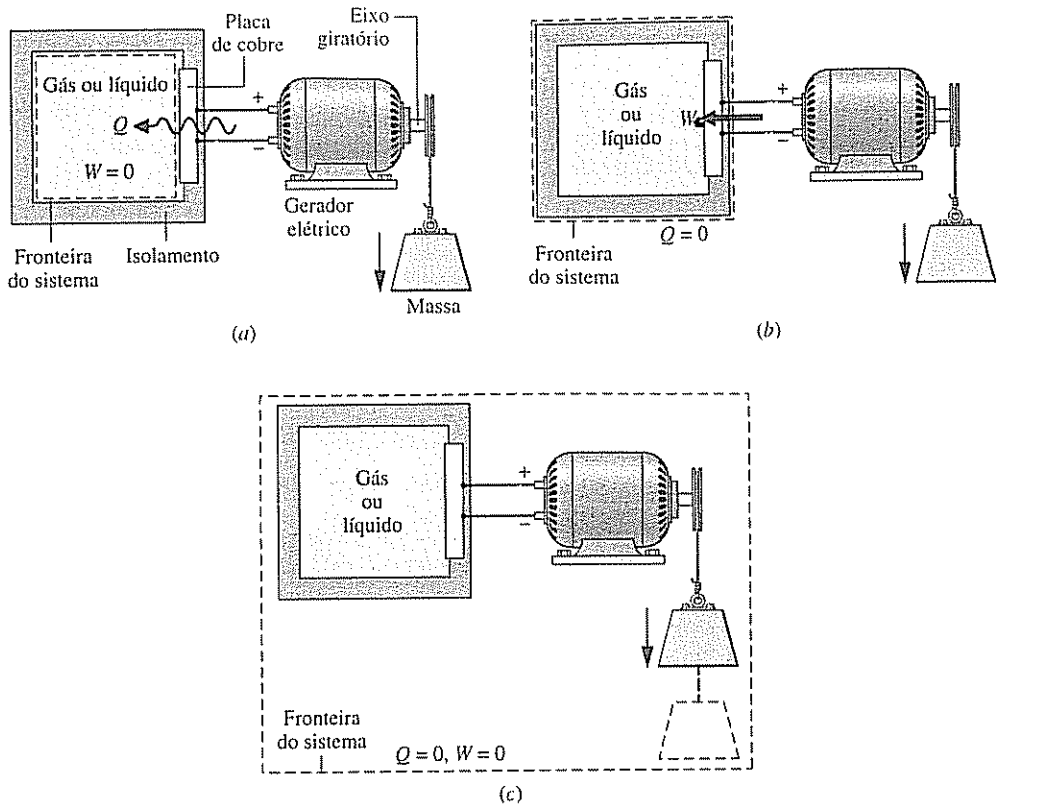


Fig. 2.15 Escolhas alternativas para a fronteira de um sistema

suas formas, é importante tomar cuidado com os sinais e unidades e fazer a distinção cuidadosa entre taxas e quantidades. Além disso, é importante reconhecer que a localização da fronteira do sistema pode ser relevante para determinar se uma específica transferência de energia será considerada como calor ou trabalho

➥ **POR EXEMPLO...** considere a Fig. 2.15, na qual são mostrados três sistemas alternativos que incluem uma quantidade de gás (ou líquido) em um recipiente rígido, bem isolado. Na Fig. 2.15*a* o próprio gás é o sistema. Conforme a corrente passa através da placa de cobre há uma transferência de energia da placa de cobre para o gás. Já que essa transferência de energia ocorre como resultado de uma diferença de temperatura entre a placa e o gás, ela é classificada como transferência de calor. Em seguida, considere a Fig. 2.15*b*, onde a fronteira é desenhada de forma a incluir a placa de cobre. Conclui-se, da definição termodinâmica de trabalho, que a transferência de energia que ocorre conforme a corrente atravessa a fronteira desse sistema deve ser considerada como trabalho. Finalmente, na Fig. 2.15*c* a fronteira está localizada de tal forma que nenhuma energia é transferida através dela por meio de calor ou trabalho. ⬅

Até agora, tivemos o cuidado de enfatizar que as quantidades simbolizadas por W e Q nas equações anteriores são responsáveis por transferências de *energia* e não por transferências de trabalho e calor, respectivamente. Os termos trabalho e calor indicam *meios* diferentes pelos quais a energia é transferida, e não *o que* é transferido. Entretanto, por economia de expressão nas discussões subseqüentes W e Q são freqüentemente referenciados simplesmente como transferência de trabalho e calor, respectivamente. Essa forma menos formal de falar é comumente usada na prática de engenharia.

Os exemplos fornecidos nas Seções 2.5.2 a 2.5.4 trazem idéias importantes sobre energia e o balanço de energia. Eles devem ser estudados cuidadosamente, e abordagens similares devem ser usadas para resolver os problemas do final do capítulo. Neste livro a maioria das aplicações do balanço de energia não envolverá variações significativas de energia cinética ou potencial. Assim, para acelerar as soluções dos muitos exemplos subseqüentes e dos problemas ao final do capítulo indicaremos no enunciado do problema que tais variações podem ser desprezadas. Se isso não estiver explícito no enunciado do problema você deve decidir, baseado no problema em estudo, qual a melhor maneira de lidar com os termos de energia cinética e potencial no balanço de energia.

Bio conexões

A energia requerida pelos animais para viverem é oriunda da oxidação da comida ingerida. Freqüentemente falamos que a comida é *queimada* no corpo humano. Essa é uma expressão apropriada, porque os experimentos mostram que quando a comida é queimada com oxigênio em uma câmara é liberada aproximadamente a mesma energia de quando a comida é oxidada no corpo. Tal câmara corresponde ao *calorímetro* a volume constante, perfeitamente isolado, apresentado na Fig. 2.16.

Uma amostra de comida, cuidadosamente pesada, é colocada na câmara de um calorímetro junto com oxigênio (O_2). Toda a câmara se encontra submersa no banho de água do calorímetro. Os conteúdos da câmara são, então, inflamados eletricamente, oxidando completamente a amostra de comida. A energia liberada durante a reação no interior da câmara resulta em um aumento da temperatura do calorímetro. Com o aumento de temperatura medido, a energia liberada pode ser calculada através de um balanço de energia, considerando o calorímetro como sistema. Esse é o valor da caloria da amostra de comida, informado usualmente em termos de quilocaloria (kcal), como pode ser visto no item "calorias" nos rótulos dos alimentos.

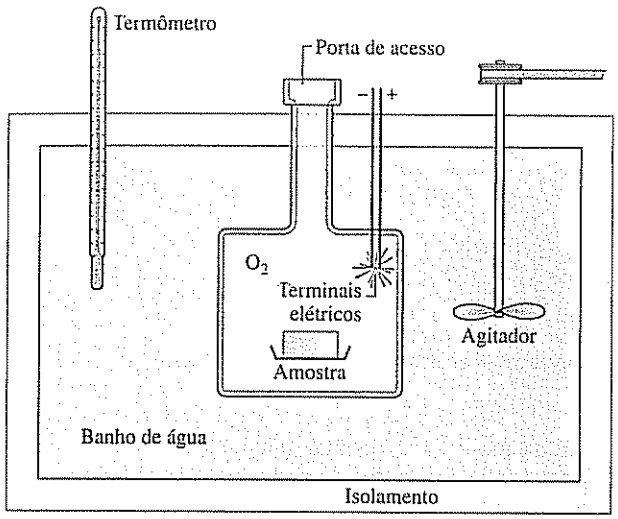


Fig. 2.16 Calorímetro a volume constante.

2.5.2 Utilizando o Balanço de Energia: Processos em Sistemas Fechados

Os dois exemplos a seguir ilustram o uso do balanço de energia para processos em sistemas fechados. Nesses exemplos são fornecidos dados para a energia interna. No Capítulo 3 aprenderemos como obter a energia interna e outros dados de propriedades termodinâmicas, utilizando tabelas, gráficos e programas de computador.

Exemplo 2.2 RESFRIANDO UM GÁS EM UM CILINDRO-PISTÃO

Um conjunto cilindro-pistão contém 0,4 kg de um certo gás. O gás está sujeito a um processo no qual a relação pressão-volume é

$$pV^{1.5} = constante$$

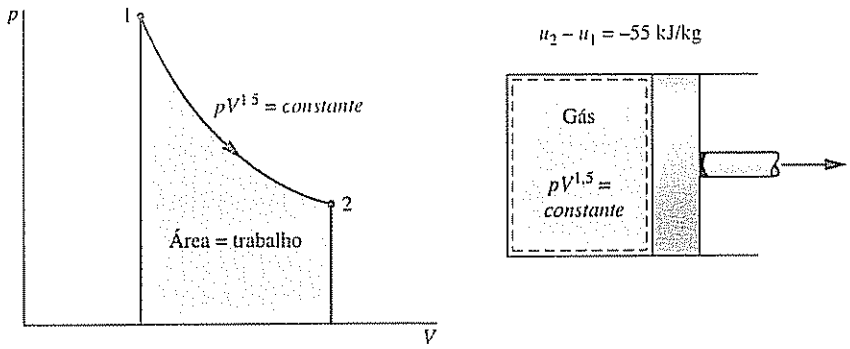
A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de 0,1 m³ e o volume final é de 0,2 m³. A variação da energia interna específica do gás no processo é $u_2 - u_1 = -55$ kJ/kg. Não há variação significativa da energia cinética ou potencial. Determine a transferência de calor líquida para o processo, em kJ.

Solução

Dado: um gás em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo de expansão para o qual são especificadas a relação pressão-volume e a variação da energia interna específica.

Pede-se: determine a transferência de calor líquida para o processo.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O gás é um sistema fechado.
2. O processo é descrito por $pV^{1,5} = constante$.
3. Não há variação da energia cinética ou potencial do sistema.

Fig. E2.2

Análise: um balanço de energia para o sistema fechado toma a forma

$$\cancel{\Delta EC}^{0} + \cancel{\Delta EP}^{0} + \Delta U = Q - W$$

na qual os termos das energias cinética e potencial tornam-se nulos pela hipótese 3. Então, escrevendo ΔU em termos das energias internas específicas o balanço de energia se torna

$$m(u_2 - u_1) = Q - W$$

onde m é a massa do sistema. Resolvendo para Q

$$Q = m(u_2 - u_1) + W$$

O valor do trabalho para esse processo é determinado na parte (a) da solução do Exemplo 2.1: $W = +17,6$ kJ. A variação da energia interna é obtida utilizando-se os dados fornecidos

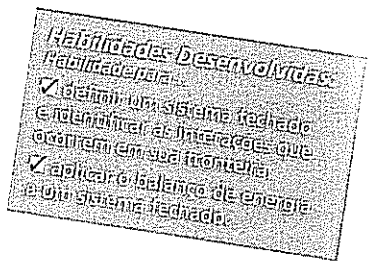
$$m(u_2 - u_1) = 0,4 \text{ kg}\left(-55\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = -22 \text{ kJ}$$

Substituindo os valores

$$Q = -22 + 17,6 = -4,4 \text{ kJ}$$

① A relação fornecida entre a pressão e o volume permite que o processo seja representado pelo caminho mostrado no diagrama correspondente. A área sob a curva representa o trabalho. Como não são propriedades, os valores do trabalho e da transferência de calor dependem dos detalhes do processo e não podem ser determinados a partir dos estados inicial e final somente.

② O sinal negativo para o valor de Q significa que uma quantidade líquida de energia foi transferida do sistema para a vizinhança por transmissão de calor.



Teste-Relâmpago

Se o gás percorre um processo no qual $pV = constante$ e $\Delta u = 0$, determine a transferência de calor, em kJ, mantendo fixos a pressão inicial e os volumes fornecidos.

Resposta 20,79 kJ.

No próximo exemplo retomamos a discussão da Fig. 2.15, considerando dois sistemas alternativos. Esse exemplo ressalta a necessidade de levar em conta corretamente as interações de calor e trabalho que ocorrem na fronteira, assim como a variação de energia.

Exemplo 2.3 CONSIDERANDO SISTEMAS ALTERNATIVOS

Ar está contido em um conjunto cilindro-pistão vertical equipado com uma resistência elétrica. A atmosfera exerce uma pressão de 14,7 lbf/in² (101,3 kPa) no topo do pistão, que possui uma massa de 100 lb (45,4 kg) e cuja área da face é de 1 ft² (0,09 m²). Uma corrente elétrica passa através da resistência e o volume de ar aumenta lentamente de 1,6 ft³ (0,04 m³), enquanto sua pressão permanece

constante. A massa do ar é 0,6 lb (0,27 kg) e sua energia interna específica aumenta de 18 Btu/lb (41,9 kJ/kg). O ar e o pistão estão em repouso no início e no fim do processo. O material do cilindro-pistão é um composto cerâmico e, portanto, um bom isolante. O atrito entre o pistão e a parede do cilindro pode ser desprezado, e a aceleração da gravidade é $g = 32{,}0\ \text{ft/s}^2\ (9{,}7\ \text{m/s}^2)$. Determine a transferência de calor da resistência para o ar, em Btu, para um sistema composto de (a) apenas ar, (b) ar e pistão.

Solução

Dado: são fornecidos dados relativos ao ar contido em um conjunto cilindro-pistão vertical equipado com uma resistência elétrica.

Pede-se: considerando cada um dos dois sistemas alternativos, determinar a transferência de calor da resistência para o ar.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

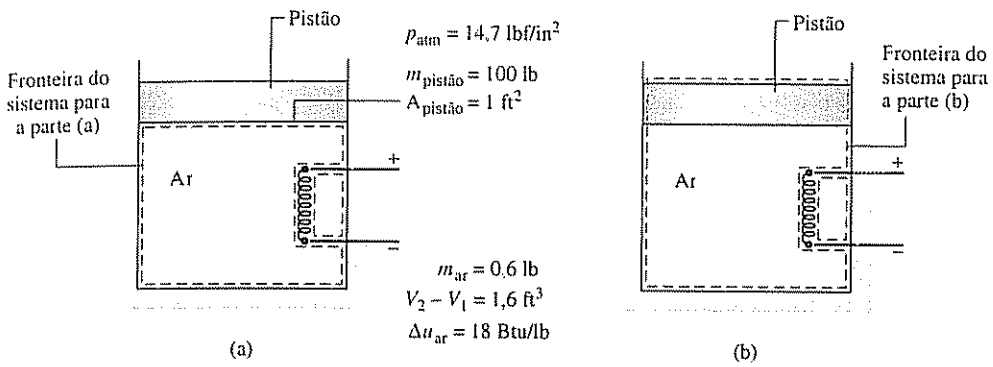


Fig. E2.3

Modelo de Engenharia:

1. Dois sistemas fechados são considerados, como ilustrado nos diagramas.
2. A única transferência de calor significativa é da resistência para o ar, durante a qual o ar se expande lentamente e sua pressão permanece constante.
3. Não há variação líquida na energia cinética; a variação da energia potencial do ar é desprezível, e já que o material do pistão é um bom isolante, a energia interna do pistão não é afetada pela transferência de calor.
4. O atrito entre o pistão e a parede do cilindro é desprezível.
5. A aceleração da gravidade é constante; $g = 32{,}0\ \text{ft/s}^2$.

Análise: **(a)** Considerando o ar como o sistema, o balanço de energia, Eq. 2.35, reduz-se, com a hipótese 3, a

$$(\cancel{\Delta EC}^{0} + \cancel{\Delta EP}^{0} + \Delta U)_{ar} = Q - W$$

Ou, resolvendo para Q

$$Q = W + \Delta U_{ar}$$

Para esse sistema, o trabalho é realizado pela força da pressão p que atua no *fundo* do pistão conforme o ar se expande. Com a Eq. 2.17 e a hipótese de pressão constante

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\, dV = p(V_2 - V_1)$$

Para determinar a pressão p, usamos um balanço de forças no pistão sem atrito que se move lentamente. A força para cima, exercida pelo ar sobre o *fundo* do pistão, é igual ao peso do pistão mais a força para baixo da atmosfera que atua no *topo* do pistão. Assim

$$p\,A_{pistão} = m_{pistão}\,g + p_{atm}A_{pistão}$$

Resolvendo para p e inserindo os valores

$$p = \frac{m_{pistão}\,g}{A_{pistão}} + p_{atm}$$
$$= \frac{(100\ \text{lb})(32{,}0\ \text{ft/s}^2)}{1\ \text{ft}^2}\left|\frac{1\ \text{lbf}}{32{,}2\ \text{lb}\cdot\text{ft/s}^2}\right|\left|\frac{1\ \text{ft}^2}{144\ \text{in}^2}\right| + 14{,}7\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 15{,}4\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

Assim, o trabalho é

$$W = p(V_2 - V_1)$$
$$= \left(15{,}4\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}\right)(1{,}6\ \text{ft}^3)\left|\frac{144\ \text{in}^2}{1\ \text{ft}^2}\right|\left|\frac{1\ \text{Btu}}{778\ \text{ft}\cdot\text{lbf}}\right| = 4{,}56\ \text{Btu}$$

Com $\Delta U_{ar} = m_{ar}(\Delta u_{ar})$, a transferência de calor é

$$Q = W + m_{ar}(\Delta u_{ar})$$
$$= 4{,}56 \text{ Btu} + (0{,}6 \text{ lb})\left(18\frac{\text{Btu}}{\text{lb}}\right) = 15{,}4 \text{ Btu}$$

(b) Considere a seguir um sistema composto pelo ar e pelo pistão. A variação de energia do sistema global é a soma das variações de energia do ar e do pistão. Assim, o balanço de energia, Eq. 2.35, é dado por

$$(\cancel{\Delta EC}^{0} + \cancel{\Delta EP}^{0} + \Delta U)_{ar} + (\cancel{\Delta EC}^{0} + \Delta EP + \cancel{\Delta U}^{0})_{pistão} = Q - W$$

onde os termos indicados se cancelam pela hipótese 3. Resolvendo para Q

$$Q = W + (\Delta EP)_{pistão} + (\Delta U)_{ar}$$

Para esse sistema, trabalho é realizado no *topo* do pistão à medida que este empurra a atmosfera vizinha. Aplicando a Eq. 2.17

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\, dV = p_{atm}(V_2 - V_1)$$
$$= \left(14{,}7\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}\right)(1{,}6 \text{ ft}^3)\left|\frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2}\right|\left|\frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}}\right| = 4{,}35 \text{ Btu}$$

A variação de altura, Δz, necessária para calcular a variação de energia potencial do pistão, pode ser encontrada a partir da variação do volume do ar e da área da face do pistão

$$\Delta z = \frac{V_2 - V_1}{A_{pistão}} = \frac{1{,}6 \text{ ft}^3}{1 \text{ ft}^2} = 1{,}6 \text{ ft}$$

Então, a variação da energia potencial do pistão é

$$(\Delta EP)_{pistão} = m_{pistão}\, g \Delta z$$
$$= (100 \text{ lb})\left(32{,}0\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}\right)(1{,}6 \text{ ft})\left|\frac{1 \text{ lbf}}{32{,}2 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2}\right|\left|\frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}}\right| = 0{,}2 \text{ Btu}$$

Finalmente

$$Q = W + (\Delta EP)_{pistão} + m_{ar}\Delta u_{ar}$$
$$= 4{,}35 \text{ Btu} + 0{,}2 \text{ Btu} + (0{,}6 \text{ lb})\left(18\frac{\text{Btu}}{\text{lb}}\right) = 15{,}4 \text{ Btu}$$

o que concorda com o resultado da parte (a)

Embora o valor de Q seja o mesmo para cada sistema, observe que os valores de W diferem. Observe, também, que as variações de energia diferem dependendo do sistema, que pode ser constituído apenas pelo ar ou pelo ar e o pistão.

Habilidades Desenvolvidas

Habilidade para:

- ✓ definir sistemas fechados alternativos e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- ✓ calcular o trabalho usando a Eq. 2.17.
- ✓ aplicar o balanço de energia a um sistema fechado.

Teste-Relâmpago

Qual a variação da energia potencial do ar, em Btu?

Resposta $\approx 10^{-3}$ Btu.

2.5.3 Utilizando o Balanço da Taxa de Energia: Operação em Regime Permanente

Um sistema está em regime permanente se nenhuma das suas propriedades varia ao longo do tempo (Seção 1.3). Muitos dispositivos operam em regime permanente ou próximo do regime permanente, significando que as variações das propriedades com o tempo são pequenas o suficiente para serem ignoradas. Os dois exemplos a seguir ilustram a aplicação da equação da energia sob a forma de taxa a sistemas fechados em regime permanente.

Exemplo 2.4 CAIXA DE REDUÇÃO EM REGIME PERMANENTE

Durante uma operação em regime permanente uma caixa de redução recebe 60 kW através do eixo de entrada e fornece potência através do eixo de saída. Considerando a caixa de redução como sistema, a taxa de transferência de energia por convecção é

$$\dot{Q} = -hA(T_b - T_f)$$

em que h = 0,171 kW/m² · K é o coeficiente de transferência de calor, A = 1,0 m² é a área da superfície externa da caixa de redução, T_b = 300 K (27°C) é a temperatura da superfície externa e T_f = 293 K (20°C) é a temperatura do ar da vizinhança longe das imediações da caixa de câmbio. Para a caixa de engrenagens, calcule a taxa de transferência de calor e a potência fornecida através do eixo de saída, ambas em kW.

Solução

Dado: uma caixa de redução opera em regime permanente com uma potência de entrada conhecida. Uma expressão para a taxa de transferência de calor da superfície externa também é conhecida.

Pede-se: determine a taxa de transferência de calor e a potência fornecida através do eixo de saída, ambas em kW.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

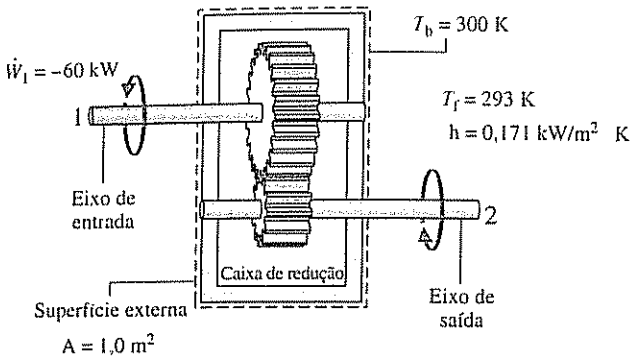


Fig. E2.4

Modelo de Engenharia:

1. A caixa de redução é um sistema fechado em regime permanente
2. Para a caixa de redução, o modo de transferência de calor dominante é a convecção.

UNIFEMM - Centro Universitário de Sete Lagoas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

Análise: utilizando a expressão dada para $\dot{Q}$ junto com os dados conhecidos, a taxa de energia transferida por meio de calor é

⓫
$$\begin{aligned}\dot{Q} &= -hA(T_b - T_f)\\ &= -\left(0{,}171\frac{kW}{m^2 \cdot K}\right)(1{,}0\ m^2)(300 - 293)\ K\\ &= -1{,}2\ kW\end{aligned}$$

O sinal negativo para $\dot{Q}$ indica que a energia é *retirada* da caixa de redução por transferência de calor.

O balanço da taxa de energia, Eq. 2.37, em regime permanente, reduz-se a

⓬
$$\frac{dE}{dt}^{0} = \dot{Q} - \dot{W} \quad \text{ou} \quad \dot{W} = \dot{Q}$$

O símbolo $\dot{W}$ representa a potência *líquida* do sistema. A potência líquida é a soma de $\dot{W}_1$ com a potência de saída $\dot{W}_2$.

$$\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$$

Com essa expressão para $\dot{W}$, o balanço da taxa de energia torna-se

$$\dot{W}_1 + \dot{W}_2 = \dot{Q}$$

Resolvendo para $\dot{W}_2$, inserindo $\dot{Q}$ = −1,2 kW e $\dot{W}_1$ = −60 kW, onde o sinal negativo é necessário porque o eixo de entrada traz energia para o sistema, temos

⓭
$$\begin{aligned}\dot{W}_2 &= \dot{Q} - \dot{W}_1\\ &= (-1{,}2\ kW) - (-60\ kW)\\ &= +58{,}8\ kW\end{aligned}$$

⓮ O sinal positivo para $\dot{W}_2$ indica que a energia é transferida do sistema, através do eixo de saída, como esperado.

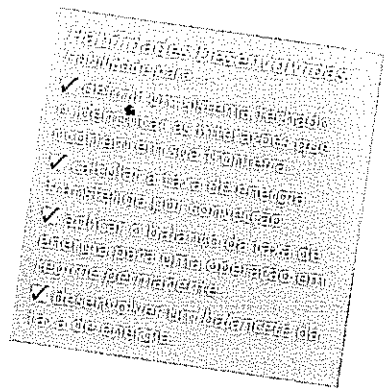
⓫ De acordo com a convenção de sinais para a taxa de transferência de calor no balanço da taxa de energia (Eq. 2.37), a Eq. 2.34 é escrita com um sinal negativo: $\dot{Q}$ é negativo desde que T_b seja maior do que T_f.

⓬ As propriedades de um sistema em regime permanente não variam com o tempo. A energia E é uma propriedade, mas a transferência de calor e o trabalho não são propriedades.

⓭ Para esse sistema, a transferência de energia por trabalho ocorre em dois locais distintos, e o sinal associado aos seus valores é diferente.

No regime permanente a taxa de transferência de calor da caixa de redução é responsável pela diferença entre a potência de entrada e de saída. Isso pode ser resumido pelo seguinte "balancete" da taxa de energia em termos das *magnitudes*:

Entrada	Saída
60 kW (eixo de entrada)	58,8 kW (eixo de saída)
	1,2 kW (transferência de calor)
Total: 60 kW	60 kW



Teste-Relâmpago

Considerando uma emissividade de 0,8 e que $T_s = T_f$, use a Eq. 2.33 para determinar a taxa líquida na qual a energia é irradiada da superfície externa da caixa de redução, em kW.

Resposta 0,03 kW.

Exemplo 2.5 CHIP DE SILÍCIO EM REGIME PERMANENTE

Um chip de silício medindo 5 mm de lado e 1 mm de espessura está inserido num substrato cerâmico. Em regime permanente o chip tem uma potência elétrica de entrada de 0,225 W. A superfície superior do chip está exposta a um refrigerante cuja temperatura é de 20°C. O coeficiente de transferência de calor para a convecção entre o chip e o refrigerante é 150 W/m² · K. Se a transferência de calor por condução entre o chip e o substrato for desprezível, determine a temperatura da superfície do chip, em °C.

Solução

Dado: a superfície superior de um chip de silício de dimensões conhecidas é exposta a um refrigerante. A potência elétrica de entrada e o coeficiente de transferência de calor por convecção são conhecidos.

Pede-se: determine a temperatura da superfície do chip em regime permanente.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

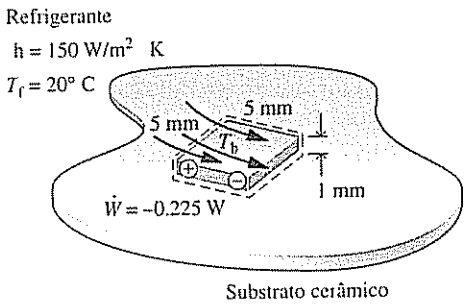


Fig. E2.5

Modelo de Engenharia:

1. O chip é um sistema fechado em regime permanente.
2. Não há transferência de calor entre o chip e o substrato.

Análise: a temperatura da superfície do chip, T_b, pode ser determinada utilizando-se o balanço de taxa de energia, Eq. 2.37, que em regime permanente reduz-se a

$$\frac{dE}{dt}^{0} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Com a hipótese 2, a única transferência de calor é por convecção para o refrigerante. Nessa aplicação, a lei do resfriamento de Newton, Eq. 2.34, toma a forma

$$\dot{Q} = -hA(T_b - T_f)$$

Juntando-se essas duas equações

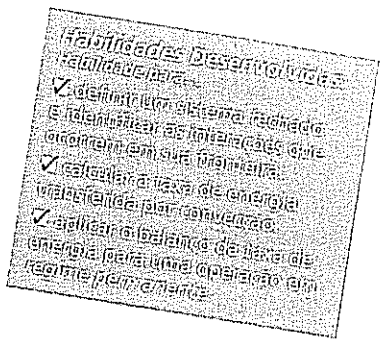
$$0 = -hA(T_b - T_f) - \dot{W}$$

Resolvendo para T_b

$$T_b = \frac{-\dot{W}}{hA} + T_f$$

Nessa expressão, $\dot{W} = -0{,}225$ W, A $= 25 \times 10^{-6}$ m^2, h $= 150$ W/m$^2 \cdot$ K e $T_f = 293$ K, assim

$$T_b = \frac{-(-0{,}225\ \text{W})}{(150\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K})(25 \times 10^{-6}\ \text{m}^2)} + 293\ \text{K}$$
$$= 353\ \text{K}\ (80°\text{C})$$



① As propriedades de um sistema em regime permanente não variam com o tempo. A energia E é uma propriedade, mas a transferência de calor e o trabalho não são propriedades.

② De acordo com a convenção de sinais para a transferência de calor no balanço da taxa de energia (Eq. 2.37), a Eq. 2.34 é escrita com um sinal negativo: $\dot{Q}$ é negativo desde que T_b seja maior do que T_f.

Teste-Relâmpago

Se a temperatura da superfície do chip não deve ser maior do que 60°C, qual a gama de valores correspondentes requerida para o coeficiente de transferência de calor por convecção, admitindo que todas as outras grandezas permaneçam constantes?

Resposta h ≥ 225 W/m$^2 \cdot$ K.

2.5.4 Utilizando o Balanço da Taxa de Energia: Operação em Regime Transiente

Muitos dispositivos estão sujeitos a períodos de operação transiente, onde o estado varia com o tempo. Isso é observado durante os períodos de partida e parada. O próximo exemplo ilustra a aplicação do balanço da taxa de energia a um motor elétrico durante a partida. O exemplo também envolve tanto trabalho elétrico quanto potência transmitida por um eixo.

Exemplo 2.6 OPERAÇÃO TRANSIENTE DE UM MOTOR

A taxa de transferência de calor entre um certo motor elétrico e sua vizinhança varia com o tempo conforme

$$\dot{Q} = -0{,}2[1 - e^{(-0{,}05t)}]$$

sendo que t está em segundos e $\dot{Q}$ está em quilowatts. O eixo do motor gira a uma velocidade constante de $\omega = 100$ rad/s (cerca de 955 revoluções por minuto, ou rpm) e aplica um torque constante de $\mathcal{T} = 18$ N $\cdot$ m a uma carga externa. O motor consome uma potência elétrica de entrada constante e igual a 2,0 kW. Para o motor, represente graficamente $\dot{Q}$ e $\dot{W}$, ambos em kW, e a variação de energia ΔE, em kJ, como funções do tempo, de $t = 0$ a $t = 120$ s. Comente.

Solução

Dado: um motor opera com potência elétrica de entrada, velocidade de eixo e torque aplicado constantes. A taxa de transferência de calor variando com o tempo entre o motor e sua vizinhança é conhecida.

Pede-se: represente graficamente, $\dot{Q}$, $\dot{W}$ e ΔE *versus* o tempo. Discuta.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

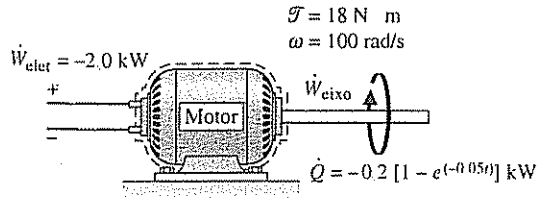


Fig. E2.6a

Modelo de Engenharia: o sistema ilustrado no esboço correspondente é um sistema fechado.

Análise: a taxa temporal de variação da energia do sistema é

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

$\dot{W}$ representa a potência *líquida do* sistema: a soma da potência associada à rotação do eixo, $\dot{W}_{eixo}$ com a potência associada ao fluxo de eletricidade, $\dot{W}_{elet}$

$$\dot{W} = \dot{W}_{eixo} + \dot{W}_{elet}$$

A taxa $\dot{W}_{elet}$ é conhecida do enunciado do sistema: $\dot{W}_{elet} = -2{,}0$ kW, onde o sinal negativo é necessário porque a energia é transferida para o sistema por meio de trabalho elétrico O termo $\dot{W}_{eixo}$ pode ser calculado com a Eq. 2.20, da seguinte forma

$$\dot{W}_{eixo} = \mathcal{T}\omega = (18 \text{ N} \cdot \text{m})(100 \text{ rad/s}) = 1800 \text{ W} = +1{,}8 \text{ kW}$$

Como a energia sai do sistema através do eixo, essa taxa de transferência de energia é positiva

Em resumo,

$$\dot{W} = \dot{W}_{elet} + \dot{W}_{eixo} = (-2{,}0 \text{ kW}) + (+1{,}8 \text{ kW}) = -0{,}2 \text{ kW}$$

onde o sinal negativo indica que a potência elétrica de entrada é maior do que a potência transferida para fora através do eixo

Com esse resultado para $\dot{W}$ e com a expressão dada para $\dot{Q}$, o balanço da taxa de energia fica

$$\frac{dE}{dt} = -0{,}2[1 - e^{(-0.05t)}] - (-0{,}2) = 0{,}2e^{(-0.05t)}$$

Integrando

$$\Delta E = \int_0^t 0{,}2e^{(-0.05t)}\,dt$$

$$= \frac{0{,}2}{(-0{,}05)} e^{(-0.05t)}\Big]_0^t = 4[1 - e^{(-0.05t)}]$$

① Os gráficos correspondentes, Figs. E2.6b, c, são elaborados, utilizando-se a expressão fornecida para $\dot{Q}$ e as expressões para $\dot{W}$ e ΔE obtidas da análise. Em virtude da nossa convenção de sinais para calor e trabalho, os valores de $\dot{Q}$ e $\dot{W}$ são negativos. Nos primeiros poucos segundos a taxa *líquida* na qual a energia é entregue através de trabalho excede enormemente a taxa na qual a energia é rejeitada por transferência de calor. Conseqüentemente, a energia armazenada no motor aumenta rapidamente, conforme o motor "aquece" À proporção que o tempo passa o valor de $\dot{Q}$ se aproxima de $\dot{W}$ e a taxa de armazenamento de energia diminui. Após cerca de 100 s esse modo de operação *transiente* está praticamente encerrado e há pouca variação na quantidade de energia armazenada ou de ② qualquer outra propriedade. Podemos dizer então que o motor está em regime permanente.

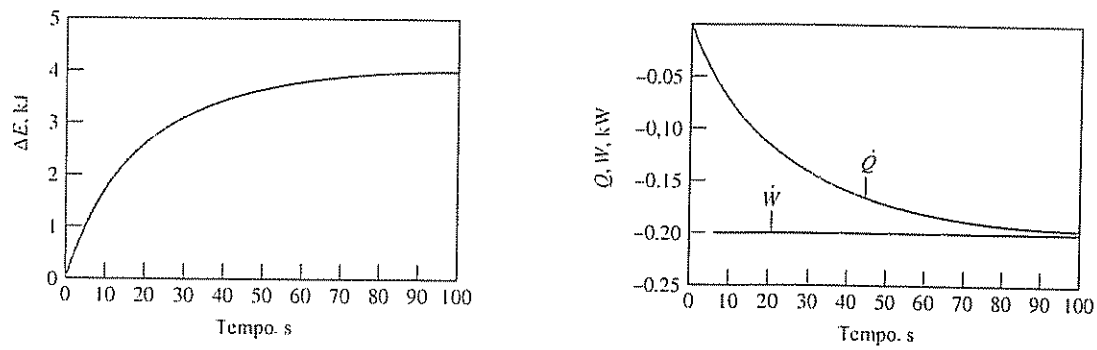
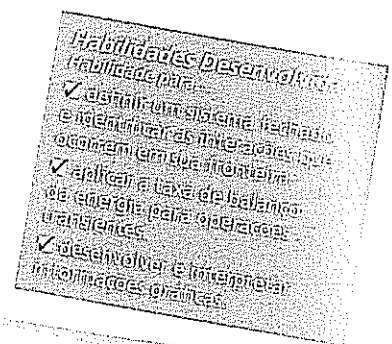


Fig. E2.6b,c

③ As Figuras E 2.6b, c podem ser elaboradas utilizando-se programas de computador próprios ou podem ser desenhadas à mão.

② Em regime permanente o valor de $\dot{Q}$ permanece constante em $-0{,}2$ kW. Esse valor constante para a taxa de transferência de calor pode ser considerado como a porção da potência elétrica de entrada que não é convertida em potência mecânica de saída devido a efeitos internos ao motor, tais como a resistência elétrica e o atrito.



Teste-Relâmpago

Considerando que o modo dominante de transferência de calor da superfície externa do motor é convecção, determine, no regime permanente, a temperatura T_b da superfície externa, em K, para h = 0,17 kW/m² K, A = 0,3 m² e T_f = 293 K.

Resposta 297 K.

2.6 Análise de Energia para Ciclos

Nesta seção são ilustrados os conceitos de energia desenvolvidos até agora, através da aplicação a sistemas submetidos a ciclos termodinâmicos. Um ***ciclo termodinâmico*** é uma seqüência de processos que começa e termina no mesmo estado. No final do ciclo todas as propriedades têm os mesmos valores que possuíam no início. Conseqüentemente, terminado o ciclo o sistema não experimenta nenhuma variação líquida de estado. Ciclos que se repetem periodicamente exercem papéis proeminentes em muitas áreas de aplicação. Por exemplo, o vapor que circula ao longo de uma termoelétrica executa um ciclo.

ciclo termodinâmico

O estudo de sistemas percorrendo ciclos tem um papel importante no desenvolvimento do assunto termodinâmica aplicada à engenharia. Tanto a primeira lei quanto a segunda lei da termodinâmica possuem raízes no estudo dos ciclos. Além disso, há muitas aplicações práticas importantes envolvendo geração de energia, propulsão de veículos e refrigeração para as quais a compreensão dos ciclos termodinâmicos é essencial. Nesta seção os ciclos são considerados sob a perspectiva do princípio da conservação de energia. Os ciclos são estudados em mais detalhes nos capítulos subseqüentes, usando-se o princípio da conservação de energia e a segunda lei da termodinâmica.

2.6.1 Balanço de Energia para um Ciclo

O balanço de energia para qualquer sistema sujeito a um ciclo termodinâmico toma a forma

$$\Delta E_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} - W_{\text{ciclo}} \tag{2.39}$$

na qual Q_{ciclo} e W_{ciclo} representam quantidades *líquidas* de transferência de energia por calor e trabalho, respectivamente, para o ciclo. Como o sistema retorna ao seu estado inicial após o ciclo não há uma variação *líquida* da sua energia. Conseqüentemente, o lado esquerdo da Eq. 2.39 é igual a zero, e a equação reduz-se a

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} \tag{2.40}$$

> **Tome Nota**
>
> **Quando analisamos ciclos normalmente consideramos a transferência de energia como positiva no sentido da seta presente no esboço do sistema e escrevemos o balanço de energia de acordo com essa convenção.**

A Eq. 2.40 é uma expressão do princípio da conservação da energia que tem que ser satisfeita por *todo* ciclo termodinâmico, não importando a seqüência de processos seguida pelo sistema submetido ao ciclo ou a natureza das substâncias que compõem o sistema.

A Fig. 2.17 fornece um esquema simplificado de duas classes gerais de ciclos consideradas neste livro: ciclos de potência e ciclos de refrigeração e bomba de calor. Em cada caso mostrado, um sistema percorre um ciclo enquanto se comunica termicamente com dois corpos, um quente e o outro frio. Esses corpos são sistemas localizados na vizinhança do sistema submetido ao ciclo. Durante cada ciclo, há também uma quantidade líquida de energia trocada com a vizinhança por meio de trabalho. Observe cuidadosamente que, ao utilizar os símbolos Q_{entra} e Q_{sai} na Fig. 2.17, nos afastamos da convenção de sinais para a transferência de calor previamente estabelecida. Nesta seção é vantajoso considerar Q_{entra} e Q_{sai} como transferências de energia nos *sentidos indicados pelas setas*. O sentido do trabalho líquido do ciclo, W_{ciclo}, *também é indicado por uma seta*. Finalmente, observe que os sentidos de transferência de energia mostrados na Fig. 2.17*b* são opostos àqueles na Fig. 2.17*a*.

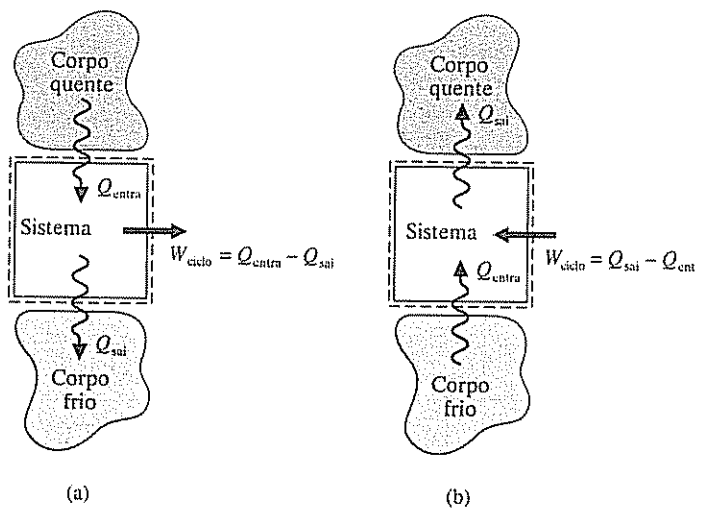


Fig. 2.17 Diagramas esquemáticos de duas classes importantes de ciclos. *(a)* Ciclos de potência. *(b)* Ciclos de refrigeração e bomba de calor.

2.6.2 Ciclos de Potência

Os sistemas que percorrem ciclos do tipo ilustrado na Fig. 2.17a fornecem uma transferência líquida sob a forma de trabalho para sua vizinhança durante cada ciclo. Qualquer um desses ciclos é chamado de ***ciclo de potência***. Da Eq. 2.40, a entrada de trabalho líquido é igual à transferência de calor líquida para o ciclo, ou

ciclo de potência

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}} \quad \text{(ciclo de potência)} \tag{2.41}$$

em que Q_{entra} representa a transferência de energia por meio de calor do corpo quente *para* o sistema e Q_{sai} representa a transferência de calor que *sai* do sistema para o corpo frio. Da Eq. 2.41, fica claro que Q_{entra} tem que ser maior do que Q_{sai} para um ciclo de *potência*. A energia fornecida por transferência de calor para um sistema que percorre um ciclo de potência é normalmente oriunda

da queima de um combustível ou de uma reação nuclear moderada; ela também pode ser obtida da radiação solar. A energia Q_{sai} é geralmente descarregada para a atmosfera circundante ou para um corpo d'água próximo

O desempenho de um sistema que percorre um *ciclo de potência* pode ser descrito em termos da extensão na qual a energia adicionada por calor, Q_{entra}, é *convertida* em trabalho líquido na saída, W_{ciclo}. A extensão da conversão de energia de calor para trabalho é expressa pela seguinte razão, comumente chamada de ***eficiência térmica***:

eficiência térmica

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{entra}} \quad \text{(ciclo de potência)} \tag{2.42}$$

Introduzindo a Eq. 2.41, obtém-se uma forma alternativa dada por

$$\eta = \frac{Q_{entra} - Q_{sai}}{Q_{entra}} = 1 - \frac{Q_{sai}}{Q_{entra}} \quad \text{(ciclo de potência)} \tag{2.43}$$

Como a energia se conserva, conclui-se que a eficiência térmica jamais pode ser maior do que a unidade (100%). No entanto, a experiência com ciclos de potência *reais* mostra que o valor da eficiência térmica é invariavelmente *menor* do que a unidade. Ou seja, nem toda a energia adicionada ao sistema por transferência de calor é convertida em trabalho; uma parte é rejeitada para o corpo frio por transferência de calor. Utilizando a segunda lei da termodinâmica, mostraremos no Capítulo 5 que a conversão de calor em trabalho não pode ser alcançada totalmente por nenhum ciclo de potência. A eficiência térmica de *todo* ciclo de potência tem que ser menor do que a unidade: $\eta < 1$

Energia e Meio Ambiente

Atualmente usinas de energia movidas a combustível fóssil podem alcançar eficiências térmicas de 40%, ou mais. Isso significa que mais de 60% da energia adicionada por transferência de calor durante o ciclo da usina são descarregados da usina de outra forma, além de trabalho, principalmente por transferência de calor. Uma forma de resfriar a usina pode ser alcançada utilizando-se água retirada de um rio vizinho ou lago. A água finalmente retorna ao rio ou lago, porém a uma temperatura mais alta, o que gera as mais diversas conseqüências ambientais possíveis.

O retorno de grandes quantidades de água aquecida para um rio ou lago pode afetar sua capacidade de manter gases dissolvidos, incluindo o oxigênio necessário para a vida aquática. Se a temperatura da água que retorna for maior do que cerca de 35°C (95°F), o oxigênio dissolvido pode ser muito baixo para manter algumas espécies de peixe. Se a temperatura da água que retorna for muito maior, algumas espécies também podem ficar estressadas. À medida que os rios e lagos tornam-se aquecidos espécies não-nativas que resistem ao calor podem assumir o controle. Além disso, a água aquecida favorece as populações de bactérias e o crescimento de algas.

Agências reguladoras têm agido no sentido de limitar descargas de água aquecida oriundas de usinas de energia, fazendo com que a presença de torres de resfriamento (Seção 12.9) adjacentes se torne uma característica comum das usinas.

2.6.3 Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor

ciclos de refrigeração e bomba de calor

A seguir, considere os ***ciclos de refrigeração e bomba de calor*** mostrados na Fig. 2.17*b*. Para ciclos desse tipo Q_{entra} é a energia transferida por calor do corpo frio para o sistema que percorre o ciclo, e Q_{sai} é a energia descarregada por transferência de calor *do* sistema *para* o corpo quente. Para realizar essas transferências de energia é necessária a *entrada* de trabalho líquido, W_{ciclo}. As quantidades Q_{entra}, Q_{sai} e W_{ciclo} estão relacionadas entre si pelo balanço de energia que, para ciclos de refrigeração e bomba de calor, toma a forma

$$W_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra} \quad \text{(ciclo de refrigeração e bomba de calor)} \tag{2.44}$$

Como W_{ciclo} é positivo nessa equação, conclui-se que Q_{sai} é maior do que Q_{entra}.

Embora tenham sido tratados de forma única até este ponto, na realidade os ciclos de refrigeração e bomba de calor possuem objetivos diferentes. O objetivo de um ciclo de refrigeração é reduzir a temperatura de um espaço refrigerado ou manter a temperatura do interior de uma residência, ou de outra construção, *abaixo* daquela do meio ambiente. O objetivo de uma bomba de calor é manter a temperatura do interior de uma residência, ou outra construção, acima daquela do meio ambiente ou fornecer aquecimento para certos processos industriais que ocorrem a temperaturas elevadas.

Como os ciclos de refrigeração e bomba de calor têm objetivos diferentes, seus parâmetros de desempenho, chamados de *coeficientes de desempenho*, são definidos de forma diferente. Esses coeficientes de desempenho são considerados a seguir.

Ciclos de Refrigeração

O desempenho dos *ciclos de refrigeração* pode ser descrito como a razão entre a quantidade de energia recebida pelo sistema percorrendo o ciclo do corpo frio, Q_{entra}, e o trabalho líquido sobre o sistema para produzir esse efeito, W_{ciclo}. Assim, o ***coeficiente de desempenho***, β, é

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{W_{ciclo}} \quad \text{(ciclo de refrigeração)} \tag{2.45}$$

coeficiente de eficácia: refrigeração

Introduzindo a Eq. 2.44, uma expressão alternativa para β é obtida

$$\beta = \frac{Q_{entra}}{Q_{sai} - Q_{entra}} \quad \text{(ciclo de refrigeração)} \tag{2.46}$$

Para um refrigerador doméstico, Q_{sai} é descarregado para o ambiente no qual o refrigerador está localizado. W_{ciclo} é normalmente fornecido sob a forma de eletricidade para alimentar o motor que aciona o refrigerador.

➥ **POR EXEMPLO...** em um refrigerador o compartimento interno age como o corpo frio, e o ar ambiente em torno do refrigerador como o corpo quente. A energia Q_{entra} passa *dos* alimentos e demais itens do compartimento interno para o fluido de refrigeração circulante. Para essa transferência de calor ocorrer a temperatura do refrigerante está necessariamente abaixo daquela do conteúdo do refrigerador. A energia Q_{sai} passa *do* fluido de refrigeração para o ar ambiente. Para essa transferência de calor ocorrer a temperatura do fluido de refrigeração circulante deve necessariamente estar acima daquela do ar ambiente. Para se obter esses efeitos é necessário o *fornecimento* de trabalho. Para um refrigerador, W_{ciclo} é fornecido sob a forma de eletricidade. ⬅

Ciclos de Bomba de Calor

O desempenho das *bombas de calor* pode ser descrito como a razão entre a quantidade de energia descarregada pelo sistema que percorre o ciclo para o corpo quente, Q_{sai}, e o trabalho líquido sobre o sistema para produzir esse efeito, W_{ciclo}. Assim, o ***coeficiente de desempenho***, γ, é

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{W_{ciclo}} \quad \text{(ciclo de bomba de calor)} \tag{2.47}$$

coeficiente de eficácia: bomba de calor

Introduzindo a Eq. 2.44, obtém-se uma expressão alternativa para esse coeficiente de desempenho:

$$\gamma = \frac{Q_{sai}}{Q_{sai} - Q_{entra}} \quad \text{(ciclo de bomba de calor)} \tag{2.48}$$

Dessa equação pode-se perceber que o valor de γ nunca é inferior à unidade. Para bombas de calor residenciais a quantidade de energia Q_{entra} é normalmente retirada da atmosfera circundante, do solo ou de um corpo d'água próximo. O trabalho, representado por W_{ciclo}, é normalmente fornecido por meio de eletricidade.

Os coeficientes de desempenho β e γ são definidos como as razões entre a transferência de calor desejada e o custo em termos de trabalho para se obter esse efeito. Baseado nas definições, é desejável termodinamicamente que esses coeficientes possuam os maiores valores possíveis. Entretanto, conforme foi discutido no Cap. 5, os coeficientes de desempenho devem satisfazer restrições impostas pela segunda lei da termodinâmica.

Resumo do Capítulo e Guia de Estudo

Neste capítulo, consideramos o conceito de energia sob uma perspectiva de engenharia e introduzimos balanços de energia para aplicar o princípio da conservação de energia a sistemas fechados. Uma idéia básica é que a energia pode ser armazenada nos sistemas sob três formas macroscópicas: energia interna, energia cinética e energia potencial gravitacional. A energia também pode ser transferida para os sistemas e dos sistemas.

A energia pode ser transferida de e para os sistemas fechados por meio de duas formas apenas: trabalho e transferência de calor. O trabalho e a transferência de calor são identificados na fronteira do sistema, e não são propriedades. Em mecânica o trabalho é a transferência de energia associada a forças macroscópicas e deslocamentos na fronteira do sistema. A definição termodinâmica de trabalho introduzida neste capítulo amplia a noção de trabalho da mecânica, de forma a incluir outros tipos de trabalho. A transferência de energia por calor, para ou de um sistema, é devida à diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança, e ocorre no sentido decrescente da temperatura. Os modos de transferência de calor incluem condução, radiação e convecção. As seguintes convenções de sinais são usadas para o trabalho e a transferência de calor:

- ☑ $W, \dot{W}$ $\begin{cases} > 0: \text{trabalho realizado pelo sistema} \\ < 0: \text{trabalho realizado sobre o sistema} \end{cases}$
- ☑ $Q, \dot{Q}$ $\begin{cases} > 0: \text{transferência de calor para o sistema} \\ < 0: \text{transferência de calor do sistema} \end{cases}$

A energia é uma propriedade extensiva de um sistema. Apenas variações na energia de um sistema possuem significado. As variações de energia são contabilizadas por meio do balanço de energia. O balanço de energia para um processo em um sistema fechado é dado pela Eq. 2.35, e uma forma análoga em termos de taxa de tempo é dada pela Eq. 2.37. A Eq. 2.40 é uma forma especial do balanço de energia para um sistema que descreve um ciclo termodinâmico.

Os itens a seguir fornecem um guia de estudo para este capítulo. Ao término do estudo do texto e dos exercícios dispostos no final do capítulo você estará apto a

- ☑ descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subseqüentes.
- ☑ calcular essas quantidades de energia
  - variações da energia cinética e potencial, utilizando as Eqs. 2.5 e 2.10, respectivamente
  - trabalho e potência, utilizando as Eqs. 2.12 e 2.13, respectivamente
  - trabalho de expansão ou compressão, utilizando a Eq. 2.17.
- ☑ aplicar balanços de energia a sistemas fechados em cada uma das formas alternativas, modelando apropriadamente o caso em estudo, observando corretamente as convenções de sinais para trabalho e transferência de calor e aplicando cuidadosamente as unidades do SI e do sistema inglês.
- ☑ conduzir análises de energia para sistemas percorrendo ciclos termodinâmicos utilizando a Eq. 2.40 e avaliar, conforme o caso, as eficiências térmicas dos ciclos de potência e os coeficientes de desempenho dos ciclos de refrigeração e bomba de calor.

Conceitos Fundamentais na Engenharia

energia cinética — ***energia interna*** — ***balanço de energia*** — ***ciclo de refrigeração***
energia potencial — ***transferência de calor*** — ***ciclo termodinâmico*** — ***ciclo de bomba de calor***
trabalho — ***primeira lei da termodinâmica*** — ***ciclo de potência***
potência

Equações Principais

$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP$	(2.27)	Variação da energia total de um sistema.
$\Delta EC = EC_2 - EC_1 = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)$	(2.5)	Variação da energia cinética de uma massa m.
$\Delta EP = EP_2 - EP_1 = mg(z_2 - z_1)$	(2.10)	Variação da energia potencial gravitacional de uma massa m sujeita a g constante.
$E_2 - E_1 = Q - W$	(2.35a)	Balanço de energia para sistemas fechados.
$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$	(2.37)	Balanço da taxa de energia para sistemas fechados.
$W = \int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$	(2.12)	Trabalho em virtude da ação de uma força $\mathbf{F}$.
$\dot{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{V}$	(2.13)	Potência em virtude da ação de uma força $\mathbf{F}$.
$W = \int_{V_1}^{V_2} p\, dV$	(2.17)	Trabalho de expansão ou compressão relacionado à pressão do fluido. Ver Fig. 2.4.
Ciclos Termodinâmicos		
$W_{ciclo} = Q_{entra} - Q_{sai}$	(2.41)	Balanço de energia para um *ciclo de potência*. Como na Fig. 2.17*a*, todas as grandezas são registradas como positivas.
$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{entra}}$	(2.42)	Eficiência térmica de um ciclo de potência.
$W_{ciclo} = Q_{sai} - Q_{entra}$	(2.44)	Balanço de energia para um *ciclo de refrigeração* ou *bomba de calor*. Como na Fig. 2.17b, todas as grandezas são registradas como positivas.
$\beta = \frac{Q_{entra}}{W_{ciclo}}$	(2.45)	Coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração.
$\gamma = \frac{Q_{sai}}{W_{ciclo}}$	(2.47)	Coeficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor.

Exercícios: pontos de reflexão para os engenheiros

1. Quais as forças que atuam na bicicleta e no ciclista considerados na Seção 2.2.1? Esboce um diagrama de corpo livre.

2. Por que é incorreto dizer que um sistema *contém* calor?

3. Quais os exemplos de transferência de calor por condução, radiação e convecção que você encontra quando utiliza uma grelha a carvão?

4. Quando um meteoro em queda se choca com a Terra e atinge o repouso, o que acontece com suas energias cinética e potencial?

5. Após correr 5 milhas em uma esteira no seu campus, Ashley observa que o cinto de sua esteira está aquecido quando o toca. Por que o cinto está aquecido?

6. Quando ingredientes de cozinha são misturados em um liquidificador, o que acontece com a energia transferida para os ingredientes? A energia é transferida por trabalho, por calor ou por ambos?

7. Quando são irradiadas microondas sobre um tumor durante uma terapia para o câncer com o objetivo de aumentar a temperatura do tumor, essa interação é considerada trabalho e não transferência de calor. Por quê?

8. Há registros de que motores moleculares experimentais exibem movimento na absorção de luz, alcançando assim uma conversão da radiação eletromagnética em movimento. A luz incidente deve ser considerada trabalho ou transferência de calor?

9. Por que os símbolos ΔU, ΔEC e ΔEP são usados para indicar a variação de energia durante um processo, mas o trabalho e a transferência de calor para o processo são representados simplesmente por W e Q, respectivamente?

10. Se a variação de energia de um sistema fechado for conhecida para um processo entre os estados inicial e final, você pode determinar se a variação de energia ocorreu em virtude do trabalho, da transferência de calor ou de alguma combinação de ambos?

11. Em relação à Fig. 2.8, que processo, A ou B, possui a maior transferência de calor?

12. Que forma o balanço de energia toma para um sistema *isolado*?

13. Como você definiria uma *eficiência* adequada para o motor do Exemplo 2.6?

14. Quantas toneladas de CO_2 são produzidas anualmente por um automóvel convencional?

Problemas: desenvolvendo habilidades para a engenharia

Explorando Conceitos sobre Energia

2.1 Uma bola de beisebol tem uma massa de 0,3 lb (0,14 kg). Qual é a energia cinética em relação à base principal (*home plate*) de uma bola a 94 milhas por hora (42,0 m/s), em Btu?

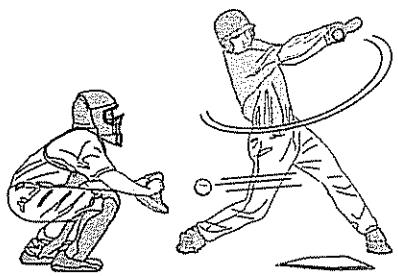


Fig. P2.1

2.2 Um objeto cuja massa é 400 kg está localizado a uma altura de 25 m acima da superfície da Terra. Para $g = 9{,}78$ m/s², determine a energia potencial gravitacional do objeto, em kJ, em relação à superfície da Terra.

2.3 Um objeto cujo peso é 100 lbf (444,8 N) experimenta um decréscimo na energia cinética de 500 ft · lbf (677,9 N · m) e um aumento na energia potencial de 1500 ft · lbf (2033,7 N · m). A velocidade inicial e a altura do objeto, ambas em relação à superfície da Terra, são 40 ft/s (12,2 m/s) e 30 ft (9,1 m), respectivamente. Considerando que $g = 32{,}2$ ft/s² (9,8 m/s²), determine

(a) a velocidade final, em ft/s
(b) a altura final, em ft

2.4 Um tijolo de 2,5 × 3,5 × 6 in (0,06 × 0,09 × 0,15 m), cuja massa específica é 120 lb/ft³ (1922,2 kg/m³) escorrega do topo de um edifício em construção e cai 69 ft (21,0 m). Para $g = 32{,}0$ ft/s² (9,7 m/s²), determine a variação na energia potencial gravitacional do tijolo, em ft · lbf.

2.5 Qual é a variação global de energia potencial, em ft · lbf e Btu, para um automóvel pesando 2500 lbf (11,1 kN) relativa a um passeio de San Diego, CA, até Santa Fe, NM? Suponha a aceleração da gravidade constante.

2.6 Um objeto cuja massa é de 1000 kg, inicialmente possuindo uma velocidade de 100 m/s, desacelera até uma velocidade final de 20 m/s. Qual é a variação de energia cinética do objeto, em kJ?

2.7 Um avião turbo-hélice de 30 lugares, cuja massa é de 14.000 kg, decola de um aeroporto e eventualmente alcança sua velocidade de cruzeiro de 620 km/h e uma altitude de 10.000 m. Para $g = 9{,}78$ m/s², determine a variação na energia cinética e a variação na energia potencial do avião, ambas em kJ.

2.8 Um objeto cuja massa é de 1 lb (0,45 kg) possui uma velocidade de 100 ft/s (30,5 m/s). Determine

(a) a velocidade final, em ft/s, se a energia cinética do objeto diminuir de 100 ft · lbf (135,6 N · m)
(b) a variação de altura, em ft, associada a uma variação de energia potencial de 100 ft · lbf (135,6 N · m). Considere $g = 32{,}0$ ft/s² (9,7 m/s²).

2.9 Um objeto cuja massa é de 2 kg é acelerado de uma velocidade de 200 m/s até uma velocidade final de 500 m/s pela ação de uma força resultante **F**. Determine o trabalho realizado pela força resultante, em kJ, se não houver outras interações entre o objeto e sua vizinhança.

2.10 Um objeto cuja massa é de 300 lb (136,1 kg) sofre uma variação em suas energias cinética e potencial em virtude da ação de uma força resultante **R**. O trabalho realizado pela força resultante sobre o objeto é 140 Btu (147,7 kJ). Não existe nenhuma outra interação entre o objeto e sua vizinhança. Se a altura do objeto aumenta de 100 ft (30,5 m) e sua velocidade final é 200 ft/s (61,0 m/s), qual é a sua velocidade inicial em ft/s?

2.11 Um volante em forma de disco, de massa específica uniforme ρ, raio externo R e espessura w, gira com uma velocidade angular ω, em rad/s.

(a) Mostre que o momento de inércia, $I = \int_{vol} \rho r^2 \, dV$, pode ser expresso como $I = \pi \rho w R^4/2$, e a energia cinética pode ser expressa como $EC = I\omega^2/2$.
(b) Para um volante de aço girando a 3000 rpm, determine a energia cinética, em N · m, e a massa, em kg, se $R = 0{,}38$ m e $w = 0{,}025$ m.
(c) Determine o raio, em m, e a massa, em kg, de um volante de alumínio que possui a mesma largura, velocidade angular e energia cinética do item (b).

2.12 Usando a relação $EC = I\omega^2/2$ do Problema 2.11(a), determine a velocidade com que um volante cujo momento de inércia é 200 lb · ft² (8,4 kg · m²) deveria girar, em rpm, para armazenar uma quantidade de energia cinética equivalente à energia potencial de uma massa de 100 lb (45,4 m) elevada de uma altura de 30 ft (9,1 m) acima da superfície da Terra. Faça $g = 32{,}2$ ft/s² (9,8 m/s²).

2.13 Dois objetos com massas diferentes caem livremente sob a ação da gravidade a partir do repouso e da mesma altura inicial. Desprezando o efeito da resistência do ar, mostre que as magnitudes das velocidades dos objetos são iguais no momento imediatamente antes de atingirem a superfície da Terra.

2.14 Um objeto cuja massa é de 50 lb (22,7 kg) é projetado para cima a partir da superfície da Terra com velocidade inicial de 200 ft/s (61,0 m/s) A única força que atua sobre o objeto é a força da gravidade Faça um gráfico da velocidade do objeto *versus* a altura Determine a altura do objeto. em ft, quando sua velocidade alcançar o valor zero A aceleração da gravidade é $g = 31.5$ ft/s² (9,6 m/s²)

2.15 Um bloco com 10 kg de massa se move ao longo de uma superfície inclinada de 30° em relação à horizontal O centro de gravidade do bloco é elevado a 3,0 m de altura, e a energia cinética do bloco *diminui* de 50 J Agem sobre o bloco uma força **R** constante, paralela à inclinação, e a força de gravidade Admita as superfícies sem atrito e $g = 9,81$ m/s² Determine a magnitude e a direção da força constante **R**, em N

2.16 Partindo do repouso, um objeto com 20 kg de massa desliza para baixo em uma rampa de 10 m de comprimento A rampa está inclinada de um ângulo de 40° a partir da horizontal Se a resistência do ar e o atrito entre o objeto e a rampa forem desprezíveis, determine a velocidade do objeto, em m/s, ao final da rampa Considere $g = 9,81$ m/s²

2.17 Jack, que pesa 150 lbf (667,2 N), corre 5 milhas em 43 minutos em uma esteira inclinada de 1 grau O visor da esteira mostra que ele *queimou* 620 kcal (2595,8 kJ). Para Jack consumir o mesmo número de calorias, quantas taças de sorvete de baunilha ele pode tomar após o seu treinamento?

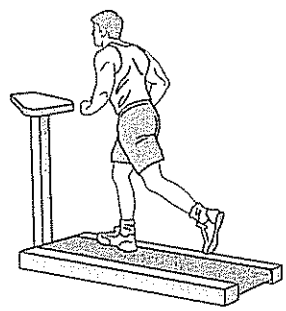


Fig. P2.17

Avaliando Trabalho

2.18 Um sistema com 5 kg de massa, inicialmente movendo-se horizontalmente com uma velocidade de 40 m/s, experimenta uma *desaceleração* horizontal constante de 2 m/s² devido à ação de uma força resultante Como conseqüência, o sistema atinge o repouso. Determine por quanto tempo. em s, a força é aplicada e a quantidade de energia transferida por trabalho, em kJ

2.19 Um objeto com 80 lb (36,3 kg) de massa, inicialmente em repouso, experimenta uma aceleração horizontal constante de 12 ft/s² (3,7 m/s²) devido à ação de uma força resultante aplicada por 6,5 s. Determine o trabalho da força resultante em ft · lbf e em Btu

2.20 A força de arrasto, F_d, imposta pelo ar ao redor de um veículo que se move com velocidade V. é dada por

$$F_d = C_d A \tfrac{1}{2} \rho V^2$$

na qual C_d é uma constante chamada de coeficiente de arrasto, A é a área frontal projetada do veículo e ρ é a massa específica do ar Determine a potência, em kW, necessária para vencer o arrasto aerodinâmico para um caminhão movendo-se a 110 km/h, se $C_d = 0,65$, A = 10 m² e $\rho = 1,1$ kg/m³.

2.21 Uma força importante que se opõe ao movimento de um veículo é a resistência dos pneus ao rolamento, F_r, dada por

$$F_r = f W$$

onde f é uma constante chamada de coeficiente de resistência ao rolamento e W é o peso do veículo Determine a potência, em kW, necessária para vencer a resistência ao rolamento para um caminhão que pesa 322,5 kN que está se movendo a 110 km/h Considere $f = 0,0069$

2.22 As duas forças mais importantes que se opõem ao movimento de um veículo em uma estrada plana são a resistência dos pneus ao rolamento, F_r, e a força de arrasto aerodinâmico do ar escoando ao redor do veículo, F_d, dadas, respectivamente, por

$$F_r = f W, \qquad F_d = C_d A \tfrac{1}{2} \rho V^2$$

sendo f e C_d constantes conhecidas como coeficiente de resistência ao rolamento e coeficiente de arrasto, respectivamente. W e A são o peso do veículo e a área frontal projetada, respectivamente. V é a velocidade do veículo e ρ é a massa específica do ar Para um carro de passeio com $W = 3550$ lbf (15,8 kN), A = 23.3 ft² (2,2 m²) e $C_d = 0,34$. e quando $f = 0,02$ e $\rho = 0.08$ lb/ft³ (1,3 kg/m³)

(a) determine a potência necessária, em HP. para vencer a resistência ao rolamento e o arrasto aerodinâmico quando V é 55 mi/h (24,6 m/s)

(b) faça um gráfico da velocidade do veículo entre 0 e 75 mi/h (33,5 m/s) *versus* (i) a potência para vencer a resistência ao rolamento, (ii) a potência para vencer o arrasto aerodinâmico e (iii) a potência total, todas em HP.

Quais as implicações para a economia de combustível do veículo que podem ser deduzidas dos resultados do item (b)?

2.23 A tabela a seguir fornece dados medidos para a pressão *versus* o volume durante a compressão de um refrigerante no cilindro de um compressor em um sistema de refrigeração Utilizando os dados da tabela. complete o seguinte:

(a) Determine um valor de n tal que os dados sejam ajustados para uma equação do tipo $pV^n = constante$

(b) Calcule analiticamente o trabalho realizado sobre o refrigerante. em Btu, utilizando a Eq 2 17 em conjunto com o resultado do item (a).

(c) Utilizando integração gráfica ou numérica dos dados, calcule o trabalho realizado sobre o refrigerante, em Btu

(d) Compare os diferentes métodos para a estimativa do trabalho utilizados nos itens (b) e (c) Por que são estimativas?

Ponto	p (lbf/in²)	V (in³)
1	112	13.0
2	131	11,0
3	157	9,0
4	197	7,0
5	270	5,0
6	424	3.0

2.24 A tabela a seguir fornece dados medidos para a pressão *versus* o volume durante a expansão dos gases no cilindro de um motor de combustão interna Utilizando os dados da tabela, faça o seguinte:

(a) Determine um valor de n tal que os dados sejam ajustados para uma equação do tipo $pV^n = constante$

(b) Calcule analiticamente o trabalho realizado pelos gases, em kJ. utilizando a Eq 2 17 em conjunto com o resultado do item (a)

(c) Utilizando integração gráfica ou numérica dos dados, calcule o trabalho realizado pelos gases, em kJ.

(d) Compare os diferentes métodos para a estimativa do trabalho utilizados nos itens (b) e (c). Por que são estimativas?

Ponto	p (bar)	V (cm³)
1	15	300
2	12	361
3	9	459
4	6	644
5	4	903
6	2	1608

2.25 Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão. com 0,250 kg de massa, passa por um processo à pressão constante de 5 bar, iniciando em $v_1 = 0,20$ m³/kg Para o gás considerado como sistema, o trabalho é −15 kJ Determine o volume final do gás em m³

2.26 O gás dióxido de carbono (CO_2) em um conjunto cilindro-pistão passa por uma expansão, partindo de um estado onde $p_1 = 20$ lbf/in² (137.9 kPa), $V_1 = 0,5$ ft³ (0,01 m³), até um estado onde $p_2 = 5$ lbf/in² (34,5 kPa), $V_2 = 2,5$ ft³ (0,07 m³) A relação entre a pressão e o volume durante o processo é $p = A + BV$, na qual A e B são constantes (a) Para o CO_2, determine o trabalho, em ft · lbf e Btu (b) Calcule A, em lbf/in², e B, em (lbf/in²)/ft³.

2.27 Um gás é comprimido de $V_1 = 0{,}3\ m^3$, $p_1 = 1$ bar até $V_2 = 0{,}1\ m^3$, $p_2 = 3$ bar. A pressão e o volume possuem uma relação linear durante o processo. Calcule o trabalho para o gás, em kJ.

2.28 O gás nitrogênio (N_2) em um conjunto cilindro-pistão sofre uma compressão de $p_1 = 0{,}2$ MPa, $V_1 = 2{,}75\ m^3$, até um estado onde $p_2 = 2$ MPa. A relação entre a pressão e o volume durante o processo é $pV^{1,35} = constante$. Para o N_2, determine (a) o volume no estado 2, em m^3, e (b) o trabalho, em kJ.

2.29 O gás oxigênio (O_2) em um conjunto cilindro-pistão passa por uma expansão, indo de um volume $V_1 = 0{,}01\ m^3$ até um volume $V_2 = 0{,}03\ m^3$. A relação entre a pressão e o volume durante o processo é $p = AV^{-1} + B$, onde $A = 0{,}06$ bar $\cdot\ m^3$ e $B = 3{,}0$ bar. Para o O_2, determine (a) as pressões inicial e final, ambas em bar, e (b) o trabalho, em kJ.

2.30 Um sistema fechado que consiste em 0,2 lbmol de ar passa por um processo politrópico de $p_1 = 20\ lbf/in^2$ (137,9 kPa) e $v_1 = 11{,}50\ ft^3/lb$ (0,72 m^3/kg) até um estado final em que $p_2 = 80\ lbf/in^2$ (551,6 kPa), $v_2 = 3{,}98\ ft^3/lb$ (0,25 m^3/kg). Determine a quantidade de energia transferida por meio de trabalho, em Btu, para o processo.

2.31 Um conjunto cilindro-pistão orientado horizontalmente contém ar aquecido, conforme ilustrado na Fig. P2.31. O ar se resfria lentamente, de um volume inicial de $0{,}003\ m^3$ até um volume final de $0{,}002\ m^3$. Durante esse processo, a mola exerce uma força que varia linearmente de um valor inicial de 900 N até um valor final zero. A pressão atmosférica é 100 kPa, e a área da face do pistão é $0{,}018\ m^2$. O atrito entre o pistão e a parede do cilindro pode ser desprezado. Para o ar, determine as pressões inicial e final, em kPa, e o trabalho, em kJ.

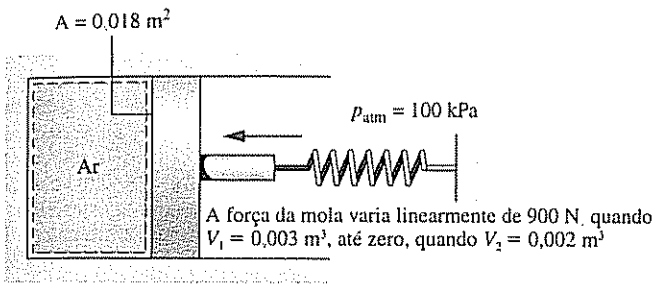


Fig. P2.31

2.32 Ar contido em um conjunto cilindro-pistão é lentamente aquecido. Conforme ilustrado na Fig. P2.32, durante esse processo a pressão primeiro varia linearmente com o volume e, então, permanece constante. Determine o trabalho total, em kJ.

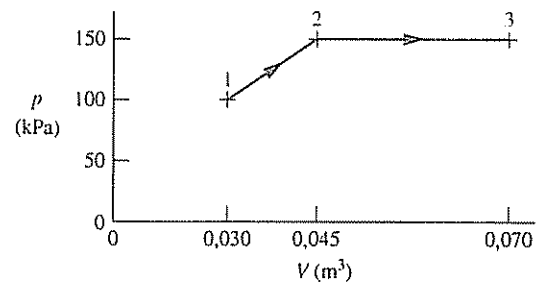


Fig. P2.32

2.33 O gás monóxido de carbono (CO) contido em um conjunto cilindro-pistão passa por três processos em série:

Processo 1-2: expansão de $p_1 = 5$ bar, $V_1 = 0{,}2\ m^3$ até $V_2 = 1\ m^3$, durante a qual a relação pressão-volume é $pV = constante$.

Processo 2-3: aquecimento a volume constante do estado 2 até o estado 3, onde $p_3 = 5$ bar.

Processo 3-1: compressão a pressão constante até o estado inicial.

Esboce os processos em série num diagrama p-V e determine o trabalho para cada processo, em kJ.

2.34 Ar contido em um conjunto cilindro-pistão passa por três processos em série:

Processo 1-2: compressão a pressão constante de $p_1 = 10\ lbf/in^2$ (68,9 kPa), $V_1 = 4{,}0\ ft^3$ (0,11 m^3) até o estado 2.

Processo 2-3: aquecimento a volume constante até o estado 3, onde $p_3 = 50\ lbf/in^2$ (344,7 kPa).

Processo 3-1: expansão até o estado inicial, durante a qual a relação pressão-volume é $pV = constante$.

Esboce os processos em série num diagrama p-V. Determine (a) o volume no estado 2, em ft^3, e (b) o trabalho para cada processo, em Btu.

2.35 A lixadeira de cinta ilustrada na Fig. P2.35 tem uma velocidade de correia de 1500 ft/min (7,6 m/s). O coeficiente de atrito entre a lixadeira e uma superfície de madeira compensada que está sendo terminada é 0,2. Se a força (normal) dirigida para baixo sobre a lixadeira é de 15 lbf (66,7 N), determine (a) a potência transmitida pela cinta, em Btu/s e em HP, e (b) o trabalho realizado em um minuto de operação, em Btu.

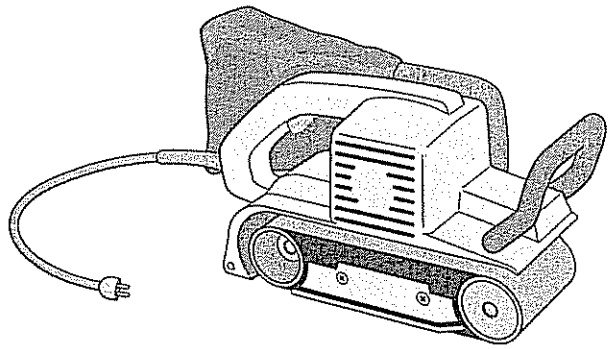


Fig. P2.35

2.36 O eixo do ventilador do sistema de exaustão de um edifício é acionado a 300 rpm por uma correia que passa por uma polia de 0,3 m de diâmetro. A força líquida aplicada na polia pela correia é de 2000 N. Determine o torque aplicado na polia pela correia, em N · m, e a potência transmitida, em kW.

2.37 Uma bateria de 10 V fornece uma corrente constante de 0,5 A para uma resistência por 30 min. (a) Determine a resistência, em ohms. (b) Para a bateria, determine a quantidade de energia transferida por trabalho, em kJ.

2.38 Uma bateria automotiva de 12 V é carregada com uma corrente constante de 2 A por 24 h. Considerando que a eletricidade custa \$0,08 por kW · h, determine o custo de recarregar a bateria.

2.39 Um fio de aço suspenso verticalmente, conforme ilustrado na Fig. P2.39, possui uma área A de seção transversal e um comprimento inicial x_0. Uma força F para baixo, aplicada à extremidade do fio faz com que este se estique. A tensão normal no fio varia linearmente de acordo com $\sigma = C\varepsilon$, onde ε é a *deformação*, dada por $\varepsilon = (x - x_0)/x_0$, onde x é o comprimento do fio esticado. C é uma constante do material (módulo de Young). Admitindo que a área da seção transversal permanece constante:

(a) obtenha uma expressão para o trabalho realizado sobre o fio.

(b) calcule o trabalho realizado sobre o fio, em ft · lbf, e a magnitude da força dirigida para baixo, em lbf, se $x_0 = 10$ ft (3,0 m), x = 10,01 ft (3,0 m), A = 0,1 in^2 ($6{,}5 \times 10^{-5}\ m^2$), e $C = 2{,}5 \times 10^7\ lbf/in^2$ ($1{,}7 \times 10^{11}$ Pa).

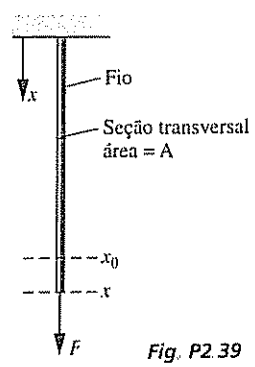


Fig. P2.39

2.40 Uma película de sabão é suspensa em uma armação de arame, conforme a Fig 2.10. O arame corrediço é deslocado por meio de uma força aplicada F. Considerando que a tensão superficial permanece constante

(a) obtenha uma expressão para o trabalho realizado ao esticar a película, em termos da tensão superficial τ, do comprimento ℓ, e do deslocamento Δx

(b) determine o trabalho realizado, em J, se $\ell = 5$ cm, $\Delta x = 0.5$ cm e $\tau = 25 \times 10^{-5}$ N/cm

2.41 Uma mola, com um comprimento inicial de ℓ_0 quando indeformada, é esticada por uma força F aplicada em sua extremidade, conforme está ilustrado na Fig. P2.41. O comprimento da mola quando esticada é dado por ℓ. Pela *lei de Hooke*, a força está linearmente relacionada à extensão da mola por $F = k(\ell - \ell_0)$, onde k é a *rigidez* da mola. Considerando que a rigidez é constante,

(a) obtenha uma expressão para o trabalho realizado ao variar o comprimento da mola de ℓ_1 para ℓ_2

(b) calcule o trabalho realizado, em J, se $\ell_0 = 3$ cm, $\ell_1 = 6$ cm, $\ell_2 = 10$ cm, e a rigidez é $k = 10^4$ N/m

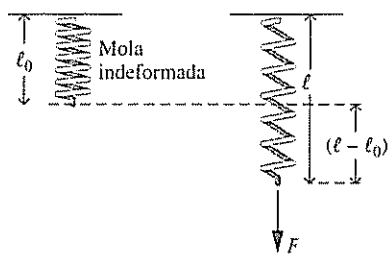


Fig. P2.41

Avaliando a Transferência de Calor

2.42 Uma superfície plana com 2 m² de área e uma temperatura de 350 K é resfriada convectivamente por um gás a 300 K. Utilizando os dados da Tabela 2.1, determine a maior e a menor taxa de transferência de calor, em kW, que poderiam ser encontradas para (a) a convecção livre, (b) a convecção forçada.

2.43 Uma parede plana de 0,2 m de espessura é construída de concreto. Em regime permanente, a taxa de transferência de energia por condução através de 1 m² de área da parede é 0.15 kW. Se a distribuição de temperatura através da parede for linear, qual é a diferença de temperatura entre os lados da parede, em K?

2.44 Conforme mostrado na Fig. P2.44, a parede externa de um edifício tem 6 in (0,1 m) de espessura e possui uma condutividade térmica média de 0,32 Btu/h · ft · °R (0.55 W/m · K). Em regime permanente, a temperatura da parede diminui linearmente de $T_1 = 70$°F (21,1°C) na superfície interna para T_2 na superfície externa. A temperatura externa relativa ao ar ambiente é $T_0 = 25$°F (−3,9°C) e o coeficiente de transferência de calor por convecção é 5,1 Btu/h · ft² · °R (29,0 W/m² · K). Determine (a) a temperatura T_2, em °F, e (b) a taxa de transferência de calor através da parede, em Btu/h por ft² de área de superfície.

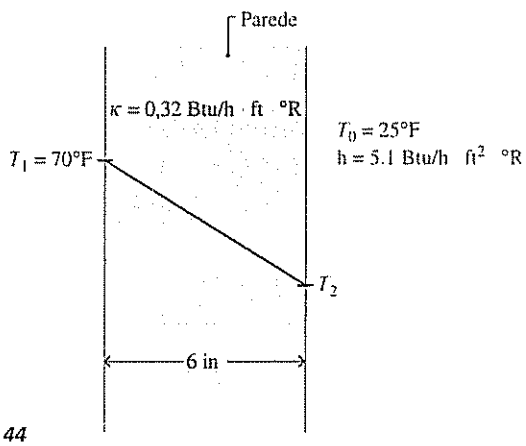


Fig. P2.44

2.45 Conforme ilustrado na Fig. P2.45, a parede de um forno é composta por uma camada de aço de 0,25 in (0,006 m) de espessura, sendo κ_s = 8.7 Btu/h · ft · °R (15,1 W/m · K) e uma camada de tijolos, sendo κ_t = 0,42 Btu/h · ft · °R (0,73 W/m · K). Em regime permanente ocorre um decréscimo de temperatura de 1,2°F (−17,1°C) na camada de aço. A temperatura interna relativa à superfície exposta da camada de aço é 540°F (282,2°C). Se a temperatura da superfície externa do tijolo não pode ser maior do que 105°F (40,6°C), determine a espessura mínima de tijolo, em in, que assegura que esse limite seja alcançado.

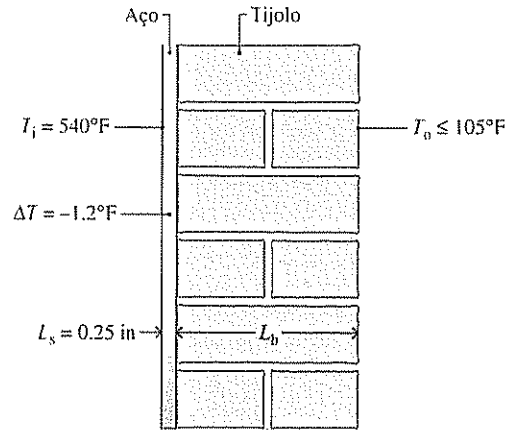


Fig. P2.45

2.46 Uma parede plana composta consiste em uma camada de tijolo de 9 in (0,23 m) de espessura, sendo κ_t = 1,4 Btu/h · ft · °R (2,4 W/m · K) e uma camada de isolante 4 in (0,10 m) de espessura, com κ_i = 0,05 Btu/h · ft · °R (0,09 W/m · K). As temperaturas das superfícies exteriores do tijolo e do isolante são 1260°R (426,8°C) e 560°R (38,0°C), respectivamente, e existe um contato perfeito na interface entre as duas camadas. Determine, em regime permanente, a taxa instantânea de transferência de calor, em Btu/h por ft² de área de superfície, e a temperatura, em °R, na interface entre o tijolo e o isolante.

2.47 Uma parede plana composta consiste em uma camada de isolante de 75 mm de espessura (κ_i = 0,05 W/m · K) e uma camada de tijolos de 25 mm de espessura (κ = 0.10 W/m · K). A temperatura interna relativa ao isolante é 20°C. A temperatura externa dos tijolos é −13°C. Determine, em regime permanente, (a) a temperatura na interface entre as duas camadas, em °C, e (b) a taxa de transferência de calor através da parede, em W por m² de área de superfície.

2.48 A estrutura de uma parede isolada de uma casa possui condutividade térmica média de 0,04 Btu/h · ft · °R (0,07 W/m · K). A espessura da parede é de 6 in (0,15 m). A temperatura do ar interno é 70°F (21,1°C), e o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar interno e a parede é 2 Btu/h · ft² · °R (11,4 W/m² · K). No lado externo, a temperatura do ar ambiente é 32°F (0°C) e o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a parede e o ar externo é 5 Btu/h · ft² · °R (28,4 W/m² · K). Determine a taxa de transferência de calor através da parede, em regime permanente, em Btu/h por ft² de área de superfície.

2.49 A Fig. P2.49 mostra uma superfície plana à temperatura T_s coberta por uma camada de isolante com condutividade térmica κ. A superfície do topo do isolamento está à temperatura T_i e exposta ao ar à temperatura T_0 ($< T_s$). O coeficiente de transferência de calor por convecção é h. A radiação pode ser desprezada.

(a) Mostre que, em regime permanente, a temperatura T_i é dada por

$$T_i = \frac{BT_0 + T_s}{B + 1}$$

onde $B = hL/\kappa$

(b) Para T_s e T_0 fixos, esboce o diagrama de T_i *versus* B. Comente.

(c) Para $T_s = 300$°C e $T_0 = 30$°C, determine o valor mínimo de B tal que T_i não seja maior do que 60°C. Se h = 4 W/m² · K e $L = 0{,}06$ m, que restrição este limite para B coloca com relação aos valores permitidos para a condutividade térmica? Repita para h = 20 W/m² · K.

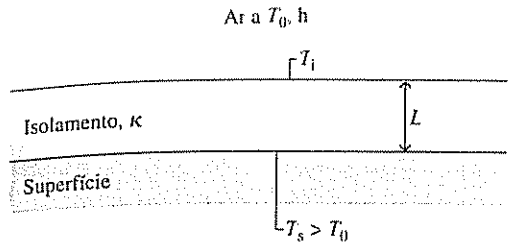


Fig. P2.49

2.50 Uma sonda interplanetária esférica, carregada eletronicamente, de 0,5 m de diâmetro, em regime permanente, transfere energia por radiação de sua superfície externa a uma taxa de 150 W. Se a sonda não recebe radiação do Sol ou do espaço, qual é a temperatura da superfície, em K?

2.51 Um corpo cuja área superficial é 0,5 m², emissividade é 0,8 e temperatura é 150°C é colocado em uma grande câmara de vácuo, cujas paredes estão a 25°C. Qual a taxa de radiação *emitida* pela superfície, em W? Qual a taxa *líquida* de radiação *trocada* entre a superfície e as paredes da câmara, em W?

2.52 A superfície externa da grelha com cobertura mostrada na Fig. P2.52 está a 47°C e sua emissividade corresponde a 0,93. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a grelha e a vizinhança é 10 W/m² · K. Determine a taxa líquida de transferência de calor entre a grelha e a vizinhança por convecção e radiação, em kW por m² de área de superfície.

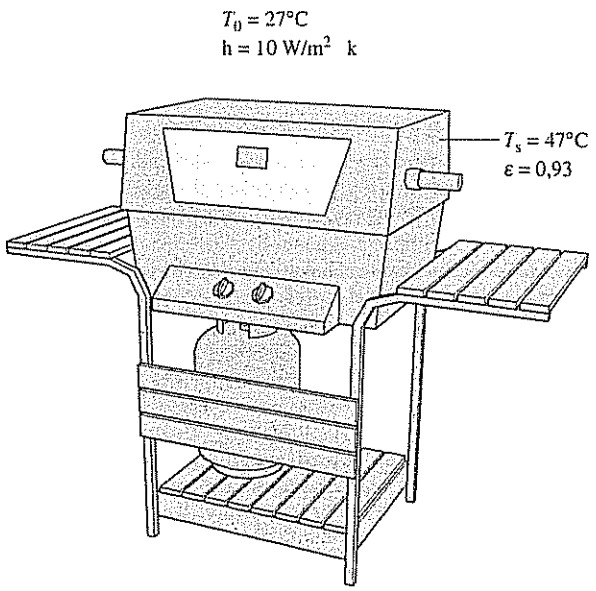


Fig. P2.52

Usando o Balanço de Energia

2.53 Cada linha na tabela a seguir fornece informações sobre um processo em um sistema fechado. Cada entrada possui as mesmas unidades de energia. Complete os espaços em branco na tabela.

Processo	Q	W	E_1	E_2	ΔE
a		−20		+50	+70
b	+50		+20	+50	
c		−60		+60	+20
d		−90		+50	0
e	+50	+150	+20		

2.54 Um cilindro vertical com 10 lb (4,5 kg) de massa passa por um processo durante o qual a velocidade diminui de 100 ft/s (30,5 m/s) para 50 ft/s (15,2 m/s), enquanto a altura permanece constante. A energia interna específica inicial da massa é 0,5 Btu/lb (1163,0 J/kg) e a energia interna específica final é 0,8 Btu/lb (1860,8 J/kg). Durante o processo, a massa recebe 2 Btu (2,1 kJ) de energia por transferência de calor através da superfície do fundo e perde 1 Btu (1,0 kJ) de energia por transferência de calor através da superfície de cima. Não há transferência de calor relativa à superfície lateral. Para esse processo, calcule (a) a variação na energia cinética da massa, em Btu, e (b) o trabalho, em Btu.

2.55 Uma massa de 10 kg passa por um processo durante o qual há transferência de calor da massa, a uma taxa de 5 kJ por kg, e um decréscimo de 50 m relativo à altura, e um aumento na velocidade de 15 m/s para 30 m/s. A energia interna específica diminui de 5 kJ/kg e a aceleração da gravidade é constante e vale $g = 9{,}7$ m/s². Determine o trabalho para o processo, em kJ.

2.56 Conforme ilustrado na Fig. P2.56, 5 kg de vapor contidos em um conjunto cilindro-pistão passam por uma expansão de um estado 1, onde a energia interna específica é $u_1 = 2709{,}9$ kJ/kg, até um estado 2, onde $u_2 = 2659{,}6$ kJ/kg. Durante o processo, há transferência de calor *para* o vapor com uma magnitude de 80 kJ. Também um agitador transfere energia *para* o vapor através de trabalho numa quantidade de 18,5 kJ. Não há variação significativa na energia cinética ou potencial do vapor. Determine a energia transferida por trabalho do vapor para o pistão durante o processo, em kJ.

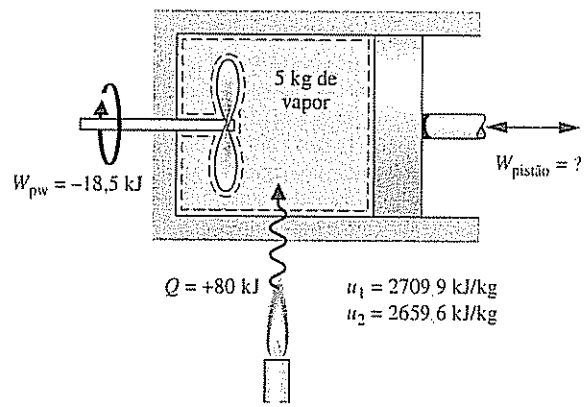


Fig. P2.56

2.57 Um gás contido num conjunto cilindro-pistão passa por dois processos, A e B, com os *mesmos estados extremos*, 1 e 2, onde $p_1 = 10$ bar, $V_1 = 0{,}1$ m³, $U_1 = 400$ kJ e $p_2 = 1$ bar, $V_2 = 1{,}0$ m³, $U_2 = 200$ kJ:

Processo A: processo de 1 até 2, durante o qual a relação pressão-volume é dada por $pV = constante$.

Processo B: processo a volume constante do estado 1 a uma pressão de 2 bar, seguido por um processo pressão-volume linear até o estado 2.

Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Para cada um dos processos, dados por A e B, (a) trace o diagrama p-V do processo, (b) calcule o trabalho, em kJ, e (c) calcule a transferência de calor, em kJ.

2.58 Um gerador elétrico acoplado a um catavento produz uma potência elétrica média de saída de 15 kW. A potência é usada para carregar uma bateria. A transferência de calor da bateria para a vizinhança ocorre a uma taxa constante de 1,8 kW. Para 8 horas de operação, determine a quantidade total de energia armazenada na bateria, em kJ.

2.59 Um motor elétrico consome uma corrente de 10 A com uma voltagem de 110 V. O eixo de saída desenvolve um torque de 10,2 N · m e uma velocidade rotacional de 1000 rpm. Para a operação em regime permanente, determine para o motor, em kW

(a) a potência elétrica requerida.
(b) a potência desenvolvida pelo eixo de saída
(c) a taxa de transferência de calor

2.60 Conforme ilustrado na Fig. P2.60, a superfície externa de um transistor é resfriada por um escoamento de ar induzido por um ventilador a uma temperatura de 25°C e uma pressão de 1 atm. A área da superfície externa do transistor é 5×10^{-4} m². Em regime permanente, a potência

elétrica do transistor é 3 W. Despreze a transferência de calor que ocorre através da base do transistor. O coeficiente de transferência de calor por convecção é 100 W/m² · K. Determine (a) a taxa de transferência de calor entre o transistor e o ar, em W, e (b) a temperatura da superfície externa do transistor, em °C.

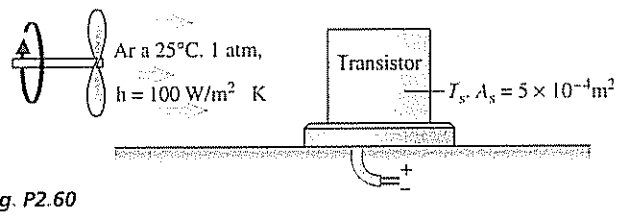


Fig. P2.60

2.61 Um kg de refrigerante 22, inicialmente a $p_1 = 0{,}9$ MPa e $u_1 = 232{,}92$ kJ/kg, está contido em um tanque rígido fechado. O tanque está equipado com um agitador que transfere energia *para* o refrigerante a uma taxa constante de 0,1 kW. A transferência de calor *do* refrigerante *para* sua vizinhança ocorre a uma taxa Kt, em kW, onde K é uma constante, em kW por minuto, e t o tempo, em minutos. Depois de 20 minutos sendo agitado, o refrigerante se encontra a $p_2 = 1{,}2$ MPa e $u_2 = 276{,}67$ kJ/kg. Não ocorrem variações globais nas energias cinética e potencial. (a) Para o refrigerante, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ. (b) Determine o valor da constante K que aparece na relação de transferência de calor conhecida, em kW/min.

2.62 Um gerador elétrico fornece eletricidade para uma bateria a uma taxa de 15 kW por um período de 12 horas. Durante esse período de 12 horas, há também transferência de calor da bateria para a vizinhança a uma taxa de 1,5 kW. Então, durante o próximo período de 12 horas, a bateria descarrega eletricidade para um carregamento externo a uma taxa de 5 kW, enquanto ocorre a transferência de calor da bateria para a vizinhança a uma taxa de 0,5 kW.

(a) Para o primeiro período de 12 h, determine, em kW, a taxa de tempo relativa à variação da energia armazenada na bateria.
(b) Para o segundo período de 12 h, determine, em kW, a taxa de tempo relativa à variação da energia armazenada na bateria.
(c) Para o período *inteiro* de 24 h, determine, em kJ, a variação *global* da energia armazenada na bateria.

2.63 Um gás se expande em um conjunto cilindro-pistão de $p_1 = 8$ bar, $V_1 = 0{,}02$ m³ até $p_2 = 2$ bar, em um processo durante o qual a relação entre a pressão e o volume é $pV^{1.2} = constante$. A massa do gás é 0,25 kg. Se a energia interna específica do gás *decrescer* de 55 kJ/kg durante o processo, determine a transferência de calor, em kJ. Os efeitos relativos às energias cinética e potencial são desprezíveis.

2.64 Dois quilogramas de ar estão contidos em um tanque rígido bem isolado, com volume de 0,6 m³. O tanque está equipado com um agitador que transfere energia para o ar a uma taxa constante de 10 W durante 1 h. Se não houver variação nas energias cinética e potencial, determine

(a) o volume específico no estado final, em m³/kg.
(b) a transferência de energia através de trabalho, em kJ.
(c) a variação da energia interna específica do ar, em kJ/kg.

2.65 Um tanque rígido fechado contém o gás hélio. Uma resistência elétrica no tanque transfere energia *para* o gás a uma taxa constante de 1 kW. A transferência de calor ocorre *do* gás para sua vizinhança a uma taxa de $5t$ watts, onde t é o tempo, em minutos. Trace a variação de energia do hélio, em kJ, para $t \geq 0$ e comente.

2.66 Vapor em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo politrópico, com $n = 2$, de um estado inicial onde $p_1 = 500$ lbf/in² (3,4 MPa), $v_1 = 1{,}701$ ft³/lb (0,11 m³/kg), $u_1 = 1363{,}3$ Btu/lb (3171 kJ/kg) até um estado final onde $u_2 = 990{,}58$ Btu/lb (2304,1 kJ/kg). Durante o processo, há uma transferência de calor do vapor de magnitude 342,9 Btu (361,8 kJ). A massa de vapor é 1,2 lb (0,54 kg). Desprezando as variações nas energias cinética e potencial, determine o trabalho, em Btu, e o volume específico final, em ft³/lb.

2.67 Um gás sofre um processo de um estado 1, onde $p_1 = 60$ lbf/in² (413,7 kPa), $v_1 = 6{,}0$ ft³/lb (0,37 m³/kg), até um estado 2, onde $p_2 = 20$ lbf/in² (137,9 kPa), de acordo com $pv^{1.3} = constante$. A relação entre a pressão, o volume específico e a energia interna é

$$u = (0{,}2651)pv - 95{,}436$$

sendo p em lbf/in², v em ft³/lb e u em Btu/lb. A massa do gás é de 10 lb. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a transferência de calor em Btu.

2.68 Ar é mantido em um conjunto cilindro-pistão vertical por um pistão com 50 kg de massa e uma área de face de 0,01 m². A massa de ar tem 5 g, e inicialmente ocupa um volume de 5 litros. A atmosfera exerce uma pressão de 100 kPa sobre o topo do pistão. O volume do ar diminui lentamente para 0,002 m³, conforme a energia interna específica do ar diminui de 260 kJ/kg. Desprezando o atrito entre o pistão e a parede do cilindro, determine a transferência de calor relativa ao ar, em kJ.

2.69 Gás CO_2 é mantido em um conjunto cilindro-pistão vertical por um pistão com 50 kg de massa e uma área de face de 0,01 m². A massa de CO_2 tem 4 g. O CO_2 inicialmente ocupa um volume de 0,005 m³ e apresenta uma energia interna específica de 675 kJ/kg. A atmosfera exerce uma pressão de 100 kPa sobre o topo do pistão. Uma transferência de calor de 1,95 kJ de magnitude ocorre lentamente do CO_2 para a vizinhança, e o volume do CO_2 diminui para 0,0025 m³. O atrito entre o pistão e a parede do cilindro pode ser desprezado. A aceleração local da gravidade é $g = 9{,}81$ m/s². Para o CO_2, determine (a) a pressão, em kPa, e (b) a energia interna específica final, em kJ/kg.

2.70 Um gás mantido em um conjunto cilindro-pistão vertical por um pistão pesando 1000 lbf (4,4 kN) de massa e com uma área de face de 12 in² (0,008 m²). A atmosfera exerce uma pressão de 14,7 lbf/in² (101,3 kPa) sobre o topo do pistão. Uma resistência elétrica transfere energia para o gás numa quantidade de 5 Btu (5,3 kJ), à medida que a altura do pistão aumenta de 2 ft (0,61 m). O pistão e o cilindro são maus condutores térmicos, e o atrito pode ser desprezado. Determine a variação na energia interna do gás, em Btu, admitindo que essa é a única variação de energia interna significativa para qualquer componente presente.

Analisando Ciclos Termodinâmicos

2.71 A seguinte tabela fornece dados, em Btu, para um sistema que percorre um ciclo termodinâmico composto por quatro processos em série. Determine

(a) os dados que faltam na tabela, todos em Btu.
(b) se o ciclo é de potência ou de refrigeração.

Processo	ΔU	ΔEC	ΔEP	ΔE	Q	W
1–2	72	−5	−6		0	
2–3	64	0			90	
3–4	−97		0			92
4–1		0	3			0

2.72 A seguinte tabela fornece dados, em Btu, para um sistema que percorre um ciclo termodinâmico composto por quatro processos em série. Determine (a) os dados que faltam na tabela, todos em Btu, e (b) a eficiência térmica.

Processo	ΔU	ΔEC	ΔEP	ΔE	Q	W
1–2	950	50	0		1000	
2–3		0	50	−450		450
3–4	−650		0	−600		0
4–1	200	−100	−50		0	

2.73 A Fig. P2.73 mostra um ciclo de potência efetuado por um gás em um conjunto cilindro-pistão. Para o processo 1-2, $U_2 - U_1 = 15$ kJ. Para o processo 3-1, $Q_{31} = 10$ kJ. Não há variações na energia cinética ou potencial. Determine (a) o trabalho para cada processo, em kJ, (b) a transferência de calor para os processos 1-2 e 2-3, ambos em kJ, e (c) a eficiência térmica.

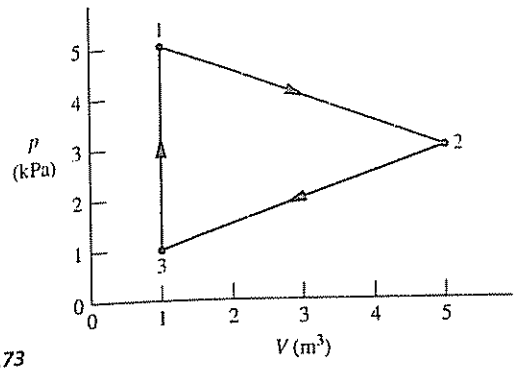


Fig. P2.73

2.74 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos em série, iniciando no estado 1, onde $p_1 = 1$ bar, $V_1 = 1{,}5$ m³, como a seguir:

Processo 1-2: compressão com $pV = constante$, $W_{12} = -104$ kJ, $U_1 = 512$ kJ, $U_2 = 690$ kJ.

Processo 2-3: $W_{23} = 0$, $Q_{23} = -150$ kJ

Processo 3-1: $W_{31} = +50$ kJ

Não há variações na energia cinética ou potencial.

(a) Determine Q_{12}, Q_{31}, e U_3, todos em kJ. (b) Esse ciclo pode ser de potência? Explique.

2.75 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos:

Processo 1-2: compressão com $pV = constante$, de $p_1 = 1$ bar, $V_1 = 1{,}6$ m³ até $V_2 = 0{,}2$ m³, $U_2 - U_1 = 0$.

Processo 2-3: pressão constante até $V_3 = V_1$

Processo 3-1: volume constante, $U_1 - U_3 = -3549$ kJ.

Não há variações significativas na energia cinética ou potencial. Determine a transferência de calor e o trabalho para o processo 2-3, em kJ. Esse é um ciclo de potência ou de refrigeração?

2.76 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos:

Processo 1-2: volume constante, $V = 0{,}028$ m³, $U_2 - U_1 = 26{,}4$ kJ

Processo 2-3: expansão com $pV = constante$, $U_3 = U_2$

Processo 3-1: pressão constante, $p = 1{,}4$ bar, $W_{31} = -10{,}5$ kJ

Não há variações significativas na energia cinética ou potencial.

(a) Esboce o ciclo em um diagrama p-V.
(b) Calcule o trabalho líquido para o ciclo, em kJ.
(c) Calcule a transferência de calor para o processo 2-3, em kJ.
(d) Calcule a transferência de calor para o processo 3-1, em kJ.

Este é um ciclo de potência ou de refrigeração?

2.77 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos em série, como mostra a Fig. P2.77:

Processo 1-2: compressão com $U_2 = U_1$.

Processo 2-3: resfriamento a volume constante até $p_3 = 140$ kPa, $V_3 = 0{,}028$ m³.

Processo 3-1: expansão a pressão constante, com $W_{31} = 10{,}5$ kJ.

Para o ciclo, $W_{ciclo} = -8{,}3$ kJ. Não há variações na energia cinética ou potencial. Determine (a) o volume no estado 1, em m³, (b) o trabalho e a transferência de calor para o processo 1-2, ambos em kJ. Este pode ser um ciclo de potência? Pode ser um ciclo de refrigeração? Explique.

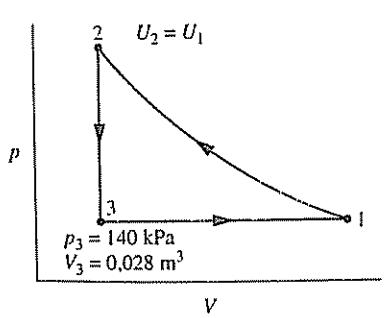


Fig. P2.77

2.78 Para um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17(*a*), as transferências de calor são $Q_{entra} = 50$ kJ e $Q_{sai} = 35$ kJ. Determine o trabalho líquido, em kJ, e a eficiência térmica.

2.79 A eficiência térmica de um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17(*a*) é 35%, e $Q_{sai} = 40$ MJ. Determine o trabalho líquido desenvolvido e a transferência de calor Q_{entra}, ambos em MJ.

2.80 Para um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17(*a*), $Q_{entra} = 2600$ Btu (2743,1 kJ) e $Q_{sai} = 1800$ Btu (1899,1 kJ). Qual é o trabalho líquido desenvolvido, em Btu, e a eficiência térmica?

2.81 Para um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17(*a*), $W_{ciclo} = 800$ Btu (844,0 kJ) e $Q_{sai} = 1800$ Btu (1899,1 kJ). Qual é a eficiência térmica?

2.82 Um ciclo de potência recebe energia por transferência de calor da queima de um combustível numa taxa líquida de 150 MW. A eficiência térmica do ciclo é 40%.

(a) Determine a taxa líquida em que o ciclo recebe energia por transferência de calor, em MW.
(b) Para 8000 horas de operação anuais, determine o trabalho líquido realizado, em kW · h por ano.
(c) Calculando o trabalho líquido produzido a \$0,08 por kW · h, determine o valor do trabalho líquido em \$ por ano.

2.83 Um ciclo de potência possui uma eficiência térmica de 40% e gera eletricidade numa taxa de 100 MW. A eletricidade vale \$0,08 por kW · h. Baseado no custo do combustível, o custo para fornecer $\dot{Q}_{entra}$ é \$4,50 por GJ. Para 8000 horas de operação anuais, determine, em \$,

(a) o valor da eletricidade gerada por ano.
(b) o custo anual de combustível.
(c) A diferença entre os resultados das partes (a) e (b) representa *lucro*? Comente.

2.84 A Fig. P2.84 mostra uma central de *co-geração* de energia operando em um ciclo termodinâmico em regime permanente. A central fornece eletricidade para uma comunidade a uma taxa de 80 MW. A energia rejeitada pela central por transferência de calor está indicada na figura por $\dot{Q}_{sai}$. Desta, 70 MW é fornecida à comunidade para o aquecimento da água e o resto é rejeitado para o ambiente sem ser usado. A eletricidade vale \$0,08 por kW · h. Se a eficiência térmica do ciclo for de 40%, determine (a) a taxa de energia adicionada por transferência de calor, $\dot{Q}_{entra}$, em MW, (b) a taxa de energia rejeitada para o ambiente, em MW, e (c) o valor da eletricidade gerada, em \$ por ano.

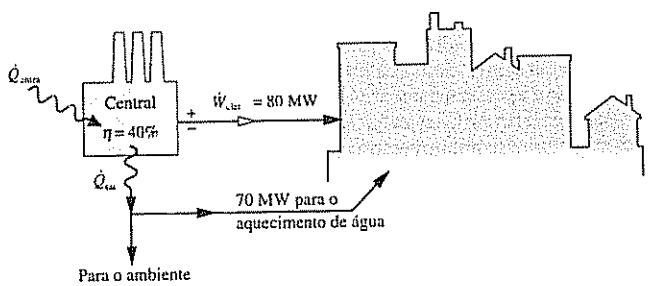


Fig. P2.84

2.85 Para cada um dos seguintes itens, qual o papel do corpo quente e do corpo frio de acordo com o esquema da Fig. 2.17?

(a) Ar condicionado de janela
(b) Reator nuclear de um submarino atômico
(c) Bomba de calor geotérmica

2.86 De que modo os motores de automóveis operam de maneira análoga ao ciclo de potência mostrado na Fig. 2.17(*a*)? Em que eles diferem? Comente.

2.87 Um ciclo de refrigeração operando como mostra a Fig. 2.17(*b*) apresenta uma transferência de calor $Q_{sai} = 2400$ Btu (2530,3 kJ) e um trabalho líquido de $W_{ciclo} = 800$ Btu (844,0 kJ). Determine o coeficiente de desempenho para o ciclo.

2.88 Um ciclo de refrigeração que opera como mostra a Fig. 2.17(*b*) possui um coeficiente de desempenho $\beta = 1{,}5$. Para o ciclo, $Q_{sai} = 500$ kJ. Determine Q_{entra} e W_{ciclo}, ambos em kJ.

2.89 Um refrigerador doméstico opera continuamente, e com um coeficiente de desempenho de 2,4 remove energia do espaço refrigerado numa taxa de 600 Btu/h (175,8 W) Calculando a eletricidade a $0.08 por kW h, determine o custo de eletricidade em um mês em que o refrigerador opera por 360 horas

2.90 Uma bomba de calor operando em regime permanente recebe energia por transferência de calor da água de um poço a 10°C e rejeita energia por transferência de calor para uma residência a uma taxa de $1,2 \times 10^5$ kJ/h Em um período de 14 dias um medidor de energia elétrica registra que a bomba de calor recebe 1490 kW h de eletricidade Essas são as únicas formas de transferência de energia envolvidas Determine (a) a quantidade de energia que a bomba de calor recebe da água do poço em um período de 14 dias por transferência de calor, em kJ, e (b) o coeficiente de desempenho da bomba de calor

2.91 Um ciclo de bomba de calor cujo coeficiente de desempenho é 2,5 fornece energia por transferência de calor para uma residência a uma taxa de 20 kW

(a) Determine a potência líquida necessária para operar a bomba de calor, em kW

(b) Calculando a eletricidade a $0,08 por kW h, determine o custo da eletricidade em um mês em que a bomba de calor opera por 200 horas

2.92 Uma bomba de calor fornece energia por transferência de calor para uma residência a uma taxa de 60 000 Btu/h (17,6 kW) A potência fornecida ao ciclo é 7,8 HP (5,8 kW)

(a) Determine o coeficiente de desempenho do ciclo

(b) Calculando a eletricidade a $0,08 por kW h, determine o custo da eletricidade em um mês em que a bomba de calor opera por 200 horas

2.93 Um refrigerador doméstico com um coeficiente de desempenho de 2,4 remove energia do espaço refrigerado numa taxa de 600 Btu/h (175,8 W) Calculando a eletricidade a $0,08 por kW h, determine o custo de eletricidade em um mês em que o refrigerador opera por 360 horas

Projetos e problemas em aberto: explorando a prática de engenharia

2.1P Avalie de forma crítica e compare os vários automóveis elétricos híbridos no mercado atualmente Em um memorando, resuma sua pesquisa e suas conclusões

2.2P Projete um sistema de proteção contra o vento para microfones (capa de sopro) que possa ser levado e usado em qualquer lugar, para atividades ao ar livre e atividades diárias casuais, incluindo tomar banho de sol, ler, cozinhar e fazer piquenique O sistema deve ser leve, portátil, fácil de manusear e de baixo custo Uma restrição importante é que o sistema deve poder ser instalado em qualquer lugar, incluindo superfícies duras, tais como estacionamentos abertos, deques de madeira, pátios de tijolo e concreto, e a praia Uma análise de custos deve acompanhar o projeto

2.3P Nos organismos a energia é armazenada na molécula de *adenosina trifosfato*, chamada ATP, para abreviar Diz-se que a ATP *atua como uma bateria*, armazenando energia quando não solicitada e liberando instantaneamente energia quando necessário Investigue como a energia é armazenada e o papel da ATP nos processos biológicos Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências

2.4P Por um período de duas semanas mantenha um diário das calorias que você consome relativas à comida e à bebida e das calorias *queimadas* devido a toda sua gama de atividades durante o período, cada uma em kcal Interprete seus resultados usando os conceitos introduzidos neste capítulo Em um memorando, resuma seus resultados e suas interpretações

2.5P Faça uma lista das opções mais comuns para aquecimento doméstico em sua localidade Para uma residência de 2500 ft² (232,3 m²). qual é o custo anual relativo ao combustível ou à eletricidade para cada opção da lista? Coloque, também, o custo de instalação de cada opção Para uma vida útil de 15 anos, qual a opção mais econômica?

2.6P Proprietários de imóveis preocupados com a interrupção de energia elétrica em sua cidade por causa das condições de tempo anunciadas e da interrupção do sistema público de energia elétrica podem adquirir um gerador auxiliar que produza eletricidade utilizando o gás natural existente em casa ou propano líquido (LP) como fonte de combustível Para a residência de uma única família de sua escolha, identifique um gerador auxiliar que forneceria eletricidade durante uma interrupção de energia para um conjunto de dispositivos e aparelhos essenciais especificados por você Resuma seus resultados em um memorando, incluindo o custo de instalação e dados do custo operacional

2.7P Um anúncio descreve um aquecedor portátil que afirma reduzir mais de 50% dos custos relativos ao aquecimento em uma casa Diz-se que o aparelho pode aquecer grandes quartos em minutos, sem que a superfície externa fique com uma temperatura alta, reduzindo a umidade e os níveis de oxigênio ou produzindo monóxido de carbono Um posicionamento típico está ilustrado na Fig P2 7P. O aquecedor é um recinto contendo lâmpadas elétricas de infravermelho de quartzo que brilham sobre tubos de cobre O ar sugado para o recinto por um ventilador escoa sobre os tubos e então é direcionado de volta à sala de estar. Aquecedores que requerem 500 watts de potência custam cerca de $400, enquanto o modelo de 1000 W custa cerca de $500 Analise criticamente os méritos técnico e econômico de tais aquecedores Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências

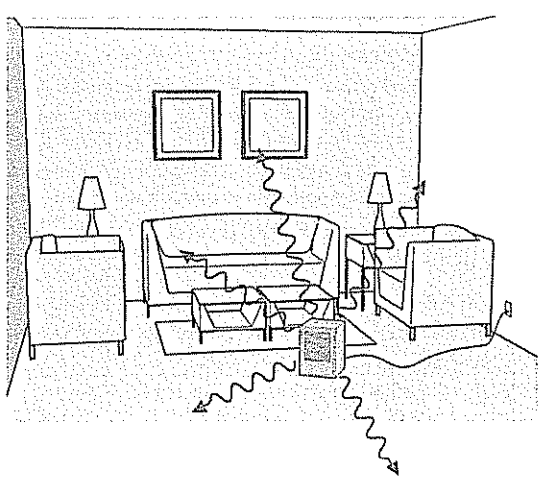


Fig. P2.7P

2.8P Usinas de energia movidas a combustível fóssil produzem a maior parte da eletricidade gerada anualmente nos Estados Unidos O custo da energia é determinado por diversos fatores, incluindo a eficiência térmica da usina de energia, o custo unitário do combustível, em $ por kW h, e o custo capital da usina, em $ por kW de potência gerada Prepare um memorando comparando faixas típicas desses três fatores para usinas a vapor que utilizam carvão como combustível e usinas de turbinas a gás que utilizam gás como combustível Que tipo de usina predomina nos Estados Unidos?

2.9P De acordo com o New York City Transit Authority, o funcionamento dos metrôs aumenta as temperaturas das estações e dos túneis cerca de 14-20°F acima da temperatura ambiente Os principais contribuintes para o aumento de temperatura incluem a operação do motor do trem, a iluminação e a própria energia dos passageiros O desconforto dos passageiros pode aumentar significativamente em períodos mais quentes se o ar condicionado não estiver disponível Todavia, como as unidades de ar condicionado a bordo liberam energia por transfe-

rência de calor para suas vizinhanças, tais unidades contribuem para o problema de administração global de energia na estação e no túnel Investigue estratégias de resfriamentos *alternativos*, aplicadas a metrôs, que produzam resfriamentos substanciais com uma potência mínima necessária incluindo armazenamento térmico e ventilação à noite, porém não se limitando a estes. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

2.10P Um inventor propôs *tomar emprestada* água do sistema adutor municipal e armazená-la *temporariamente* em um tanque nas instalações de uma residência equipada com uma bomba de calor Conforme ilustrado na Fig P2 10P, a água armazenada atua como o corpo frio para a bomba de calor, e a própria residência atua como o corpo quente. Como a energia da água armazenada diminui conforme é removida pela bomba de calor, para restabelecer o nível de energia a água é retirada periodicamente do sistema e uma quantidade igual de água, a baixa energia, retorna ao sistema Como a invenção não requer água *líquida* do sistema, o inventor afirma que nada é pago pelo uso da água O inventor também afirma que esse tipo de abordagem não apenas fornece um coeficiente de desempenho superior àquele das bombas de calor com *fontes de ar* como também evita custos associados às bombas de calor *de solo* Assim, o inventor conclui que há uma economia significativa com relação aos custos. Analise criticamente a afirmação do inventor Escreva um relatório com no mínimo três referências.

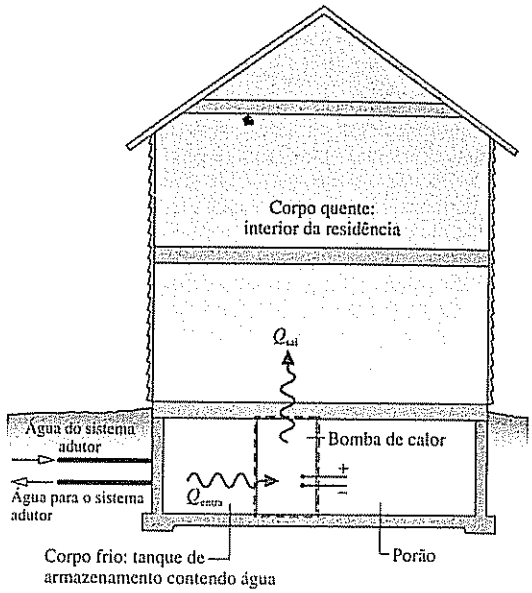
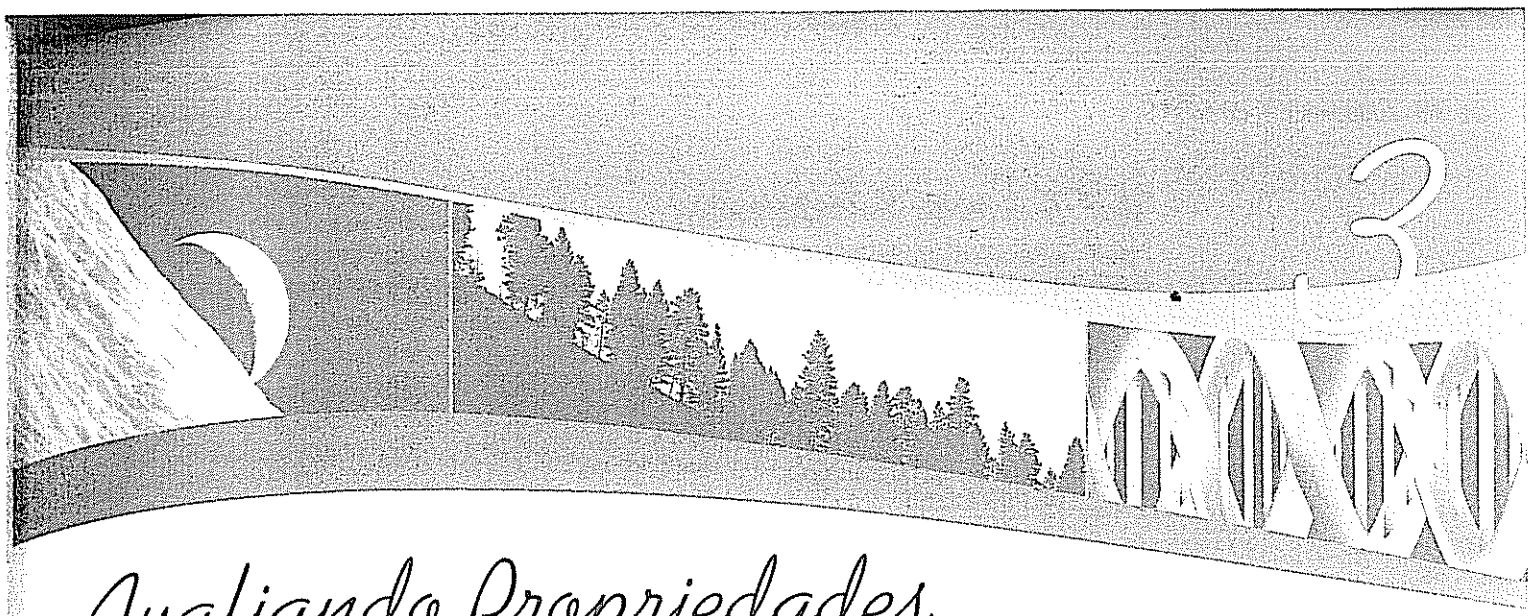


Fig. P2.10P



Avaliando Propriedades

Contexto de Engenharia

A aplicação do balanço de energia a um sistema de interesse requer o conhecimento das propriedades desse sistema e de como essas propriedades estão relacionadas. Este capítulo tem como **objetivos** apresentar relações de propriedades relevantes à termodinâmica voltada para a engenharia e fornecer diversos exemplos ilustrando o uso do balanço de energia para o sistema fechado, juntamente com as relações das propriedades consideradas no presente capítulo.

Objetivos de Aprendizagem

Quando você completar o estudo deste capítulo estará apto a...

☑ demonstrar conhecimento dos conceitos fundamentais... incluindo fase e substância pura, princípios dos estados equivalentes para sistemas simples compressíveis, superfície p-v-T, temperatura de saturação e pressão de saturação, mistura bifásica líquido-vapor, título, entalpia e calores específicos.

☑ aplicar, com dados de propriedades, o balanço de energia para um sistema fechado.

☑ esboçar os diagramas T-v, p-v e o diagrama de fases, e localizar os estados principais nesses diagramas.

☑ obter dados de propriedades a partir das Tabelas A-1 a A-23.

☑ aplicar o modelo de gás ideal para análise termodinâmica, incluindo a determinação de quando a utilização do modelo de gás ideal é apropriada.

3.1 Conceitos Introdutórios

Nesta seção serão apresentados conceitos que apóiam nosso estudo de relações de propriedades, incluindo fase, substância pura e o princípio dos estados equivalentes para sistemas simples.

3.1.1 Fase e Substância Pura

fase

O termo ***fase*** refere-se a uma quantidade de matéria que é homogênea como um todo, tanto em composição química como em estrutura física. Homogeneidade em estrutura física significa que a matéria é toda *sólida*, toda *líquida* ou toda *vapor* (ou, de forma equivalente, toda *gás*). Um sistema pode conter uma ou mais fases.

➥ **POR EXEMPLO...** um sistema de água líquida e vapor d'água (vapor) contém *duas* fases. Um sistema de água líquida e gelo, incluindo o caso de neve derretida, também contém *duas* fases. Gases como, por exemplo, o oxigênio e o nitrogênio podem estar misturados em qualquer proporção para formar uma *única* fase gasosa. Certos líquidos, tais como álcool e água, podem ser misturados formando uma *única* fase líquida. Mas líquidos como óleo e água, que não são miscíveis, formam *duas* fases líquidas. ⇐

Duas fases coexistem durante processos de *mudanças de fase*, tais como *vaporização*, *fusão* e *sublimação*.

substância pura

Uma ***substância pura*** é aquela cuja composição química é uniforme e invariável. Uma substância pura pode existir em mais de uma fase, mas sua composição química deve ser a mesma em cada fase.

➥ **POR EXEMPLO...** se água líquida e vapor d'água formam um sistema com duas fases, esse sistema pode ser visto como uma substância pura porque cada fase possui a mesma composição. Uma mistura uniforme de gases pode ser vista como uma substância pura desde que ela se mantenha como um gás e não reaja quimicamente. O ar pode ser considerado como uma substância pura, desde que permaneça como uma mistura de gases; mas se uma fase líquida fosse formada por resfriamento o líquido teria uma composição diferente da fase gasosa, e o sistema não poderia mais ser considerado uma substância pura. ⇐

As mudanças de composição devidas a reações químicas serão consideradas no Cap. 13.

3.1.2 Definindo o Estado

O estado de um sistema fechado em equilíbrio é sua condição como descrita por valores de suas propriedades termodinâmicas. A partir da observação de muitos sistemas termodinâmicos sabe-se que nem todas as propriedades são independentes entre si, e que o estado pode ser unicamente determinado pelo estabelecimento dos valores das propriedades *independentes*. Os valores de todas as outras propriedades termodinâmicas são determinados a partir desse subconjunto de propriedades independentes especificado. Uma regra geral conhecida como ***princípio dos estados equivalentes*** foi desenvolvida como um guia na determinação do número de propriedades independentes necessárias para se determinar o estado de um sistema.

princípio dos estados equivalentes

Para a maioria das aplicações consideradas neste livro estamos interessados no que o princípio dos estados equivalentes afirma sobre o estado *intensivo* de sistemas. Sistemas de substâncias puras comumente encontradas, tais como a água e misturas de gases não-reativos, são de especial interesse. Esses sistemas são denominados ***sistemas compressíveis simples***. A experiência mostra que os sistemas compressíveis simples ocorrem em uma vasta gama de aplicações da engenharia. Para tais sistemas o princípio dos estados equivalentes indica que o número de propriedades intensivas independentes é igual a *dois*.

sistemas compressíveis simples

➥ **POR EXEMPLO...** no caso de um gás, a temperatura e outra propriedade intensiva, tal como o volume específico, podem ser selecionadas como as duas propriedades independentes. O princípio dos estados equivalentes então estabelece que pressão, energia interna específica e todas as demais propriedades *intensivas* pertinentes podem ser determinadas em função de T e v: $p = p(T, v)$, $u = u(T, v)$, e assim por diante. As relações funcionais seriam determinadas utilizando os dados experimentais e dependeriam explicitamente da identidade química particular das substâncias que compõem o sistema. O desenvolvimento de tais funções é discutido no Cap. 11. ⇐

Propriedades intensivas, tais como velocidade e elevação, que têm valores determinados em relação a referenciais *externos* ao sistema, são excluídas das presentes considerações. Além disso, como o próprio nome sugere, alterações de volume podem ter uma influência significativa na energia de *sistemas simples compressíveis*. O único modo de transferência de energia através de trabalho que pode ocorrer à medida que um sistema simples compressível é submetido a processos quase-estáticos (Seção 2.2) está associado a mudanças de volume, e é dado por $\int p\, dV$. Para maiores informações sobre sistemas simples e o princípio dos estados equivalentes, veja o boxe.

Princípio dos Estados Equivalentes para Sistemas Simples

Com base em evidências empíricas pode-se concluir que existe uma propriedade independente para cada forma pela qual a energia de um sistema pode ser variada independentemente. Vimos no Cap. 2 que a energia de um sistema fechado pode ser alterada independentemente por calor ou por trabalho. Conseqüentemente, uma propriedade independente pode ser associada à quantidade de calor transferida como forma de variação da energia de um sistema, assim como outras propriedades independentes podem ser consideradas para cada forma relevante de alteração da energia do sistema resultante do trabalho. Portanto, com base em evidência experimental o *princípio dos estados equivalentes* determina que o número de propriedades independentes é igual a um mais o número de interações *relevantes* do sistema devido a trabalho. Na determinação do número de interações relevantes resultantes do trabalho é suficiente considerar somente aquelas que seriam significantes em processos *quase-estáticos* do sistema.

O termo *sistema simples* é aplicado quando existe somente *uma* forma pela qual a energia do sistema pode ser significativamente alterada por trabalho à medida que o sistema é submetido a um processo quase-estático. Portanto, considerando uma propriedade independente para a transferência de calor e outra para a única interação via trabalho chega-se a um total de duas propriedades necessárias para a determinação do estado de um sistema simples. *Esse é o princípio dos estados equivalentes para sistemas simples.* Embora nenhum sistema seja sempre realmente simples, muitos sistemas podem ser modelados como sistemas simples para fins de análise termodinâmica. O mais importante desses modelos para as aplicações consideradas neste livro é o *sistema simples compressível*. Outros tipos de sistemas simples são os sistemas *elásticos* simples e os sistemas *magnéticos* simples.

UNIFEMM - Centro Universitário de Sete Lagoas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

Avaliando Propriedades: Considerações Gerais

Esta parte do capítulo está, de forma geral, relacionada com propriedades termodinâmicas de sistemas simples compressíveis compostos de substâncias *puras*. Uma substância pura é aquela de composição química uniforme e invariável. Relações de propriedades para sistemas nos quais a composição se altera devido à reação química são apresentadas no Cap. 13. Na segunda parte do presente capítulo consideramos a avaliação de propriedades utilizando o *modelo de gás ideal*.

3.2 Relação p–v–T

Iniciamos nosso estudo das propriedades de substâncias puras simples compressíveis e das relações entre essas propriedades com a pressão, o volume específico e a temperatura. A partir de conhecimento experimental sabe-se que a temperatura e o volume específico podem ser considerados independentes e a pressão determinada como função desses dois: $p = p(T, v)$. O gráfico de tal função é uma *superfície*; a

superfície p–v–T

superfície p–v–T

3.2.1 Superfície p–v–T

A Fig. 3.1 ilustra a superfície p–v–T de uma substância como a água, que se expande durante a solidificação. A Fig. 3.2 corresponde a uma substância que se contrai durante a solidificação, sendo que a maioria das substâncias exibe esse comportamento. As coordenadas de um ponto na superfície p–v–T representam os valores que a pressão, o volume específico e a temperatura assumem quando a substância se encontra em equilíbrio.

As Figs. 3.1 e 3.2 apresentam regiões nas superfícies p–v–T denominadas *sólido*, *líquido* e *vapor*. No interior dessas regiões *monofásicas* o estado é determinado por *quaisquer* duas das seguintes propriedades: pressão, volume específico e temperatura, uma vez que todas são independentes quando há uma única fase presente. Localizadas entre as regiões monofásicas estão as seguintes ***regiões bifásicas***, onde duas fases coexistem em equilíbrio: líquido-vapor, sólido-líquido e sólido-vapor. Duas fases podem coexistir durante processos de mudanças de fase, tais como vaporização, fusão e sublimação. No interior dessas regiões bifásicas, pressão e temperatura não são independentes; ou seja, uma não pode ser modificada sem a alteração da outra. No interior dessas regiões o estado não pode ser determinado somente por temperatura e pressão. Entretanto, o estado pode ser estabelecido pelo volume específico e uma outra propriedade: a pressão ou a temperatura. Três fases podem coexistir em equilíbrio ao longo da linha denominada ***linha tripla***.

regiões bifásicas

linha tripla

O estado no qual uma mudança de fase começa ou termina é denominado ***estado de saturação***. A região em formato de sino composta pelos estados bifásicos líquido-vapor é chamada de ***domo***

estado de saturação

domo de vapor

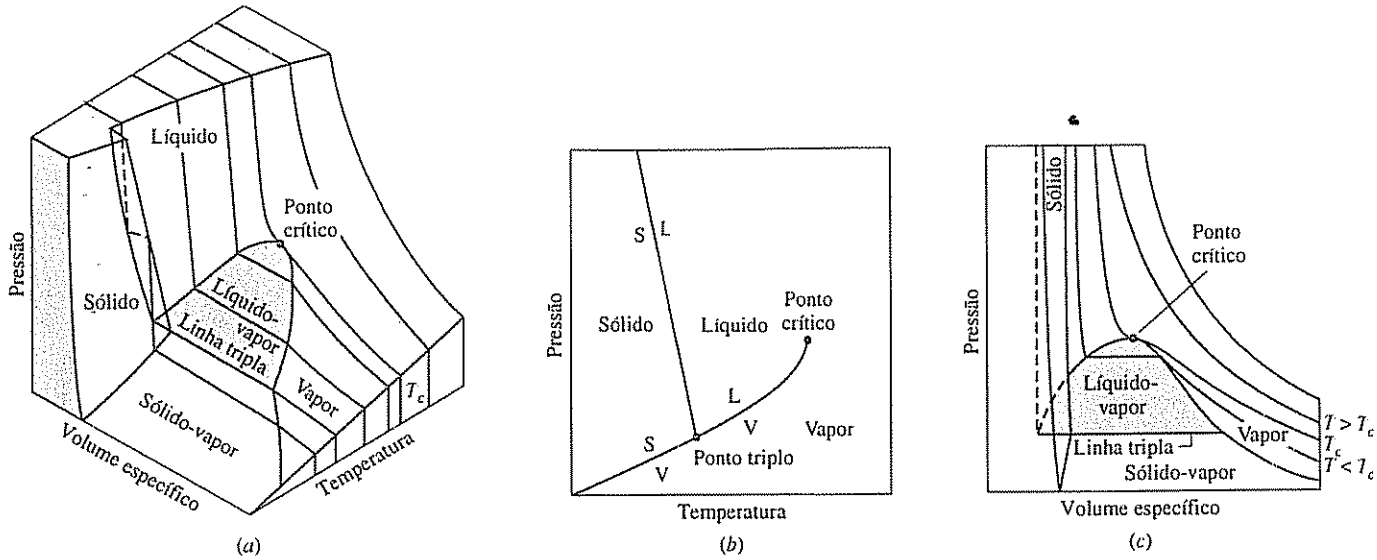


Fig. 3.1 Superfície *p–v–T* e projeções para uma substância que se expande durante a solidificação. (*a*) Vista tridimensional. (*b*) Diagrama de fases. (*c*) Diagrama *p–v*.

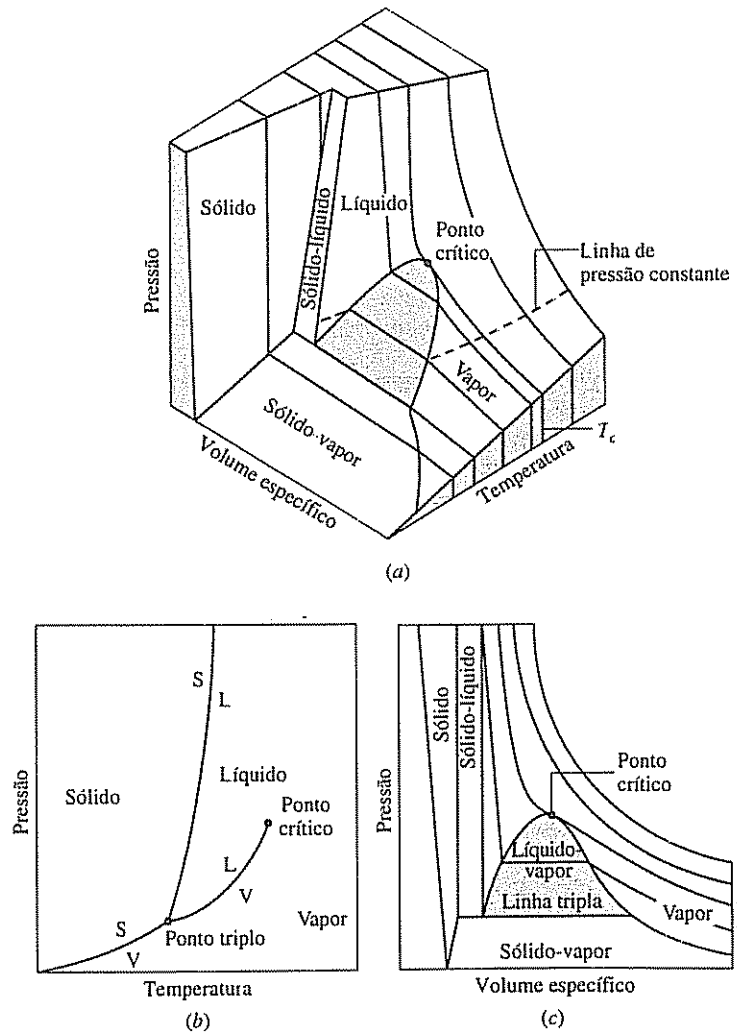


Fig. 3.2 Superfície *p–v–T* e projeções para uma substância que se contrai durante a solidificação. (*a*) Vista tridimensional. (*b*) Diagrama de fases. (*c*) Diagrama *p–v*.

de vapor As linhas que definem o contorno do domo de vapor são denominadas linhas de líquido saturado e de vapor saturado. O topo do domo, onde as linhas de líquido e de vapor saturados se encontram, é denominado ***ponto crítico***. A *temperatura crítica* T_c de uma substância pura corresponde à temperatura máxima na qual as fases líquida e de vapor podem coexistir em equilíbrio. A pressão no ponto crítico é denominada *pressão crítica*, p_c. O volume específico nesse estado é denominado *volume específico crítico*. Valores das propriedades no ponto crítico para diversas substâncias são apresentados nas Tabelas A-1 localizadas no Apêndice.

ponto crítico

A superfície tridimensional p–v–T é útil para se obter as relações gerais entre as três fases da matéria que são geralmente consideradas. Entretanto, geralmente é mais conveniente trabalhar com projeções bidimensionais dessa superfície. Essas projeções são consideradas a seguir.

3.2.2 Projeções da Superfície p–v–T

O Diagrama de Fases

Se a superfície p–v–T é projetada sobre o plano pressão-temperatura, um diagrama de propriedades conhecido como ***diagrama de fases*** é obtido. Como ilustrado nas Figs. 3.1*b* e 3.2*b*, quando a superfície é projetada desse modo as *regiões* bifásicas se reduzem a *linhas*. Um ponto em qualquer dessas linhas representa todas as misturas bifásicas na temperatura e na pressão especificadas.

diagrama de fases

O termo ***temperatura de saturação*** indica a temperatura na qual uma mudança de fase ocorre para uma dada pressão, que é denominada ***pressão de saturação*** para a dada temperatura. Os diagramas de fase mostram que para cada pressão de saturação há uma única temperatura de saturação, e vice-versa.

temperatura de saturação
pressão de saturação

A linha *tripla* da superfície p–v–T tridimensional é projetada em um único *ponto* no diagrama de fases. Esse ponto é denominado ***ponto triplo***. Vale recordar que o ponto triplo da água é usado como referência na definição de escalas de temperatura (Seção 1.7.3). Por convenção, a temperatura *associada* ao ponto triplo da água é de 273,16 K (491,69°R). A pressão *medida* no ponto triplo da água é de 0,6113 kPa (0,00602 atm).

ponto triplo

A linha que representa a região bifásica sólido-líquido no diagrama de fases se inclina para a esquerda para substâncias que se expandem durante a solidificação e para a direita para aquelas que se contraem. Embora uma única fase sólida seja mostrada nos diagramas de fase das Figs. 3.1 e 3.2, sólidos podem existir em diferentes fases sólidas. Por exemplo, sete diferentes formas cristalinas foram identificadas para a água na fase sólida (gelo).

Diagrama p–v

Projetar a superfície p–v–T sobre o plano pressão-volume específico resulta no ***diagrama p–v***, como ilustrado nas Figs. 3.1*c* e 3.2*c*. Essas figuras apresentam termos já discutidos anteriormente.

diagrama p–v

Durante a resolução de problemas um esboço do diagrama p–v é em geral conveniente. Para facilitar o uso desse esboço observe o comportamento das linhas de temperatura constante (isotermas). Observando-se as Figs. 3.1*c* e 3.2*c* pode-se ver que para qualquer temperatura especificada *inferior* à temperatura crítica a pressão se mantém constante ao longo de uma transformação líquido-vapor. Entretanto, para as regiões monofásicas de líquido e de vapor a pressão diminui, para uma dada temperatura, à medida que o volume específico aumenta. Para temperaturas superiores ou iguais à temperatura crítica a pressão se reduz continuamente, para uma dada temperatura, à medida que o volume específico aumenta. Não há passagem pela região bifásica líquido-vapor. A isoterma crítica passa por um ponto de inflexão com inclinação nula no ponto crítico.

Diagrama T–v

Projetando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor da superfície p–v–T sobre o plano temperatura-volume específico obtém-se um ***diagrama T–v*** como ilustrado na Fig. 3.3. Uma vez que características semelhantes são apresentadas para o comportamento p–v–T de todas as substâncias puras, o diagrama T–v para a água mostrado na Fig. 3.3 pode ser considerado representativo.

diagrama T–v

Como para o diagrama p–v, um esboço do diagrama T–v é freqüentemente conveniente para a resolução de problemas. Para facilitar o uso desse esboço observe a forma das linhas de pressão constante (isobáricas). Para pressões *inferiores* à pressão crítica, tal como a isobárica de 10 MPa da Fig. 3.3, a pressão se mantém constante em relação à temperatura à medida que a região bifásica é percorrida. No interior das regiões monofásicas de líquido e de vapor a temperatura aumenta, para uma dada pressão, à medida que o volume específico aumenta. Para pressões superiores ou iguais à pressão crítica, tal como a de 30 MPa na Fig. 3.3, a temperatura aumenta continuamente com o volume específico para uma dada pressão. Não há passagem pela região bifásica líquido-vapor.

As projeções da superfície p–v–T utilizadas neste livro para ilustrar os processos geralmente não são desenhadas em escala. O mesmo comentário se aplica a outros diagramas de propriedades que serão apresentados posteriormente.

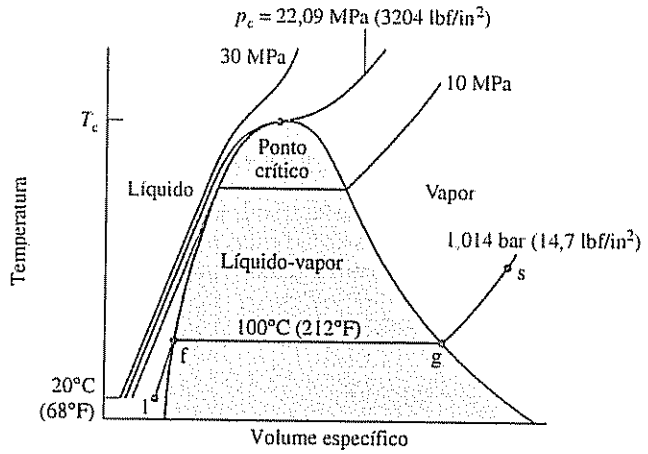


Fig. 3.3 Esboço de um diagrama temperatura-volume específico para a água mostrando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor (fora de escala).

3.3 Estudando Mudança de Fase

O estudo dos eventos que ocorrem quando uma substância pura passa por uma mudança de fase é instrutivo. Para começar, considere um sistema fechado de massa unitária (1 kg ou 1 lb) de água líquida a 20°C (68°F) contida no interior de um conjunto cilindro-pistão, como ilustrado na Fig. 3.4*a*. Esse estado é representado pelo ponto 1 na Fig. 3.3. Suponha que a água é aquecida lentamente enquanto sua pressão é mantida constante e uniforme no interior do sistema a 1,014 bar (14,7 lbf/in²).

Estados de Líquido

À medida que o sistema é aquecido a uma pressão constante a temperatura aumenta consideravelmente, enquanto o volume específico apresenta uma elevação menos significativa. Eventualmente, o sistema atinge o estado representado por f na Fig. 3.3. Esse é o estado de líquido saturado correspondente à pressão especificada. Para água a 1,014 bar (14,7 lbf/in²), a temperatura de saturação é de 100°C (212°F). Os estados de líquido ao longo do segmento l-f da Fig. 3.3 são, algumas vezes, denominados estados de ***líquido sub-resfriado***, uma vez que a temperatura nesses estados é inferior à temperatura de saturação na pressão especificada. Eles são também denominados estados de ***líquido comprimido***, uma vez que a pressão em cada estado é superior à pressão de saturação correspondente à temperatura no estado. As denominações líquido, líquido sub-resfriado e líquido comprimido são utilizadas de forma equivalente.

líquido sub-resfriado
líquido comprimido

Mistura Bifásica Líquido-Vapor

Quando o sistema se encontra no estado de líquido saturado (estado f da Fig. 3.3) uma transferência de calor adicional à pressão constante resulta na formação de vapor sem qualquer mudança de temperatura, mas com um considerável aumento de volume específico. Conforme ilustrado na Fig. 3.4*b*, o sistema seria composto de uma mistura bifásica líquido-vapor. Quando uma mistura de líquido e vapor existe em equilíbrio a fase líquida é um líquido saturado e a fase vapor é um vapor saturado. Se o sistema continua a ser aquecido até que a última porção de líquido tenha sido vaporizada, ele é levado ao ponto g da Fig. 3.3, o estado de vapor saturado. As ***misturas bifásicas líquido-vapor*** intermediárias podem ser distinguidas entre si pelo *título*, uma propriedade intensiva.

mistura bifásica líquido-vapor

Para uma mistura bifásica líquido-vapor, a razão entre a massa de vapor presente e a massa total da mistura é seu ***título***, x. Em forma matemática, temos

título

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}} \tag{3.1}$$

O valor do título varia de zero até a unidade: para estados de líquido saturado, $x = 0$, e para estados de vapor saturado, $x = 1{,}0$. Embora definido como uma razão, o título é geralmente expresso como porcentagem. Exemplos ilustrando a utilização do título são apresentados na Seção 3.5. Parâmetros semelhantes podem ser definidos para misturas bifásicas sólido-vapor e sólido-líquido.

Estados de Vapor

Voltemos a considerar as Figs. 3.3 e 3.4. Quando o sistema se encontra no estado de vapor saturado (estado g na Fig. 3.3), o aquecimento suplementar à pressão constante resulta nos aumentos de tem-

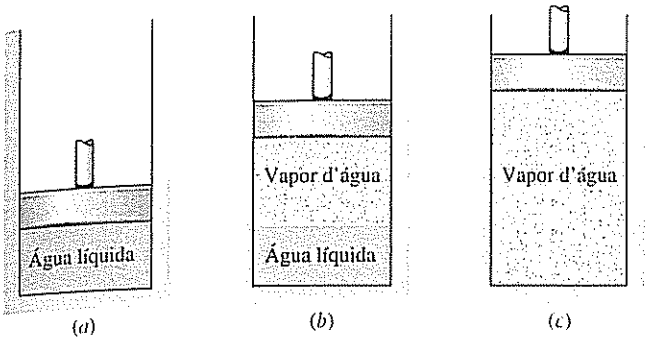


Fig. 3.4 Ilustração de uma transformação líquido-vapor para a água a pressão constante

peratura e de volume específico. A condição do sistema seria agora representada pela Fig. 3.4(*c*). O estado indicado por s na Fig. 3.3 é representativo dos estados que seriam alcançados continuando o aquecimento, à medida que a pressão é mantida constante. Um estado tal como s é normalmente chamado de estado de ***vapor superaquecido***, uma vez que o sistema estaria a uma temperatura superior à temperatura de saturação correspondente para a pressão dada.

vapor superaquecido

Considere, a seguir, o mesmo raciocínio realizado para as outras pressões constantes indicadas na Fig. 3.3, 10 MPa (1450 lbf/in²), 22,09 MPa (3204 lbf/in²) e 30 MPa (4351 lbf/in²). A primeira dessas pressões é inferior à pressão crítica da água, a segunda é a pressão crítica e a terceira é superior à pressão crítica. Como antes, considere o sistema contendo inicialmente líquido a 20°C (68°F). Primeiro, consideremos o sistema caso este fosse aquecido lentamente a 10 MPa (1450 lbf/in²). A essa pressão seria formado vapor a uma temperatura superior à observada no exemplo anterior, uma vez que a pressão de saturação é superior (consulte a Fig. 3.3). Além disso, o aumento de volume específico do líquido saturado até vapor saturado seria um pouco menor, como mostrado pelo estreitamento da região de saturação. A despeito disso, o comportamento global seria o mesmo de antes.

A seguir, considere o comportamento de um sistema que seja aquecido à pressão crítica, ou superior a esta. Como se verificou ao se seguir a isobárica crítica da Fig. 3.3, não ocorreria a mudança de fase de líquido para vapor. Para todos os estados existiria somente uma fase. Conforme mostra a linha *a-b-c* do diagrama de fases da Fig. 3.5, a *vaporização* (e o processo inverso de *condensação*) pode ocorrer somente quando a pressão é inferior à pressão crítica. Então, para estados em que a pressão é maior que a pressão crítica os termos líquido e vapor tendem a perder seus significados. Ainda de forma a facilitar a referência a tais estados, usamos o termo líquido quando a temperatura é inferior à temperatura crítica, e vapor quando a temperatura é maior que a temperatura crítica.

Fusão e Sublimação

Embora as mudanças de fase de líquido para vapor (vaporização) e de vapor para líquido (condensação) sejam as de principal interesse neste livro, é também importante considerar as mudanças de fase de sólido para líquido (fusão) e de sólido para vapor (sublimação). Para estudar essas transições, considere um sistema que consiste em uma massa unitária de gelo a uma temperatura inferior à do ponto triplo. Iniciemos com o caso em que o sistema se encontra no estado *a'* da Fig. 3.5, no qual a pressão é superior à pressão do ponto crítico. Admita que o sistema é aquecido lentamente enquanto sua pressão é mantida constante e uniforme no interior do sistema. A temperatura aumenta com o aquecimento até que o ponto *b'* da Fig. 3.5 seja alcançado. Nesse estado, o gelo é um sólido saturado. A transferência de calor adicional à pressão constante leva à formação de líquido sem qualquer alteração de temperatura. Conforme o aquecimento do sistema prossegue, o gelo continua a se fundir até que eventualmente a última parcela se transforma, e o sistema passa a conter somente líquido saturado. Durante o processo de fusão a pressão e a temperatura se mantêm constantes. Para a maioria das substâncias o volume específico aumenta durante a fusão, mas, para a água, o volume específico do líquido é inferior ao volume específico do sólido. A continuidade do processo de aquecimento à pressão constante leva a um aumento de temperatura à medida que o sistema é levado ao ponto *c'* da Fig. 3.5. A seguir, considere o caso em que o sistema se encontra inicialmente no estado *a"* da Fig. 3.5, no qual a pressão é inferior à pressão do ponto triplo. Nesse caso, se o sistema for aquecido a pressão constante ele passará pela região bifásica sólido-vapor, sendo levado para a região de vapor ao longo da linha *a"–b"–c"* mostrada na Fig. 3.5. Isto é, ocorre a sublimação.

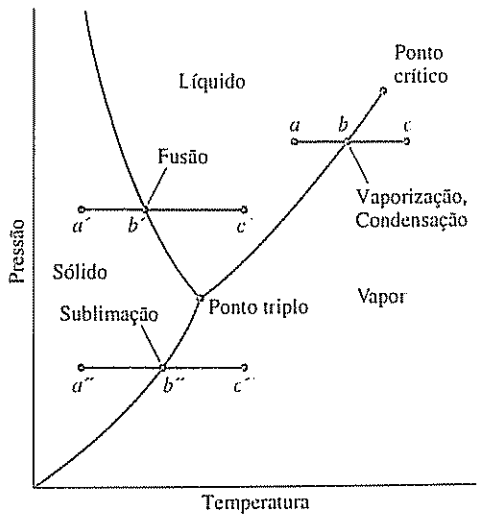


Fig. 3.5 Diagrama de fases para a água (fora de escala)

Bio... conexões

Enquanto a condensação do vapor para líquido e o resfriamento adicional a uma temperatura inferior à do estado líquido é facilmente imaginada e até mesmo faz parte de nossa experiência, gases liquefeitos como o nitrogênio e o oxigênio podem não ser tão familiares. Contudo, há aplicações médicas e industriais importantes envolvendo os mesmos. Uma delas corresponde à prática da *criocirurgia* utilizada pelos dermatologistas, que consiste no congelamento localizado do tecido da pele para a remoção de lesões indesejáveis, inclusive lesões pré-cancerosas. Para esse tipo de cirurgia aplica-se nitrogênio líquido a uma temperatura de cerca de −195°C (−319°F) a partir de um *spray* ou uma sonda. A criocirurgia é rapidamente realizada, e geralmente sem o uso de anestesia. Os dermatologistas armazenam o nitrogênio líquido necessário para muitos meses em recipientes chamados frascos *Dewar*, similares às garrafas a vácuo.

3.4 Obtendo Propriedades Termodinâmicas

Dados de propriedades termodinâmicas podem ser obtidos de várias formas, incluindo tabelas, gráficos, equações e programas de computador. As Seções 3.5 e 3.6 dão ênfase à utilização de *tabelas* de propriedades termodinâmicas que estão normalmente disponíveis para as substâncias puras simples compressíveis de interesse em engenharia. O uso dessas tabelas constitui uma importante habilidade. A capacidade de localizar estados em um diagrama de propriedades constitui uma importante habilidade associada. O programa de computador *Interactive Thermodynamics: IT* é apresentado na Seção 3.7 e utilizado seletivamente em exemplos e problemas de final de capítulo neste livro. No entanto, convém ressaltar que outros programas similares podem ser utilizados para a solução dos problemas apresentados. O uso apropriado de tabelas e diagramas de propriedades é um pré-requisito para a efetiva utilização do programa computacional na obtenção de dados de propriedades termodinâmicas.

a *tabelas de vapor*

Uma vez que tabelas para diferentes substâncias são freqüentemente colocadas no mesmo formato, a presente discussão será centrada principalmente nas Tabelas A-2 a A-6, que fornecem propriedades para a água; essas tabelas são comumente denominadas ***tabelas de vapor***. As Tabelas A-7 a A-9 para o Refrigerante 22, as Tabelas A-10 a A-12 para o Refrigerante 134a, as Tabelas A-13 a A-15 para a amônia e as Tabelas A-16 a A-18 para o propano são utilizadas de modo similar, da mesma forma que tabelas para outras substâncias encontradas na literatura de engenharia. As tabelas estão disponíveis nos Apêndices em unidades SI e inglesas. As tabelas em unidades inglesas estão designadas pela letra E. Por exemplo, as tabelas de vapor em unidades inglesas são as Tabelas A-2E a A-6E.

As substâncias com os dados tabelados apresentados neste livro foram selecionadas em virtude de sua importância prática. Contudo, elas são meramente representativas, considerando a vasta gama de substâncias importantes na indústria. Para satisfazer às mudanças de requisitos e lidar com as necessidades especiais, freqüentemente são introduzidas substâncias novas, enquanto outras se tornam obsoletas.

Energia e Meio Ambiente

Refrigerantes *naturais* como a amônia, o dióxido de carbono e certos hidrocarbonetos eram utilizados em sistemas de refrigeração há um século atrás. Esses refrigerantes foram substituídos por refrigerantes contendo cloro, considerados seguros para o uso até então. Esses refrigerantes, conhecidos como clorofluorcarbonos (CFCs), abriram caminho para os refrigeradores e condicionadores de ar desfrutados até pouco tempo. Recentemente, em virtude da preocupação relativa aos efeitos do cloro sobre a camada de ozônio que protege a Terra, acordos internacionais têm sido feitos para abolir gradualmente o uso dos CFCs. Os CFCs têm sido substituídos por refrigerantes como o Refrigerante 22 ($CHClF_2$) e o Refrigerante 134a (CF_3CH_2F), que possuem menor potencial para agredir a camada de ozônio. Entretanto, estudos atuais sugerem que os refrigerantes naturais podem ser preferíveis em virtude do baixo efeito estufa.

Embora décadas de pesquisa e desenvolvimento tenham conduzido aos refrigeradores e condicionadores de ar atuais, e o uso dos refrigerantes naturais represente desafios significativos para a engenharia, os mesmos estão de novo sendo ativamente considerados. A amônia, outrora amplamente utilizada, porém suspensa para o uso doméstico por ser tóxica, está recebendo interesse renovado porque não contém cloro. Novos refrigeradores energeticamente eficientes utilizando propano estão disponíveis no mercado global, mas ainda representam uma preocupação para os Estados Unidos em virtude de o propano ser inflamável. O dióxido de carbono é considerado promissor considerando sistemas pequenos e leves, tais como os automotivos e as unidades portáteis de condicionadores de ar. Embora o CO_2 seja um gás de efeito estufa, apenas uma minúscula quantidade seria necessária em uma unidade típica, e até mesmo esse caso estaria sujeito a uma manutenção adequada e aos protocolos disponíveis para unidades de refrigeração, dizem os especialistas.

3.5 Avaliando Pressão, Volume Específico e Temperatura

3.5.1 Tabelas de Líquido e de Vapor

As propriedades do vapor d'água estão listadas nas Tabelas A-4 e as de água líquida nas Tabelas A-5. Estas são geralmente denominadas tabelas de vapor *superaquecido* e tabelas de líquido *comprimido*, respectivamente. O esboço do diagrama de fases mostrado na Fig. 3.6 apresenta a estrutura dessas tabelas. Como a pressão e a temperatura são propriedades independentes nas regiões monofásicas de líquido e de vapor, elas podem ser utilizadas para a determinação de um estado em uma dessas regiões. Conseqüentemente, as Tabelas A-4 e A-5 estão montadas de forma a fornecer valores de várias propriedades em função de valores da pressão e da temperatura. A primeira propriedade listada é o volume específico. As demais propriedades serão discutidas nas seções subseqüentes.

Para cada pressão listada os valores dados na tabela de vapor superaquecido (Tabela A-4) *começam* com o estado de vapor saturado e então prosseguem para temperaturas superiores. Os dados da tabela de líquido comprimido (Tabela A-5) *terminam* com os estados de líquido saturado. Isto é, para uma dada pressão os valores das propriedades são dados para temperaturas crescentes até o estado de saturação. Para essas tabelas os valores mostrados entre parênteses após a pressão no topo da tabela correspondem à temperatura de saturação. ⇨ **POR EXEMPLO...** nas Tabelas A-4 e A-5, para uma pressão de 10,0 MPa, a temperatura de saturação é listada como sendo de 311,06°C. Nas Tabelas A-4E e A-5E, na pressão de 500 lbf/in², a temperatura de saturação é listada como sendo de 467,1°F. ⇦

⇨ **POR EXEMPLO...** de forma a adquirir maior experiência com as Tabelas A-4 e A-5, verifique o seguinte: a Tabela A-4 fornece o volume específico do vapor d'água a 10,0 MPa e 600°C como sendo 0,03837 m³/kg. A 10,0 MPa e 100°C a Tabela A-5 fornece o volume específico da água líquida como $1{,}0385 \times 10^{-3}$ m³/kg. A Tabela A-4E fornece o volume específico do vapor d'água a 500 lbf/in² e 600°F como 1,158 ft³/lb. A 500 lbf/in² e 100°F a Tabela A-5E fornece o volume específico da água líquida como 0,016106 ft³/lb. ⇦

Os estados envolvidos na resolução de problemas geralmente não estão contidos no conjunto de valores fornecidos pelas tabelas de propriedades. A *interpolação* entre valores adjacentes das tabelas se torna, dessa forma, necessária. Deve-se ter muito cuidado, sempre, durante a interpolação dos valores da tabela. As tabelas disponíveis no Apêndice foram extraídas de tabelas mais completas que são construídas de forma que a ***interpolação linear***, ilustrada no exemplo a seguir, pode ser utilizada com precisão aceitável. Considera-se que a interpolação linear permanece válida quando aplicada a tabelas menos refinadas, como as disponíveis neste livro, para exemplos resolvidos e problemas de final de capítulo.

interpolação linear

⇨ **POR EXEMPLO...** determinemos o volume específico do vapor d'água para um estado onde p = 10 bar e T = 215°C. A Fig. 3.7 mostra um conjunto de dados extraído da Tabela A-4. Para a pressão de 10 bar a temperatura especificada de 215°C se encontra entre os valores tabelados de 200°C e 240°C, que são mostrados em negrito. Os valores de volume específico correspondentes são também

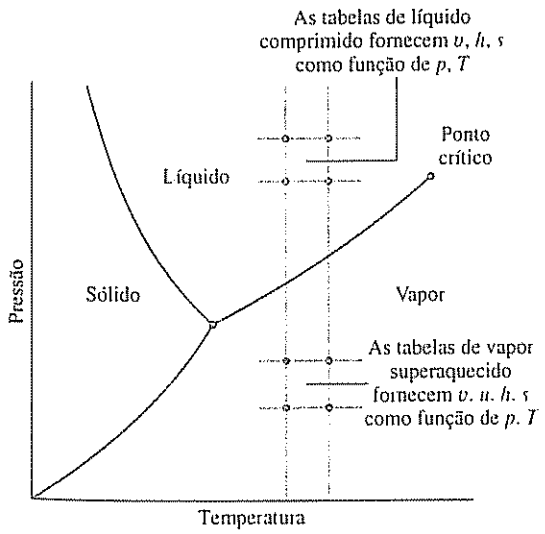
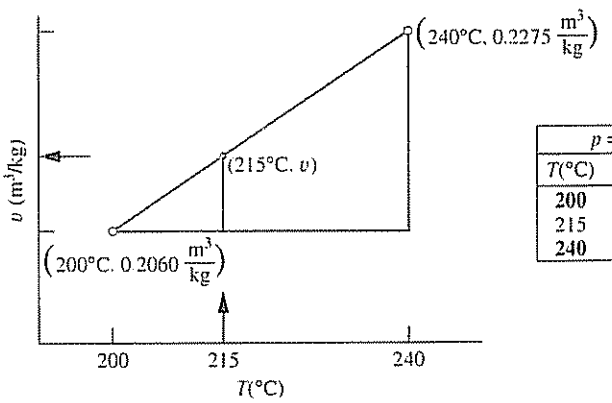


Fig. 3.6 Esboço do diagrama de fases para a água utilizado para a discussão da estrutura das tabelas de vapor superaquecido e de líquido comprimido (fora de escala).



p = 10 bar	
T(°C)	v (m³/kg)
200	**0,2060**
215	v = ?
240	**0,2275**

Fig. 3.7 Ilustração da interpolação linear.

mostrados em negrito. Para determinar o volume específico v correspondente a 215°C podemos pensar na *inclinação* de uma linha reta que une os estados adjacentes da tabela, como se segue

$$\text{inclinação} = \frac{(0{,}2275 - 0{,}2060)\ \text{m}^3/\text{kg}}{(240 - 200)°\text{C}} = \frac{(v - 0{,}2060)\ \text{m}^3/\text{kg}}{(215 - 200)°\text{C}}$$

Resolvendo para v, o resultado é $v = 0{,}2141\ \text{m}^3/\text{kg}$ ⇐

Os exemplos a seguir abordam o uso de esboços de diagramas p–v e T–v juntamente com dados tabelados de forma a estabelecer os estados finais de processos. De acordo com o princípio dos estados equivalentes, duas propriedades intensivas independentes devem ser conhecidas para que sejam estabelecidos os estados do sistema aqui considerado.

Exemplo 3.1 AQUECENDO AMÔNIA A PRESSÃO CONSTANTE

Um conjunto cilindro-pistão vertical contendo 0,1 lb (0,45 kg) de amônia, inicialmente como vapor saturado, é colocado sobre uma placa aquecida. Devido ao peso do pistão e da pressão atmosférica local a pressão da amônia é de 20 lbf/in² (137,9 kPa). O aquecimento ocorre lentamente, e a amônia se expande a pressão constante até a temperatura final de 77°F (25°C). Mostre os estados inicial e final em diagramas T–v e p–v, e determine

(a) o volume ocupado pela amônia em cada estado, em ft³.
(b) o trabalho realizado durante o processo, em Btu

Solução

Dado: amônia é aquecida a uma pressão constante em um conjunto cilindro-pistão a partir do estado de vapor saturado até uma temperatura final conhecida.

Pede-se: mostre os estados inicial e final em diagramas T–v e p–v e determine o volume em cada estado e o trabalho realizado durante o processo.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

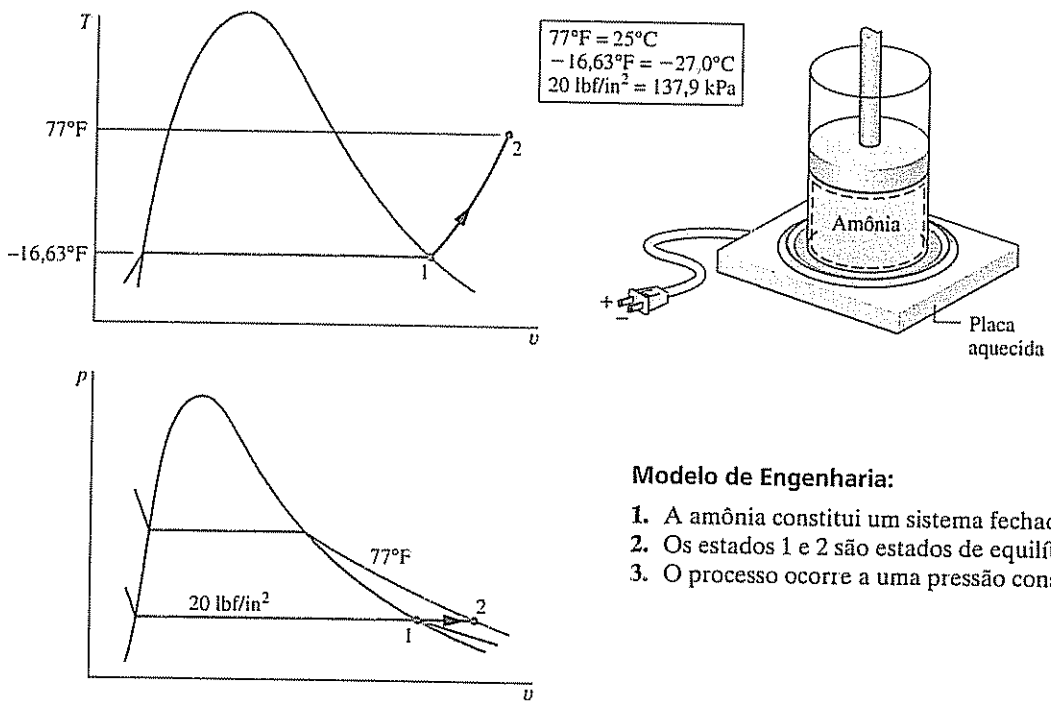


Fig. E3.1

Modelo de Engenharia:

1. A amônia constitui um sistema fechado.
2. Os estados 1 e 2 são estados de equilíbrio.
3. O processo ocorre a uma pressão constante.

Análise: o estado inicial é de vapor saturado a 20 lbf/in². Como o processo ocorre a uma pressão constante, o estado final se encontra na região de vapor superaquecido e é determinado por $p_2 = 20\ \text{lbf/in}^2$ e $T_2 = 77°\text{F}$. Os estados inicial e final são mostrados nos diagramas T–v e p–v da Fig. E3.1.

(a) Os volumes ocupados pela amônia nos estados 1 e 2 são obtidos utilizando a massa dada e os respectivos volumes específicos. A partir da Tabela A-15E para $p_1 = 20$ lbf/in² e da temperatura de saturação correspondente, obtemos $v_1 = v_g = 13{,}497$ ft³/lb. Então

$$\begin{aligned} V_1 &= mv_1 = (0{,}1 \text{ lb})(13{,}497 \text{ ft}^3/\text{lb}) \\ &= 1{,}35 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

Interpolando na Tabela A-15E para $p_2 = 20$ lbf/in² e $T_2 = 77°\text{F}$, obtemos $v_2 = 16{,}7$ ft³/lb. Então

$$V_2 = mv_2 = (0{,}1 \text{ lb})(16{,}7 \text{ ft}^3/\text{lb}) = 1{,}67 \text{ ft}^3$$

(b) Para esse caso o trabalho pode ser calculado utilizando a Eq. 2.17. Considerando que a pressão é constante

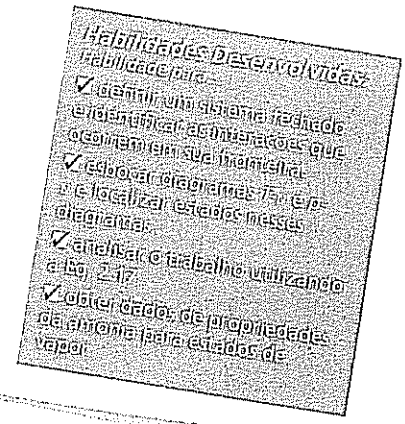
$$W = \int_{V_1}^{V_2} p\, dV = p(V_2 - V_1)$$

Substituindo valores

$$\begin{aligned} W &= (20 \text{ lbf/in}^2)(1{,}67 - 1{,}35)\text{ft}^3 \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft lbf}} \right| \\ &= 1{,}18 \text{ Btu} \end{aligned}$$

⓫

⓫ Observe a utilização de fatores de conversão no cálculo



Teste-Relâmpago

Considerando que o aquecimento continua a 20 lbf/in² (137,9 kPa) de $T_2 = 77°\text{F}$ (25°C) a 90°F (32,2°C), determine o trabalho realizado durante o Processo 2-3 em Btu.

Resposta: 0,15 Btu.

3.5.2 Tabelas de Saturação

As tabelas de saturação, Tabelas A-2 e A-3, listam valores de propriedades para estados de líquido saturado e de vapor saturado. Os valores de propriedades para esses estados são denotados pelos subscritos f e g, respectivamente. A Tabela A-2 é chamada de *tabela de temperatura*, uma vez que temperaturas são listadas na primeira coluna, em incrementos convenientes. A segunda coluna fornece os valores de pressão de saturação correspondentes. As duas colunas subseqüentes fornecem, respectivamente, o volume específico do líquido saturado, v_f, e o volume específico do vapor saturado, v_g. A Tabela A-3 é chamada de *tabela de pressão*, já que as pressões são listadas, em incrementos convenientes, em sua primeira coluna. Os valores de temperatura de saturação correspondentes são fornecidos na segunda coluna. As duas colunas subseqüentes fornecem v_f e v_g, respectivamente.

O volume específico de uma mistura bifásica líquido-vapor pode ser determinado pela utilização das tabelas de saturação e pela definição de título dada pela Eq. 3.1 descrita a seguir. O volume total da mistura é a soma dos volumes das fases líquida e de vapor

$$V = V_{liq} + V_{vap}$$

Dividindo pela massa total da mistura, m, é obtido um volume específico *médio* para a mistura

$$v = \frac{V}{m} = \frac{V_{liq}}{m} + \frac{V_{vap}}{m}$$

Uma vez que a fase líquida é composta por líquido saturado e que a fase vapor é composta por vapor saturado, $V_{liq} = m_{liq}v_f$ e $V_{vap} = m_{vap}v_g$, então

$$v = \left(\frac{m_{liq}}{m}\right)v_f + \left(\frac{m_{vap}}{m}\right)v_g$$

Utilizando a definição de título, $x = m_{vap}/m$, e notando que $m_{liq}/m = 1 - x$, a expressão anterior se torna

$$v = (1 - x)v_f + xv_g = v_f + x(v_g - v_f) \qquad (3.2)$$

O aumento de volume específico durante a vaporização $(v_g - v_f)$ é também representado por v_{fg}.

⇨ **POR EXEMPLO...** considere um sistema que consiste em uma mistura bifásica líquido-vapor de água a 100°C e título de 0,9. Da Tabela A-2 a 100°C, $v_f = 1{,}0435 \times 10^{-3}$ m³/kg e $v_g = 1{,}673$ m³/kg. O volume específico da mistura é

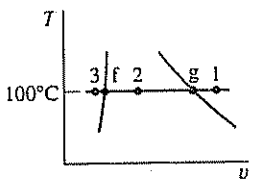
$$v = v_f + x(v_g - v_f) = 1{,}0435 \times 10^{-3} + (0{,}9)(1{,}673 - 1{,}0435 \times 10^{-3}) = 1{,}506 \text{ m}^3/\text{kg}$$

De forma semelhante, o volume específico de uma mistura bifásica líquido-vapor a 212°F e um título de 0,9 é

$$v = v_f + x(v_g - v_f) = 0{,}01672 + (0{,}9)(26{,}80 - 0{,}01672) = 24{,}12 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

onde os valores de v_f e v_g são obtidos da Tabela A-2E.

Para facilitar a localização de estados nas tabelas em geral é conveniente o uso de valores das tabelas de saturação juntamente com um esboço de um diagrama T–v ou p–v. Por exemplo, se o volume específico v e a temperatura T são conhecidos, utilize a tabela de temperatura apropriada, Tabela A-2 ou A-2E, e determine os valores de v_f e v_g. Um diagrama T–v mostrando esses dados é apresentado na Fig. 3.8. Se o volume específico dado se encontra entre v_f e v_g, o sistema consiste em uma mistura bifásica líquido-vapor, e a pressão é a pressão de saturação correspondente à temperatura dada. O título pode ser encontrado pela resolução da Eq. 3.2. Se o volume específico é maior do que v_g, o estado se encontra na região de vapor superaquecido. Portanto, por interpolação na Tabela A-4 ou A-4E, a pressão e outras propriedades listadas podem ser determinadas. Se o valor dado de volume específico é inferior a v_f, a Tabela A-5 ou A-5E pode ser utilizada para determinar a pressão e outras propriedades.



POR EXEMPLO... determinemos a pressão da água em cada um de três estados definidos pela temperatura de 100°C e volumes específicos de, respectivamente, $v_1 = 2{,}434$ m³/kg, $v_2 = 1{,}0$ m³/kg e $v_3 = 1{,}0423 \times 10^{-3}$ m³/kg. Utilizando a temperatura conhecida, a Tabela A-2 fornece os valores de v_f e de v_g: $v_f = 1{,}0435 \times 10^{-3}$ m³/kg, $v_g = 1{,}673$ m³/kg. Uma vez que v_1 é superior a v_g, o estado 1 se encontra na região de vapor. A Tabela A-4 determina a pressão como sendo de 0,70 bar. A seguir, já que v_2 se encontra entre v_f e v_g, a pressão é a pressão de saturação correspondente a 100°C, que é de 1,014 bar. Finalmente, como v_3 é inferior a v_f, o estado 3 se encontra na região de líquido. A Tabela A-5 indica que a pressão é de 25 bar.

O exemplo a seguir aborda o uso de um esboço do diagrama T–v juntamente com dados tabelados de forma a estabelecer os estados finais de processos. De acordo com o princípio dos estados equivalentes, duas propriedades intensivas independentes devem ser conhecidas para se definir os estados do sistema aqui considerado.

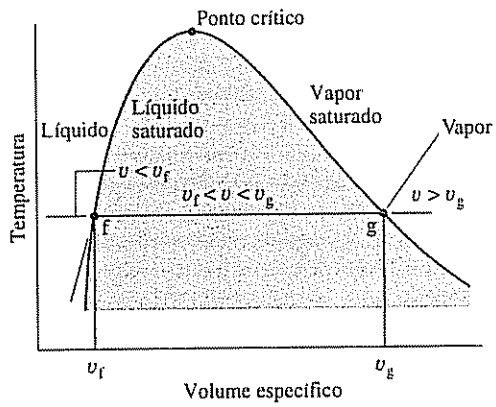


Fig. 3.8 Esboço de um diagrama T–v para a água utilizado para discutir a localização de estados nas tabelas.

Exemplo 3.2 AQUECIMENTO DE ÁGUA A VOLUME CONSTANTE

Um reservatório rígido e fechado de 0,5 m³ de volume é colocado sobre uma placa aquecida. Inicialmente o reservatório contém uma mistura bifásica de água líquida saturada e de vapor d'água saturado a $p_1 = 1$ bar com título de 0,5. Após o aquecimento a pressão do reservatório é de $p_2 = 1{,}5$ bar. Indique os estados inicial e final em um diagrama T–v e determine

(a) a temperatura, em °C, nos estados 1 e 2.
(b) a massa de vapor presente nos estados 1 e 2, em kg.
(c) Considerando que o aquecimento continua, determine a pressão, em bar, na qual o reservatório contém somente vapor saturado.

Solução

Dado: uma mistura bifásica líquido-vapor de água em um reservatório rígido e fechado é aquecida sobre uma placa quente. A pressão e o título iniciais e a pressão final são conhecidos.

Pede-se: indique os estados inicial e final em um digrama T–v e determine em cada estado a temperatura e a massa de vapor d'água presente. Prosseguindo o processo de aquecimento, determine, ainda, a pressão na qual o reservatório contém somente vapor saturado.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

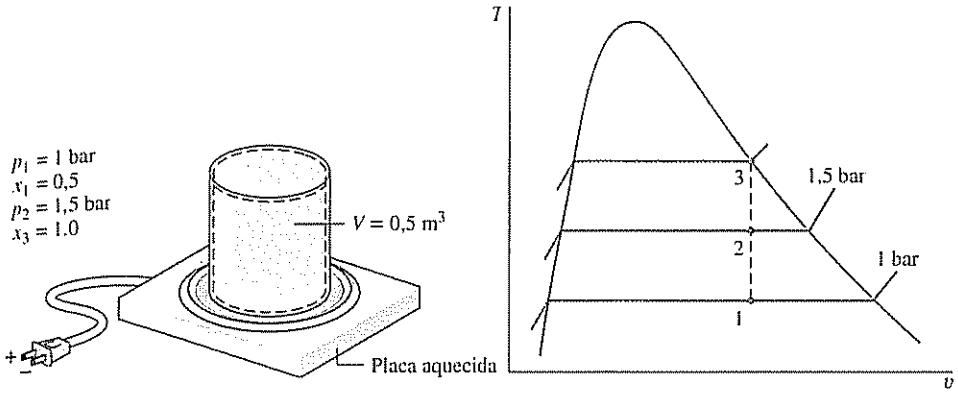


Fig. E3.2

Modelo de Engenharia:

1. A água no reservatório se constitui em um sistema fechado.
2. Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio.
3. O volume do reservatório permanece constante.

Análise: duas propriedades independentes são necessárias para determinar os estados 1 e 2. No estado inicial a pressão e o título são conhecidos. Como estes são independentes, o estado está determinado. O estado 1 é mostrado no diagrama T–v no interior da região bifásica. O volume específico no estado 1 é determinado utilizando o título dado e a Eq. 3.2. Logo,

$$v_1 = v_{f1} + x(v_{g1} - v_{f1})$$

Da Tabela A-3 para $p_1 = 1$ bar, $v_{f1} = 1,0432 \times 10^{-3}$ m³/kg e $v_{g1} = 1,694$ m³/kg. Logo,

$$v_1 = 1,0432 \times 10^{-3} + 0,5(1,694 - 1,0432 \times 10^{-3}) = 0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para o estado 2 a pressão é conhecida. A outra propriedade necessária para a determinação do estado é o volume específico v_2. O volume e a massa são ambos constantes, e então $v_2 = v_1 = 0,8475$ m³/kg. Para $p_2 = 1,5$ bar, a Tabela A-3 fornece $v_{f2} = 1,0582 \times 10^{-3}$ e $v_{g2} = 1,59$ m³/kg. Uma vez que

❶
$$v_{f2} < v_2 < v_{g2}$$

❷ o estado 2 deve se encontrar da mesma forma na região bifásica. O estado 2 é também mostrado no diagrama T–v dado.

(a) Uma vez que os estados 1 e 2 se encontram na região bifásica líquido-vapor, as temperaturas correspondem às temperaturas de saturação nas pressões dadas. A Tabela A-3 fornece

$$T_1 = 99,63°\text{C} \qquad \text{e} \qquad T_2 = 111,4°\text{C}$$

(b) Para achar a massa de vapor d'água presente, utilizamos inicialmente o volume e o volume específico para determinar a massa *total*, m. Assim,

$$m = \frac{V}{v} = \frac{0,5 \text{ m}^3}{0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,59 \text{ kg}$$

Dessa forma, a partir da Eq. 3.1 e do título dado, a massa de vapor no estado 1 é

$$m_{g1} = x_1 m = 0,5(0,59 \text{ kg}) = 0,295 \text{ kg}$$

A massa de vapor no estado 2 é encontrada de forma similar utilizando o título x_2. Para determinar x_2, resolvemos a Eq. 3.2 para o título e utilizamos dados de volume específico da Tabela A-3 para a pressão de 1,5 bar, juntamente com os valores dados de v, como a seguir

$$x_2 = \frac{v - v_{f2}}{v_{g2} - v_{f2}} = \frac{0,8475 - 1,0528 \times 10^{-3}}{1,159 - 1,0528 \times 10^{-3}} = 0,731$$

Então, com a Eq. 3.1

$$m_{g2} = 0,731(0,59 \text{ kg}) = 0,431 \text{ kg}$$

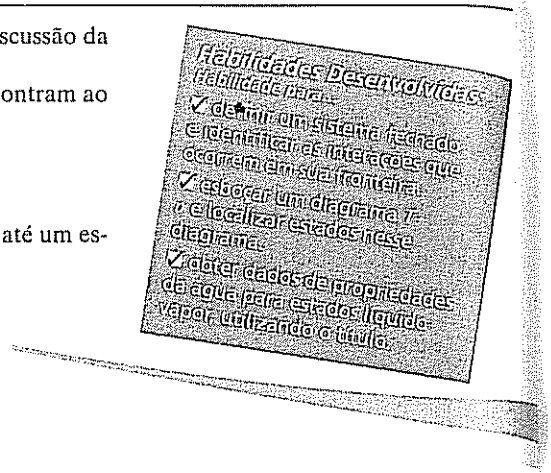
(c) Prosseguindo o processo de aquecimento o estado 3 estaria na linha de vapor saturado, como ilustrado no diagrama T–v. Dessa forma, a pressão seria a pressão de saturação correspondente. Interpolando na Tabela A-3 para $v_g = 0,8475$ m³/kg, obtemos $p_3 = 2,11$ bar.

③ O procedimento para a determinação do estado 2 é o mesmo apresentado na discussão da Fig. 3.8.
④ Uma vez que o processo ocorre a volume específico constante, os estados se encontram ao longo de uma linha vertical

Teste-Relâmpago

Prosseguindo o aquecimento com volume específico constante a partir do estado 3 até um estado onde a pressão é de3 bar, determine a temperatura nesse estado.

Resposta: 282°C



3.6 Avaliando a Energia Interna Específica e a Entalpia

3.6.1 Apresentando a Entalpia

entalpia

Em diversas análises termodinâmicas a soma da energia interna U com o produto da pressão p pelo volume V se faz presente. Uma vez que a soma $U + pV$ vai aparecer tão freqüentemente em discussões futuras, é conveniente dar a essa combinação um nome, ***entalpia***, e um símbolo específico, H. Por definição

$$H = U + pV \tag{3.3}$$

Como U, p e V são todas propriedades, essa combinação é também uma propriedade. A entalpia pode ser expressa em base mássica

$$h = u + pv \tag{3.4}$$

e em base molar

$$\bar{h} = \bar{u} + p\bar{v} \tag{3.5}$$

As unidades de entalpia são as mesmas utilizadas para a energia interna.

3.6.2 Obtendo os valores de *u* e *h*

As tabelas de propriedades apresentadas na Seção 3.5 fornecem valores de pressão, volume específico e temperatura e também valores de energia interna específica u, entalpia h e entropia s. A utilização dessas tabelas para avaliar u e h é descrita na presente seção; a consideração da entropia é postergada até sua apresentação no Cap. 6.

Os dados para energia interna específica u e a entalpia h são obtidos a partir das tabelas de propriedades, da mesma forma que o volume específico. Para estados de saturação os valores de u_f e u_g, assim como de h_f e h_g, são tabelados em função da pressão de saturação e da temperatura de saturação. A energia interna específica para uma mistura bifásica líquido-vapor é calculada para um dado título da mesma forma que o volume específico é calculado

$$u = (1 - x)u_f + xu_g = u_f + x(u_g - u_f) \tag{3.6}$$

O aumento de energia interna específica durante a vaporização $(u_g - u_f)$ é geralmente representado por u_{fg}. De forma similar, a entalpia específica de uma mistura bifásica líquido-vapor é dada em termos do título por

$$h = (1 - x)h_f + xh_g = h_f + x(h_g - h_f) \tag{3.7}$$

O aumento de entalpia durante a vaporização $(h_g - h_f)$ é normalmente tabelado por conveniência sob o símbolo h_{fg}.

➥ **POR EXEMPLO...** para ilustrar o uso das Eqs. 3.6 e 3.7, determinamos a entalpia específica do Refrigerante 22 quando sua temperatura é 12°C e sua energia interna específica é 144,58 kJ/kg. De acordo com a Tabela A-7, os valores dados de energia interna se encontram entre u_f e u_g a 12°C; dessa forma, o estado se encontra na região bifásica líquido-vapor. O título da mistura é encontrado

utilizando-se a Eq. 3.6 e os dados da Tabela A-7, como se segue:

$$x = \frac{u - u_f}{u_g - u_f} = \frac{144{,}58 - 58{,}77}{230{,}38 - 58{,}77} = 0{,}5$$

Dessa forma, com os valores da Tabela A-7, a Eq. 3.7 fornece

$$\begin{aligned} h &= (1 - x)h_f + xh_g \\ &= (1 - 0{,}5)(59{,}35) + 0{,}5(253{,}99) = 156{,}67 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Nas tabelas de vapor superaquecido u e h são tabelados juntamente com v como função da temperatura e pressão. **POR EXEMPLO...** avaliemos T, v e h para água a 0,10 MPa e uma energia interna específica de 2537,3 kJ/kg. Voltando à Tabela A-3, note que o valor dado de u é superior a u_g a 0,1 MPa (u_g = 2506,1 kJ/kg). Esse fato sugere que o estado se encontra na região de vapor superaquecido. A partir da Tabela A-4 obtemos $T = 120°C$, $v = 1{,}793$ m³/kg e $h = 2716{,}6$ kJ/kg. De forma alternativa, a definição de h relaciona h e u

$$\begin{aligned} h &= u + pv \\ &= 2537{,}3\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(10^5\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)\left(1{,}793\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)\left|\frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}\right| \\ &= 2537{,}3 + 179{,}3 = 2716{,}6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Como outro exemplo, considere água em um dado estado definido por uma pressão igual a 14,7 lbf/in² e uma temperatura de 250°F. Da Tabela A-4E, $v = 28{,}42$ ft³/lb, $u = 1091{,}5$ Btu/lb e $h = 1168{,}8$ Btu/lb. Como já descrito anteriormente, h pode ser calculado a partir de u. Então

$$\begin{aligned} h &= u + pv \\ &= 1091{,}5\frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + \left(14{,}7\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}\right)\left(28{,}42\frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}\right)\left|\frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2}\right|\left|\frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}}\right| \\ &= 1091{,}5 + 77{,}3 = 1168{,}8 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

Dados de energia interna e de entalpia específicos para estados de líquido da água são apresentados na Tabela A-5. O formato dessas tabelas é o mesmo das de vapor superaquecido consideradas anteriormente. Dessa forma, valores de propriedades para estado de líquido são obtidos da mesma maneira que para estados de vapor.

Para a água, as Tabelas A-6 fornecem as propriedades de equilíbrio de sólidos saturados e de vapor saturado. A primeira coluna lista a temperatura e a segunda fornece a pressão de saturação correspondente. Esses estados estão em pressões e temperaturas *inferiores* às do ponto triplo. As duas colunas que se seguem fornecem o volume específico do sólido saturado, v_i, e do vapor saturado, v_g, respectivamente. A tabela também fornece valores de energia interna específica, entalpia e entropia para o sólido saturado e para o vapor saturado em cada uma das temperaturas listadas.

Bio... conexões

O que as tripulações de vôos militares, os personagens fantasiados em parques temáticos e os atletas têm em comum? Eles compartilham uma necessidade de evitar sobrecarga térmica enquanto executam seu dever, trabalho ou passatempo. Para satisfazer a essa necessidade foram desenvolvidas *vestimentas com sistemas de refrigeração*, tais como coletes térmicos e colarinhos térmicos. As vestimentas com sistemas de refrigeração podem se caracterizar por bolsas de gelo inseridas, canais pelos quais um líquido refrigerante circula, *materiais de mudança de fase* encapsulados ou uma combinação desses itens. Um exemplo familiar de um material de mudança de fase, conhecido também por PCM (*phase-change material*), é o gelo, o qual na fusão a 0°C absorve cerca de 334 kJ/kg de energia.

A vestimenta com PCM encapsulado, quando utilizada próxima ao corpo, absorve a energia da pessoa que está trabalhando ou se exercitando em um ambiente quente enquanto a mantém fresca. Na especificação de um PCM para uma vestimenta com sistemas de refrigeração o material deve mudar de fase na temperatura operacional de resfriamento desejada. Hidrocarbonetos conhecidos como *parafinas* são freqüentemente utilizados para tal finalidade. Muitos sistemas de refrigeração disponíveis atualmente empregam contas de PCM com diâmetros pequenos, até de 0,5 μm, encapsuladas em uma estrutura feita de um polímero resistente. Materiais de mudança de fase encapsulados também podem ser encontrados em outros produtos.

3.6.3 Estados de Referência e Valores de Referência

Os valores de u, h e s fornecidos pelas tabelas de propriedades não são obtidos a partir de medidas diretas, mas são calculados a partir de outros dados mais facilmente determinados de maneira experimental. Os procedimentos de cálculo requerem o uso da segunda lei da termodinâmica, assim a consideração desses procedimentos é adiada para o Cap. 11, após a segunda lei ter sido apresentada.

estados de referência
valores de referência

Entretanto, uma vez que u, h e s são calculados, a questão de ***estados de referência*** e de ***valores de referência*** se torna importante e será discutida de forma breve nos parágrafos que se seguem

Quando balanços de energia são aplicados as *diferenças* de energia interna, cinética e potencial entre dois estados é que são importantes, e *não* os valores dessas quantidades de energia em cada um desses dois estados. ⇨ **POR EXEMPLO...** Considere o caso da energia potencial. O valor numérico da energia potencial medida em relação à superfície da Terra é diferente do valor relativo ao topo de um edifício no mesmo local. Entretanto, a diferença de energia potencial entre duas elevações diferentes é exatamente a mesma a despeito do referencial utilizado, uma vez que o valor do referencial é cancelado durante o cálculo. ⇦

De forma similar, podem-se atribuir valores à energia interna específica e à entalpia em relação a valores de referência arbitrários em estados de referência arbitrários. Como para o caso da energia potencial considerado anteriormente, a utilização de valores de uma propriedade particular determinados em relação a uma referência arbitrária é única, desde que os cálculos feitos envolvam somente diferenças dessa propriedade para as quais o valor de referência se cancela. Entretanto, quando reações químicas acontecem entre as substâncias consideradas deve-se dar atenção especial para a questão dos estados e valores de referência. Uma discussão de como valores de propriedades são atribuídos quando da análise de sistemas reativos é apresentada no Cap. 13.

Os valores tabelados de u e h para a água, a amônia, o propano e os Refrigerantes 22 e 134a fornecidos no Apêndice são relativos aos estados e valores de referência comentados a seguir. Para a água, o estado de referência é o de líquido saturado a 0,01°C (32,02°F). Nesse estado a energia interna específica é considerada zero. Valores da entalpia específica são calculados a partir de $h = u + pv$, utilizando os valores tabelados de p, v e u. Para a amônia, o propano e os refrigerantes o estado de referência é o de líquido saturado a −40°C (−40°F para as tabelas em unidades inglesas). Para esse estado de referência a entalpia específica é considerada zero. Valores de energia interna específica são calculados a partir de $u = h - pv$ utilizando os valores tabelados de p, v e h. Deve-se notar, na Tabela A-7, que isso leva a um valor negativo para a energia interna no estado de referência, o que enfatiza que o importante não são os valores numéricos atribuídos a u e h em um dado estado, mas sim as *diferenças* dessas propriedades entre estados. Os valores atribuídos a um estado são modificados se o estado de referência ou o valor de referência se altera, mas sua diferença permanece a mesma.

3.7 Avaliando Propriedades Utilizando Programas de Computador

A utilização de programas de computador para a avaliação de propriedades termodinâmicas está se tornando prática comum na engenharia. Os programas de computador podem ser definidos em duas categorias: aqueles que fornecem dados somente para estados individuais e aqueles que fornecem dados de propriedades como parte de um pacote de simulação mais geral. A ferramenta *Interactive Thermodynamics*: *IT* pode ser utilizada não somente para a solução de problemas comuns, fornecendo dados em estados específicos, mas também para simulação e análise. Outros programas, além do *IT*, também podem ser utilizados com esses propósitos. Veja o boxe para uma análise do software usado em termodinâmica.

O *IT* fornece dados para as substâncias que constam das tabelas do Apêndice. De forma geral os dados são obtidos a partir de declarações simples que são inseridas no espaço de trabalho do programa. ⇨ **POR EXEMPLO...** considere a mistura bifásica líquido-vapor no estado 1 do Exemplo 3.2 para o qual $p = 1$ bar, $v = 0{,}8475$ m³/kg. A seguir, uma descrição de como os dados para temperatura de saturação, título e energia interna específica são obtidos utilizando-se o *IT*. As funções para T, v e u são obtidas pela escolha da opção Água/Vapor d'água (Water/Steam) do menu de propriedades (**Properties**). Escolhendo unidades SI do menu de Unidades (**Units**), com p em bar, T em °C e a quantidade da substância em kg, o programa *IT* se torna

```
p = 1//bar
v = 0,8475//m^3/kg
T = Tsat_P("Water/Steam",p)
v = vsat_Px("Water/Steam",p,x)
u = usat_Px("Water/Steam",p,x)
```

Pressionando o botão de Resolver (**Solve**), o programa fornece os valores de $T = 99{,}63$°C, $x = 0{,}5$ e $u = 1462$ kJ/kg. Esses valores podem ser verificados utilizando-se dados da Tabela A-3. Note que o texto inserido entre o símbolo // e o final da linha é considerado como comentário. ⇦

O exemplo anterior ilustra uma importante característica do *IT*. Embora o título, x, esteja implícito na lista de argumentos na expressão para o volume específico, não há necessidade de resolver a expressão algebricamente para x. Em lugar dessa resolução algébrica o programa pode calcular x enquanto o número de equações for igual ao número de incógnitas.

Utilizando Programas de Computador em Termodinâmica

Programas de computador, tais como o ***Interactive Thermodynamics: IT*** ou similares, podem ser utilizados como ferramentas de auxílio para o aprendizado da termodinâmica aplicada à engenharia e para a solução de problemas de engenharia. O *IT* é construído em torno de um programa que atua na solução de equações e é aprimorado com dados de propriedades termodinâmicas e outras características valiosas. A partir do *IT* pode-se obter uma solução numérica singular ou variar parâmetros para investigar seus efeitos. Pode-se obter também uma saída gráfica e utilizar qualquer processador de texto do Windows ou planilhas eletrônicas para gerar relatórios. Além disso, funções do *IT* podem ser chamadas a partir do *Excel*, permitindo o uso dessas funções termodinâmicas enquanto se trabalha com o *Excel*. Outras características do *IT* incluem:

- uma série de telas de ajuda guiada e diversos exemplos resolvidos para ajudar a aprender como usar o programa.
- dados que podem ser arrastados (*drag-and-drop*) em muitos tipos de problemas padrões, incluindo uma lista de hipóteses que você pode personalizar para o problema
- cenários predeterminados para usinas e outras aplicações importantes.
- dados de propriedades termodinâmicas para a água, os refrigerantes 22 e 134a, a amônia, misturas água-vapor d'água e um número de gases ideais.
- a capacidade de entrar com dados do usuário.
- a capacidade de utilizar rotinas do usuário

Muitas características do *IT* são encontradas no conhecido *Engineering Equation Solver (EES)*. Leitores habituados com o *EES* podem preferir utilizá-lo na solução dos problemas deste livro.

A utilização de programas de computador em análises de engenharia se constitui em uma poderosa ferramenta. Entretanto, algumas regras devem ser observadas:

- Programas de computador *complementam* e *ampliam* análises cuidadosas, mas não as substituem.
- Valores obtidos a partir de programas de computador devem ser verificados seletivamente com outros calculados manualmente ou, ainda, de forma alternativa, determinados de forma independente
- Gráficos gerados por computador devem ser analisados de forma a verificar se as curvas parecem razoáveis e se exibem as tendências esperadas.

O *IT* também fornece valores de propriedades na região de vapor superaquecido. ⇨ **POR EXEMPLO...** considere o vapor superaquecido de amônia no estado 2 do Exemplo 3.1, para o qual p = 20 lbf/in² e T = 77°F. Selecionando amônia (*Ammonia*) do menu de Propriedades (**Properties**) e escolhendo unidades inglesas no menu de Unidades (**Units**), valores de volume específico, energia interna e entalpia são obtidos a partir do *IT* como se segue:

```
p = 20//lbf/in^2
T = 77//°F
v = v_PT("Ammonia",p,T)
u = u_PT("Ammonia",p,T)
h = h_PT("Ammonia",p,T)
```

Pressionando o botão de Resolver (**Solve**), o programa fornece os valores de v = 16,67 ft³/lb, u = 593,7 Btu/lb e h = 655,3 Btu/lb, respectivamente. Esses valores estão de acordo com os valores correspondentes obtidos através de interpolação da Tabela A-15E. ⇦

3.8 Aplicando o Balanço de Energia Usando Propriedades Tabeladas e Programas de Computador

Nos Exemplos 3.3 e 3.4, sistemas fechados submetidos a processos são analisados utilizando o balanço de energia. Em cada caso, esboços dos diagramas p–v e/ou T–v são utilizados em conjunto com as tabelas apropriadas para obter os dados de propriedades necessários. A utilização de diagramas de propriedades e tabelas introduz um nível adicional de complexidade quando comparado com problemas similares do Cap. 2.

Exemplo 3.3 AGITANDO ÁGUA A VOLUME CONSTANTE

Um tanque isolado e rígido com um volume de 10 ft³ (0,28 m³) contém vapor d'água saturado a 212°F (100°C). A água é rapidamente misturada até uma pressão de 20 lbf/in² (137,9 kPa). Determine a temperatura no estado final, em °F, e o trabalho realizado durante o processo, em Btu.

Solução

Dado: através de agitação rápida, vapor d'água em um tanque isolado e rígido é levado de um estado de vapor saturado a 212°F a uma pressão de 20 lbf/in².

Pede-se: determine a temperatura no estado final e o trabalho realizado.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

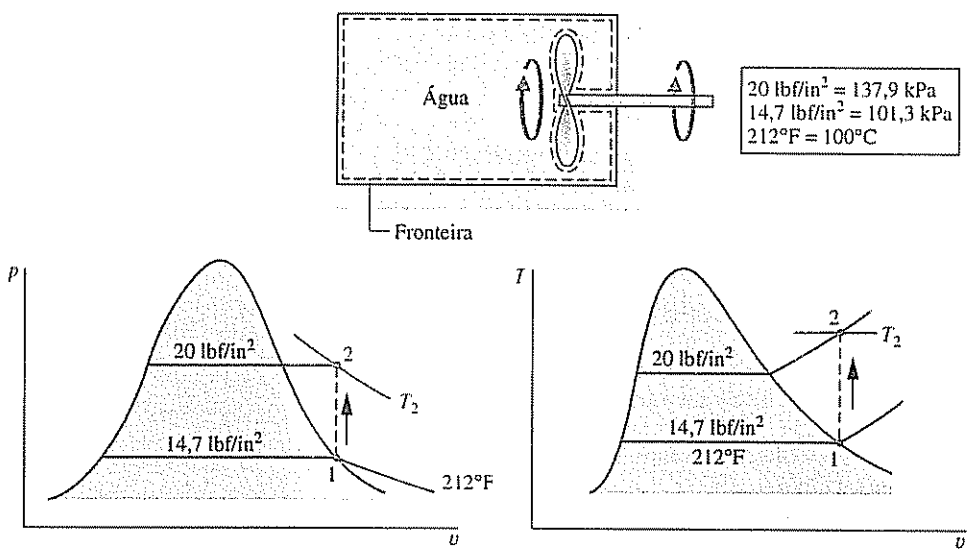


Fig. E3.3

Modelo de Engenharia:

1. A água constitui um sistema fechado.
2. Os estados inicial e final são estados de equilíbrio. Não ocorrem variações das energias cinética e potencial.
3. Não ocorre transferência de calor para a vizinhança.
4. O volume do tanque permanece constante.

Análise: para determinar o estado final de equilíbrio são necessários os valores de duas propriedades intensivas independentes. Uma delas é a pressão, $p_2 = 20$ lbf/in², e a outra é o volume específico: $v_2 = v_1$. Os volumes específicos inicial e final são iguais, uma vez que a massa total e o volume total permanecem inalterados durante o processo. Os estados final e inicial estão representados nos diagramas T–v e p–v correspondentes.

Da Tabela A-2E, $v_1 = v_g(212°F) = 26{,}80$ ft³/lb, $u_1 = u_g(212°F) = 1077{,}6$ Btu/lb. Utilizando $v_2 = v_1$ e interpolando na Tabela A-4E para $p_2 = 20$ lbf/in²

$$T_2 = 445°F, \qquad u_2 = 1161{,}6 \text{ Btu/lb}$$

A seguir, com as hipóteses 2 e 3 o balanço de energia para o sistema se reduz a

$$\Delta U + \Delta \cancel{KE}^{0} + \Delta \cancel{PE}^{0} = \cancel{Q}^{0} - W$$

Reescrevendo,

$$W = -(U_2 - U_1) = -m(u_2 - u_1)$$

Para avaliar W é necessário avaliar a massa do sistema. Esta pode ser determinada a partir do volume e do volume específico

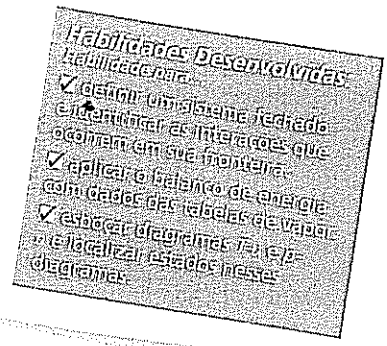
$$m = \frac{V}{v_1} = \left(\frac{10 \text{ ft}^3}{26{,}8 \text{ ft}^3/\text{lb}}\right) = 0{,}373 \text{ lb}$$

Finalmente, substituindo os valores na expressão para W,

$$W = -(0{,}373 \text{ lb})(1161{,}6 - 1077{,}6) \text{ Btu/lb} = -31{,}3 \text{ Btu}$$

onde o sinal negativo significa que a transferência de energia através de trabalho é realizada para o sistema.

⓫ Embora os estados inicial e final sejam de equilíbrio, os estados intermediários não o são. Para enfatizar este aspecto o processo foi indicado nos diagramas T–v e p–v por linhas tracejadas. Linhas cheias em diagramas de propriedades são reservadas a processos que passam somente por estados de equilíbrio (processos de quase-equilíbrio). A análise mostra a importância de se esboçar cuidadosamente os diagramas de propriedades como ferramenta auxiliar na resolução de problemas.



Teste-Relâmpago

Determine a transferência de calor, em Btu, se o isolamento fosse removido do tanque e a água resfriada a volume constante de $T_2 = 445°F$ (229,4°C) a $T_3 = 300°F$ (148,9°C).

Resposta: −19,5 Btu

Exemplo 3.4 ANALISANDO DOIS PROCESSOS EM SÉRIE

Água contida em um conjunto cilindro-pistão é submetida a dois processos em série a partir de um estado inicial, onde a pressão é de 10 bar e a temperatura é 400°C.

Processo 1-2: a água é resfriada à medida que é comprimida a uma pressão constante a partir de 10 bar até alcançar o estado de vapor saturado.

Processo 2-3: a água é resfriada a volume constante até 150°C.

(a) Esboce ambos os processos em diagramas T–v e p–v.
(b) Determine o trabalho para o processo global, em kJ/kg.
(c) Determine a quantidade de calor transferida para o processo global, em kJ/kg.

Solução

Dado: água contida em um conjunto cilindro-pistão é submetida a dois processos: é resfriada e comprimida enquanto a pressão é mantida constante, e posteriormente é resfriada a volume constante.

Pede-se: esboce os processos em diagramas T–v e p–v. Determine o trabalho líquido e a quantidade de calor líquida transferida para o processo global por unidade de massa contida no conjunto cilindro-pistão.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

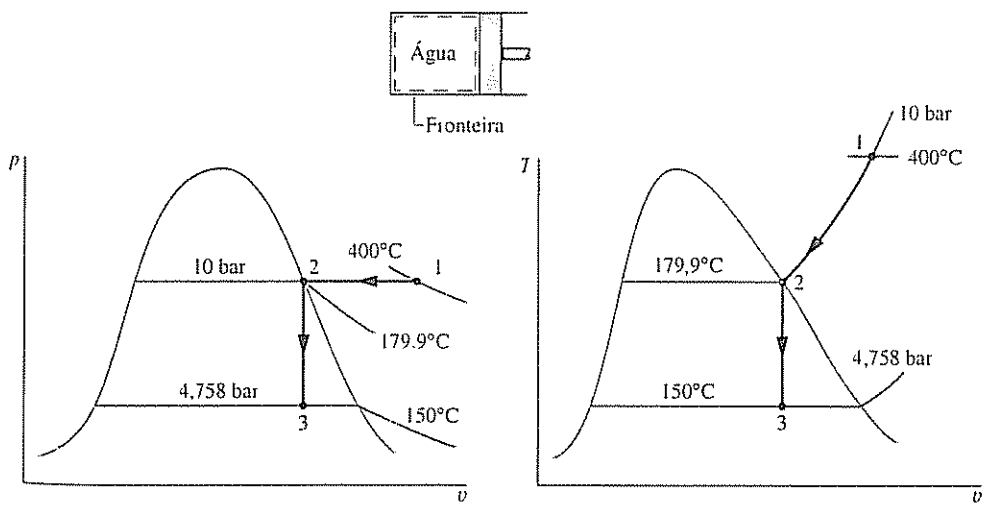


Fig. E3.4

Modelo de Engenharia:

1. A água constitui um sistema fechado.
2. O trabalho relacionado ao movimento do pistão é o único modo de trabalho presente.
3. Não ocorrem variações da energia cinética ou potencial.

Análise:

(a) Os diagramas T–v e p–v correspondentes mostram os dois processos. Uma vez que a temperatura no estado 1, $T_1 = 400°C$, é superior à temperatura de saturação correspondente a $p_1 = 10$ bar: 179,9°C, o estado 1 se encontra na região de vapor superaquecido.

(b) Uma vez que o trabalho relacionado ao movimento do pistão é o único presente,

$$W = \int_1^3 p\,dV = \int_1^2 p\,dV + \int_2^3 p\,dV^{0}$$

A segunda integral se anula, já que o volume é constante durante o Processo 2-3. Dividindo pela massa e utilizando o fato de que a pressão é constante no Processo 1-2,

$$\frac{W}{m} = p(v_2 - v_1)$$

O volume específico no estado 1 é obtido da Tabela A-4 utilizando $p_1 = 10$ bar e $T_1 = 400°C$: $v_1 = 0{,}3066$ m³/kg. Além disso, $u_1 = 2957{,}3$ kJ/kg. O volume específico no estado 2 possui o valor de vapor saturado a 10 bar: $v_2 = 0{,}1944$ m³/kg, a partir da Tabela A-3. Então

$$\frac{W}{m} = (10\text{ bar})(0{,}1944 - 0{,}3066)\left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)\left|\frac{10^5\text{ N/m}^2}{1\text{ bar}}\right|\left|\frac{1\text{ kJ}}{10^3\text{ N}\cdot\text{m}}\right|$$
$$= -112{,}2\text{ kJ/kg}$$

O sinal negativo indica que o trabalho é realizado *sobre* o vapor d'água pelo pistão.

(c) O balanço de energia para o processo *global* se reduz a

$$m(u_3 - u_1) = Q - W$$

Rearranjando,

$$\frac{Q}{m} = (u_3 - u_1) + \frac{W}{m}$$

O cálculo da quantidade de calor transferida requer que se saiba o valor de u_3, a energia interna específica no estado 3. Como T_3 é dada e $v_3 = v_2$, duas propriedades intensivas independentes são conhecidas e, em conjunto, determinam o estado 3. Para achar u_3, primeiro resolvemos para o título

$$x_3 = \frac{v_3 - v_{f3}}{v_{g3} - v_{f3}} = \frac{0{,}1944 - 1{,}0905 \times 10^{-3}}{0{,}3928 - 1{,}0905 \times 10^{-3}} = 0{,}494$$

onde v_{f3} e v_{g3} são obtidos da Tabela A-2 a 150°C. Então,

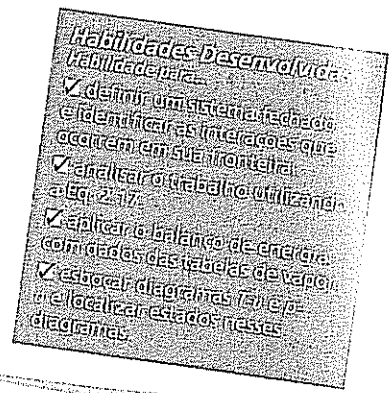
$$u_3 = u_{f3} + x_3(u_{g3} - u_{f3}) = 631{,}68 + 0{,}494(2559{,}5 - 631{,}98)$$
$$= 1583{,}9\text{ kJ/kg}$$

onde u_{f3} e u_{g3} são obtidos da Tabela A-2 a 150°C.

Substituindo os valores no balanço de energia

$$\frac{Q}{m} = 1583{,}9 - 2957{,}3 + (-112{,}2) = -1485{,}6\text{ kJ/kg}$$

O sinal negativo indica que energia é transferida *para fora* do sistema devido à transferência de calor.



Teste-Relâmpago

Considerando que após os dois processos especificados ocorre o Processo 3-4, durante o qual a água passa por um processo de expansão à temperatura constante de 150°C até o estado de vapor saturado, determine o trabalho, em kJ/kg, para o processo *global* de 1 a 4.

Resposta: −17,8 kJ/kg

O Exemplo 3.5 apresenta a utilização do *Interactive Thermodynamics: IT* para a solução de problemas. Nesse caso o programa avalia os dados de propriedade, calcula os resultados e os apresenta graficamente. Outros programas similares podem ser usados para a obtenção da solução apresentada

Exemplo 3.5 REPRESENTANDO GRAFICAMENTE DADOS TERMODINÂMICOS UTILIZANDO PROGRAMAS DE COMPUTADOR

Para o sistema do Exemplo 3.2, represente graficamente a quantidade de calor transferida, em kJ, e a massa de vapor saturado presente, em kg, como função da pressão no estado 2 que varia de 1 a 2 bar. Discuta os resultados.

Solução

Dado: uma mistura bifásica líquido-vapor de água em um reservatório rígido e fechado é aquecida sobre uma placa aquecida. A pressão e o título iniciais e a pressão final são conhecidos. A pressão no estado final varia de 1 a 2 bar.

Pede-se: represente graficamente a quantidade de calor transferida e a massa de vapor saturado presente, ambos em função da pressão no estado final. Discuta.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos: veja a Fig. E3.2.

Modelo de Engenharia:

1. Não há trabalho realizado.
2. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.
3. Veja o Exemplo 3.2 para outras hipóteses.

Análise: A quantidade de calor transferida é obtida a partir do balanço de energia. Com as hipóteses 1 e 2, o balanço de energia se reduz a

$$\Delta U + \Delta \cancelto{0}{KE} + \Delta \cancelto{0}{PE} = Q - \cancelto{0}{W}$$

ou

$$Q = m(u_2 - u_1)$$

Selecionando Água/Vapor d'água no menu de Propriedades (**Properties**) e selecionando unidades SI no menu de Unidades (**Units**), o programa *IT* para o cálculo dos dados necessários e a construção dos gráficos fica

```
// Given data—State 1
   p1 = 1//bar
   x1 = 0.5
   V = 0.5//m^3
// Evaluate property data—State 1
   v1 = vsat_Px("Water/Steam", p1,x1)
   u1 = usat_Px("Water/Steam", p1,x1)
// Calculate the mass
   m = V/v1
// Fix state 2
   v2 = v1
   p2 = 1.5//bar
// Evaluate property data—State 2
   v2 = vsat_Px("Water/Steam", p2,x2)
   u2 = usat_Px("Water/Steam", p2,x2)
// Calculate the mass of saturated vapor present
   mg2 = x2 * m
// Determine the pressure for which the quality is unity
   v3 = v1
   v3 = vsat_Px( "Water/Steam" ,p3,1)
// Energy balance to determine the heat transfer
   m * (u2 - u1) = Q - W
   W = 0
```

Pressione o botão de Resolver (**Solve**) para obter a solução para $p_2 = 1{,}5$ bar. O programa fornece os valores de $v_1 = 0{,}8475$ m³/kg e $m = 0{,}59$ kg. Além disso, a $p_2 = 1{,}5$ bar, o programa fornece $m_{g2} = 0{,}4311$ kg. Esses valores estão de acordo com aqueles obtidos no Exemplo 3.2.

Uma vez que o código computacional foi verificado, utilize o botão de Exploração (**Explore**) para variar a pressão de 1 a 2 bar em intervalos de 0,1 bar. Em seguida, utilize o botão de Exibir (**Graph**) para construir os gráficos pedidos. Os resultados podem ser vistos na Fig. E3.5.

Podemos concluir do primeiro desses gráficos que a quantidade de calor transferida para a água varia diretamente com a pressão. O gráfico de m_g mostra que a massa de vapor d'água saturado presente também aumenta à medida que a pressão aumenta. Esses resultados estão de acordo com os resultados esperados para o processo.

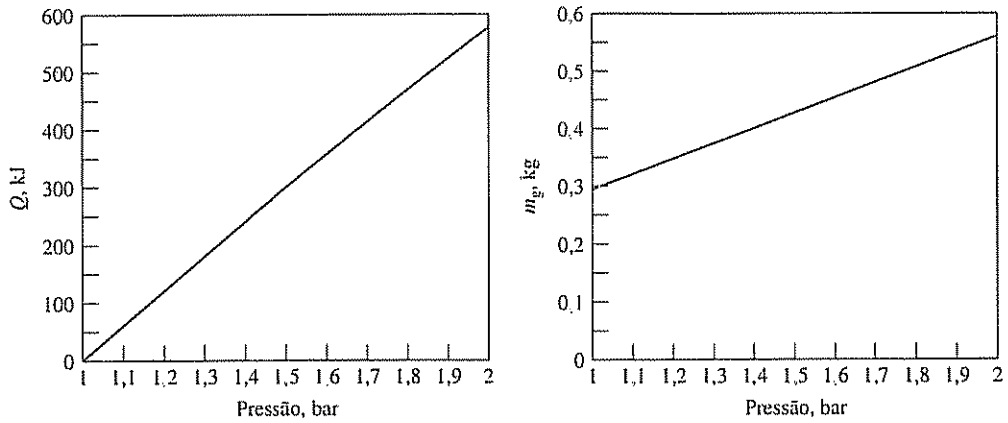


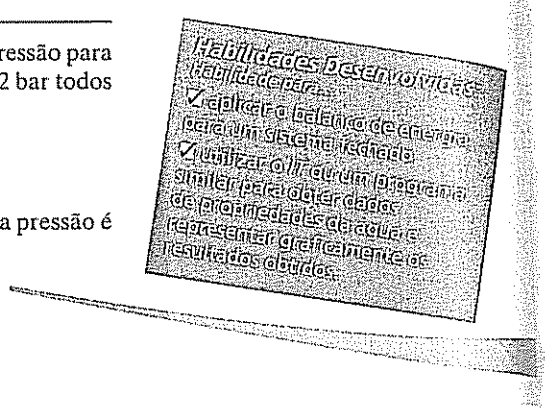
Fig. E3.5

Utilizando o botão de Navegar (**Browse**), a solução computacional indica que a pressão para a qual o título se torna unitário é 2,096 bar. Assim, para pressões variando de 1 a 2 bar todos os estados estão na região bifásica líquido-vapor.

Teste-Relâmpago

Prosseguindo o aquecimento com volume específico constante até um estado onde a pressão é 3 bar, modifique o programa *IT* para obter a temperatura nesse estado, em °C.

Resposta:
```
v4 = v1
p4 = 3 //bar
v4 = v_PT ("Water/Steam", p4, T4)
T4 = 282,4°C
```



3.9 Apresentando os Calores Específicos c_v e c_p

Diversas propriedades relacionadas à energia interna são importantes em termodinâmica. Uma dessas propriedades é a entalpia, apresentada na Seção 3.6.1. Duas outras, conhecidas como *calores específicos*, são consideradas nesta seção. Os calores específicos são particularmente úteis para cálculos termodinâmicos que envolvam o *modelo de gás ideal* a ser apresentado na Seção 3.12.

As propriedades intensivas c_v e c_p são definidas para substâncias simples compressíveis puras em termos de derivadas parciais das funções $u(T, v)$ e $h(T, p)$, respectivamente, como

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \tag{3.8}$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \tag{3.9}$$

onde os subscritos v e p representam, respectivamente, as variáveis mantidas fixas durante a diferenciação. Valores de c_v e c_p podem ser obtidos através de mecânica estatística utilizando medições em *espectrômetros*. Eles também podem ser determinados macroscopicamente através de medidas precisas de propriedades. Uma vez que u e h podem ser expressos em base mássica ou em base molar, os valores de calores específicos podem ser expressos de modo semelhante. Em unidades SI tem-se kJ/kg · K ou kJ/kmol · K. Em unidades inglesas tem-se Btu/lb · °R ou Btu/lbmol °R.

A propriedade k, denominada *razão de calores específicos*, é simplesmente a razão

$$k = \frac{c_p}{c_v} \tag{3.10}$$

calores específicos

As propriedades c_v e c_p são denominadas ***calores específicos*** (ou capacidades térmicas) uma vez que, sob certas *condições especiais*, relacionam a variação de temperatura de um sistema com a quantidade de calor adicionado por transferência de calor. Entretanto, geralmente é preferível pensar em c_v e c_p em termos de suas definições, Eqs. 3.8 e 3.9, e não em termos da limitada interpretação que envolve a transferência de calor.

Em geral, c_v é uma função de v e T (ou p e T) e c_p é uma função de p e T (ou v e T). A Fig. 3.9 apresenta como c_p para vapor d'água varia em função da temperatura e da pressão. As fases de vapor de outras substâncias exibem um comportamento semelhante. Note que a figura fornece a variação de c_p com a temperatura no limite de pressão tendendo a zero. Ao longo desse limite c_p aumenta à medida que a temperatura aumenta, o que é uma característica também apresentada por outros gases. Esses valores de *pressão zero* para c_v e c_p serão novamente mencionados na Seção 3.13.2.

Dados de calores específicos estão disponíveis para gases, líquidos e sólidos de uso comum. Dados para gases são apresentados na Seção 3.13.2 como parte da discussão sobre o modelo de gás ideal. Valores de calor específico para alguns líquidos e sólidos de uso comum são apresentados na Seção 3.10.2 como parte da discussão sobre o modelo de substância incompressível.

3.10 Avaliando Propriedades de Líquidos e Sólidos

Métodos especiais freqüentemente podem ser utilizados para avaliar propriedades de líquidos e sólidos. Esses métodos fornecem aproximações simples, embora precisas, que não requerem levantamentos exatos como as das tabelas de líquido comprimido para a água, Tabelas A-5. Dois desses métodos são apresentados a seguir: aproximações utilizando dados de líquido saturado e o modelo de substância incompressível.

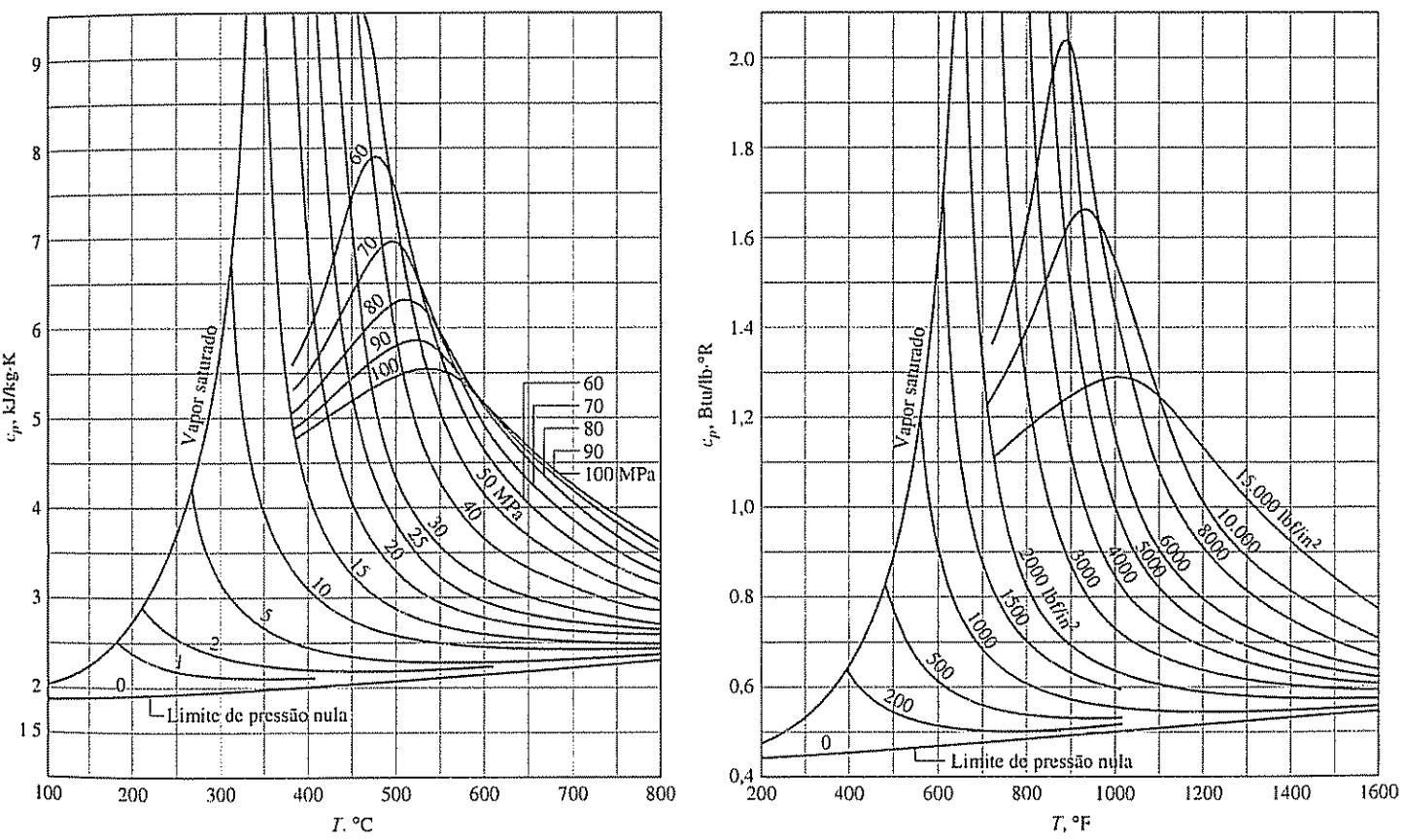


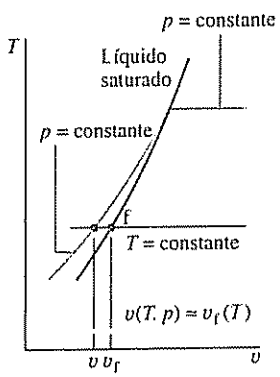
Fig. 3.9 c_p do vapor d'água como função da temperatura e da pressão

3.10.1 Aproximações para Líquidos Utilizando Dados de Líquido Saturado

Valores aproximados para v, u e h para estados líquidos podem ser obtidos utilizando dados de líquido saturado. Para ilustrar, utilizemos as tabelas de líquido comprimido, Tabelas A-5. Essas tabelas mostram que o volume específico e a energia interna específica variam muito pouco com a pressão *para uma temperatura fixa*. Como os valores de v e u variam apenas levemente à medida que a pressão se altera para uma temperatura fixa, as aproximações a seguir são razoáveis para muitos cálculos de engenharia:

$$v(T, p) \approx v_f(T) \tag{3.11}$$

$$u(T, p) \approx u_f(T) \tag{3.12}$$



Isto é, para líquidos v e u podem ser avaliados no estado de líquido saturado correspondente à temperatura no dado estado.

Um valor aproximado de h para estados de líquido pode ser obtido utilizando as Eqs. 3.11 e 3.12 na definição $h = u + pv$; então

$$h(T, p) \approx u_f(T) + pv_f(T)$$

Essa relação pode ser expressa alternativamente por

$$h(T, p) \approx h_f(T) + \underline{v_f(T)[p - p_{sat}(T)]} \tag{3.13}$$

onde p_{sat} representa a pressão de saturação a uma dada temperatura. O desenvolvimento da expressão é deixado como exercício. Quando a contribuição do termo sublinhado da Eq. 3.13 é pequena, a entalpia específica pode ser aproximada pelo valor do líquido saturado, da mesma forma que para v e u. Isto é,

$$h(T, p) \approx h_f(T) \tag{3.14}$$

Embora as aproximações dadas tenham sido apresentadas em relação à água líquida, elas também fornecem aproximações apropriadas para outras substâncias *quando os únicos dados de líquido disponíveis são para estados de líquido saturado*. No presente texto, dados para líquido comprimido são apresentados somente para água (Tabelas A-5). Note ainda que o *Interactive Thermodynamics: IT* não fornece dados de líquido comprimido para *qualquer* substância, mas utiliza as Eqs. 3.11, 3.12 e 3.14 para avaliar, respectivamente, os valores de v, u e h. Quando uma precisão maior que a fornecida pelas aproximações for necessária, outras fontes de dados devem ser consultadas para a obtenção de conjuntos mais completos de propriedades da substância considerada.

3.10.2 Modelo de Substância Incompressível

modelo de substância incompressível

Conforme foi abordado anteriormente, existem regiões onde o volume específico da água líquida pouco varia e que a energia interna específica varia principalmente com a temperatura. O mesmo comportamento geral é apresentado pelas fases líquidas de outras substâncias e por sólidos. As aproximações das Eqs. 3.11 a 3.14 se baseiam nessas observações, assim como o ***modelo de substância incompressível*** aqui considerado.

Para simplificar os cálculos envolvendo líquidos e sólidos geralmente assume-se que o volume específico (massa específica) seja constante e que a energia interna específica varie somente com a temperatura. Uma substância idealizada sob essas hipóteses é denominada *incompressível*.

Uma vez que a energia interna específica de uma substância modelada como incompressível depende somente da temperatura, o calor específico c_v é também uma função exclusiva da temperatura

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \qquad \text{(incompressível)} \tag{3.15}$$

Esta expressão utiliza uma derivada ordinária, já que u depende somente de T.

Embora o volume específico seja constante e a energia interna dependa somente da temperatura, a entalpia varia com a pressão e com a temperatura de acordo com

$$h(T, p) = u(T) + pv \qquad \text{(incompressível)} \tag{3.16}$$

Para uma substância modelada como incompressível os calores específicos c_v e c_p são iguais. Isso é observado pela derivação da Eq. 3.16 com relação à temperatura, enquanto a pressão é mantida constante para obter

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = \frac{du}{dT}$$

O lado esquerdo desta expressão corresponde a c_p por definição (Eq. 3.9) e, utilizando a Eq. 3.15 no lado direito, temos

$$c_p = c_v \qquad \text{(incompressível)} \tag{3.17}$$

Então, para uma substância incompressível não é necessária a distinção entre c_p e c_v, e ambos podem ser representados pelo mesmo símbolo, c. Os calores específicos de alguns líquidos e sólidos de uso comum são fornecidos, em função da temperatura, nas Tabelas A-19. Ao longo de intervalos limitados de temperatura a variação de c com a temperatura pode ser pequena. Nesses casos, o calor específico c pode ser tratado como constante sem significativa perda de precisão.

Utilizando as Eqs. 3.15 e 3.16 as variações da energia interna específica e da entalpia específica entre dois estados são dadas, respectivamente, por

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T)\,dT \qquad \text{(incompressível)} \qquad (3.18)$$

$$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + v(p_2 - p_1)$$
$$= \int_{T_1}^{T_2} c(T)\,dT + v(p_2 - p_1) \qquad \text{(incompressível)} \qquad (3.19)$$

Se o calor específico c for tomado como constante, as Eqs. 3.18 e 3.19 se tornam, respectivamente,

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1) \qquad \text{(incompressível, } c \text{ constante)} \qquad (3.20a)$$
$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + \underline{v(p_2 - p_1)} \qquad (3.20b)$$

Na Eq. 3.20*b* o termo sublinhado é geralmente pequeno com relação ao primeiro termo do lado direito, e pode ser desprezado.

O próximo exemplo ilustra o uso do modelo de substância incompressível em uma aplicação envolvendo o calorímetro a volume constante discutido na Seção 2.5.1.

Exemplo 3.6 MEDINDO O VALOR DA CALORIA DO ÓLEO DE COZINHA

Um décimo de mililitro de óleo de cozinha é colocado na câmara de um calorímetro a volume constante com oxigênio suficiente para que o óleo seja completamente queimado. A câmara se encontra imersa em um banho de água, cuja massa é de 2,15 kg. Para atingir o objetivo desta análise as partes de metal do aparato são modeladas como equivalentes a um adicional de 0,5 kg de água. O calorímetro é perfeitamente isolado, e inicialmente está a 25°C. O óleo é inflamado eletricamente. Quando o equilíbrio é novamente alcançado a temperatura é de 25,3°C. Determine a variação da energia interna dos conteúdos da câmara em kcal por ml de óleo de cozinha e em kcal por colher de sopa de óleo de cozinha.

Solução

Dado: são fornecidos os dados relativos a um calorímetro a volume constante que testa óleo de cozinha para obter seu valor calórico.

Pede-se: determine a variação da energia interna dos conteúdos da câmara do calorímetro.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

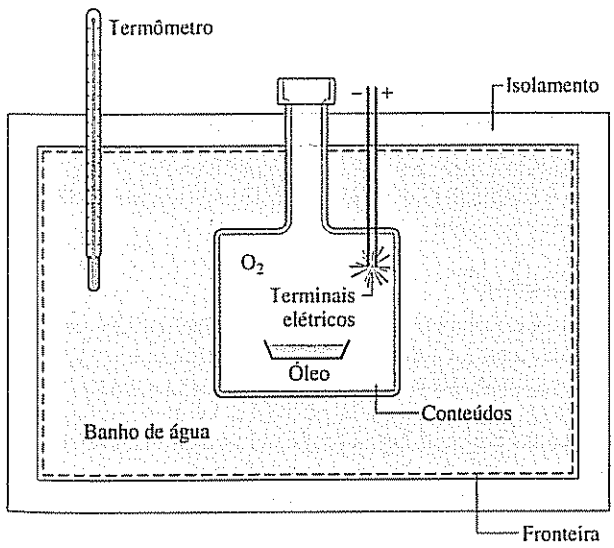


Fig. E3.6

Modelo de Engenharia:

1. O sistema fechado está ilustrado pela linha pontilhada na figura correspondente.
2. O volume total permanece constante, inclusive a câmara, o banho e a quantidade de água utilizada como modelo para as partes metálicas.
3. A água é modelada como fluido incompressível com calor específico constante c.
4. A transferência de calor relativa à vizinhança é desprezível, e não há variações com relação à energia cinética ou potencial.

Análise: com as hipóteses listadas, o balanço de energia do sistema fechado fica

$$\Delta U + \cancel{\Delta KE}^{0} + \cancel{\Delta PE}^{0} = \cancel{Q}^{0} - \cancel{W}^{0}$$

ou

$$(\Delta U)_{conteúdos} + (\Delta U)_{água} = 0$$

desse modo

$$(\Delta U)_{conteúdos} = -(\Delta U)_{água} \tag{a}$$

A variação da energia interna dos conteúdos é igual e oposta à variação da energia interna da água.

Como a água é modelada como incompressível, a Eq. 3.20*a* é utilizada para analisar o lado direito da Eq. (a), fornecendo

$$(\Delta U)_{conteúdos} = -m_a c_a (T_2 - T_1) \tag{b}$$

Com $m_a = 2{,}15\ \text{kg} + 0{,}5\ \text{kg} = 2{,}65\ \text{kg}$, $(T_2 - T_1) = 0{,}3\ \text{K}$, e $c_a = 4{,}18\ \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ da Tabela A-19, a Eq. (b) fornece

$$(\Delta U)_{conteúdos} = -(2{,}65\ \text{kg})(4{,}18\ \text{kJ/kg} \cdot \text{K})(0{,}3\ \text{K}) = -3{,}32\ \text{kJ}$$

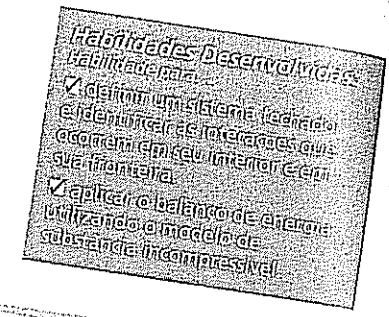
Convertendo para kcal e expressando o resultado por milímetro de óleo utilizando o volume de óleo, de 0,1 ml, obtemos

$$\frac{(\Delta U)_{conteúdos}}{V_{óleo}} = \frac{-3{,}32\ \text{kJ}}{0{,}1\ \text{mL}} \left| \frac{1\ \text{kcal}}{4{,}1868\ \text{kJ}} \right| = -7{,}9\ \text{kcal/mL}$$

O valor da caloria do óleo de cozinha é da magnitude de 7,9 kcal/ml. Os rótulos dos recipientes com óleo de cozinha usualmente fornecem o valor da caloria considerando o tamanho de uma colher de sopa (15 ml). Utilizando o valor calculado, obtemos 119 kcal por colher de sopa.

① A variação da energia interna da água pode ser obtida de forma alternativa utilizando a Eq. 3.12, juntamente com os dados relativos à energia interna para um líquido saturado obtidos da Tabela A-2.

② A variação da energia interna dos conteúdos da câmara não pode ser avaliada utilizando calor específico, porque os calores específicos são definidos (Seção 3.9) apenas para substâncias *puras* — ou seja, substâncias que possuem composição invariável.



Teste-Relâmpago

Utilizando a Eq. 3.12 juntamente com os dados relativos à energia interna para um líquido saturado obtidos da Tabela A-2, obtenha a variação da energia interna da água, em kJ, e compare com os valores obtidos admitindo que a água é incompressível.

Resposta: 3,32 kJ

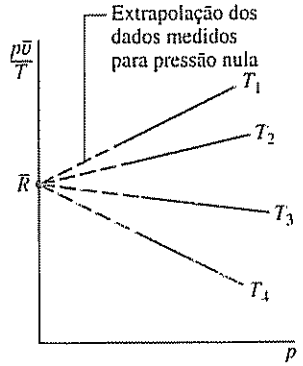


Fig. 3.10 Esboço de $p\bar{v}/T$ em função da pressão para um gás considerando diferentes valores de temperatura.

3.11 Diagrama Generalizado de Compressibilidade

O objetivo da presente seção é o de obter uma melhor compreensão das relações entre pressão, volume específico e temperatura para gases. Isso é importante não somente como uma base para análises envolvendo gases, mas também para discussões da segunda parte deste capítulo, onde o *modelo de gás ideal* é apresentado. A presente discussão é conduzida em termos do *fator de compressibilidade*, e começa pela introdução da *constante universal dos gases*.

3.11.1 Constante Universal dos Gases, $\bar{R}$

Considere um gás confinado em um cilindro por um pistão e o conjunto mantido a uma temperatura constante. O pistão pode ser movimentado para diversas posições, de forma que uma série de estados de equilíbrio pode ser visitada a uma temperatura constante. Suponha que a pressão e o volume específico sejam medidos em cada estado e o valor da razão $p\bar{v}/T$ ($\bar{v}$ é o volume por mol) seja determinado. Essas razões podem ser colocadas em uma forma gráfica em função da pressão para uma temperatura constante. Os resultados para diversas temperaturas são esboçados na Fig. 3.10. Quando as razões são extrapoladas para o valor de pressão nula *exatamente o mesmo valor-limite é obtido* para cada curva. Isto é,

$$\lim_{p \to 0} \frac{p\bar{v}}{T} = \bar{R} \tag{3.21}$$

onde $\bar{R}$ representa o limite comum para todas as temperaturas. Se esse procedimento fosse repetido para outros gases veríamos em todos os casos que o limite da razão $p\bar{v}/T$, à medida que p tende a zero para uma temperatura fixa, é o mesmo e é denominado $\bar{R}$. Como o mesmo valor-limite é apresentado para todos os gases, $\bar{R}$ é denominada ***constante universal dos gases***. O seu valor obtido experimentalmente é

constante universal dos gases

$$\bar{R} = \begin{cases} 8{,}314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 1{,}986 \text{ Btu/lbmol} \cdot {}^\circ\text{R} \\ 1545 \text{ ft} \cdot \text{lbf/lbmol} \cdot {}^\circ\text{R} \end{cases} \tag{3.22}$$

Tendo apresentado a constante universal dos gases, analisa-se a seguir o fator de compressibilidade

3.11.2 Fator de Compressibilidade, Z

fator de compressibilidade

A razão adimensional $p\bar{v}/\bar{R}T$ é denominada ***fator de compressibilidade***, e é representada por Z. Isto é,

$$Z = \frac{p\bar{v}}{\bar{R}T} \tag{3.23}$$

Como mostrado em cálculos a serem apresentados, quando valores de p, $\bar{v}$, $\bar{R}$ e T são utilizados em unidades consistentes Z é adimensional.

Com $\bar{v} = Mv$ (Eq. 1.9), onde M representa o peso atômico ou molecular, o fator de compressibilidade pode ser expresso de modo alternativo como

$$Z = \frac{pv}{RT} \tag{3.24}$$

onde

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \tag{3.25}$$

R é uma constante para um gás particular cujo peso molecular é M. Alternativamente, as unidades para R são kJ/kg · K, Btu/lb · °R e ft · lbf/lb · °R. A Tabela 3.1 fornece uma amostra de valores da constante R para alguns gases, calculada a partir da Eq. 3.25.

A Eq. 3.21 pode ser expressa em termos do fator de compressibilidade como

$$\lim_{p \to 0} Z = 1 \tag{3.26}$$

Isto é, o fator de compressibilidade Z tende a ser unitário à medida que a pressão tende a zero para uma temperatura fixa. Isso pode ser ilustrado observando-se a Fig. 3.11, que mostra Z para o hidrogênio como função da pressão para diferentes temperaturas. Em geral, nos estados de um gás em que a pressão é pequena com relação à pressão crítica Z é aproximadamente 1.

3.11.3 Dados Generalizados de Compressibilidade, Diagrama Z

A Fig. 3.11 apresenta o fator de compressibilidade para o hidrogênio em função da pressão para um dado valor de temperatura. Diagramas semelhantes podem ser construídos para outros gases. Quando esses diagramas são estudados observa-se uma semelhança *qualitativa* entre eles. Um estudo mais profundo mostra que quando as coordenadas são apropriadamente modificadas, curvas para diferentes gases quase coincidem quando representadas graficamente nos mesmos eixos coordenados em conjunto. Dessa forma, uma semelhança *quantitativa* pode ser alcançada. Esse fato é denominado *princípio de estados correspondentes*. Nesse tipo de abordagem o fator de compressibilidade

Tabela 3.1

Valores da constante R do gás para Elementos e Compostos Selecionados

Substância	Fórmula Química	R (kJ/kg · K)	R (Btu/lb · °R)
Água	H_2O	0,4614	0,11021
Amônia	NH_3	0,4882	0,11662
Ar	—	0,2870	0,06855
Argônio	Ar	0,2082	0,04972
Dióxido de carbono	CO_2	0,1889	0,04513
Hélio	He	2,0769	0,49613
Hidrogênio	H_2	4,1240	0,98512
Metano	CH_4	0,5183	0,12382
Monóxido de carbono	CO	0,2968	0,07090
Nitrogênio	N_2	0,2968	0,07090
Oxigênio	O_2	0,2598	0,06206

Fonte: os valores de R são calculados em termos da constante universal dos gases $\bar{R}$ = 8,314 kJ/kmol · K = 1,986 Btu/lbmol · °R e do peso molecular M obtido da Tabela A-1 utilizando $R = \bar{R}/M$ (Eq. 3.25).

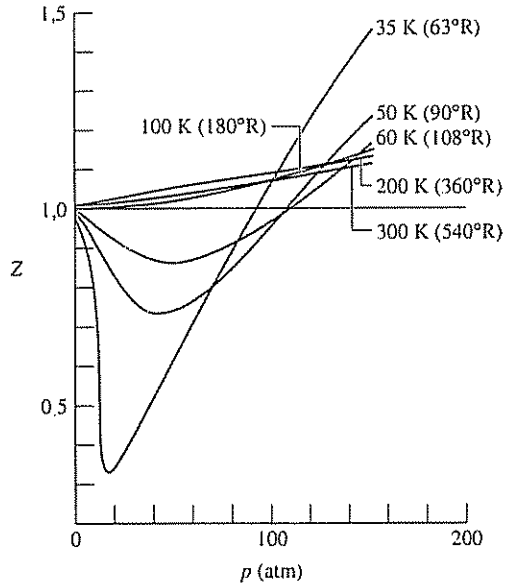


Fig. 3.11 Variação do fator de compressibilidade com a pressão a temperatura constante para o hidrogênio

pressão e temperatura reduzidas

Z é representado graficamente como função da ***pressão reduzida*** p_R e da ***temperatura reduzida*** T_R, adimensionais definidas como

$$p_R = p/p_c \tag{3.27}$$

$$T_R = T/T_c \tag{3.28}$$

diagrama generalizado de compressibilidade

onde p_c e T_c representam a pressão e a temperatura crítica, respectivamente. Isso resulta em um ***diagrama generalizado de compressibilidade*** da forma $Z = f(p_R, T_R)$. A Fig. 3.12 mostra dados experimentais para 10 diferentes gases em um diagrama desse tipo. As linhas cheias, que correspondem a isotermas reduzidas, representam as melhores curvas ajustadas aos dados.

Um diagrama generalizado mais apropriado que o da Fig. 3.12 para a resolução de problemas é apresentado no Apêndice como as Figs. A-1, A-2 e A-3. Na Fig. A-1 p_R varia de 0 a 1,0; na Fig. A-2 p_R varia de 0 a 10,0; e na Fig. A-3 p_R varia de 10,0 a 40,0. Para qualquer temperatura o desvio entre os dados medidos e aqueles do diagrama generalizado aumenta com a pressão. Entretanto, para os 30 gases utilizados no desenvolvimento do diagrama o desvio é *no máximo* da ordem de 5%, e para

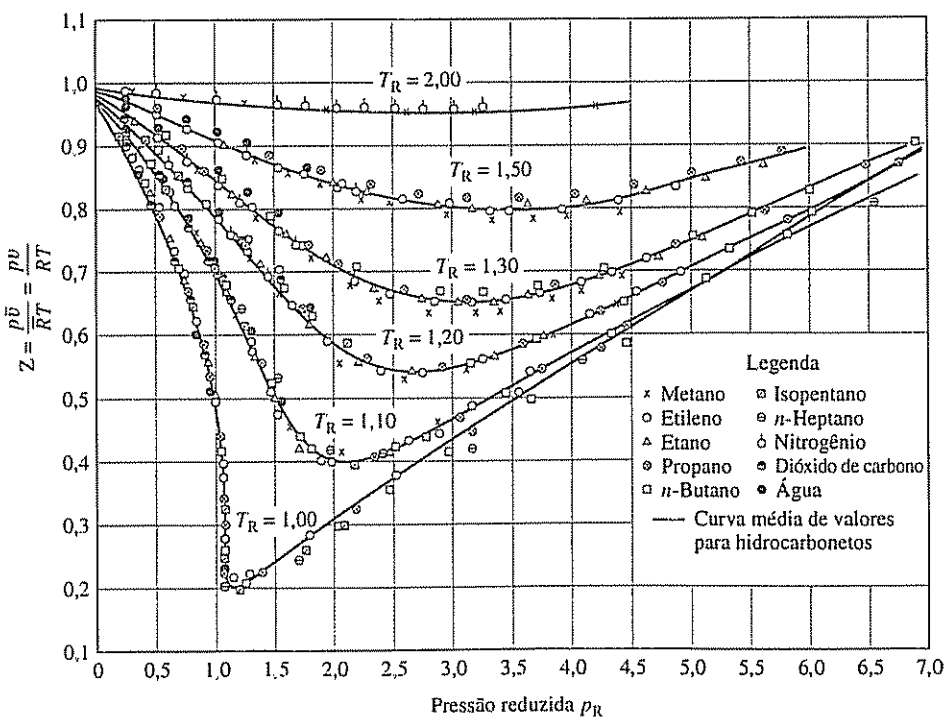


Fig. 3.12 Diagrama generalizado de compressibilidade para vários gases.

a maioria dos intervalos muito é inferior a este valor.[1] A partir das Figs. A-1 e A-2 pode-se ver que o valor de Z tende à unidade para todas as temperaturas à medida que a pressão tende a zero, o que está de acordo com a Eq. 3.26. A Fig. A-3 mostra que Z também se aproxima de um valor unitário para todas as pressões em temperaturas elevadas.

Valores de volume específico são incluídos no diagrama generalizado de compressibilidade através da variável v'_R, denominada ***volume específico pseudo-reduzido*** e definida por

volume específico pseudo-reduzido

$$v'_R = \frac{\bar{v}}{\bar{R}T_c/p_c} \tag{3.29}$$

Para propósitos de correlações, o volume específico pseudo-reduzido se mostra mais apropriado que o volume específico *reduzido* $v_R = \bar{v}/\bar{v}_c$, onde $\bar{v}_c$ é o volume específico crítico. A partir da pressão e da temperatura críticas de uma substância de interesse, o diagrama generalizado pode ser utilizado com diversos pares das variáveis T_R, p_R e v'_R: (T_R, p_R), (p_R, v'_R) ou (T_R, v'_R). As Tabelas A-1 listam as constantes críticas para diversas substâncias.

O mérito do diagrama generalizado para a avaliação de p, v e T para gases está relacionado à simplicidade em conjunto com a precisão. Entretanto, o diagrama generalizado de compressibilidade não deve ser utilizado como um substituto para os dados p–v–T de uma substância fornecidos por uma tabela ou programa de computador. O diagrama é útil principalmente para a obtenção de estimativas razoáveis na ausência de dados mais precisos.

O exemplo a seguir fornece uma ilustração do uso do diagrama generalizado de compressibilidade.

Exemplo 3.7 UTILIZANDO O DIAGRAMA GENERALIZADO DE COMPRESSIBILIDADE

Um tanque rígido e fechado, repleto de vapor d'água, inicialmente a 20 MPa, 520°C, é resfriado até que sua temperatura atinja 400°C. Utilizando o diagrama de compressibilidade, determine

(a) o volume específico do vapor d'água em m³/kg no estado inicial.
(b) a pressão em MPa no estado final.

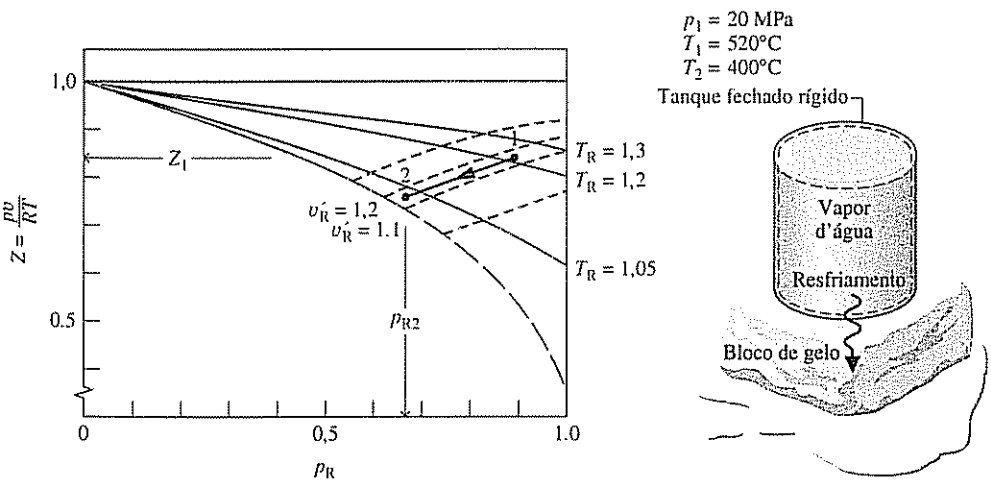
Compare os resultados dos itens (a) e (b) com os valores obtidos das tabelas de vapor superaquecido, Tabela A-4.

Solução

Dado: vapor d'água é resfriado a volume constante de 20 MPa, 520°C a 400°C

Pede-se: utilize o diagrama de compressibilidade e as tabelas de vapor superaquecido para determinar o volume específico e a pressão final e compare os resultados.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O vapor d'água constitui um sistema fechado.
2. Os estados inicial e final estão em equilíbrio.
3. O volume é constante.

Fig. E3.7

[1]Para determinar Z acima de T_R igual a 5 para o hidrogênio, o hélio e para o neon, a temperatura e a pressão reduzidas devem ser calculadas utilizando-se $T_R = T/(T_c + 8)$ e $p_R = p/(p_c + 8)$, com as temperaturas em K e as pressões em atm.

Análise:

(a) Da Tabela A-1, $T_c = 647{,}3$ K e $p_c = 22{,}09$ MPa para a água. Então,

$$T_{R1} = \frac{793}{647{,}3} = 1{,}23, \qquad p_{R1} = \frac{20}{22{,}09} = 0{,}91$$

Com esses valores para a temperatura reduzida e a pressão reduzida o valor de Z obtido da Fig. A-1 é aproximadamente 0,83. Uma vez que $Z = pv/RT$, o volume específico no estado 1 pode ser determinado do seguinte modo:

$$v_1 = Z_1 \frac{RT_1}{p_1} = 0{,}83\frac{\overline{R}T_1}{Mp_1}$$

$$= 0{,}83\left(\frac{8314\ \frac{\text{N m}}{\text{kmol K}}}{18{,}02\ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}\right)\left(\frac{793\ \text{K}}{20 \times 10^6\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}\right) = 0{,}0152\ \text{m}^3/\text{kg}$$

O peso molecular da água é obtido da Tabela A-1.

De acordo com a Tabela A-4, o volume específico no estado inicial é 0,01551 m³/kg. Esse valor concorda com o valor obtido com o diagrama de compressibilidade, como esperado.

(b) Uma vez que a massa e o volume permanecem constantes, o vapor d'água é resfriado a volume específico constante e, dessa forma, a v'_R constante. Utilizando o valor de volume específico determinado no item (a), o valor constante de v'_R é

$$v'_R = \frac{vp_c}{RT_c} = \frac{\left(0{,}0152\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)\left(22{,}09 \times 10^6\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}{\left(\frac{8314}{18{,}02}\frac{\text{N m}}{\text{kg K}}\right)(647{,}3\ \text{K})} = 1{,}12$$

No estado 2

$$T_{R2} = \frac{673}{647{,}3} = 1{,}04$$

Localizando o ponto no diagrama de compressibilidade onde $v'_R = 1{,}12$ e $T_R = 1{,}04$, o valor correspondente de p_R se encontra em torno de 0,69. Assim,

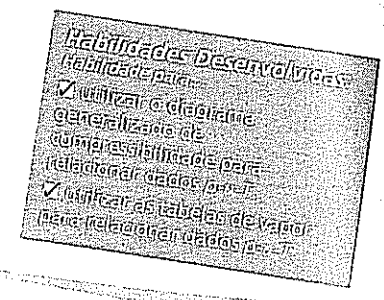
$$p_2 = p_c(p_{R2}) = (22{,}09\ \text{MPa})(0{,}69) = 15{,}24\ \text{MPa}$$

Interpolando nas tabelas de vapor superaquecido obtém-se $p_2 = 15{,}16$ MPa. Como antes, o valor obtido a partir do diagrama de compressibilidade se encontra em boa concordância com o valor tabelado.

---

⑪ A temperatura *absoluta* e a pressão *absoluta* devem ser utilizadas na determinação do fator de compressibilidade Z, da temperatura reduzida T_R e da pressão reduzida p_R.

⑫ Uma vez que Z é adimensional, valores de p, v, R e T devem ser utilizados em unidades compatíveis.



Teste-Relâmpago

Utilizando o diagrama de compressibilidade, determine o volume específico, em m³/kg, para o vapor d'água a 14 MPa, 440°C. Compare com o valor da tabela de vapor.

Resposta: 0,0195 m³/kg

3.11.4 Equações de Estado

Considerando as curvas das Figs. 3.11 e 3.12, é razoável pensar que a variação do fator de compressibilidade com a pressão e a temperatura para gases pode ser expressa como uma equação, pelo menos para alguns intervalos de p e T. Duas expressões que contemplam uma base teórica podem ser escritas. Uma fornece o fator de compressibilidade como uma expansão em série infinita em termos da pressão:

$$Z = 1 + \hat{B}(T)p + \hat{C}(T)p^2 + \hat{D}(T)p^3 + \qquad (3.30)$$

onde os coeficientes $\hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \ldots$ dependem somente da temperatura. As reticências na Eq. 3.30 representam termos de ordem superior. A outra expressão é uma série inteiramente análoga à Eq. 3.30, mas expressa em termos de $1/\overline{v}$ em vez de p.

$$Z = 1 + \frac{B(T)}{\bar{v}} + \frac{C(T)}{\bar{v}^2} + \frac{D(T)}{\bar{v}^3} + \cdots \tag{3.31}$$

As Eqs. 3.29 e 3.30 são conhecidas como ***equações viriais de estado***, e os coeficientes $\hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \ldots$ e $B, C, D, \ldots$ são denominados *coeficientes viriais*. A palavra *virial* origina-se da palavra latina para força. No presente uso está relacionada com interações de força entre moléculas

equações viriais de estado

As expansões viriais podem ser derivadas por métodos da mecânica estatística, e pode-se atribuir sentido físico aos coeficientes: $B/\bar{v}$ está relacionado a interações entre duas moléculas, $C/\bar{v}^2$ está relacionado a interações entre três moléculas, etc. Em princípio, os coeficientes viriais podem ser calculados pelo uso de expressões da mecânica estatística derivada da consideração dos campos de forças ao redor das moléculas de um gás. Os coeficientes viriais também podem ser determinados a partir de dados p–v–T experimentais. As expansões viriais são utilizadas na Seção 11.1 como ponto de partida para a continuação dos estudos de representações analíticas das relações p–v–T de gases conhecidas genericamente como *equações de estado*.

As expansões viriais e o significado físico atribuído aos termos que compõem as expansões podem ser utilizados para explicar a natureza do comportamento-limite de um gás à medida que a pressão tende a zero para uma dada temperatura. Da Eq. 3.30 pode ser visto que se a pressão decresce a uma temperatura constante os termos $\hat{B}p, \hat{C}p^2$, etc. que consideram as diversas interações moleculares tendem a ser reduzidos, sugerindo que as forças de interação se tornam mais fracas sob essas circunstâncias. No limite da pressão tendendo a zero esses termos se anulam, e a equação se reduz a $Z = 1$, o que se encontra de acordo com a Eq. 3.26. De forma semelhante, como o volume aumenta à medida que a pressão diminui para uma temperatura fixa os termos $B/\bar{v}$, $C/\bar{v}^2$, etc. da Eq. 3.31 também se anulam no limite, levando a $Z = 1$ quando as forças de interação entre as moléculas não são mais significativas.

Avaliando Propriedades com o Uso do Modelo de Gás Ideal

3.12 Apresentando o Modelo de Gás Ideal

Nesta seção é apresentado o modelo de gás ideal. Esse modelo tem muitas aplicações na prática de engenharia, e é freqüentemente utilizado nas seções que se seguem após este texto.

3.12.1 A Equação de Estado de Gás Ideal

Conforme foi discutido na Seção 3.11, o estudo do diagrama generalizado de compressibilidade, tal como a Fig. A-2, mostra que para os estados onde a pressão p é pequena em relação à pressão crítica p_c (baixa p_R) e/ou a temperatura T é elevada em relação à temperatura crítica T_c (elevada T_R) o fator de compressibilidade, $Z = pv/RT$, é próximo de 1. Nesses estados, podemos admitir com uma precisão aceitável que $Z = 1$, ou

$$pv = RT \tag{3.32}$$

A segunda parte deste capítulo, fundamentada no modelo de gás ideal, está vinculada à Eq. 3.32, que é conhecida como a ***equação de estado de gás ideal***.

equação de estado de gás ideal

Formas alternativas da mesma relação básica entre pressão, volume específico e temperatura são obtidas como se segue. Com $v = V/m$, a Eq. 3.32 pode ser expressa como

$$pV = mRT \tag{3.33}$$

Além disso, uma vez que $v = \bar{v}/M$ e $R = \bar{R}/M$, Eqs. 1.9 e 3.25, respectivamente, onde M é o peso molecular, a Eq. 3.32 pode ser expressa como

$$p\bar{v} = \bar{R}T \tag{3.34}$$

ou, com $\bar{v} = V/n$, como

$$pV = n\bar{R}T \tag{3.35}$$

3.12.2 Modelo de Gás Ideal

Para qualquer gás cuja equação de estado seja dada *exatamente* por $pv = RT$ a energia interna específica depende *somente* da temperatura. Essa conclusão é demonstrada formalmente na Seção 11.4. Observações experimentais também suportam essa conclusão, iniciando com o trabalho de Joule,

que mostrou, em 1843, que a energia interna do ar em baixa massa específica depende basicamente da temperatura. Uma motivação adicional, a partir de um ponto de vista microscópico, será fornecida em breve. A entalpia específica de um gás descrito por $pv = RT$ também depende somente da temperatura, como pode ser mostrado pela combinação da definição de entalpia, $h = u + pv$, com $u = u(T)$, e a equação de estado de gás ideal para obter $h = u(T) + RT$. Tomadas em conjunto, essas especificações constituem o ***modelo de gás ideal***, que é resumido a seguir:

modelo de gás ideal

$$pv = RT \tag{3.32}$$

$$u = u(T) \tag{3.36}$$

$$h = h(T) = u(T) + RT \tag{3.37}$$

A energia interna específica e a entalpia de gases geralmente dependem de duas propriedades independentes — e não somente da temperatura, como estabelecido pelo modelo de gás ideal. Além disso, a equação de estados dos gases perfeitos não fornece uma aproximação aceitável para todos os estados. Conseqüentemente, a utilização do modelo de gás ideal depende do erro aceitável para um dado cálculo. Não obstante, gases geralmente se *aproximam* do comportamento de gás ideal, e uma descrição particularmente simplificada é obtida com o modelo de gás ideal.

Para verificar se um gás pode ser modelado como um gás ideal, estados de interesse podem ser localizados em um diagrama de compressibilidade de forma a determinar o desvio em relação à condição de $Z = 1$. Como mostrado em discussões posteriores, outros dados de propriedades em forma de gráficos ou tabelas podem também ser utilizados na determinação da aplicabilidade do modelo de gás ideal.

O próximo exemplo ilustra a utilização da equação de estado de gás ideal e reforça o uso dos diagramas de propriedades para localizar os principais estados durante processos.

Tome Nota

Para o desenvolvimento das soluções de muitos exemplos a seguir e problemas de final de capítulo envolvendo ar, oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e outros gases comuns é indicado no enunciado do problema que o modelo de gás ideal deve ser utilizado. Se essa informação não estiver explicitamente indicada, a aplicabilidade do modelo de gás ideal deve ser verificada utilizando o diagrama Z ou outros dados.

Exemplo 3.8 AR COMO UM GÁS IDEAL SUBMETIDO A UM CICLO

Uma libra (0,45 kg) de ar em um conjunto cilindro-pistão é submetida a um ciclo termodinâmico que consiste em três processos.

Processo 1-2: volume específico constante

Processo 2-3: expansão à temperatura constante

Processo 3-1: compressão à pressão constante

No estado 1 a temperatura é de 540°R (26,8°C) e a pressão é 1 atm. No estado 2, a pressão é de 2 atm. Empregando a equação de estado de gás ideal,

(a) esboce o ciclo em coordenadas p–v.
(b) determine a temperatura no estado 2, em °R.
(c) determine o volume específico no estado 3, em ft^3/lb.

Solução

Dado: ar é submetido a um ciclo termodinâmico composto por três processos: Processo 1-2, $v = constante$; Processo 2-3, $T = constante$; Processo 3-1, $p = constante$. São fornecidos valores para T_1, p_1 e p_2.

Pede-se: esboce o ciclo em coordenadas p–v e determine T_2 e v_3.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

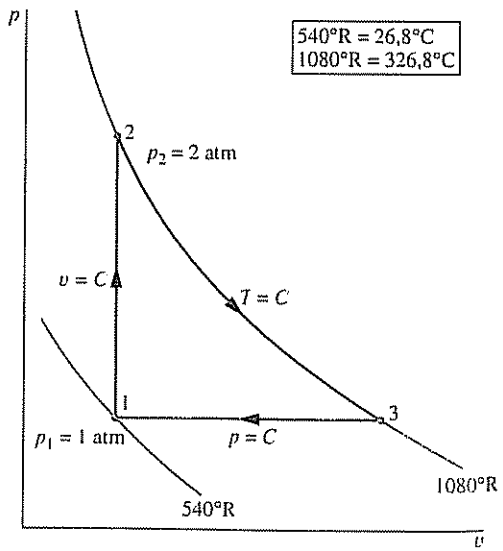


Fig. E3.8

Modelo de Engenharia:

1. O ar constitui um sistema fechado.
2. O ar se comporta como um gás ideal. ⓫
3. O trabalho relacionado à variação de volume é o único modo de trabalho.

Análise:

(a) O ciclo é ilustrado em coordenadas p–v na figura correspondente. Observe que como $p = RT/v$ e a temperatura é constante, a variação de p com v para o processo de 2 para 3 é não-linear.

(b) Utilizando $pv = RT$, a temperatura no estado 2 é

$$T_2 = p_2 v_2 / R$$

Para obter o volume específico v_2 necessário nesta relação, note que $v_2 = v_1$, assim

$$v_2 = RT_1/p_1 \quad ⓬$$

Combinando esses dois resultados, temos

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \left(\frac{2 \text{ atm}}{1 \text{ atm}}\right)(540°\text{R}) = 1080°\text{R}$$

(c) Uma vez que $pv = RT$, o volume específico no estado 3 é

$$v_3 = RT_3/p_3$$

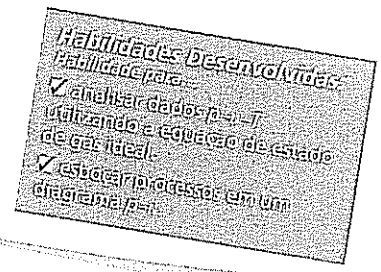
Observando que $T_3 = T_2, p_3 = p_1$ e $R = \bar{R}/M$

$$\begin{aligned} v_3 &= \frac{\bar{R}T_2}{Mp_1} \\ &= \left(\frac{1545 \dfrac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{lbmol} \cdot °\text{R}}}{28{,}97 \dfrac{\text{lb}}{\text{lbmol}}}\right) \frac{(1080°\text{R})}{(14{,}7 \text{ lbf/in}^2)} \left| \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} \right| \\ &= 27{,}2 \text{ ft}^3/\text{lb} \end{aligned}$$

onde o peso molecular do ar é obtido da Tabela A-1E.

ⓕ A Tabela A-1E fornece $p_c = 37{,}2$ atm, $T_c = 239°\text{R}$ para o ar. Então, $p_{R2} = 0{,}054$, $T_{R2} = 4{,}52$. De acordo com a Fig. A-1, o valor do fator de compressibilidade para esse estado é $Z \approx 1$. A mesma conclusão resulta quando os estados 1 e 3 são verificados. Dessa forma, $pv = RT$ descreve de modo adequado a relação p–v–T do ar para esses estados.

⓬ Note cuidadosamente que a equação de estado $pv = RT$ requer a utilização da temperatura *absoluta* T e da pressão *absoluta* p.



Teste-Relâmpago

O ciclo ilustrado na Fig. E3.8 é um ciclo de potência ou um ciclo de refrigeração? Explique.

Resposta: Um ciclo de potência. O trabalho líquido é positivo, conforme representado pela área 1-2-3-1.

3.12.3 Interpretação Microscópica

Uma idéia da dependência da energia interna dos gases com respeito à temperatura para baixos valores de massa específica pode ser obtida a partir da discussão sobre as equações viriais da Seção 3.11. À medida que $p \to 0$ ($v \to \infty$), as forças de interação entre as moléculas de um gás se tornam mais fracas e as expansões viriais se aproximam, no limite, de $Z = 1$. O estudo de gases sob o ponto de vista microscópico mostra que a dependência da energia interna do gás em relação à pressão, ou volume específico, para uma dada temperatura aparece basicamente devido a interações moleculares. Conseqüentemente, à medida que a massa específica de um gás diminui à temperatura constante atinge-se uma situação em que os efeitos das forças intermoleculares se tornam mínimos. A energia interna é então determinada principalmente pela temperatura. Do ponto de vista microscópico o modelo de gás ideal é constituído de várias idealizações: o gás é composto de moléculas que se encontram em movimento randômico e obedecem às leis da mecânica; o número total de moléculas é elevado, entretanto o volume de moléculas corresponde a uma fração desprezível do volume ocupado pelo gás; e não existem forças apreciáveis agindo nas moléculas, exceto durante colisões. Uma discussão adicional sobre o gás ideal com abordagem microscópica é apresentada na Seção 3.13.2.

3.13 Energia Interna, Entalpia e Calores Específicos de Gases Ideais

3.13.1 Relações Δu, Δh, c_v e c_p

Para um gás que obedeça ao modelo de gás ideal, a energia interna específica depende somente da temperatura. Assim, o calor específico c_v, definido pela Eq. 3.8, é também uma função somente da temperatura. Isto é,

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.38}$$

Essa expressão apresenta uma derivada ordinária, já que u depende apenas de T.

Separando variáveis na Eq. 3.38

$$du = c_v(T)\,dT \tag{3.39}$$

Através de integração, a variação da energia interna específica fica

$$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\,dT \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.40}$$

De forma similar, para um gás que se comporta de acordo com o modelo de gás ideal a entalpia específica depende apenas da temperatura, e então o calor específico c_p, definido pela Eq. 3.9, é também uma função exclusiva da temperatura. Isto é,

$$c_p(T) = \frac{dh}{dT} \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.41}$$

Separando variáveis na Eq. 3.41

$$dh = c_p(T)\,dT \tag{3.42}$$

Através de integração, a variação da entalpia específica fica

$$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\,dT \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.43}$$

Uma relação importante entre os calores específicos de um gás ideal pode ser desenvolvida pela diferenciação da Eq. 3.37 em relação à temperatura

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

e, introduzindo as Eqs. 3.38 e 3.41, obtemos

$$c_p(T) = c_v(T) + R \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.44}$$

Em base molar, essa relação pode ser escrita como

$$\bar{c}_p(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.45}$$

Embora cada um dos dois calores específicos de um gás ideal seja função da temperatura, as Eqs. 3.44 e 3.45 mostram que esses calores específicos diferem somente por uma constante: a constante do gás. O conhecimento de qualquer um dos calores específicos de um gás particular permite que o outro seja calculado utilizando-se apenas a constante do gás. As equações citadas também mostram que $c_p > c_v$ e $\bar{c}_p > \bar{c}_v$, respectivamente.

Para um gás ideal, a razão de calores específicos, k, é também uma função somente da temperatura

$$k = \frac{c_p(T)}{c_v(T)} \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.46}$$

Uma vez que $c_p > c_v$, conclui-se que $k > 1$. A combinação das Eqs. 3.44 e 3.46 resulta em

$$c_p(T) = \frac{kR}{k-1} \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.47a}$$

$$c_v(T) = \frac{R}{k-1} \tag{3.47b}$$

O que Fazer com o CO_2?

A concentração de dióxido de carbono na atmosfera é atualmente mais de 30% maior do que nos tempos pré-industriais. Grande parte desse aumento se deve à queima de carvão, óleo e gás natural. Aumentam as evidências de que o excesso de CO_2 na atmosfera contribui para o aquecimento global e para as mudanças climáticas. Há um entendimento crescente de que medidas deveriam ser tomadas para reduzir o CO_2 emitido para a atmosfera.

A redução das emissões de CO_2 pode ser alcançada pelo uso de fontes renováveis de energia, como o vento e o sol, de combustíveis mais eficientes e pela mudança para combustíveis de baixo teor de carbono. Reduções significativas requerem medidas adicionais, incluindo a captura e o armazenamento (*seqüestro*) do dióxido de carbono. Isso envolveria a remoção do CO_2 dos gases de exaustão de usinas, refinarias de óleo e gás e outras fontes industriais, seguida pelo armazenamento do CO_2 capturado. Alguns propõem o armazenamento em reservatórios esgotados de gás e óleo, jazidas de carvão, aqüíferos profundos de água salgada e outras estruturas geológicas. O armazenamento em oceanos, inclusive a injeção de CO_2 a grandes profundidades a partir de estações *off-shore* de bombeamento, é uma outra opção, dizem alguns.

O desenvolvimento da tecnologia de captura e armazenamento de CO_2 enfrenta importantes barreiras, incluindo a incerteza com relação a quanto tempo o gás injetado permanecerá armazenado e aos possíveis impactos ambientais colaterais quando importantes quantidades de CO_2 forem armazenadas na natureza. Outro desafio corresponde ao desenvolvimento de tecnologias efetivas para a remoção de CO_2 de correntes de gás. As despesas relacionadas aos combustíveis fósseis e aos fundos necessários para a captura de CO_2, o transporte para o local de armazenagem e o próprio armazenamento são provavelmente significativas. Contudo, pelo menos em cerca de duas dúzias de locais de testes nacionais os pesquisadores estão estudando a viabilidade da captura e do armazenamento de CO_2.

Expressões similares podem ser escritas para os calores específicos em uma base molar, com R sendo substituído por $\overline{R}$.

3.13.2 Utilizando Funções Relativas ao Calor Específico

As expressões precedentes requerem que os calores específicos dos gases ideais sejam funções da temperatura. Essas funções estão disponíveis para gases de interesse prático, em diversas formas, tais como gráficos, tabelas e equações. A Fig. 3.13 apresenta a variação de $\overline{c}_p$ (base molar) com a temperatura para alguns gases de uso comum. Para o intervalo de temperatura mostrado $\overline{c}_p$ aumenta com a temperatura para todos os gases, com exceção dos gases monoatômicos Ar, Ne e He. Para esses, $\overline{c}_p$ é aproximadamente constante e igual ao valor previsto pela teoria cinética dos gases: $\overline{c}_p = \frac{5}{2}\overline{R}$. Dados tabelados de calores específicos para alguns gases selecionados são apresentados como função da temperatura nas Tabelas A-20. Calores específicos também estão disponíveis em

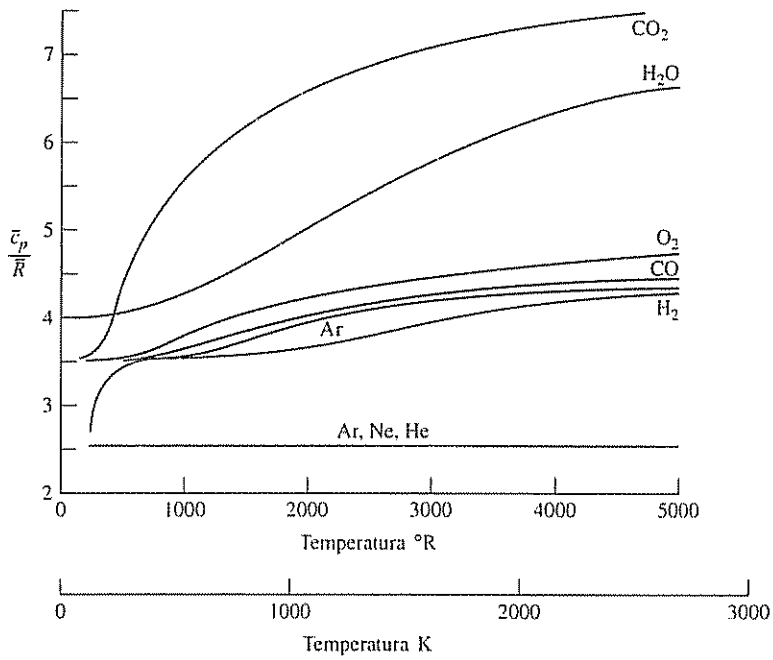


Fig. 3.13 Variação de $\overline{c}_p/\overline{R}$ com a temperatura para alguns gases utilizando o modelo de gás ideal

forma de equação. Diversas formas alternativas dessas equações podem ser encontradas na literatura da engenharia. Uma equação que é de integração relativamente fácil é a de forma polinomial dada por

$$\frac{\bar{c}_p}{\bar{R}} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4 \qquad (3.48)$$

Valores das constantes α, β, γ, δ e ε são listados na Tabela A-21 para vários gases considerando o intervalo de temperatura de 300 a 1000 K (540 a 1800°R).

➥ **POR EXEMPLO...** para ilustrar o uso da Eq. 3.48, avaliemos a variação da entalpia específica, em kJ/kg, do ar, modelado como gás ideal, a partir de um estado onde $T_1 = 400$ K a um estado onde $T_2 = 900$ K. Substituindo a expressão para $\bar{c}_p(T)$ dada pela Eq. 3.48 na Eq. 3.43 e integrando em relação à temperatura, temos

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= \frac{\bar{R}}{M}\int_{T_1}^{T_2} (\alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4)\, dT \\ &= \frac{\bar{R}}{M}\left[\alpha(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{\gamma}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{\delta}{4}(T_2^4 - T_1^4) + \frac{\varepsilon}{5}(T_2^5 - T_1^5)\right] \end{aligned}$$

onde o peso molecular M foi utilizado de forma a obter o resultado em uma base mássica unitária. Com os valores das constantes da Tabela A-21

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 = \frac{8{,}314}{28{,}97}\Bigg\{ & 3{,}653(900 - 400) - \frac{1{,}337}{2(10)^3}\left[(900)^2 - (400)^2\right] \\ & + \frac{3{,}294}{3(10)^6}\left[(900)^3 - (400)^3\right] - \frac{1{,}913}{4(10)^9}\left[(900)^4 - (400)^4\right] \\ & + \frac{0{,}2763}{5(10)^{12}}\left[(900)^5 - (400)^5\right]\Bigg\} = 531{,}69 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$ ⬅

As funções dos calores específicos $c_v(T)$ e $c_p(T)$ também estão disponíveis no *IT: Interactive Thermodynamics*, no menu de Propriedades (**Properties**). Essas funções podem ser integradas utilizando a função integral do programa para calcular Δu e Δh, respectivamente. ➥ **POR EXEMPLO...** Refaremos o exemplo anterior utilizando o *IT*. Para o ar, o código *IT* é

```
cp = cp_T ("Air",T)
delh = integral(cp, T)
```

Pressionando o botão de Resolver (Solve) e variando T de 400 K a 900 K, a variação da entalpia específica é Δh = 531,7 kJ/kg delh, o que concorda de forma precisa com o valor obtido através da integração da função do calor específico da Tabela A-21, conforme ilustrado anteriormente. ⬅

A fonte de dados de calores específicos de gases ideais é experimental. Os calores específicos podem ser determinados macroscopicamente a partir de cuidadosas medidas de propriedades. No limite, à medida que a pressão tende a zero as propriedades de um gás tendem a coincidir com as de seu modelo de gás ideal. Então, calores específicos determinados macroscopicamente de um gás quando extrapolados para baixas pressões podem ser chamados tanto de calores específicos à *pressão zero* quanto de calores específicos de *gás ideal*. Embora calores específicos à pressão zero possam ser obtidos pela extrapolação de dados experimentais macroscopicamente determinados, esse procedimento hoje em dia é raramente efetuado. Isso se deve ao fato de que os calores específicos de gases perfeitos podem ser prontamente calculados com expressões da mecânica estatística utilizando dados *espectrais*, que podem ser obtidos experimentalmente com precisão. A determinação de calores específicos de gases perfeitos é uma das importantes áreas em que a *abordagem microscópica* contribui significativamente para as aplicações da termodinâmica.

3.14 Aplicando o Balanço de Energia Utilizando Tabelas de Gás Ideal, Calores Específicos Constantes e Programas de Computador

Embora variações da entalpia específica e da energia interna específica possam ser determinadas pela integração das expressões de calores específicos, como já foi mostrado na Seção 3.13, tais cálculos são mais facilmente conduzidos utilizando-se procedimentos considerados na presente seção. Esses procedimentos são ilustrados nas aplicações do balanço de energia para um sistema fechado

3.14.1 Utilizando Tabelas de Gás Ideal

Para alguns gases comumente encontrados o cálculo das variações da energia interna e da entalpia específicas é facilitado pelo uso das *tabelas de gás ideal*, Tabelas A-22 e A-23, que fornecem u e h (ou $\bar{u}$ e $\bar{h}$) em função da temperatura.

Para obter entalpia em função da temperatura escrevemos a Eq. 3.43 como

$$h(T) = \int_{T_{ref}}^{T} c_p(T)\,dT + h(T_{ref})$$

onde T_{ref} corresponde a uma temperatura de referência arbitrária e $h(T_{ref})$ a um valor arbitrário de entalpia para a temperatura de referência. As Tabelas A-22 e A-23 são baseadas na escolha de $h = 0$ em $T_{ref} = 0$ K. Dessa forma, a tabela de valores de entalpia em função da temperatura é desenvolvida através da integral[2]

$$h(T) = \int_{0}^{T} c_p(T)\,dT \tag{3.49}$$

Os valores tabelados de energia interna em função da temperatura são obtidos dos valores tabelados de entalpia através de $u = h - RT$.

Para o ar considerado como gás ideal h e u são dados pela Tabela A-22, com unidades de kJ/kg, e pela Tabela A-22E em unidades de Btu/lb. Valores de entalpia $\bar{h}$ e energia interna $\bar{u}$ específicas molares para diversos gases comumente encontrados, assumidos como gases ideais, são dados na Tabela A-23 em unidades de kJ/kmol ou Btu/lbmol. Outras propriedades, que não a energia interna e a entalpia específicas, presentes nessas tabelas são apresentadas no Cap. 6 e devem ser ignoradas no momento. As Tabelas A-22 e A-23 são convenientes para cálculos envolvendo gases ideais não apenas pelo fato de a variação dos calores específicos com a temperatura ser considerada automaticamente, mas também porque as tabelas são de uso fácil.

O próximo exemplo ilustra o uso das tabelas de gás ideal, juntamente com o balanço de energia para um sistema fechado.

Exemplo 3.9 UTILIZANDO O BALANÇO DE ENERGIA E AS TABELAS DE GÁS IDEAL

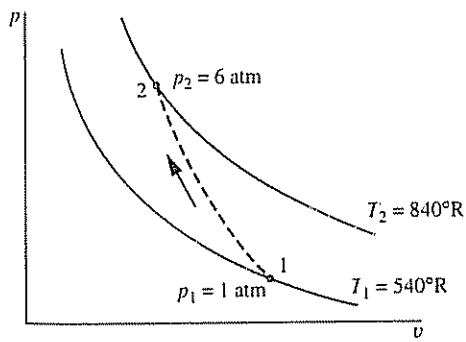
Um conjunto cilindro-pistão contém 2 lb (0,91 kg) de ar a uma temperatura de 540°R (26,8°C) e a uma pressão de 1 atm. O ar é comprimido até um estado onde a temperatura é 840°R (193,5°C) e a pressão é 6 atm. Durante a compressão uma quantidade de calor igual a 20 Btu (21,1 kJ) é transferida do ar para a vizinhança. Utilizando o modelo de gás ideal para o ar, determine o trabalho realizado durante o processo, em Btu.

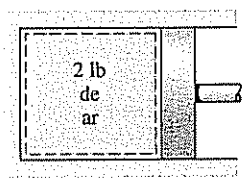
Solução

Dado: duas libras de ar são comprimidas entre dois estados especificados enquanto uma determinada quantidade de calor é transferida do ar.

Pede-se: determine o trabalho, em Btu.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:





Modelo de Engenharia:

1. O ar constitui um sistema fechado.
2. Os estados inicial e final são estados de equilíbrio. Não ocorrem variações da energia cinética ou potencial.
3. O ar se comporta como um gás ideal.

Fig. E3.9

[2]A expressão simples para a variação de calor específico dada pela Eq. 3.48 é válida apenas para um intervalo limitado de temperatura. Dessa forma, valores tabelados de entalpia são calculados a partir da Eq. 3.49 utilizando expressões que permitam que a integral seja avaliada com precisão em intervalos mais amplos de temperatura.

Análise: um balanço de energia para o sistema fechado é

$$\Delta \cancel{KE}^{0} + \Delta \cancel{PE}^{0} + \Delta U = Q - W$$

onde os termos de energia cinética e potencial se anulam de acordo com a hipótese 2. Resolvendo para W,

$$W = Q - \Delta U = Q - m(u_2 - u_1)$$

A partir do enunciado do problema, $Q = -20$ Btu. Além disso, da Tabela A-22E a $T_1 = 540°R$, $u_1 = 92{,}04$ Btu/lb e a $T_2 = 840°R$, $u_2 = 143{,}98$ Btu/lb. Desse modo

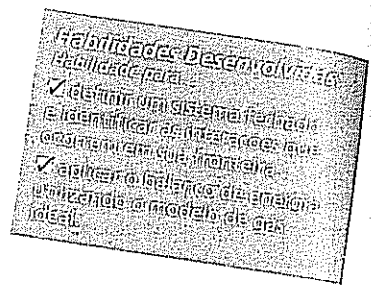
$$W = -20 \text{ Btu} - (2 \text{ lb})(143{,}98 - 92{,}04) \text{ Btu/lb} = -123{,}9 \text{ Btu}$$

O sinal negativo indica que o trabalho é realizado sobre o sistema nesse processo.

(1) Embora os estados inicial e final sejam considerados como estados de equilíbrio, os estados intermediários não são necessariamente estados de equilíbrio, de forma que o processo foi representado no diagrama p–v por uma linha tracejada. Essa linha tracejada não define uma "trajetória" para o processo.

(2) A Tabela A-1E fornece $p_c = 37{,}2$ atm, $T_c = 239°R$ para o ar. Dessa forma, no estado 1 $p_{R1} = 0{,}03$, $T_{R1} = 2{,}26$ e, no estado 2, $p_{R2} = 0{,}16$, $T_{R2} = 3{,}51$. Consultando a Fig. A-1 pode-se concluir que para esses estados $Z \approx 1$, como admitido para a solução.

(3) Em principio, o trabalho poderia ser calculado através de $\int p\, dV$, mas por se desconhecer a variação de pressão na face do pistão com o volume a integração não pode ser realizada sem mais informações.



Teste-Relâmpago

Substituindo o ar por dióxido de carbono, porém mantendo inalterados todos os outros dados do problema, calcule o trabalho, em Btu.

Resposta: −125,1 Btu

3.14.2 Utilizando Calores Específicos Constantes

Quando calores específicos são tomados como constantes as Eqs. 3.40 e 3.43 são reduzidas, respectivamente, a

$$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1) \tag{3.50}$$

$$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1) \tag{3.51}$$

As Eqs. 3.50 e 3.51 são geralmente utilizadas em análises termodinâmicas envolvendo gases ideais, uma vez que permitem o desenvolvimento de equações simples e fechadas para vários processos.

Os valores constantes de c_v e c_p nas Eqs. 3.50 e 3.51 são, estritamente falando, valores médios calculados como

$$c_v = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\, dT}{T_2 - T_1} \qquad c_p = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\, dT}{T_2 - T_1}$$

Entretanto, quando a variação de c_v ou c_p ao longo de um dado intervalo de temperatura não é significativa é pequeno o erro cometido ao se tomar o calor específico requerido pela Eq. 3.50 ou 3.51 como a média aritmética dos valores de calor específico avaliados nas temperaturas-limite. Alternativamente, o calor específico avaliado na temperatura média do intervalo pode ser utilizado. Esses métodos são particularmente convenientes quando dados tabelados de calor específico estão disponíveis, como nas Tabelas A-20, e, dessa forma, o calor específico *constante* pode ser geralmente determinado por inspeção.

⇨ **POR EXEMPLO...** admitindo que o calor específico c_v é uma constante e utilizando a Eq. 3.50, a expressão para o trabalho na solução do Exemplo 3.9 é dada por

$$W = Q - mc_v(T_2 - T_1)$$

Determinando c_v na temperatura média, 690°R (230°F), a Tabela A-20E fornece $c_v = 0{,}173$ Btu/lb °R. Inserindo esse valor para c_v junto com outros dados do Exemplo 3.9, tem-se

$$W = -20 \text{ Btu} - (2 \text{ lb})\left(0{,}173 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot °\text{R}}\right)(840 - 540)°\text{R}$$

$$= -123{,}8 \text{ Btu}$$

o que concorda de forma precisa com a resposta obtida no Exemplo 3.9, utilizando os dados da Tabela A-22E. ⇐

O exemplo a seguir ilustra a utilização de balanços de energia em sistemas fechados, em conjunto com o modelo de gás ideal e a hipótese de calores específicos constantes.

Exemplo 3.10 UTILIZANDO O BALANÇO DE ENERGIA E CALORES ESPECÍFICOS CONSTANTES

Dois tanques são conectados por uma válvula. Um tanque contém 2 kg de monóxido de carbono gasoso a 77°C e 0,7 bar. O outro tanque contém 8 kg do mesmo gás a 27°C e 1,2 bar. A válvula é aberta, permitindo a mistura dos gases enquanto energia sob a forma de calor é absorvida a partir da vizinhança. A temperatura final de equilíbrio é 42°C. Utilizando o modelo de gás ideal com c_v constante, determine **(a)** a pressão final de equilíbrio, em bar; **(b)** a quantidade de calor trocado durante o processo, em kJ.

Solução

Dado: dois tanques contendo diferentes quantidades de monóxido de carbono gasoso, inicialmente em diferentes estados, estão conectados por uma válvula. A válvula é aberta, permitindo a mistura do gás enquanto uma determinada quantidade de energia é absorvida por transferência de calor. A temperatura final de equilíbrio é conhecida.

Pede-se: determine a pressão final e a quantidade de calor transferida durante o processo.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

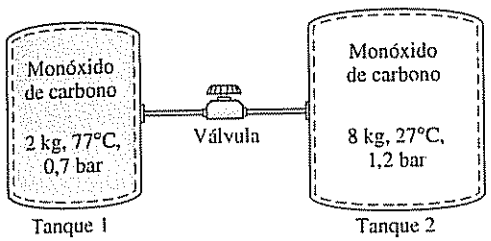


Fig. E3.10

Modelo de Engenharia:

1. A totalidade do monóxido de carbono gasoso constitui um sistema fechado.
2. O gás é modelado como um gás ideal com c_v constante.
3. O gás inicialmente em cada tanque está em equilíbrio. O estado final é um estado de equilíbrio.
4. Não ocorre transferência de energia para ou do gás por trabalho.
5. Não ocorrem variações da energia cinética ou potencial.

Análise:

(a) A pressão final de equilíbrio p_f pode ser determinada a partir da equação de estado de gás ideal

$$p_f = \frac{mRT_f}{V}$$

onde m é a soma das quantidades iniciais presentes no interior dos dois tanques, V é o volume total dos dois tanques e T_f é a temperatura final de equilíbrio. Então

$$p_f = \frac{(m_1 + m_2)RT_f}{V_1 + V_2}$$

Representando a temperatura e a pressão iniciais do tanque 1 como T_1 e p_1, respectivamente, $V_1 = m_1RT_1/p_1$. De forma similar, se a temperatura e a pressão iniciais no tanque 2 são representadas por T_2 e p_2, $V_2 = m_2RT_2/p_2$. Então, a pressão final é

$$p_f = \frac{(m_1 + m_2)RT_f}{\left(\frac{m_1RT_1}{p_1}\right) + \left(\frac{m_2RT_2}{p_2}\right)} = \frac{(m_1 + m_2)T_f}{\left(\frac{m_1T_1}{p_1}\right) + \left(\frac{m_2T_2}{p_2}\right)}$$

Inserindo valores

$$p_f = \frac{(10\text{ kg})(315\text{ K})}{\frac{(2\text{ kg})(350\text{ K})}{0{,}7\text{ bar}} + \frac{(8\text{ kg})(300\text{ K})}{1{,}2\text{ bar}}} = 1{,}05\text{ bar}$$

(b) A quantidade de calor trocado pode ser encontrada a partir do balanço de energia, que com as hipóteses 4 e 5 se reduz a

$$\Delta U = Q - \cancel{W}^{0}$$

ou

$$Q = U_f - U_i$$

U_i é a energia interna inicial, dada por

$$U_i = m_1 u(T_1) + m_2 u(T_2)$$

onde T_1 e T_2 são as temperaturas iniciais do CO nos tanques 1 e 2, respectivamente. A energia interna final é U_f

$$U_f = (m_1 + m_2)u(T_f)$$

Introduzindo essas expressões para a energia interna, o balanço de energia se torna

$$Q = m_1[u(T_f) - u(T_1)] + m_2[u(T_f) - u(T_2)]$$

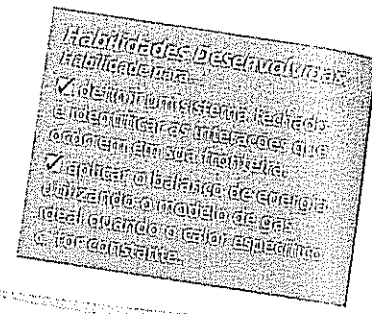
Uma vez que o calor específico c_v é constante (hipótese 2)

$$Q = m_1 c_v(T_f - T_1) + m_2 c_v(T_f - T_2)$$

Avaliando c_v como a média dos valores listados na Tabela A-20 para 300 K e 350 K, $c_v = 0{,}745$ kJ/kg · K. Então

$$Q = (2\text{ kg})\left(0{,}745\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(315\text{ K} - 350\text{ K}) + (8\text{ kg})\left(0{,}745\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(315\text{ K} - 300\text{ K}) = +37{,}25\text{ kJ}$$

O sinal positivo indica que a transferência de calor ocorre para o sistema.



Utilizando o diagrama generalizado de compressibilidade pode-se verificar que a equação de estado de gás ideal é apropriada para o CO nesse intervalo de temperatura e pressão. Como o calor específico c_v do CO varia pouco no intervalo de temperatura de 300 a 350 K (Tabela A-20), ele pode ser tratado como constante com uma precisão aceitável.

Teste-Relâmpago

Avalie Q utilizando valores de energia interna específica obtidos da Tabela A-23 para o CO. Compare com o resultado utilizando c_v constante.

Resposta: 36,99 kJ

3.14.3 Utilizando Programas de Computador

O *Interactive Thermodynamics*: *IT* também fornece valores de entalpia e de energia interna específicas para uma vasta gama de gases modelados como gases ideais. Consideremos o uso do *IT* inicialmente para o ar e, em seguida, para outros gases.

AR. Para o ar, o *IT* utiliza o mesmo estado e o mesmo valor de referência que a Tabela A-22, e os valores fornecidos pelo *IT* apresentam uma boa concordância com os dados tabelados. ⇨ **POR EXEMPLO...** consideremos o uso do *IT* para avaliar a variação da entalpia específica do ar de um estado onde $T_1 = 400$ K para um estado onde $T_2 = 900$ K. Selecionando Ar (*Air*) no menu de Propriedades (**Properties**), o código a seguir seria utilizado pelo *IT* para determinar Δh (delh), em kJ/kg

```
h1 = h_T("Air",T1)
h2 = h_T("Air",T2)
T1 = 400//K
T2 = 900//K
delh = h2 - h1
```

Escolhendo-se K como unidade de temperatura e kg para a massa no menu de Unidades (**Units**), os resultados fornecidos pelo *IT* são $h_1 = 400{,}8$, $h_2 = 932{,}5$ e $\Delta h = 531{,}7$ kJ/kg, respectivamente. Esses valores apresentam uma boa concordância com os obtidos pela Tabela A-22: $h_1 = 400{,}98$, $h_2 = 932{,}93$ e $\Delta h = 531{,}95$ kJ/kg ⇦

OUTROS GASES. O *IT* também fornece valores para cada um dos gases presentes na Tabela A-23. Para esses gases os valores de energia interna $\bar{u}$ e entalpia $\bar{h}$ específicas fornecidos pelo *IT* são determinados em relação a um *estado de referência padrão* que difere do empregado na Tabela A-23. Isso habilita o *IT* para o uso em aplicações envolvendo combustão; veja a Seção 13.2.1 para uma discussão adicional. Em conseqüência, os valores de $\bar{u}$ e $\bar{h}$ fornecidos pelo *IT* para os gases da Tabela A-23 são diferentes dos obtidos diretamente da tabela. Entretanto, a variação de propriedades entre dois estados permanece a mesma, uma vez que os valores de referência se cancelam quando a variação é calculada.

⇨ **POR EXEMPLO...** utilizemos o *IT* para avaliar a variação da entalpia específica, em kJ/kmol, para o dióxido de carbono (CO_2) considerado como gás ideal de um estado onde $T_1 = 300$ K para um estado onde $T_2 = 500$ K. Selecionando CO_2 no menu de Propriedades (**Properties**), o código a seguir seria empregado pelo *IT*:

```
h1 = h_T("CO2",T1)
h2 = h_T("CO2",T2)
T1 = 300//K
T2 = 500//K
delh = h2 - h1
```

Escolhendo-se K como unidade de temperatura e moles no menu de Unidades (**Units**), os resultados fornecidos pelo *IT* são $\bar{h}_1 = -3{,}935 \times 10^5$, $\bar{h}_2 = -3{,}852 \times 10^5$ e $\Delta\bar{h} = 8238$ kJ/kmol, respectivamente. Os elevados valores negativos para $\bar{h}_1$ e $\bar{h}_2$ são conseqüência dos estados e valores de referência utilizados pelo *IT* para o CO_2. Embora esses valores de entalpia específica nos estados 1 e 2 sejam diferentes dos valores correspondentes que constam na Tabela A-23: $\bar{h}_1 = 9431$ e $\bar{h}_2 = 17.678$, que fornece $\Delta\bar{h} = 8247$ kJ/kmol, a *variação* da entalpia específica avaliada a partir de ambos os conjuntos de dados apresenta uma boa concordância. ⇦

O exemplo a seguir ilustra o uso de programas de computador para a resolução de problemas utilizando o modelo de gás ideal. Os resultados obtidos são comparados com outros, determinados a partir da hipótese de que o calor específico $\bar{c}_v$ é constante

Exemplo 3.11 UTILIZANDO O BALANÇO DE ENERGIA E CÓDIGO COMPUTACIONAL

Um kmol de dióxido de carbono gasoso (CO_2) contido em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo a pressão constante de 1 bar a partir de $T_1 = 300$ K a T_2. Represente graficamente a transferência de calor para o gás, em kJ, em função de T_2 quando este varia de 300 a 1500 K. Admita o modelo de gás ideal e determine a variação da energia interna específica do gás utilizando

(a) $\bar{u}$ obtido a partir do *IT*.
(b) $\bar{c}_v$ constante avaliado em T_1 obtido a partir do *IT*.

Solução

Dado: um kmol de CO_2 é submetido a um processo a pressão constante em um conjunto cilindro-pistão. A temperatura inicial, T_1, e a pressão são conhecidas.

Pede-se: represente graficamente a quantidade de calor trocado como função da temperatura final, T_2. Utilize o modelo de gás ideal e avalie $\Delta\bar{u}$ utilizando (a) dados de $\bar{u}$ a partir do *IT*, (b) $\bar{c}_v$ constante avaliado a T_1 obtido a partir do *IT*.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

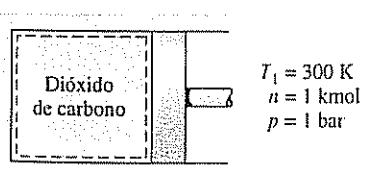


Fig. E3.11(a)

Modelo de Engenharia:

1. O dióxido de carbono constitui um sistema fechado.
2. O processo ocorre a pressão constante.
3. O dióxido de carbono se comporta como um gás ideal.
4. Os efeitos das energias cinética ou potencial são desprezíveis.

Análise: o calor trocado é calculado utilizando o balanço de energia para um sistema fechado, que se reduz a

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

Utilizando a Eq. 2.17 para pressão constante (hipótese 2)

$$W = p(V_2 - V_1) = pn(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)$$

Então, com $\Delta U = n(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)$ o balanço de energia se torna

$$n(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) = Q - pn(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)$$

Resolvendo para Q

$$Q = n[(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + p(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)]$$

Com $p\bar{v} = \bar{R}T$ obtém-se

$$Q = n[(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + \bar{R}(T_2 - T_1)]$$

O objetivo é o de representar graficamente Q em função de T_2 para cada um dos seguintes casos: **(a)** valores de $\bar{u}_1$ e $\bar{u}_2$ a T_1 e T_2, respectivamente, como fornecido pelo *IT*, **(b)** Eq. 3.50 utilizada em uma base molar, na forma

$$\bar{u}_2 - \bar{u}_1 = \bar{c}_v(T_2 - T_1)$$

onde o valor de $\bar{c}_v$ é calculado a T_1 utilizando o *IT*.

O código *IT* é apresentado a seguir, onde Rbar representa $\bar{R}$, cvb representa $\bar{c}_v$ e ubar1 e ubar2 representam $\bar{u}_1$ e $\bar{u}_2$, respectivamente

```
// Using the Units menu, select "mole" for the substance amount.
//Given Data
T1 = 300//K
T2 = 1500//K
n = 1//kmol
Rbar = 8.314//kJ/kmol · K

// (a) Obtain molar specific internal energy data using IT.
ubar1 = u_T ( "CO2", T1)
ubar2 = u_T ( "CO2", T2)
Qa = n*(ubar2 - ubar1) + n*Rbar*(T2 - T1)

// (b) Use Eq. 3.50 with cv evaluated at T1.
cvb = cv_T ( "CO2", T1)
Qb = n*cvb*(T2 - T1) + n*Rbar*(T2 - T1)
```

Utilize o botão de Resolver (**Solve**) para obter a solução para o caso-exemplo de $T_2 = 1500$ K. Para o item (a), o programa fornece $Q_a = 6{,}16 \times 10^4$ kJ. A solução pode ser verificada utilizando os dados para CO_2 da Tabela A-23, como se segue:

$$\begin{aligned} Q_a &= n[(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + \bar{R}(T_2 - T_1)] \\ &= (1\ \text{kmol})[(58.606 - 6939)\text{kJ/kmol} + (8{,}314\ \text{kJ/kmol}\cdot\text{K})(1500 - 300)\text{K}] \\ &= 61.644\ \text{kJ} \end{aligned}$$

Então, o resultado obtido utilizando os dados para CO_2 da Tabela A-23 apresenta boa concordância com a solução obtida utilizando o código computacional para o caso-exemplo. Para o item (b), o *IT* fornece $\bar{c}_v = 28{,}95$ kJ/kmol · K a T_1, fornecendo $Q_b = 4{,}472 \times 10^4$ kJ quando $T_2 = 1500$ K. Esse valor está de acordo com o resultado obtido utilizando o calor específico c_v a 300 K da Tabela A-20, como pode ser verificado.

Uma vez que o código computacional tenha sido verificado, utilize o botão de Exploração (**Explore**) para fazer variar T_2 de 300 a 1500 K em intervalos de 10. Construa o gráfico a seguir utilizando o botão de Exibir (**Graph**):

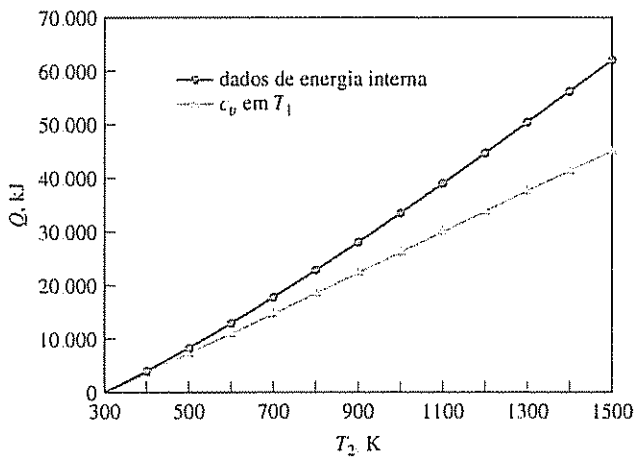


Fig. E3.11(b)

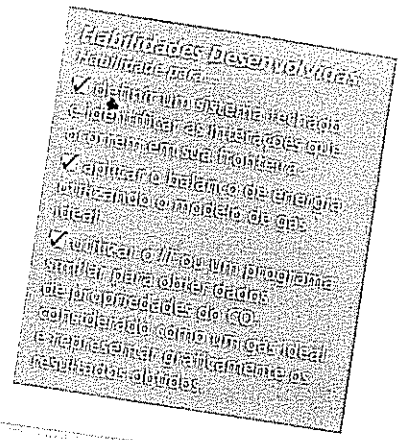
Como esperado, observa-se que a transferência de calor cresce à medida que a temperatura final aumenta. A partir dos gráficos observamos também que a utilização de valores constantes de $\bar{c}_v$ avaliados a T_1 para cálculo de $\Delta\bar{u}$ e, em conseqüência, de Q pode conduzir a um erro considerável quando comparado com a utilização de dados de $\bar{u}$. A comparação das duas soluções é favorável até aproximadamente 500 K, mas elas apresentam uma diferença de aproximadamente 27% quando o aquecimento leva a temperaturas de 1500 K.

Alternativamente, essa expressão para Q pode ser escrita como

$$Q = n[(\bar{u}_2 + p\bar{v}_2) - (\bar{u}_1 + p\bar{v}_1)]$$

Utilizando $\bar{h} = \bar{u} + p\bar{v}$, a expressão para Q se torna

$$Q = n(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)$$



Teste-Relâmpago

Repita o item (b) utilizando $\bar{c}_v$ avaliado em $T_{méd} = (T_1 + T_2)/2$. Que abordagem concorda melhor com os resultados do item (a): a análise com $\bar{c}_v$ a T_1 ou a $T_{méd}$?

Resposta: A análise com $\bar{c}_v$ a $T_{méd}$

3.15 Relações de Processos Politrópicos

Um *processo politrópico* é um processo de quase-equilíbrio (Seção 2.2.5) descrito por

$$pV^n = constante \tag{3.52}$$

ou, em termos de volume específico, por $pv^n = constante$. Nessas expressões n é uma constante.

Para um processo politrópico entre dois estados

$$p_1V_1^n = p_2V_2^n$$

ou

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \tag{3.53}$$

O expoente n pode assumir qualquer valor de $-\infty$ a $+\infty$, dependendo do processo particular. Quando $n = 0$, o processo é denominado isobárico (pressão constante), e quando $n \pm\infty$ o processo é denominado isométrico (volume constante).

Para um processo politrópico

$$\int_1^2 p\,dV = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1 - n} \qquad (n \neq 1) \tag{3.54}$$

para qualquer valor do expoente n com exceção de $n = 1$. Para $n = 1$,

$$\int_1^2 p\,dV = p_1V_1 \ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (n = 1) \tag{3.55}$$

O Exemplo 2.1 fornece detalhes dessas integrações.

As Eqs. 3.52 a 3.55 se aplicam a *qualquer* gás (ou líquido) que sofre um processo politrópico. Quando a idealização *adicional* de comportamento de gás ideal é apropriada outras relações podem ser obtidas. Dessa forma, quando a equação de estado de gás ideal é introduzida nas Eqs. 3.53, 3.54 e 3.55 as expressões a seguir são, respectivamente, obtidas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} \qquad \text{(gás ideal)} \tag{3.56}$$

$$\int_1^2 p\,dV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \qquad \text{(gás ideal, } n \neq 1) \tag{3.57}$$

$$\int_1^2 p\,dV = mRT \ln\frac{V_2}{V_1} \qquad \text{(gás ideal, } n = 1) \tag{3.58}$$

Para um gás ideal o caso de $n = 1$ corresponde a um processo isotérmico (temperatura constante), como pode ser prontamente verificado.

O Exemplo 3.12 ilustra o uso de balanço de energia para um sistema fechado que consiste em um gás ideal que é submetido a um processo politrópico.

Exemplo 3.12 PROCESSO POLITRÓPICO DE AR COMO GÁS IDEAL

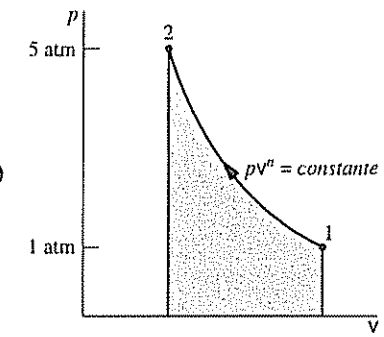
Ar é submetido a uma compressão politrópica em um conjunto cilindro-pistão de $p_1 = 1$ atm, $T_1 = 70°F$ (21,1°C) até $p_2 = 5$ atm. Empregando o modelo de gás ideal com a razão k de calores específicos constante, determine o trabalho e o calor transferido por unidade de massa, em Btu/lb, se (a) $n = 1,3$, (b) $n = k$. Calcule k a T_1.

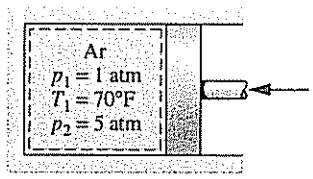
Solução

Dado: ar é submetido a um processo de compressão politrópica a partir de um estado inicial dado até uma pressão final especificada.

Pede-se: determine o trabalho e a quantidade de calor transferido, ambos em Btu/lb.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:





Modelo de Engenharia:

1. O ar é um sistema fechado.
2. O ar se comporta como um gás ideal com a razão k de calores específicos constante calculada na temperatura inicial.
3. A compressão é politrópica.
4. Não há variações da energia cinética ou potencial.

Fig. E3.12

Análise: o trabalho pode ser calculado para esse caso a partir da expressão

$$W = \int_1^2 p\, dV$$

Com a Eq. 3.57

$$\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n} \tag{a}$$

O calor trocado pode ser calculado do balanço de energia. Assim

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + (u_2 - u_1)$$

Verificando a Eq. 3.47b, observa-se que quando a razão k de calores específicos é constante c_v é constante. Então

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + c_v(T_2 - T_1) \tag{b}$$

(a) Para $n = 1,3$, a temperatura no estado final, T_2, pode ser avaliada da Eq. 3.56 como a seguir

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} = 530°R\left(\frac{5}{1}\right)^{(1,3-1)/1,3} = 768°R\ (308°F)$$

Utilizando a Eq. (a), o trabalho é então

$$\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n} = \left(\frac{1,986\ \text{Btu}}{28,97\ \text{lb} \cdot °R}\right)\left(\frac{768°R - 530°R}{1 - 1,3}\right) = -54,39\ \text{Btu/lb}$$

A 70°F a Tabela A-20E fornece $k = 1,401$ e $c_v = 0,171$ Btu/lb · °R. Alternativamente, c_v pode ser obtido usando a Eq. 3.47b, como a seguir:

$$c_v = \frac{R}{k - 1} \tag{c}$$

$$= \frac{(1,986/28,97)\ \text{Btu/lb} \cdot °R}{(1,401 - 1)} = 0,171\frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot °R}$$

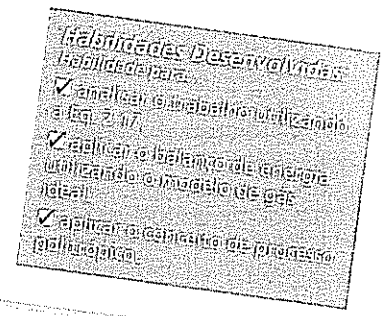
Substituindo os valores na Eq. (b), obtemos

$$\frac{Q}{m} = -54{,}39\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + \left(0{,}171\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot {}^\circ\text{R}}\right)(768{}^\circ\text{R} - 530{}^\circ\text{R})$$
$$= -13{,}69\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

(b) Para $n = k$, substituindo as Eqs. (a) e (c) na Eq. (b), obtém-se

$$\frac{Q}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - k} + \frac{R(T_2 - T_1)}{k - 1} = 0$$

Isto é, não há transferência de calor no processo politrópico de um gás ideal para o qual $n = k$.



◍ Os estados visitados durante o processo de compressão politrópica são mostrados pela curva que acompanha o diagrama p–v. A magnitude do trabalho por unidade de massa é representada pela área sombreada *sob* a curva.

Teste-Relâmpago

Para $n = k$, calcule a temperatura no final do estado, em °R e °F.

Resposta: 840°R (380°F)

Resumo do Capítulo e Guia de Estudo

Neste capítulo consideramos as relações de propriedades de uma vasta gama de substâncias em formas de tabela, gráfico e de equação. Foi principalmente enfatizada a utilização de dados tabelados. No entanto, a obtenção de dados de propriedades por computador também foi considerada.

Um aspecto-chave da análise termodinâmica é o de estabelecer estados. Isso é regulado pelo princípio dos estados para sistemas simples compressíveis compostos de substâncias puras, que indica que o estado é determinado pelo valor de *duas* propriedades intensivas independentes.

Outro aspecto importante da análise termodinâmica é o de localizar os principais estados de processos em diagramas apropriados: p–v, T–v e p–T. A capacidade de determinar estados e utilizar diagramas de propriedades é particularmente importante na resolução de problemas envolvendo o balanço de energia.

O modelo de gás ideal é apresentado na segunda parte do presente capítulo, utilizando o fator de compressibilidade como ponto de partida. Essa abordagem enfatiza as limitações do modelo de gás ideal. Quando a utilização do modelo de gás ideal é apropriada é salientado que os calores específicos geralmente variam com a temperatura, e a utilização das tabelas de gás ideal é discutida para a resolução de problemas.

Os itens a seguir fornecem um guia de estudo para este capítulo. Ao término do estudo do texto e dos exercícios dispostos no final do capítulo você estará apto a

- ☑ descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subseqüentes.
- ☑ obter dados de propriedades a partir das Tabelas A-1 a A-23, utilizando o princípio dos estados para determinar um estado e interpolação linear quando necessário.
- ☑ esboçar os diagramas T–v, p–v e p–T e localizar os estados principais nesses diagramas.
- ☑ aplicar, com dados de propriedades, o balanço de energia para um sistema fechado.
- ☑ avaliar as propriedades de misturas bifásicas líquido-vapor utilizando as Eqs. 3.1, 3.2, 3.6 e 3.7.
- ☑ estimar as propriedades de líquidos utilizando as Eqs. 3.11, 3.12 e 3.14.
- ☑ aplicar o modelo de substância incompressível.
- ☑ utilizar o diagrama generalizado de compressibilidade para relacionar dados p–v–T de gases.
- ☑ aplicar o modelo de gás ideal para análise termodinâmica, incluindo a determinação de quando a utilização do modelo de gás ideal é apropriada, e utilizar corretamente os dados das tabelas de gás ideal ou os dados de calores específicos constantes para determinar Δu e Δh.

Conceitos Fundamentais na Engenharia

fase
substância pura
princípio dos estados equivalentes
sistema compressível simples
superfície p–v–T
diagrama de fases
temperatura de saturação
pressão de saturação
diagrama p–v
diagrama T–v
mistura bifásica líquido-vapor
título
vapor superaquecido
entalpia
calores específicos
modelo de gás ideal

Equações Principais

$x = \dfrac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}}$	(3.1)	Título, x, de uma mistura bifásica líquido-vapor.
$v = (1 - x)v_f + xv_g = v_f + x(v_g - v_f)$ $u = (1 - x)u_f + xu_g = u_f + x(u_g - u_f)$ $h = (1 - x)h_f + xh_g = h_f + x(h_g - h_f)$	(3.2) (3.6) (3.7)	Volume específico, energia interna e entalpia de uma mistura bifásica líquido–vapor.
$v(T, p) \approx v_f(T)$ $u(T, p) \approx u_f(T)$ $h(T, p) \approx h_f(T)$	(3.11) (3.12) (3.14)	Volume específico, energia interna e entalpia de líquidos aproximados por valores para líquido saturado.
Relações para o Modelo de Gás Ideal		
$pv = RT$ $u = u(T)$ $h = h(T) = u(T) + RT$	(3.32) (3.36) (3.37)	Modelo de Gás Ideal.
$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\, dT$	(3.40)	Variação da energia interna específica.
$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1)$	(3.50)	Para c_v constante.
$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\, dT$	(3.43)	Variação da entalpia específica.
$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1)$	(3.51)	Para c_p constante.

Exercícios: pontos de reflexão para os engenheiros

1. Se a água se contrai durante a solidificação, que conseqüências esse fato pode ter para a vida aquática?

2. A que temperatura a água ferve no topo do Monte McKinley, no Alasca? E no Vale da Morte, na Califórnia?

3. Por que dutos com água congelada se rompem?

4. Por que muitos alimentos possuem instruções para serem cozinhados em elevadas altitudes?

5. Uma substância que se contrai durante a solidificação pode existir como um sólido quando está a uma temperatura maior do que a sua temperatura do ponto triplo? Repita essa questão para uma substância que se expande na solidificação.

6. A energia interna específica é escolhida arbitrariamente como nula para a água líquida saturada a 0,01°C na Tabela A-2. Se o valor de referência para u no estado de referência fosse especificado de forma diferente, haveria um efeito significativo nas análises termodinâmicas utilizando u e h?

7. Para a água líquida a 20°C e 1,0 MPa, que diferença percentual existiria se a entalpia específica fosse avaliada utilizando-se a Eq. 3.14 em vez da Eq. 3.13?

8. Como eu poderia medir o calor específico c_p da água líquida na pressão atmosférica e na temperatura ambiente?

9. Se um bloco de ferro e um bloco de estanho com o mesmo volume recebessem a mesma quantidade de energia através de transferência de calor, qual dos blocos seria submetido ao maior aumento de temperatura?

10. Quantos minutos devo me exercitar para ajudar a *queimar* as calorias referentes à minha sobremesa favorita?

11. Qual a minha contribuição anual com relação à emissão de CO_2 na atmosfera?

12. Como posso estimar a massa de ar contida em um pneu de bicicleta?

13. Dados da energia interna e da entalpia específicas para vapor d'água são fornecidos em duas tabelas: A-4 e A-23. Quando a Tabela A-23 seria utilizada?

Problemas: desenvolvendo habilidades para a engenharia

Explorando Conceitos: Fase e Substância Pura

3.1 Um sistema é composto por água líquida em equilíbrio com uma mistura gasosa de ar e vapor d'água. Quantas fases estão presentes? O sistema consiste em uma substância pura? Explique. Repita a questão para um sistema composto por gelo e água líquida em equilíbrio com uma mistura gasosa de ar e vapor d'água.

3.2 Um sistema é composto por oxigênio líquido em equilíbrio com vapor de oxigênio. Quantas fases estão presentes? O sistema passa por um processo durante o qual parte do líquido é evaporada. O sistema pode ser considerado como uma substância pura durante o processo? Explique.

3.3 Um sistema composto por água líquida passa por um processo. No final do processo parte da água líquida se solidifica e o sistema contém água líquida e gelo. O sistema pode ser considerado como uma substância pura durante o processo? Explique.

3.4 Um prato de água líquida é colocado em uma mesa em um quarto. Depois de um tempo toda a água evapora. Considerando a água e o ar do quarto como um sistema fechado, tal sistema pode ser considerado como uma substância pura *durante* o processo? E *depois* que o processo se completa? Discuta.

Utilizando Dados *p–v–T*

3.5 Determine a fase ou as fases de um sistema que consiste em H_2O nas seguintes condições e esboce os diagramas *p–v* e *T–v* mostrando a localização de cada estado.

(a) $p = 80$ lbf/in² (551,6 kPa), $T = 312{,}07$°F (155,6°C).
(b) $p = 80$ lbf/in², $T = 400$°F (204,4°C).
(c) $T = 400$°F, $p = 360$ lbf/in² (2,5 MPa).
(d) $T = 320$°F (160°C), $p = 70$ lbf/in² (482,6 kPa).
(e) $T = 10$°F (−12,2°C), $p = 14{,}7$ lbf/in² (101,3 kPa).

UNIFEMM - Centro Universitário de Sete Lagoas
BIBLIOTECA CENTRAL
Dr. José Barbosa de Melo Santos

3.6 Determine a fase ou as fases de um sistema que consiste em H_2O nas seguintes condições e esboce os diagramas p–v e T–v mostrando a localização de cada estado.
(a) $p = 5$ bar, $T = 151{,}9°C$
(b) $p = 5$ bar, $T = 200°C$
(c) $T = 200°C, p = 2{,}5$ MPa
(d) $T = 160°C, p = 4{,}8$ bar
(e) $T = -12°C, p = 1$ bar

3.7 A Tabela a seguir lista as temperaturas e os volumes específicos do vapor d'água em duas pressões:

$p = 1{,}0$ MPa		$p = 1{,}5$ MPa	
T(°C)	v (m³/kg)	T (°C)	v (m³/kg)
200	0,2060	200	0,1325
240	0,2275	240	0,1483
280	0,2480	280	0,1627

Os dados encontrados durante a resolução de problemas freqüentemente não coincidem com os valores fornecidos pelas tabelas de propriedades, sendo necessária uma *interpolação linear* entre as entradas adjacentes na tabela. Utilizando os dados fornecidos, estime
(a) o volume específico a $T = 240°C, p = 1{,}25$ MPa, em m³/kg
(b) a temperatura a $p = 1{,}5$ MPa, $v = 0{,}1555$ m³/kg, em °C.
(c) o volume específico a $T = 220°C, p = 1{,}4$ MPa, em m³/kg

3.8 A Tabela a seguir lista as temperaturas e os volumes específicos da amônia em duas pressões:

$p = 50$ lbf/in²		$p = 60$ lbf/in²	
T (°F)	v (ft³/lb)	T (°F)	v (ft³/lb)
100	6,836	100	5,659
120	7,110	120	5,891
140	7,380	140	6,120

Os dados encontrados durante a resolução de problemas freqüentemente não coincidem com os valores fornecidos pelas tabelas de propriedades, sendo necessária uma *interpolação linear* entre as entradas adjacentes na tabela. Utilizando os dados fornecidos, estime
(a) o volume específico a $T = 120°F$ (48,9°C), $p = 54$ lbf/in² (372,3 kPa), em ft³/lb.
(b) a temperatura a $p = 60$ lbf/in² (413,7 kPa), $v = 5{,}982$ ft³/lb (0,37 m³/kg), em °F.
(c) o volume específico a $T = 110°C, p = 58$ lbf/in² (399,9 kPa), em ft³/lb

3.9 Para H_2O, esboce em um diagrama p–v, representado em escala log-log:
(a) as linhas de líquido saturado e de vapor saturado a partir do ponto triplo até o ponto crítico, com a pressão expressa em MPa e o volume específico em m³/kg.
(b) as linhas de temperatura constante a 100 e 300°C

3.10 Para H_2O, determine a propriedade especificada no estado indicado. Localize o estado em um esboço do diagrama T–v.
(a) $p = 300$ kPa, $v = 0{,}5$ m³/kg. Determine T, em °C.
(b) $p = 28$ MPa, $T = 200°C$. Determine v, em m³/kg.
(c) $p = 1$ MPa, $T = 405°C$. Determine v, em m³/kg
(d) $T = 100°C, x = 60\%$. Determine v, em m³/kg

3.11 Para cada caso, determine o volume específico no estado indicado. Localize o estado em um esboço do diagrama T–v.
(a) Água a $p = 14{,}7$ lbf/in² (101,3 kPa), $T = 100°C$. Determine v, em ft³/lb.
(b) Amônia a $T = -30°C, x = 50\%$. Determine v, em m³/kg.
(c) Refrigerante 134a $p = 1{,}5$ MPa, $T = 100°C$. Determine v, em m³/kg

3.12 Para cada caso, determine a propriedade específica no estado indicado. Localize o estado em um esboço do diagrama T–v.
(a) Água a $v = 0{,}5$ m³/kg, $p = 3$ bar. Determine T, em °C.
(b) Amônia a $p = 11$ lbf/in² (75,8 kPa), $T = -20°C$. Determine v, em ft³/lb.
(c) Propano a $p = 1$ MPa, $T = 85°C$. Determine v, em ft³/lb.

3.13 Determine a massa, em kg, de 0,1 m³ do Refrigerante 134a a 4 bar, 100°C.

3.14 Determine o volume, em ft³, ocupado por 2 lb (0.91 kg) de H_2O a uma pressão de 1000 lbf/in² (6,9 MPa) e
(a) a temperatura de 600°F (315,6°C)
(b) o título de 80%
(c) a temperatura de 200°F (93,3°C)

3.15 Um vaso hermético com um volume de 2 ft³ (0,06 m³) contém 5 lb (2,3 kg) do Refrigerante 134a. Um sensor de pressão na parede do tanque indica 71,39 lbf/in² (492,2 kPa) (manométrica). Se a pressão atmosférica é 14,4 lbf/in² (99,3 kPa), qual a temperatura do refrigerante em °F?

3.16 Dois quilogramas de uma mistura bifásica líquido-vapor de dióxido de carbono (CO_2) estão a −40°C em um tanque de 0,05 m³. Determine o título da mistura se os valores do volume específico para o líquido saturado e para o vapor saturado do CO_2 a −40°C são $v_f = 0{,}896 \times 10^{-3}$ m³/kg e $v_g = 3{,}824 \times 10^{-2}$ m³/kg, respectivamente.

3.17 Determine o título de uma mistura bifásica líquido-vapor de
(a) H_2O a 20°C com um volume específico de 20 m³/kg.
(b) Propano a 15 bar com um volume específico de 0,02997 m³/kg.
(c) Refrigerante 134a a 60°C com um volume específico de 0,001 m³/kg.
(d) Amônia a 1 MPa com um volume específico de 0,1 m³/kg.

3.18 Determine o título de uma mistura bifásica líquido-vapor bifásica de
(a) H_2O a 14,696 lbf/in² (101,3 kPa) com um volume específico de 25 ft³/lb (1,6 m³/kg).
(b) Propano a −80°F (−62,2°C) com um volume específico de 0,02653 ft³/lb (0,002 m³/kg)
(c) Refrigerante 134a a 50 lbf/in² (344,7 kPa) com um volume específico de 0,5 ft³/lb (0,03 m³/kg)
(d) Amônia a −40°F (−40°C) com um volume específico de 20 ft³/lb (1,2 m³/kg)

3.19 Uma mistura bifásica líquido-vapor de amônia a 100°F (37,8°C) tem um volume específico de 1,0 ft³/lb (0,06 m³/kg). Determine o título de uma mistura bifásica líquido-vapor a 0°F (−17,8°C) com o mesmo volume específico.

3.20 Uma mistura bifásica líquido-vapor de uma substância possui uma pressão de 150 bar e ocupa um volume de 0,2 m³. As massas de líquido e vapor saturados presentes são 3,8 kg e 4,2 kg, respectivamente. Determine o volume específico da mistura, em m³/kg.

3.21 Conforme ilustrado na Fig. P3.21, um cilindro rígido hermético contém diferentes volumes de água líquida saturada e vapor d'água saturado na temperatura de 150°C. Determine o título da mistura, expresso em porcentagem.

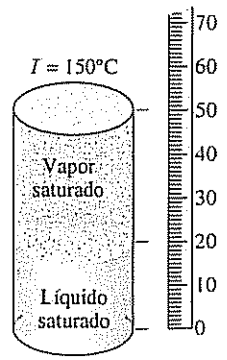


Fig. P3.21

3.22 Um sistema hermético composto de uma mistura bifásica líquido-vapor de H_2O em equilíbrio a 300°F (148,9°C). O título da mistura é de 0,8 (80%) e a massa de vapor saturado presente é de 2 lb (0,91 kg). Determine a massa de líquido saturado presente, em lb, e o volume total do sistema, em ft³.

3.23 Amônia, inicialmente como vapor saturado a −4°C, passa por um processo a volume específico constante até 200 kPa. No final do estado determine a temperatura, em °C, e o título. Localize cada estado em um diagrama T–v.

3.24 Um tanque rígido fechado com 0,2 m³ contém água a uma pressão inicial de 5 bar e um título de 50%. Calor é transferido até que o tanque contenha somente vapor saturado. Determine a massa final de vapor no tanque, em kg, e a pressão final, em bar.

3.25 Um tanque rígido contém 5 lb (2,3 kg) de uma mistura bifásica líquido-vapor de H_2O, inicialmente a 260°F (126,7°C) e título de 0,6. Calor é transferido para o conteúdo do tanque até que a temperatura seja de 320°F (160°C). Mostre o processo em um diagrama p–v. Determine a massa de vapor, em lb, inicialmente presente no tanque e a pressão final, em lbf/in².

3.26 Dois mil quilogramas de água, inicialmente um líquido saturado a 150°C, são aquecidos em um tanque rígido fechado até um estado final em que a pressão é 2,5 MPa. Determine a temperatura final, em °C, o volume do tanque, em m³, e esboce o processo em diagramas T–v e p–v.

3.27 Vapor d'água está contido em um reservatório rígido fechado com um volume de 1 m³. Inicialmente, a pressão e a temperatura do vapor d'água são 7 bar e 500°C, respectivamente. A temperatura é reduzida como resultado de transferência de calor para a vizinhança. Determine a temperatura na qual a condensação se inicia, em °C, e a fração da massa total que se encontra condensada quando a pressão atinge 0,5 bar. Qual o volume, em m³, ocupado pelo líquido saturado no estado final?

3.28 Vapor d'água é aquecido em um tanque rígido fechado de vapor saturado a 160°C a uma temperatura final de 400°C. Determine as pressões inicial e final, em bar, e esboce o processo em diagramas T–v e p–v.

3.29 Amônia é submetida a um processo isotérmico a partir de um estado inicial a T_1 = 80°F (26,7°C) e v_1 = 10 ft³/lb (0,62 m³/kg) até vapor saturado. Determine as pressões inicial e final, em lbf/in², e esboce o processo em diagramas T–v e p–v.

3.30 Um quilograma de água se encontra inicialmente no ponto crítico.

(a) Se a água é resfriada a volume específico constante até a pressão de 30 bar, determine o título no final do estado.

(b) Se a água passa por uma expansão a temperatura constante até a pressão de 30 bar, determine o volume específico no final do estado, em m³/kg.

Mostre cada processo em um diagrama T–v.

3.31 Três libras (1,4 kg) de vapor d'água saturado, contidas em um tanque rígido fechado cujo volume é de 13,3 ft³ (0,38 m³), são aquecidas até uma temperatura final de 400°F (204,4°C). Esboce o processo em um diagrama T–v. Determine as pressões nos estados inicial e final, em lbf/in².

3.32 Duas libras (0,91 kg) de vapor d'água são comprimidas a uma pressão constante de 250 lbf/in² (1,7 MPa) a partir de um volume de 6,88 ft³ (0,19 m³) até o estado de vapor saturado. Determine as temperaturas nos estados inicial e final, em °F, e o trabalho relacionado ao processo, em Btu.

3.33 Sete libras (3,2 kg) de propano em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a p_1 = 200 lbf/in² (1,4 MPa) e T_1 = 200°F (93,3°C) são submetidas a um processo a pressão constante até um estado final. O trabalho relativo ao processo é de −88,84 Btu (−93,7 kJ). No estado final, determine a temperatura, em °F, se superaquecido, ou o título, se saturado.

3.34 Amônia em um conjunto cilindro-pistão é submetida a um processo a pressão constante a 2,5 bar de T_1 = 30°C até vapor saturado. Determine o trabalho para o processo, em kJ por kg de refrigerante.

3.35 Vapor d'água inicialmente a 10 bar e 400°C está contido no interior de um conjunto cilindro-pistão. A água é resfriada a volume constante até que sua temperatura atinja 150°C. A água é então condensada isotermicamente até o estado de líquido saturado. Considerando a água como sistema, avalie o trabalho, em kJ/kg.

3.36 Dois quilogramas de Refrigerante 22 são submetidos a um processo para o qual a relação pressão-volume é $pv^{1,05}$ = *constante*. O estado inicial do refrigerante é estabelecido por p_1 = 2 bar, T_1 = −20°C, e a pressão final é p_2 = 10 bar. Calcule o trabalho para o processo, em kJ.

3.37 Refrigerante 134a em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo para o qual a relação pressão-volume é $pv^{1,058}$ = *constante*. No estado inicial, p_1 = 200 kPa, T_1 = −10°C. A temperatura final é de T_2 = 50°C. Determine a pressão final, em kPa, e o trabalho relacionado ao processo em kJ por kg de refrigerante.

3.38 Um conjunto cilindro-pistão contém 0,04 lb (0,02 kg) de Refrigerante 134a. O refrigerante é comprimido de um estado inicial onde p_1 = 10 lbf/in² (68,9 kPa) e T_1 = 20°F (−6,7°C) a um estado final onde p_2 = 160 lbf/in² (1,1 MPa). Durante o processo a pressão e o volume específico estão relacionados por pv = *constante*. Determine o trabalho, em Btu, relacionado ao refrigerante.

Utilizando Dados u–h

3.39 Determine os valores das propriedades especificadas para cada uma das condições a seguir.

(a) Para o Refrigerante 134a a T = 60°C e v = 0,072 m³/kg, determine p em kPa e h em kJ/kg.

(b) Para a amônia a p = 8 bar e v = 0,005 m³/kg, determine T em °C e u em kJ/kg.

(c) Para o Refrigerante 22 a T = −10°C e u = 200 kJ/kg, determine p em bar e v em m³/kg.

3.40 Determine os valores das propriedades especificadas para cada uma das condições a seguir.

(a) Para o Refrigerante 134a a p = 140 lbf/in² (965,3 kPa) e h = 100 Btu/lb (232,6 kJ/kg), determine T em °F e v em ft³/lb.

(b) Para a amônia a T = 0°F (−17,8°C) e v = 15 ft³/lb (0,94 m³/kg), determine p em lbf/in² e h em Btu/lb.

(c) Para o Refrigerante 22 a T = 30°F (−1,1°C) e v = 1,2 ft³/lb (0,07 m³/kg), determine p em lbf/in² e h em Btu/lb.

3.41 Utilizando o *IT* ou um programa similar, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Compare os resultados com os dados da tabela apropriada.

(a) Casos (a), (b) e (c) do Problema 3.39.

(b) Casos (a), (b) e (c) do Problema 3.40.

3.42 Utilizando as tabelas para a água, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Para cada caso, localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas p–v e T–v.

(a) A p = 3 bar, T = 240°C, avalie v em m³/kg e u em kJ/kg.

(b) A p = 3 bar, v = 0,5 m³/kg, avalie T em °C e u em kJ/kg.

(c) A T = 400°C, p = 10 bar, avalie v em m³/kg e h em kJ/kg.

(d) A T = 320°C, v = 0,03 m³/kg, avalie p em MPa e u em kJ/kg.

(e) A p = 28 MPa, T = 520°C, avalie v em m³/kg e h em kJ/kg.

(f) A T = 100°C, x = 60%, avalie p em bar e v em m³/kg.

(g) A T = 10°C, v = 100 m³/kg, avalie p em kPa e h em kJ/kg.

(h) A p = 4 MPa, T = 160°C, avalie v em m³/kg e u em kJ/kg.

3.43 Utilizando as tabelas para a água, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Para cada caso, localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas p–v e T–v.

(a) A p = 20 lbf/in² (137,9 kPa), T = 400°F (204,4°C), avalie v em ft³/lb e u em Btu/lb.

(b) A p = 20 lbf/in², v = 16 ft³/lb (1,0 m³/kg), avalie T em °F e u em Btu/lb.

(c) A T = 900°F (482,2°C), p = 170 lbf/in² (1,2 MPa), avalie v em ft³/lb e h em Btu/lb.

(d) A T = 600°F (315,6°C), v = 0,6 ft³/lb (0,04 m³/kg), avalie p em lbf/in² e u em Btu/lb.

(e) A p = 700 lbf/in² (4,8 MPa), T = 650°F (343,3°C), avalie v em ft³/lb e h em Btu/lb.

(f) A T = 400°F, x = 90%, avalie p em lbf/in² e v em ft³/lb.

(g) A T = 40°F (4,4°C), v = 1950 ft³/lb (121,7 m³/kg), avalie p em lbf/in² e h em Btu/lb.

(h) A p = 600 lbf/in² (4,1 MPa), T = 320°F (160°C), avalie v em ft³/lb e u em Btu/lb.

3.44 Uma quantidade de água se encontra a 15 MPa e 100°C. Avalie o volume específico, em m³/kg, e a entalpia específica, em kJ/kg, utilizando

(a) dados da Tabela A-5.

(b) dados de líquido saturado da Tabela A-2.

3.45 Avalie o volume específico, em ft³/lb, e a entalpia específica, em Btu/lb, da água a 400°F (204,4°C) e à pressão de 3000 lbf/in² (20.7 MPa)

3.46 Avalie o volume específico, em ft³/lb, e a entalpia específica, em Btu/lb, do Refrigerante 134a a 95°F (35°C) e à pressão de 150 lbf/in² (1.0 MPa)

3.47 Avalie o volume específico, em m³/kg, e a entalpia específica, em kJ/kg, da amônia a 20°C e 1 MPa

3.48 Avalie o volume específico, em m³/kg, e a entalpia específica, em kJ/kg, do propano a 800 kPa e 0°C

3.49 Represente graficamente, em função da pressão, a variação percentual de volume específico, a energia interna específica e a entalpia específica para a água a 20°C a partir do estado de líquido saturado até o estado onde a pressão é de 300 bar. Baseado nos gráficos obtidos, discuta as implicações relacionadas à aproximação de propriedades de líquido comprimido utilizando propriedades de líquido saturado a 20°C, como discutido na Seção 3.10.1

Aplicando o Balanço de Energia

3.50 Um conjunto cilindro-pistão contém 1 kg de água, inicialmente ocupando um volume de 0,5 m³ a 1 bar. A transferência de energia por calor para a água resulta em uma expansão a temperatura constante até um volume final de 1,694 m³. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial. Para água (a) mostre o processo em um diagrama p–v, (b) determine o trabalho, em kJ, e (c) determine a quantidade de calor transferida, em kJ.

3.51 Propano em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo a pressão constante de vapor saturado a 400 kPa até a temperatura de 40°C. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial. (a) Mostre o processo em um diagrama p–v, (b) determine o trabalho, em kJ/kg, e (c) determine a quantidade de calor transferida, em kJ/kg.

3.52 Refrigerante 134a é comprimido sem transferência de calor em um conjunto cilindro-pistão a partir de 30 lbf/in² (206,8 kPa), 20°F (−6,7°C) até 160 lbf/in² (1,1 MPa). A massa do refrigerante é 0,04 lb (0,02 kg). Tomando o refrigerante como sistema, $W = -0{,}56$ Btu (−0,59 kJ). Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine a temperatura final em °F.

3.53 Vapor de amônia em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo a pressão constante a partir de vapor saturado a 10 bar. O trabalho é de +16,5 kJ/kg. Variações das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine (a) a temperatura final da amônia, em °C, e (b) determine a quantidade de calor transferida, em kJ/kg.

3.54 Água em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente à temperatura de 99,63°C e um título de 65%, é aquecida a pressão constante até a temperatura de 200°C. Se o trabalho durante o processo for de +300 kJ, determine (a) a massa da água, em kg, e (b) a quantidade de calor transferida, em kJ. Variações das energias cinética e potencial são desprezíveis.

3.55 Um conjunto cilindro-pistão contendo, inicialmente, água líquida a 50°F (10°C) passa por um processo a uma pressão constante de 20 lbf/in² (137,9 kPa) até um estado final em que a água é um vapor a 300°F (148,9°C). Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine o trabalho e o calor transferido, em Btu por libra, para cada uma das três partes do processo global: (a) do estado inicial líquido até o estado de líquido saturado, (b) do estado de líquido saturado até o estado de vapor saturado e (c) do estado de vapor saturado até o estado final de vapor, todos a 20 lbf/in².

3.56 Conforme ilustrado na Fig. P3.56, um conjunto cilindro-pistão contém 0,1 kg de propano a uma pressão constante de 0,2 MPa. A transferência de energia por calor ocorre lentamente para o propano, e o volume do propano aumenta de 0,0277 m³ até 0,0307 m³. O atrito entre o pistão e o cilindro é desprezível. A pressão atmosférica local e a aceleração da gravidade são de 100 kPa e 9,81 m/s², respectivamente. Os efeitos das energias cinética e potencial relativos ao propano são desprezíveis. Para o propano determine (a) as temperaturas inicial e final, em °C, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a quantidade de calor transferida, em kJ.

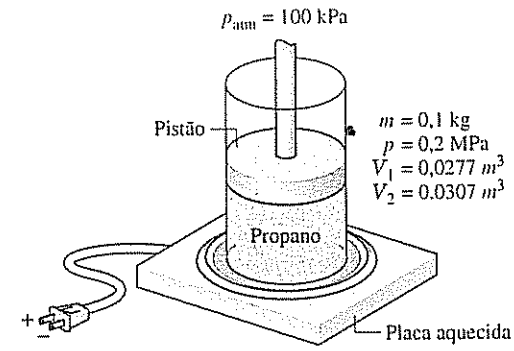


Fig. P3.56

3.57 Um tanque rígido fechado contém um quilograma de Refrigerante 22, inicialmente a 0,9 MPa, 20°C. O tanque é equipado com um agitador que transfere energia *para* o refrigerante a uma taxa constante de 0,1 kW. A transferência de calor *do* refrigerante *para* a vizinhança ocorre a uma taxa Kt, em kW, onde a constante K está em kW por minuto e t é o tempo, em minutos. Após 20 minutos sendo misturado o refrigerante fica a uma pressão de 1,2 MPa. Não ocorrem variações globais com relação às energias cinética e potencial. Para o Refrigerante 22, determine

(a) o trabalho, em kJ
(b) o calor transferido, em kJ.
(c) Determine a constante K, em kW por minuto.

3.58 Um tanque hermético rígido contém 2 kg de água inicialmente a 80°C e um título de 0,6. Uma transferência de calor ocorre até que o tanque contenha apenas vapor saturado a alta pressão. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Considerando a água como sistema, determine a quantidade de energia transferida por calor, em kJ.

3.59 Conforme ilustrado na Fig. P3.59, um tanque rígido fechado com 20 ft³ (0,57 m³) de volume contém 75 lb (34 kg) de Refrigerante 134a e está exposto ao sol. Às 9:00 h da manhã o refrigerante está a uma pressão de 100 lbf/in² (689,5 kPa). Às 15 h, devido à radiação solar, o refrigerante se encontra como um vapor saturado a uma pressão maior do que 100 lbf/in². Para o refrigerante, determine (a) a temperatura inicial, em °F, (b) a pressão final, em lbf/in², e (c) a transferência de calor, em Btu.

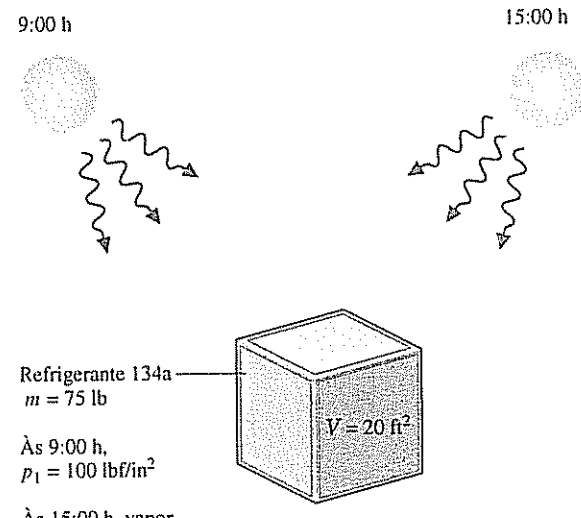


Fig. P3.59

3.60 Um tanque rígido e isolado equipado com um agitador contém água, inicialmente como uma mistura bifásica líquido-vapor a 20 lbf/in² (137,9 kPa). Essa mistura consiste em 0,07 lb (0,03 kg) de água líquida saturada e 0,07 lb de vapor d'água saturado. Um agitador movimenta a mistura até que toda a água se torne vapor saturado a uma pressão maior do que 20 lbf/in². Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para a água, determine

(a) o volume ocupado, em ft³.
(b) a temperatura inicial, em °F.
(c) a pressão final, em lbf/in²
(d) o trabalho, em Btu.

3.61 Se a placa aquecida do Exemplo 3.2 transferisse energia a uma taxa de 0,1 kW para uma mistura bifásica, determine o tempo necessário, em horas, para levar a mistura do (a) estado 1 até o estado 2, (b) do estado 1 até o estado 3.

3.62 Um tanque rígido contém 5 lb (2,3 kg) de água, inicialmente a T_1 = 260°F (126,7°C) e v_1 = 7,07 ft³/lb (0,44 m³/kg). Calor é transferido para o conteúdo do tanque até que a temperatura seja de T_2 = 350°F (176,7°C). Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para a água, determine (a) as pressões inicial e final, em lbf/in², e (b) a transferência de calor, em Btu.

3.63 Um tanque rígido e fechado contém vapor d'água saturado. A água é resfriada até um estado final onde a temperatura é 110°C. Nessa temperatura as massas de vapor e líquido saturado são ambas de 1000 kg. Determine o calor transferido durante o processo, em kJ.

3.64 Um tanque rígido bem isolado contém uma mistura bifásica que consiste em 0,005 ft³ (141,6 cm³) de água líquida saturada e 1,2 ft³ (0,03 m³) de vapor d'água saturado, inicialmente a 14,7 lbf/in² (101,3 kPa). Um agitador movimenta a mistura até que somente vapor saturado a alta pressão permanece no tanque. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para a água, determine a quantidade de calor transferida por trabalho, em Btu.

3.65 Uma mistura bifásica líquido-vapor de H_2O, inicialmente a 1,0 MPa com um título de 90%, está contida em um tanque rígido bem isolado. A massa de H_2O é de 2 kg. Uma resistência elétrica de aquecimento no interior do tanque transfere energia para a água a uma taxa constante de 60 W por 1,95 h. Determine a temperatura final da água no tanque, em °C, e a pressão final, em bar.

3.66 Dois quilogramas de Refrigerante 134a, inicialmente a 2 bar e ocupando um volume de 0,12 m³, são submetidos a um processo a pressão constante até que o volume seja duplicado. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine o trabalho e a quantidade de calor transferida durante o processo, ambos em kJ.

3.67 Duas libras (0,91 kg) de uma mistura bifásica líquido-vapor de H_2O, inicialmente a 100 lbf/in² (689,5 kPa), estão confinadas em uma parte de um reservatório rígido e isolado por meio de uma divisória. O restante do reservatório possui um volume de 7 ft³ (0,20 m³) e está inicialmente em vácuo. A divisória é removida e a água se expande de forma a preencher a totalidade do reservatório. A pressão no estado final de equilíbrio é de 40 lbf/in² (275,8 kPa). Determine o título da mistura presente inicialmente e o volume total do reservatório, em ft³.

3.68 Um quilograma de água sólida saturada nas condições do ponto triplo é aquecido a líquido saturado enquanto a pressão é mantida constante. Determine o trabalho e o calor transferido para o processo, ambos em kJ. Mostre que o calor transferido é igual à variação de entalpia da água para esse caso.

3.69 Um sistema fechado inicialmente contém uma mistura trifásica que consiste em 1 lb (0,45 kg) de água sólida saturada (gelo), 1 lb de água líquida saturada e 0,2 lb (0,09 kg) de vapor d'água saturado na temperatura e pressão do ponto triplo. Ocorre transferência de calor enquanto a pressão é mantida constante, até que reste apenas vapor saturado. Determine as quantidades de energia transferida por trabalho e por calor, ambas em Btu.

3.70 Uma mistura bifásica líquido-vapor de H_2O, inicialmente com x = 30% e uma pressão de 100 kPa, está contida em um conjunto cilindro-pistão, como ilustrado na Fig. P3.70. A massa do pistão é de 10 kg, e ele possui 15 cm de diâmetro. A pressão da vizinhança é de 100 kPa. À medida que a água é aquecida a pressão no interior do cilindro permanece constante até que o pistão atinge os esbarros. A transferência de calor para a água continua, a volume constante, até que a pressão atinja 150 kPa. O atrito entre o pistão e as paredes do cilindro e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para o processo global relativo à água, determine o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ.

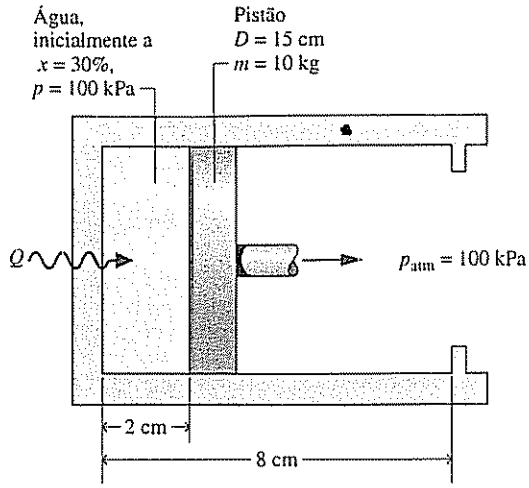


Fig. P3.70

3.71 Um conjunto cilindro-pistão contém 2 lb (0,91 kg) de água, inicialmente a 300°F (148,9°C). A água passa por dois processos em série: aquecimento a volume constante seguido por um processo a pressão constante. No final do processo a volume constante a pressão é de 100 lbf/in² (689,5 kPa) e a água corresponde a uma mistura bifásica líquido-vapor com um título de 80%. No final do processo a pressão constante a temperatura é de 400°F (204,4°C). Despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

(a) Esboce os diagramas T–v e p–v indicando os estados principais e os processos.
(b) Determine o trabalho e a transferência de calor para cada um dos dois processos, ambos em Btu.

3.72 Um sistema que consiste em 2 lb (0,91 kg) de vapor d'água inicialmente a 300°F (148,9°C) e ocupando um volume de 20 ft³ (0,57 m³) é comprimido isotermicamente até um volume de 9,05 ft³ (0,26 m³). O sistema é então aquecido a volume constante até uma pressão final de 120 lbf/in² (827,4 kPa). Durante a pressão isotérmica ocorre transferência de energia por trabalho de magnitude 90,8 Btu (95,8 kJ) *para* o sistema. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine a quantidade de calor trocada, em Btu, para cada processo.

3.73 Amônia em um conjunto cilindro-pistão é submetida a dois processos em série. No estado inicial, p_1 = 120 lbf/in² (827,4 kPa) e o título é 100%. O Processo 1-2 ocorre a volume constante até que a temperatura atinja 100°F (37,8°C). O segundo processo, do estado 2 para o estado 3, ocorre a temperatura constante com Q_{23} = −98,9 Btu (−104,3 kJ), até que o título volte a 100%. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Para 2,2 lb (1,0 kg) de amônia, determine (a) a quantidade de calor transferida para o Processo 1-2 e (b) o trabalho para o Processo 2-3, em Btu.

3.74 Um conjunto cilindro-pistão contém 3 lb (1,4 kg) de água, inicialmente ocupando um volume V_1 = 30 ft³ (0,85 m³) a T_1 = 300°F (148,9°C). A água passa por dois processos em série:

Processo 1-2: compressão a temperatura constante até V_2 = 11,19 ft³ (0,32 m³), durante a qual há uma transferência de energia por calor *a partir* da água de 1275 Btu (1,3 MJ).

Processo 2-3: aquecimento a volume constante até p_3 = 120 lbf/in² (827,4 kPa).

Esboce os dois processos em série em um diagrama T–v. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho no Processo 1-2 e o calor transferido no Processo 2-3, ambos em Btu.

3.75 Conforme ilustrado na Fig. P3.75, um conjunto cilindro-pistão equipado com esbarros contém 0,1 kg de água, inicialmente a 1 MPa, 500°C. A água passa por dois processos em série:

Processo 1-2: resfriamento a pressão constante até que a face do pistão pare ao atingir os esbarros. O volume ocupado pela água é então metade do seu volume inicial.

Processo 2-3: com a face do pistão em repouso sobre os esbarros, a água é resfriada até 25°C.

Esboce os dois processos em série em um diagrama p–v. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine para cada processo o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ.

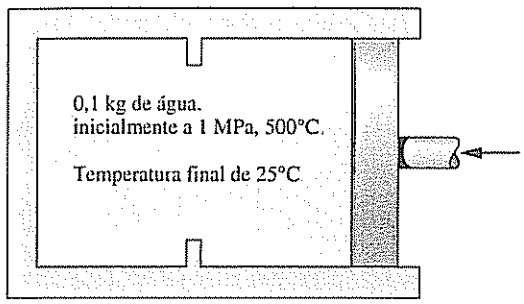


Fig. P3.75

3.76 Um sistema que consiste em 2 kg de amônia é submetido a um ciclo composto dos seguintes processos:

Processo 1-2: volume constante de $p_1 = 10$ bar, $x_1 = 0.6$ até vapor saturado.

Processo 2-3: temperatura constante de $p_3 = p_1$, $Q_{23} = +228$ kJ

Processo 3-1: pressão constante

Esboce o ciclo em diagramas p–v e T–v. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho líquido relativo ao ciclo e a quantidade de calor trocada para cada processo, todos em kJ.

3.77 Um sistema que consiste em 1 kg de H_2O é submetido a um ciclo de potência composto pelos seguintes processos:

Processo 1-2: aquecimento a pressão constante de 10 bar, a partir de vapor saturado.

Processo 2-3: resfriamento a volume constante a $p_3 = 5$ bar, $T_3 = 160$°C

Processo 3-4: compressão isotérmica com $Q_{34} = -815{,}8$ kJ.

Processo 4-1: aquecimento a volume constante

Esboce o ciclo em diagramas p–v e T–v. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a eficiência térmica.

3.78 Um sistema que consiste em 1 lb (0,45 kg) de Refrigerante 22 é submetido a um processo composto dos seguintes processos:

Processo 1-2: pressão constante de $p_1 = 30$ lbf/in² (206,8 kPa), $x_1 = 0{,}95$ para $T_2 = 40$°F (4,4°C).

Processo 2-3: temperatura constante até vapor saturado com $W_{23} = -11{,}82$ Btu ($-12{,}5$ kJ).

Processo 3-1: expansão adiabática

Esboce o ciclo em diagramas p–v e T–v. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho líquido relativo ao ciclo e a quantidade de calor trocada para cada processo, todos em Btu.

3.79 Um conjunto cilindro-pistão contém 0,5 kg de Refrigerante 22, inicialmente como vapor saturado a 5 bar. O refrigerante passa por um processo no qual a relação pressão-volume específico é dada por pv = *constante* até uma pressão final de 20 bar. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine o trabalho e a quantidade de calor trocada para o processo, ambos em kJ.

3.80 Dez quilogramas de Refrigerante 22 contidos em um conjunto cilindro-pistão passam por um processo no qual a relação pressão-volume específico é dada por pv^n = *constante*. Os estados inicial e final do refrigerante são determinados por $p_1 = 400$ kPa, $T_1 = -5$°C, e $p_2 = 2000$ kPa, $T_2 = 70$°C, respectivamente. Determine o trabalho e a quantidade de calor transferida para o processo, ambos em kJ.

3.81 Um conjunto cilindro-pistão contém amônia, inicialmente a 0,8 bar e -10°C. A amônia é comprimida até uma pressão de 5,5 bar. Durante o processo, a pressão e o volume específico estão relacionados por pv = *constante*. Para 20 kg de amônia, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ.

3.82 Um conjunto cilindro-pistão contém amônia, inicialmente a $p_1 = 0{,}1$ MPa, $T_1 = 15$°C. A amônia é comprimida até um estado final em que $p_2 = 1$ MPa. Durante o processo, a pressão e o volume específico estão relacionados por pv = *constante* e o trabalho possui uma magnitude de 32 kJ. Esboce o processo em um diagrama p–v. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a quantidade de calor trocada, em kJ.

3.83 A Fig. P3.83 mostra um conjunto cilindro-pistão no qual atua uma mola. O cilindro contém água, inicialmente a 1000°F (537,8°C), e a mola está no vácuo. A face do pistão, cuja área é de 20 in² (0,01 m²), se encontra inicialmente em $x_1 = 20$ in (0,51 m). A água é resfriada até que a face do pistão atinja $x_2 = 16$ in (0,41 m). A força exercida pela mola varia linearmente com x de acordo com a expressão $F_{mola} = kx$, onde $k = 200$ lbf/in (35,0 kN/m). O atrito entre o pistão e o cilindro é desprezível. Para a água, determine

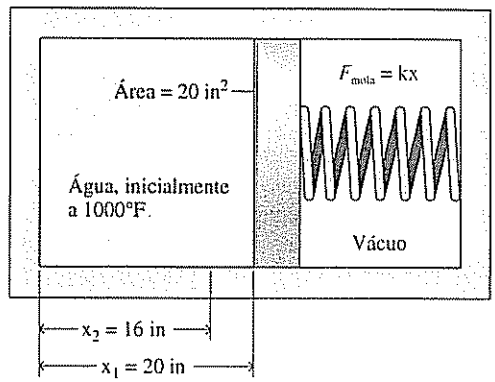


Fig. P3.83

(a) as pressões inicial e final, ambas em lbf/in²
(b) a quantidade de água presente, em lb
(c) o trabalho, em Btu
(d) a transferência de calor, em Btu

3.84 Conforme ilustrado na Fig. P3.84, um conjunto cilindro-pistão contém 0,5 kg de amônia, inicialmente a $T_1 = -20$°C e um título de 25%. Conforme a amônia é lentamente aquecida até o estado final, onde $T_2 = 20$°C e $p_2 = 0{,}6$ MPa, sua pressão varia linearmente com o volume específico. Os efeitos das energias cinética e potencial não são significativos. Para a amônia, (a) mostre o processo em um diagrama p–v e (b) determine o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em kJ.

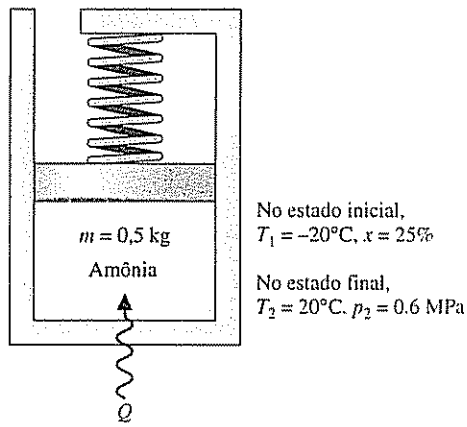


Fig. P3.84

3.85 Um galão de leite a 68°F (20°C) é colocado em um refrigerador. Se a energia for removida do leite por transferência de calor a uma taxa constante de 0,08 Btu/s (84,4 W), quanto tempo levaria, em minutos, para o leite ser resfriado até 40°F (4,4°C)? O calor específico e a massa específica do leite são 0,94 Btu/lb °R (3,9 kJ/kg K) e 64 lb/ft³ (1025,2 kg/m³), respectivamente.

3.86 A Fig. P3.86 mostra um bloco de cobre isolado que recebe energia a uma taxa de 100 W de uma resistência embutida. Se o bloco possui um volume de 10^{-3} m³ e uma temperatura inicial de 20°C, quanto tempo levaria, em minutos, para a temperatura alcançar 60°F (15,6°C)? Os dados para o cobre são fornecidos na Tabela A-19.

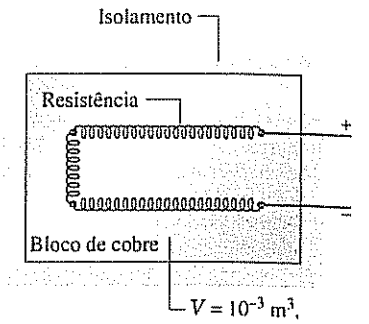


Fig. P3.86

3.87 Um tanque de cobre com massa de 13 kg perfeitamente isolado armazena 4 kg de água líquida. Inicialmente a temperatura do cobre é 27°C e a temperatura da água é 50°C. Uma resistência elétrica de massa desprezível transfere 100 kJ de energia para o conteúdo do tanque. O tanque e o seu conteúdo atingem o equilíbrio. Qual a temperatura final, em °C?

3.88 Uma barra de alumínio de 0,2 ft³ (0,006 m³), inicialmente a 200°F (93,3°C), é colocada em um tanque aberto com 4 ft³ (0,11 m³) de água líquida, inicialmente a 70°F (21,1°C). Considerando a água e a barra como sistema, determine a temperatura final de equilíbrio, em °F, desprezando o calor transferido entre o tanque e a sua vizinhança.

3.89 Cinqüenta libras (22,7 kg) de ferro fundido a uma temperatura inicial de 700°F (371,1°C) são temperadas em um tanque cheio de óleo. O tanque possui 3 ft de diâmetro e 5 ft (1,5 m) de altura. O óleo pode ser considerado incompressível com uma massa específica de 60 lb/ft³ (961,1 kg/m³) e uma temperatura inicial de 80°F (26,7°C). A massa do tanque é desprezível. Se o calor específico do ferro é 0,10 Btu/lb · °R (0,42 kJ/kg · K) e o do óleo é 0,45 Btu/lb · °R (1,9 kJ/kg · K), qual a temperatura de equilíbrio do ferro e do óleo, em °F? Despreze o calor transferido entre o tanque e a sua vizinhança.

3.90 Conforme ilustrado na Fig. P3.90, um tanque isolado fechado contém 0,15 kg de água líquida e possui uma base de 0,25 kg de cobre. As paredes finas do reservatório possuem massa desprezível. Inicialmente, o tanque e o seu conteúdo estão ambos a 30°C. Um elemento de aquecimento inserido na base de cobre é energizado com uma corrente elétrica de 10 ampères a uma voltagem de 12 V por 100 segundos. Determine a temperatura final do tanque e do seu conteúdo, em °C. Os dados para o cobre e a água líquida são fornecidos na Tabela A-19.

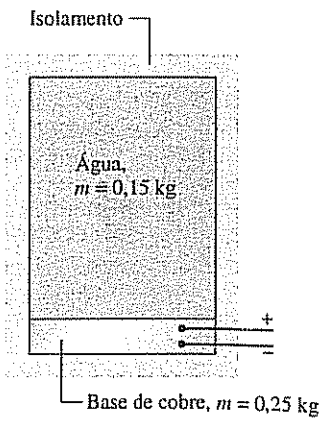


Fig. P3.90

Utilizando Dados Generalizados de Compressibilidade

3.91 Determine o fator de compressibilidade do vapor d'água a 200 bar e 470°C, utilizando

(a) dados do diagrama de compressibilidade
(b) dados das tabelas de vapor.

3.92 Determine o volume, em m³, ocupado por 40 kg de nitrogênio (N_2) a 17 MPa, 180 K.

3.93 Oxigênio (O_2) ocupa um volume de 5 ft³ (0,14 m³) a 400°R (−50,9°C). Determine a massa de oxigênio, em lb.

3.94 Determine a pressão, em lbf/in², de etano (C_2H_6) a 115°F (46,1°C) e um volume específico de 0,3 ft³/lb (0,02 m³/kg).

3.95 Um tanque contém 2 m³ de ar a −93°C e uma pressão manométrica de 1,4 MPa. Determine a massa do ar, em kg. A pressão atmosférica local é de 1 atm.

3.96 Butano (C_4H_{10}) em um conjunto cilindro-pistão é submetido a uma compressão isotérmica a 173°C de p_1 = 1,9 MPa até p_2 = 2,5 MPa. Determine o trabalho, em kJ/kg.

3.97 Cinco quilogramas de butano (C_4H_{10}) em um conjunto cilindro-pistão são submetidos a um processo de p_1 = 5 MPa, T_1 = 500 K para p_2 = 3 MPa, T_2 = 450 K durante o qual a relação entre a pressão e o volume específico é pv^n = *constante*. Determine o trabalho, em kJ.

3.98 Cinco libra-moles de dióxido de carbono (CO_2), inicialmente a 320 lbf/in² (2,2 MPa), 660°R (93,5°C), são comprimidas a pressão constante em um conjunto cilindro-pistão. Para o gás, W = −2000 Btu (−2,1 MJ). Determine a temperatura final, em °R.

3.99 Para que intervalos de pressão e temperatura o ar pode ser considerado um gás ideal? Explique sua resposta.

Trabalhando com o Modelo de Gás Ideal

3.100 Um tanque contém 0,05 m³ de nitrogênio (N_2) a −21°C e 10 MPa. Determine a massa de nitrogênio, em kg, utilizando

(a) o modelo de gás ideal.
(b) dados do diagrama de compressibilidade.

Comente sobre a aplicabilidade do modelo de gás ideal para o nitrogênio nesse estado.

3.101 Determine o erro percentual relacionado à utilização do modelo de gás ideal na determinação do volume específico de

(a) vapor d'água a 2000 lbf/in² (13,8 MPa), 700°F (371,1°C).
(b) vapor d'água a 1 lbf/in² (6,9 kPa), 200°F (93,3°C).
(c) amônia a 60 lbf/in² (413,7 kPa), 160°F (71,1°C).
(d) ar a 1 atm, 2000°R (838,1°C).
(e) Refrigerante 22 a 300 lbf/in² (2,1 MPa), 140°F (60°C).

3.102 Verifique a aplicabilidade do modelo de gás ideal

(a) para a água a 700°F (371,1°C) nas pressões de 1600 lbf/in² (11,0 MPa) e 160 lbf/in² (1,1 MPa).
(b) para o dióxido de carbono a 865 K nas pressões de 75 bar e 3 bar.

3.103 Determine a temperatura, em K, do oxigênio (O_2) a 250 bar e um volume específico de 0,003 m³/kg utilizando dados de compressibilidade generalizada e compare com o valor obtido a partir do modelo de gás ideal.

3.104 Um tanque rígido fechado contém um gás que se comporta como gás ideal, inicialmente a 27°C e com uma pressão manométrica de 300 kPa. Se o gás for aquecido até 77°C, determine a pressão final, expressa como uma pressão manométrica, em kPa. A pressão atmosférica local é de 1 atm.

3.105 Um tanque contém 10 lb (4,5 kg) de ar a 70°F (21,1°C) com uma pressão de 30 lbf/in² (206,8 kPa). Determine o volume do ar, em ft³. Verifique que o comportamento de gás ideal pode ser assumido pelo ar sob essas condições.

3.106 Compare as massas específicas, em kg/m³, de hélio e ar, cada um a 300 K, 100 kPa. Admita comportamento de gás ideal.

3.107 Utilizando o modelo de gás ideal, determine o volume, em ft³, ocupado por 1 lbmol de dióxido de argônio (Ar) gasoso a 100 lbf/in² (689,5 kPa) e 550°R (32,4°C).

3.108 Mostre que a razão de calores específicos de um gás ideal monoatômico é igual a 5/3.

3.109 Um balão com hélio em seu interior, inicialmente a 27°C e 1 bar, é solto e sobe na atmosfera até que o hélio atinja 17°C e 0,9 bar. Determine a variação percentual de volume do hélio partindo do seu volume inicial.

3.110 Integrando $\bar{c}_p(T)$ obtido a partir da Tabela A-21, determine a variação da entalpia específica, em kJ/kg, de metano (CH_4) a partir de T_1

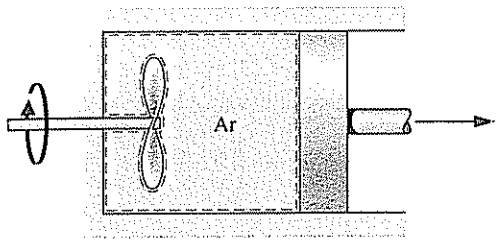
= 320 K. p_1 = 2 bar até T_2 = 800 K. p_2 = 10 bar Verifique o resultado utilizando o *IT* ou um programa similar

3.111 Admitindo o comportamento de gás ideal, represente graficamente em escala as isotermas de 300. 500, 1000 e de 2000 K em um diagrama p–v

3.112 Admitindo o comportamento de gás ideal, represente graficamente em escala as isotermas de 500, 1000, 2000 e de 4000°R (4,6; 282,4; 838,1 e 1949,1°C) em um diagrama p–v.

Utilizando Balanços de Energia com o Modelo de Gás Ideal

3.113 Conforme ilustrado na Fig P3 113, um conjunto cilindro-pistão equipado com um agitador contém ar, inicialmente a p_1 = 30 lbf/in² (206,8 kPa), T_1 = 540°F (282,2°C) e V_1 = 4 ft³ (0,11 m³). O ar passa por um processo até um estado final em que p_2 = 20 lbf/in² (137,9 kPa) e V_2 = 4,5 ft³ (0,13 m³) Durante o processo, o agitador transfere energia *para* o ar por trabalho na quantidade de 1 Btu, enquanto o ar transfere energia por trabalho *para* o pistão na quantidade de 3,31 Btu (3,5 kJ) Admitindo que o ar se comporta como um gás ideal, determine (a) a temperatura no estado 2, em °R, e (b) a transferência de calor, em Btu



No estado inicial, p_1 = 30 lbf/in². T_1 = 540°F. V_1 = 4 ft³
No estado final. p_2 = 20 lbf/in². V_2 = 4.5 ft³

Fig. P3.113

3.114 Amônia está contida em um reservatório rígido e bem isolado. A pressão inicial é de 20 lbf/in² (137,9 kPa), a massa é 0,12 lb (0,05 kg) e o volume é de 2 ft³ (0,06 m³). O gás é misturado por um agitador, resultando em uma transferência de energia para a amônia de 20 Btu (21,1 kJ) de magnitude Empregando o modelo de gás ideal, determine a temperatura final da amônia, em °R. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial

3.115 Um conjunto cilindro-pistão contém 1 kg de nitrogênio, conforme ilustrado na Fig P3 115 Não há atrito entre o pistão e as paredes do cilindro. A vizinhança está a 1 atm. O volume e a pressão iniciais no cilindro são 1 m³ e 1 atm, respectivamente Calor é transferido para o nitrogênio até que o volume seja duplicado Determine a quantidade de calor transferida durante o processo, em kJ, considerando que a razão de calores específicos é constante e dada por k = 1,4

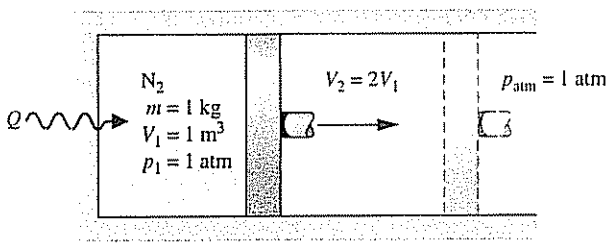


Fig. P3.115

3.116 Um conjunto cilindro-pistão contém ar a uma pressão de 30 lbf/in² (206,8 kPa) e um volume de 0,75 ft³ (0,02 m³) O ar é aquecido a pressão constante até que o seu volume seja duplicado. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, com a razão de calores específicos constante, dada por k = 1,4, determine o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em Btu

3.117 Conforme ilustrado na Fig P3 117, um ventilador movido a eletricidade a uma taxa de 1,5 kW se encontra no interior de um recinto medindo 3 m × 4 m × 5 m. O recinto contém ar, inicialmente a 27°C e 0,1 MPa O ventilador opera em regime permanente por 30 minutos Admitindo o modelo de gás ideal, determine para o ar (a) a massa, em kg, (b) a temperatura final, em °C, e (c) a pressão final, em MPa Não há transferência de calor entre o recinto e a vizinhança Ignore o volume ocupado pelo ventilador e admita que o ventilador não armazena energia.

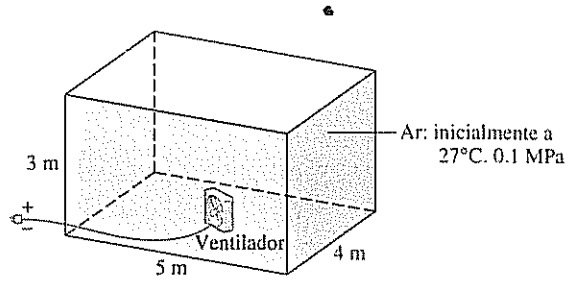


Fig. P3.117

3.118 Um conjunto cilindro-pistão contém nitrogênio (N_2) ocupando um volume de 2 ft³ (0,06 m³), inicialmente a 20 lbf/in² (137,9 kPa) e 80°F (26,7°C) O nitrogênio é comprimido até um estado final em que a pressão é de 160 lbf/in² (1,1 MPa) e a temperatura é de 300°F (148,9°C) Durante a compressão ocorre uma transferência de calor de 1,6 Btu (1,7 kJ) de magnitude, *do* nitrogênio *para* sua vizinhança Admitindo o comportamento de gás ideal, determine para o nitrogênio (a) a massa, em lb. e (b) o trabalho, em Btu

3.119 Conforme ilustrado na Fig. P3 119, um conjunto cilindro-pistão, cujo pistão repousa sobre um conjunto de esbarros, contém 0,5 kg do gás hélio inicialmente a 100 kPa e 25°C A massa do pistão e o efeito da pressão atmosférica que atua sobre o pistão são tais que a pressão necessária para levantá-lo é de 500 kPa Que quantidade de energia deve ser transferida por calor para o hélio, em kJ, antes que o pistão comece a subir? Admita o comportamento de gás ideal para o hélio.

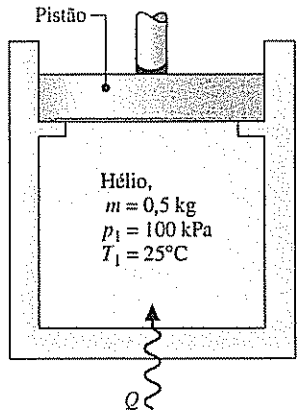


Fig. P3.119

3.120 Conforme ilustrado na Fig P3 120, um tanque equipado com uma resistência elétrica de massa desprezível mantém 2 kg de nitrogênio (N_2) inicialmente a 27°C e 0,1 MPa. Em um período de 10 minutos é fornecida eletricidade para a resistência a uma taxa a 0,12 kW Durante esse mesmo período uma transferência de calor de 12,59 kJ de magnitude ocorre *do* nitrogênio *para* a sua vizinhança Considerando comportamento de gás ideal, determine a temperatura final do nitrogênio. em °C. e a pressão final, em MPa

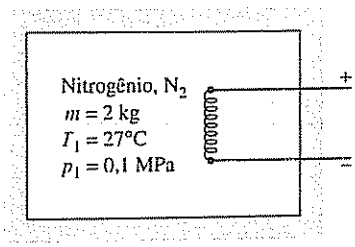


Fig. P3.120

3.121 Um tanque rígido fechado equipado com um agitador contém 0,1 kg de ar, inicialmente a 300 K e 0,1 MPa. O agitador movimenta o ar por 20 minutos, com a potência de acionamento variando em função do tempo de acordo com a expressão $\dot{W} = -10t$, onde $\dot{W}$ está em watts e t é o tempo em minutos. A temperatura final do ar é de 1060 K. Admitindo comportamento de gás ideal e que não ocorrem variações relativas às energias cinética e potencial, determine para o ar (a) a pressão final, em MPa, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a transferência de calor, em kJ.

3.122 Conforme ilustrado na Fig. P3.122, um dos lados de um reservatório rígido e isolado mantém 2 m³ de ar inicialmente a 27°C e 0,3 MPa. Uma fina membrana separa o ar de um espaço evacuado com 3 m³ de volume. Devido à pressão do ar a membrana estica e eventualmente se rompe, permitindo que o ar ocupe todo o volume. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine (a) a massa do ar, em kg, (b) a temperatura final do ar, em K, e (c) a pressão final do ar, em MPa.

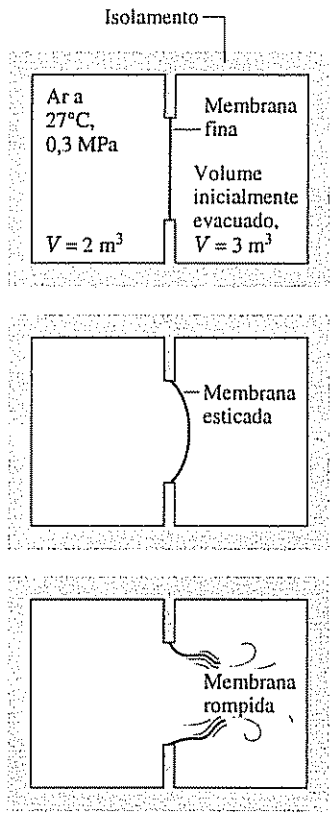


Fig. P3.122

3.123 Ar está confinado por uma divisória em um dos lados de um reservatório rígido e isolado, como mostra a Fig. P3.123. O outro lado está inicialmente evacuado. O ar está inicialmente a: $p_1 = 5$ bar, $T_1 = 500$ K e $V_1 = 0{,}2$ m³. Quando a divisória é retirada, o ar se expande de forma a preencher a totalidade do reservatório. Medidas mostram que $V_2 = 2V_1$ e $p_2 = p_1/4$. Considerando que o ar se comporta como um gás ideal, determine (a) a temperatura final, em K, e (b) a transferência de calor, em kJ.

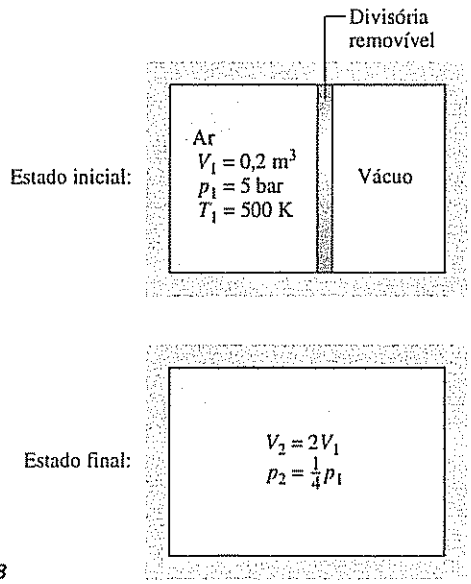


Fig. P3.123

3.124 Dois quilogramas de ar, inicialmente a 5 bar, 350 K, e 4 kg de monóxido de carbono (CO), inicialmente a 2 bar e 450 K, estão confinados em lados opostos de um reservatório rígido e perfeitamente isolado por meio de uma divisória, como ilustrado na Fig. P3.124. A divisória é livre para se mover e permite condução de um gás para o outro sem o acúmulo de energia na própria divisória. O ar e o CO se comportam como gases ideais com a razão de calores específicos constante, dada por $k = 1{,}395$. Determine no equilíbrio, (a) a temperatura, em K, (b) a pressão, em bar, e (c) o volume ocupado por cada gás, em m³.

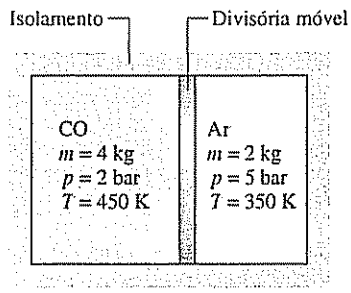


Fig. P3.124

3.125 Dois tanques não-isolados contêm ar. Inicialmente o tanque A armazena 1 lb (0,45 kg) de ar a 1440°R (526,8°C) e o tanque B contém 2 lb (0,91 kg) de ar a 900°R (226,8°C). A pressão inicial em cada tanque é de 50 lbf/in² (344,7 kPa). Uma válvula na linha que conecta os dois tanques é aberta, permitindo a mistura dos conteúdos dos tanques. Eventualmente, os conteúdos dos tanques alcançam equilíbrio à temperatura da vizinhança, dada por 520°R (15,7°C). Assumindo o comportamento de gás ideal, determine a quantidade de energia transferida como calor, em Btu, e a pressão final, em lbf/in².

3.126 Dois quilogramas de um gás com peso molecular 28 estão contidos em um tanque rígido fechado equipado com uma resistência elétrica. Por essa resistência passa uma corrente constante de 10 ampères a uma voltagem de 12 V por 10 min. Medições indicam que quando o equilíbrio é alcançado a temperatura do gás aumenta de 40,3°C. Estima-se que a transferência de calor para a vizinhança ocorre a uma taxa constante de 20 W. Considerando comportamento de gás ideal, determine o valor médio do calor específico c_p, em kJ/kg · K, do gás no intervalo de temperaturas correspondente aos dados medidos.

3.127 Conforme ilustrado na Fig. P3.127, um tanque rígido contém inicialmente 3 kg de dióxido de carbono (CO_2) a 500 kPa. O tanque está conectado por uma válvula a um conjunto cilindro-pistão orientado verticalmente e contendo de início 0,05 m³ de CO_2. Embora a válvula esteja fechada, um pequeno vazamento faz com que o CO_2 escoe para o interior do cilindro até que a pressão do tanque tenha sido reduzida a 200 kPa. O peso do pistão e a pressão atmosférica mantêm uma pressão constante de 200 kPa no cilindro. Devido à transferência de calor, a temperatura do CO_2 permanece constante e igual a 290 K ao longo do tanque e do cilindro. Considerando o comportamento de gás ideal, determine para o CO_2 o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ.

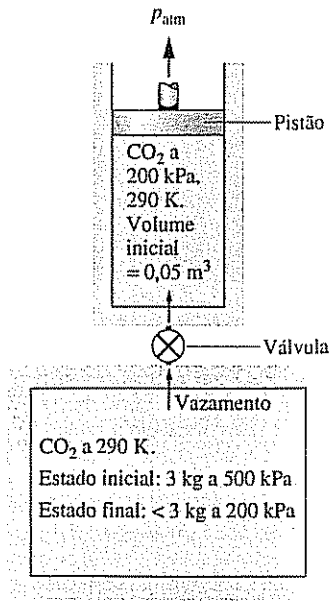


Fig. P3.127

3.128 Um tanque rígido, com volume de 2 ft³ (0,06 m³), contém ar inicialmente a 20 lbf/in² (137,9 kPa) e 500°R (4.6°C) Se o ar recebe uma quantidade de calor igual a 6 Btu (6,3 kJ), determine a temperatura final, em °R, e a pressão final, em lbf/in² Considere o comportamento de gás ideal e utilize

(a) um valor constante de calor específico obtido da Tabela A-20E
(b) uma dependência funcional para o calor específico da Tabela A-21E.
(c) dados da Tabela A-22E

3.129 Ar é comprimido adiabaticamente de $p_1 = 1$ bar, $T_1 = 300$ K até $p_2 = 15$ bar, $v_2 = 0{,}1227$ m³/kg O ar é então resfriado a volume constante até $T_3 = 300$ K Considerando comportamento de gás ideal e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, calcule o trabalho para o primeiro processo e a quantidade de calor transferida no segundo processo, em kJ por kg de ar Resolva o problema de duas formas:

(a) utilizando dados da Tabela A-22
(b) utilizando um calor específico constante avaliado a 300 K.

3.130 Ar é comprimido em um conjunto cilindro-pistão de $p_1 = 10$ lbf/in² (68,9 kPa), $T_1 = 500$°R (4,6°C) até um volume final de $V_2 = 1$ ft³ (0,03 m³) em um processo descrito por $pv^{1.25} = constante$ A massa do ar é de 0,5 lb (0,23 kg) Considerando comportamento de gás ideal e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em Btu, utilizando (a) calores específicos constantes avaliados a 500°R e (b) dados da Tabela A-22E. Compare os resultados e discuta

3.131 Hélio (He) gasoso inicialmente a 2 bar, 200 K é submetido a um processo politrópico, com $n = k$, até a pressão final de 14 bar Determine o trabalho e o calor transferido durante o processo em kJ por kg de hélio Considere o comportamento de gás ideal

3.132 Um conjunto cilindro-pistão contém monóxido de carbono modelado como um gás ideal com razão de calores específicos constante dada por $k = 1{,}4$ O monóxido de carbono passa por uma expansão politrópica, com $n = k$, de um estado inicial, onde $T_1 = 200$°F (93,3°C) e $p_1 = 40$ lbf/in² (275,8 kPa), até um estado final em que o volume é duas vezes o volume inicial Determine (a) a temperatura final, em °F, e a pressão final, em lbf/in², e (b) o trabalho e a transferência de calor, ambos em Btu/lb

3.133 Um conjunto cilindro-pistão que contém 0,2 kmol de nitrogênio (N_2) passa por dois processos em série, como é descrito a seguir:

Processo 1-2: pressão constante a 5 bar de $V_1 = 1.33$ m³ até $V_2 = 1$ m³

Processo 2-3: volume constante até $p_3 = 4$ bar

Considerando comportamento de gás ideal e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho e o calor transferido para cada processo, em kJ.

3.134 Um conjunto cilindro-pistão que contém 1 kg de ar passa por dois processos em série a partir de um estado inicial onde $p_1 = 0{,}5$ MPa e $T_1 = 227$°C:

Processo 1-2: expansão a temperatura constante até que o volume seja duas vezes o volume inicial

Processo 2-3: aquecimento a volume constante até que a pressão seja novamente 0.5 MPa

Esboce os dois processos em série em um diagrama p–v Considerando comportamento de gás ideal, determine (a) a pressão no estado 2, em MPa, (b) a temperatura no estado 3, em °C, e para cada um dos processos (c) o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ.

3.135 Um conjunto cilindro-pistão contém ar modelado como um gás ideal com razão de calores específicos constante e dada por $k = 1{,}4$ O ar passa por um ciclo de potência composto por quatro processos em série:

Processo 1-2: expansão a temperatura constante a 600 K de $p_1 = 0{,}5$ MPa até $p_2 = 0{,}4$ MPa

Processo 2-3: expansão politrópica com $n = k$ até $p_3 = 0{,}3$ MPa.

Processo 3-4: compressão a pressão constante até $V_4 = V_1$.

Processo 4-1: aquecimento a volume constante.

Esboce o ciclo em um diagrama p–v Determine (a) o trabalho e o calor transferido para cada processo, em kJ/kg, e (b) a eficiência térmica.

3.136 Uma libra de ar é submetida a um ciclo de potência que consiste nos seguintes processos:

Processo 1-2: volume constante de $p_1 = 20$ lbf/in² (137,9 kPa), $T_1 = 500$°R (4,6°C) para $T_2 = 820$°R (182.4°C)

Processo 2-3: expansão adiabática até $v_3 = 1{,}4v_2$.

Processo 3-1: compressão a pressão constante.

Esboce o ciclo em um diagrama p–v. Considerando comportamento de gás ideal, determine

(a) a pressão no estado 2, em lbf/in².
(b) a temperatura no estado 3, em °R
(c) a eficiência térmica do ciclo.

3.137 Um sistema consiste em 2 kg de dióxido de carbono gasoso inicialmente no estado 1, onde $p_1 = 1$ bar e $T_1 = 300$ K. O sistema é submetido a um ciclo de potência que consiste nos seguintes processos:

Processo 1-2: volume constante até $p_2, p_2 > p_1$

Processo 2-3: expansão com $pv^{1.28} = constante$

Processo 3-1: compressão a pressão constante

Utilizando o modelo de gás ideal e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial,

(a) esboce o ciclo em um diagrama p–v.
(b) represente graficamente a relação entre a eficiência térmica e a razão p_2/p_1 para o intervalo de variação de 1,05 a 4

3.138 Ar é submetido a um processo politrópico em um conjunto cilindro-pistão de $p_1 = 14{,}7$ lbf/in² (101,3 kPa) e $T_1 = 70$°F (21,1°C) até $p_2 = 100$ lbf/in² (689,5 kPa). Utilizando o *IT* ou um programa similar, represente graficamente o trabalho e o calor transferido, em Btu por lb de ar, para o expoente politrópico variando de 1,0 a 1,6 Analise o erro introduzido na quantidade de calor transferida pela consideração de c_v constante avaliado a 70°F. Discuta o resultado.

3.139 Vapor d'água, inicialmente a 5 MPa, 280°C, é submetido a um processo politrópico em um conjunto cilindro-pistão até uma pressão final de 20 MPa. Utilizando o *IT* ou um programa similar represente graficamente o calor transferido, em kJ por kg de vapor, para expoentes politrópicos variando entre 1,0 e 1,6. Analise o erro introduzido na quantidade de calor transferida pela consideração de comportamento de gás ideal para o vapor Discuta o resultado

Projetos e problemas em aberto: explorando a prática de engenharia

3.1P Dermatologistas removem marcas na pele de pacientes pela aplicação de *sprays* com tubos de nitrogênio líquido (N_2) Investigue como o nitrogênio líquido é produzido e entregue aos médicos e como estes lidam com o nitrogênio líquido em suas práticas. Investigue também as vantagens e desvantagens desse tipo de abordagem para a remoção de marcas na pele em comparação com abordagens alternativas utilizadas atualmente Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências.

3.2P Embora utilizados como fluidos refrigerantes em refrigeradores e *freezers* em outras partes do mundo, os hidrocarbonetos não continuarão em uso nos Estados Unidos em virtude da preocupação com as responsabilidades envolvidas quando ocorrem acidentes. Pesquise sobre a segurança relativa à utilização dos hidrocarbonetos como fluidos refrigerantes Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências.

3.3P O gás metano gerado pela decomposição de lixo de aterros possui valor econômico Pesquise na literatura os possíveis usos do gás proveniente de aterros Contacte o administrador de um grande aterro perto de sua região para saber sobre a captura e o uso, se houver, do gás gerado a partir do lixo Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências.

3.4P Engenheiros metalúrgicos utilizam um diagrama de fases para o estudo de *transformações alotrópicas*, que são transformações de fase dentro

da região de sólido Que características do comportamento de fases em sólidos são importantes nos campos de metalurgia e processamento de materiais? Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências

3.5P O uso do calorímetro a *volume constante* para medir o valor da caloria de alimentos e outras substâncias, conforme ilustrado no Exemplo 3 6, é um dos três tipos gerais de calorimetria biológica Os dois outros são a *calorimetria diferencial de varredura* e a *calorimetria de titulação isotérmica* Considerando esses dois, investigue os objetivos e a instrumentação de cada um Apresente as informações obtidas em um memorando, incluindo esboços da respectiva instrumentação juntamente com um resumo de como a instrumentação é utilizada em laboratórios

3.6P Projete um frasco de laboratório para conter até 10 kmol de vapor de mercúrio a pressões de até 3 MPa e temperaturas de 900 a 1000 K Considere a saúde e a segurança dos técnicos que trabalhariam com tal recipiente contendo vapor de mercúrio A relação p–v–T para o vapor de mercúrio pode ser expressa como

$$p = RT/v - T/v^2\exp(10{,}3338 - 0{,}0312095/T - 2{,}07950\ln T)$$

onde T é dado em K, v em m³/kg e p em Pa

3.7P Um método de modelagem do comportamento de gases do ponto de vista microscópico é conhecido como *teoria cinética dos gases* Utilizando a teoria cinética, derive a equação de estado de gás ideal e explique a variação do calor específico de gás ideal c_v com a temperatura A utilização da teoria cinética está limitada ao comportamento de gás ideal? Resuma suas respostas em um memorando

3.8P Um artigo de jornal informa que no mesmo dia em que uma companhia aérea cancelou onze vôos que partiriam de Las Vegas porque a temperatura local estava próxima do limite operacional de 117°F (47,2°C) para seus jatos, uma outra cancelou sete vôos que partiriam de Denver porque a temperatura local estava acima do nível operacional de 104°F (40°C) para seus aviões a hélice Prepare uma apresentação de 30 min adequada para uma aula de ciências do ensino médio, explicando as considerações técnicas relativas a esses cancelamentos

3.9P A imprudência relativa ao uso de pneus com baixa calibragem tem provocado acidentes envolvendo o capotamento de veículos. Em virtude disso, o Congresso dos Estados Unidos aprovou uma legislação determinando que veículos novos com peso inferior a 10.000 lbf (44,5 kN) devem ser equipados com um sistema de alerta relativo à pressão dos pneus, e orientou a Administração Nacional de Segurança nas Estradas dos Estados Unidos a publicar uma regra Essa regra deve exigir que os fabricantes de carros instalem um sistema que irá monitorar a pressão dos quatro pneus, sendo capaz de alertar os motoristas quando um pneu estiver perigosamente abaixo da calibragem recomendada Espera-se que transdutores *microeletromecânicos* exerçam um papel em tais sistemas Investigue as opções técnicas de sistemas capazes de monitorar a pressão dos pneus, inclusive os méritos dos sistemas sem bateria Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências

3.10P A captura e o armazenamento de dióxido de carbono estão em foco atualmente por reduzir os efeitos do aquecimento global e das mudanças climáticas provocados pela queima de combustíveis fósseis Uma abordagem muito conhecida está ilustrada na Fig 3 10P, e consiste em remover CO_2 do gás de exaustão de uma usina e injetá-lo em uma formação geológica subterrânea Analise criticamente esse tipo de abordagem para a administração em larga escala de CO_2 gerado pela atividade humana, incluindo os aspectos técnicos e os custos relacionados Considere os principais métodos de captura de CO_2 a partir das correntes de gás, os problemas relacionados à injeção de CO_2 em grandes profundidades e as conseqüências da migração do CO_2 proveniente do armazenamento Formule uma posição a favor ou contra o desenvolvimento desse tipo de tecnologia Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências

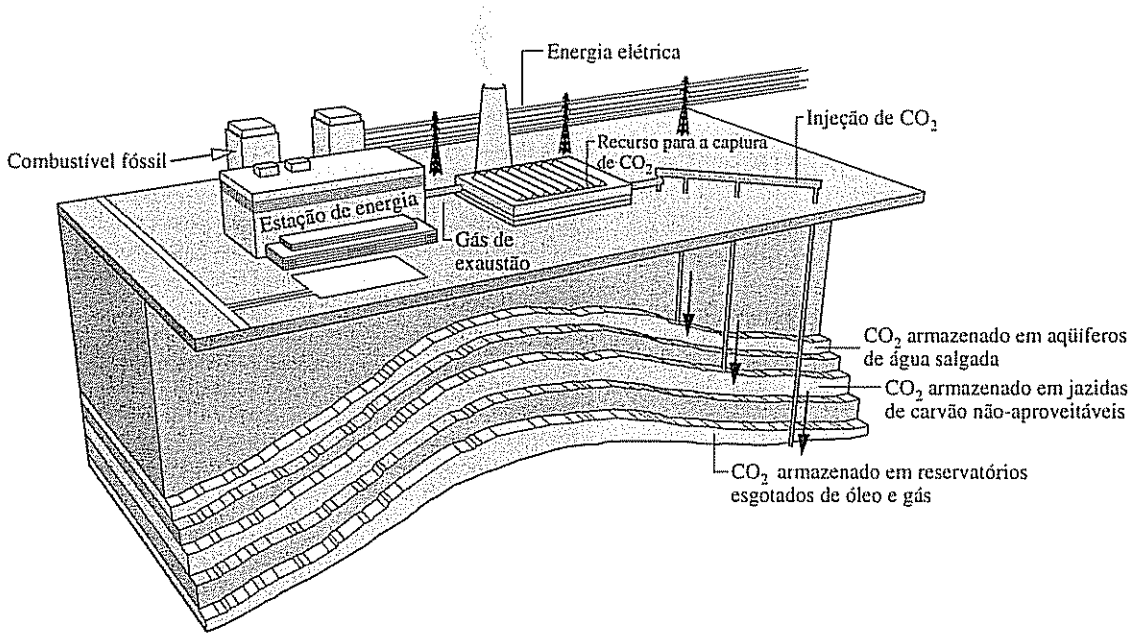


Fig. P3.10P

Índice de Tabelas em Unidades do SI

Tabela A-1 **Peso Atômico ou Molecular e Propriedades Críticas de Elementos e Compostos Selecionados**

Tabela A-2 **Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Tabela A-3 **Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão**

Tabela A-4 **Propriedades do Vapor d'Água Superaquecido**

Tabela A-5 **Propriedades da Água Líquida Comprimida**

Tabela A-6 **Propriedades da Água Saturada (Sólido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Tabela A-7 **Propriedades do Refrigerante 22 Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Tabela A-8 **Propriedades do Refrigerante 22 Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão**

Tabela A-9 **Propriedades do Vapor de Refrigerante 22 Superaquecido**

Tabela A-10 **Propriedades do Refrigerante 134a Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Tabela A-11 **Propriedades do Refrigerante 134a Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão**

Tabela A-12 **Propriedades do Vapor de Refrigerante 134a Superaquecido**

Tabela A-13 **Propriedades da Amônia Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Tabela A-14 **Propriedades da Amônia Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão**

Tabela A-15 **Propriedades do Vapor de Amônia Superaquecido**

Tabela A-16 **Propriedades do Propano Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Tabela A-17 **Propriedades do Propano Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão**

Tabela A-18 **Propriedades do Vapor de Propano Superaquecido**

Tabela A-19 **Propriedades de Sólidos e Líquidos Selecionados: c_p, ρ e κ**

Tabela A-20 **Calores Específicos de Gases Ideais para Alguns Gases Usuais**

Tabela A-21 **Variação de $\bar{c}_p$ com a Temperatura para Gases Ideais Selecionados**

Tabela A-22 **Propriedades do Ar como Gás Ideal**

Tabela A-23 **Propriedades de Gases Selecionados Tomados como Gases Ideais**

Tabela A-24 **Constantes para as Equações de Estado de van der Waals, de Redlich-Kwong e de Benedict-Webb-Rubin**

Tabela A-25 **Propriedades Termoquímicas a 298 K e 1 atm de Substâncias Selecionadas**

Tabela A-26 **Exergia Química Padrão Molar, $\bar{e}^{ch}$ (kJ/kmol) a 298 K e p_0 de Substâncias Selecionadas**

Tabela A-27 **Logaritmos em Base 10 das Constantes de Equilíbrio K**

Tabela A-1 **Peso Atômico ou Molecular e Propriedades Críticas de Elementos e Compostos Selecionados**

Substância	Fórmula Química	M (kg/kmol)	T_c (K)	p_c (bar)	$Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c}$
Acetileno	C_2H_2	26,04	309	62,8	0,274
Água	H_2O	18,02	647,3	220,9	0,233
Álcool etílico	C_2H_5OH	46,07	516	63,8	0,249
Álcool metílico	CH_3OH	32,04	513	79,5	0,220
Amônia	NH_3	17,03	406	112,8	0,242
Ar equivalente	—	28,97	133	37,7	0,284
Argônio	Ar	39,94	151	48,6	0,290
Benzeno	C_6H_6	78,11	563	49,3	0,274
Butano	C_4H_{10}	58,12	425	38,0	0,274
Carbono	C	12,01	—	—	—
Cobre	Cu	63,54	—	—	—
Dióxido de carbono	CO_2	44,01	304	73,9	0,276
Dióxido de enxofre	SO_2	64,06	431	78,7	0,268
Etano	C_2H_6	30,07	305	48,8	0,285
Etileno	C_2H_4	28,05	283	51,2	0,270
Hélio	He	4,003	5,2	2,3	0,300
Hidrogênio	H_2	2,016	33,2	13,0	0,304
Metano	CH_4	16,04	191	46,4	0,290
Monóxido de carbono	CO	28,01	133	35,0	0,294
Nitrogênio	N_2	28,01	126	33,9	0,291
Octano	C_8H_{18}	114,22	569	24,9	0,258
Oxigênio	O_2	32,00	154	50,5	0,290
Propano	C_3H_8	44,09	370	42,7	0,276
Propileno	C_3H_6	42,08	365	46,2	0,276
Refrigerante 12	CCl_2F_2	120,92	385	41,2	0,278
Refrigerante 22	$CHClF_2$	86,48	369	49,8	0,267
Refrigerante 134a	CF_3CH_2F	102,03	374	40,7	0,260

Fontes: Adaptado de *International Critical Tables* e de L. C. Nelson e E. F. Obert, Generalized Compressibility Charts, *Chem. Eng. 61*: 203 (1954)

Tabela A-2 **Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Conversões da Pressão: 1 bar = 0,1 MPa = 10^2 kPa

Temp. °C	Press. bar	Volume Específico m³/kg: Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Volume Específico m³/kg: Vapor Sat. v_g	Energia Interna kJ/kg: Líquido Sat. u_f	Energia Interna kJ/kg: Vapor Sat. u_g	Entalpia kJ/kg: Líquido Sat. h_f	Entalpia kJ/kg: Evap h_{fg}	Entalpia kJ/kg: Vapor Sat. h_g	Entropia kJ/kg K: Líquido Sat. s_f	Entropia kJ/kg K: Vapor Sat s_g	Temp. °C
0,01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562	0,01
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514	4
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257	5
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003	6
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501	8
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008	10
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765	11
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524	12
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285	13
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048	14
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814	15
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582	16
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351	17
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123	18
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897	19
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672	20
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450	21
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229	22
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011	23
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794	24
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580	25
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367	26
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156	27
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946	28
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739	29
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533	30
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2418,0	129,97	2428,1	2558,1	0,4507	8,4329	31
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2419,3	134,15	2425,7	2559,9	0,4644	8,4127	32
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927	33
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2422,0	142,50	2421,0	2563,5	0,4917	8,3728	34
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	8,3531	35
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2424,7	150,86	2416,2	2567,1	0,5188	8,3336	36
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2427,4	159,21	2411,5	2570,7	0,5458	8,2950	38
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	8,2570	40
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	8,1648	45

Tabela A-2 **(Continuação)**

Temp °C	Press bar	Volume Específico m³/kg: Líquido Sat $v_f \times 10^3$	Volume Específico m³/kg: Vapor Sat v_g	Energia Interna kJ/kg: Líquido Sat u_f	Energia Interna kJ/kg: Vapor Sat u_g	Entalpia kJ/kg: Líquido Sat h_f	Entalpia kJ/kg: Evap h_{fg}	Entalpia kJ/kg: Vapor Sat h_g	Entropia kJ/kg K: Líquido Sat s_f	Entropia kJ/kg K: Vapor Sat s_g	Temp °C
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	0,7038	8,0763	50
55	0,1576	1,0146	9,568	230,21	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	0,7679	7,9913	55
60	0,1994	1,0172	7,671	251,11	2456,6	251,13	2358,5	2609,6	0,8312	7,9096	60
65	0,2503	1,0199	6,197	272,02	2463,1	272,06	2346,2	2618,3	0,8935	7,8310	65
70	0,3119	1,0228	5,042	292,95	2469,6	292,98	2333,8	2626,8	0,9549	7,7553	70
75	0,3858	1,0259	4,131	313,90	2475,9	313,93	2321,4	2635,3	1,0155	7,6824	75
80	0,4739	1,0291	3,407	334,86	2482,2	334,91	2308,8	2643,7	1,0753	7,6122	80
85	0,5783	1,0325	2,828	355,84	2488,4	355,90	2296,0	2651,9	1,1343	7,5445	85
90	0,7014	1,0360	2,361	376,85	2494,5	376,92	2283,2	2660,1	1,1925	7,4791	90
95	0,8455	1,0397	1,982	397,88	2500,6	397,96	2270,2	2668,1	1,2500	7,4159	95
100	1,014	1,0435	1,673	418,94	2506,5	419,04	2257,0	2676,1	1,3069	7,3549	100
110	1,433	1,0516	1,210	461,14	2518,1	461,30	2230,2	2691,5	1,4185	7,2387	110
120	1,985	1,0603	0,8919	503,50	2529,3	503,71	2202,6	2706,3	1,5276	7,1296	120
130	2,701	1,0697	0,6685	546,02	2539,9	546,31	2174,2	2720,5	1,6344	7,0269	130
140	3,613	1,0797	0,5089	588,74	2550,0	589,13	2144,7	2733,9	1,7391	6,9299	140
150	4,758	1,0905	0,3928	631,68	2559,5	632,20	2114,3	2746,5	1,8418	6,8379	150
160	6,178	1,1020	0,3071	674,86	2568,4	675,55	2082,6	2758,1	1,9427	6,7502	160
170	7,917	1,1143	0,2428	718,33	2576,5	719,21	2049,5	2768,7	2,0419	6,6663	170
180	10,02	1,1274	0,1941	762,09	2583,7	763,22	2015,0	2778,2	2,1396	6,5857	180
190	12,54	1,1414	0,1565	806,19	2590,0	807,62	1978,8	2786,4	2,2359	6,5079	190
200	15,54	1,1565	0,1274	850,65	2595,3	852,45	1940,7	2793,2	2,3309	6,4323	200
210	19,06	1,1726	0,1044	895,53	2599,5	897,76	1900,7	2798,5	2,4248	6,3585	210
220	23,18	1,1900	0,08619	940,87	2602,4	943,62	1858,5	2802,1	2,5178	6,2861	220
230	27,95	1,2088	0,07158	986,74	2603,9	990,12	1813,8	2804,0	2,6099	6,2146	230
240	33,44	1,2291	0,05976	1033,2	2604,0	1037,3	1766,5	2803,8	2,7015	6,1437	240
250	39,73	1,2512	0,05013	1080,4	2602,4	1085,4	1716,2	2801,5	2,7927	6,0730	250
260	46,88	1,2755	0,04221	1128,4	2599,0	1134,4	1662,5	2796,6	2,8838	6,0019	260
270	54,99	1,3023	0,03564	1177,4	2593,7	1184,5	1605,2	2789,7	2,9751	5,9301	270
280	64,12	1,3321	0,03017	1227,5	2586,1	1236,0	1543,6	2779,6	3,0668	5,8571	280
290	74,36	1,3656	0,02557	1278,9	2576,0	1289,1	1477,1	2766,2	3,1594	5,7821	290
300	85,81	1,4036	0,02167	1332,0	2563,0	1344,0	1404,9	2749,0	3,2534	5,7045	300
320	112,7	1,4988	0,01549	1444,6	2525,5	1461,5	1238,6	2700,1	3,4480	5,5362	320
340	145,9	1,6379	0,01080	1570,3	2464,6	1594,2	1027,9	2622,0	3,6594	5,3357	340
360	186,5	1,8925	0,006945	1725,2	2351,5	1760,5	720,5	2481,0	3,9147	5,0526	360
374,14	220,9	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298	374,14

Fonte: As Tabelas A-2 até A-5 foram extraídas de J H Keenan, F G Keyes, P G Hill e J G Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969

Tabela A-3 **Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão**

Conversões da Pressão:
1 bar = 0,1 MPa
= 10^2 kPa

		Volume Específico m^3/kg		Energia Interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
Press. bar	Temp. °C	Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Líquido Sat. u_f	Vapor Sat. u_g	Líquido Sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor Sat. h_g	Líquido Sat. s_f	Vapor Sat. s_g	Press. bar
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746	0,04
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304	0,06
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287	0,08
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502	0,10
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085	0,20
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686	0,30
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700	0,40
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939	0,50
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320	0,60
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797	0,70
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346	0,80
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949	0,90
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594	1,00
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233	1,50
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271	2,00
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527	2,50
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919	3,00
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405	3,50
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959	4,00
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565	4,50
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212	5,00
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600	6,00
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080	7,00
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628	8,00
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226	9,00
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863	10,0
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448	15,0
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409	20,0
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575	25,0
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869	30,0
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253	35,0
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701	40,0
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199	45,0
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734	50,0
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892	60,0
70,0	285,9	1,3513	0,02737	1257,6	2580,5	1267,0	1505,1	2772,1	3,1211	5,8133	70,0
80,0	295,1	1,3842	0,02352	1305,6	2569,8	1316,6	1441,3	2758,0	3,2068	5,7432	80,0
90,0	303,4	1,4178	0,02048	1350,5	2557,8	1363,3	1378,9	2742,1	3,2858	5,6772	90,0
100,0	311,1	1,4524	0,01803	1393,0	2544,4	1407,6	1317,1	2724,7	3,3596	5,6141	100,0
110,0	318,2	1,4886	0,01599	1433,7	2529,8	1450,1	1255,5	2705,6	3,4295	5,5527	110,0

Tabela A-3 **(Continuação)**

Press bar	Temp °C	Volume Específico m³/kg		Energia Interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		Press bar
		Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Líquido Sat. u_f	Vapor Sat. u_g	Líquido Sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor Sat. h_g	Líquido Sat. s_f	Vapor Sat. s_g	
120,0	324,8	1,5267	0,01426	1473,0	2513,7	1491,3	1193,6	2684,9	3,4962	5,4924	120,0
130,0	330,9	1,5671	0,01278	1511,1	2496,1	1531,5	1130,7	2662,2	3,5606	5,4323	130,0
140,0	336,8	1,6107	0,01149	1548,6	2476,8	1571,1	1066,5	2637,6	3,6232	5,3717	140,0
150,0	342,2	1,6581	0,01034	1585,6	2455,5	1610,5	1000,0	2610,5	3,6848	5,3098	150,0
160,0	347,4	1,7107	0,009306	1622,7	2431,7	1650,1	930,6	2580,6	3,7461	5,2455	160,0
170,0	352,4	1,7702	0,008364	1660,2	2405,0	1690,3	856,9	2547,2	3,8079	5,1777	170,0
180,0	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044	180,0
190,0	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9388	5,0228	190,0
200,0	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269	200,0
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298	220,9

Tabela A-4 Propriedades do Vapor d'Água Superaquecido

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 0,06 bar = 0,006 MPa (T_{sat} = 36,16°C)				p = 0,35 bar = 0,035 MPa (T_{sat} = 72,69°C)			
Sat.	23,739	2425,0	2567,4	8,3304	4,526	2473,0	2631,4	7,7158
80	27,132	2487,3	2650,1	8,5804	4,625	2483,7	2645,6	7,7564
120	30,219	2544,7	2726,0	8,7840	5,163	2542,4	2723,1	7,9644
160	33,302	2602,7	2802,5	8,9693	5,696	2601,2	2800,6	8,1519
200	36,383	2661,4	2879,7	9,1398	6,228	2660,4	2878,4	8,3237
240	39,462	2721,0	2957,8	9,2982	6,758	2720,3	2956,8	8,4828
280	42,540	2781,5	3036,8	9,4464	7,287	2780,9	3036,0	8,6314
320	45,618	2843,0	3116,7	9,5859	7,815	2842,5	3116,1	8,7712
360	48,696	2905,5	3197,7	9,7180	8,344	2905,1	3197,1	8,9034
400	51,774	2969,0	3279,6	9,8435	8,872	2968,6	3279,2	9,0291
440	54,851	3033,5	3362,6	9,9633	9,400	3033,2	3362,2	9,1490
500	59,467	3132,3	3489,1	10,1336	10,192	3132,1	3488,8	9,3194
	p = 0,70 bar = 0,07 MPa (T_{sat} = 89,95°C)				p = 1,0 bar = 0,10 MPa (T_{sat} = 99,63°C)			
Sat.	2,365	2494,5	2660,0	7,4797	1,694	2506,1	2675,5	7,3594
100	2,434	2509,7	2680,0	7,5341	1,696	2506,7	2676,2	7,3614
120	2,571	2539,7	2719,6	7,6375	1,793	2537,3	2716,6	7,4668
160	2,841	2599,4	2798,2	7,8279	1,984	2597,8	2796,2	7,6597
200	3,108	2659,1	2876,7	8,0012	2,172	2658,1	2875,3	7,8343
240	3,374	2719,3	2955,5	8,1611	2,359	2718,5	2954,5	7,9949
280	3,640	2780,2	3035,0	8,3162	2,546	2779,6	3034,2	8,1445
320	3,905	2842,0	3115,3	8,4504	2,732	2841,5	3114,6	8,2849
360	4,170	2904,6	3196,5	8,5828	2,917	2904,2	3195,9	8,4175
400	4,434	2968,2	3278,6	8,7086	3,103	2967,9	3278,2	8,5435
440	4,698	3032,9	3361,8	8,8286	3,288	3032,6	3361,4	8,6636
500	5,095	3131,8	3488,5	8,9991	3,565	3131,6	3488,1	8,8342
	p = 1,5 bar = 0,15 MPa (T_{sat} = 111,37°C)				p = 3,0 bar = 0,30 MPa (T_{sat} = 133,55°C)			
Sat.	1,159	2519,7	2693,6	7,2233	0,606	2543,6	2725,3	6,9919
120	1,188	2533,3	2711,4	7,2693				
160	1,317	2595,2	2792,8	7,4665	0,651	2587,1	2782,3	7,1276
200	1,444	2656,2	2872,9	7,6433	0,716	2650,7	2865,5	7,3115
240	1,570	2717,2	2952,7	7,8052	0,781	2713,1	2947,3	7,4774
280	1,695	2778,6	3032,8	7,9555	0,844	2775,4	3028,6	7,6299
320	1,819	2840,6	3113,5	8,0964	0,907	2838,1	3110,1	7,7722
360	1,943	2903,5	3195,0	8,2293	0,969	2901,4	3192,2	7,9061
400	2,067	2967,3	3277,4	8,3555	1,032	2965,6	3275,0	8,0330
440	2,191	3032,1	3360,7	8,4757	1,094	3030,6	3358,7	8,1538
500	2,376	3131,2	3487,6	8,6466	1,187	3130,0	3486,0	8,3251
600	2,685	3301,7	3704,3	8,9101	1,341	3300,8	3703,2	8,5892

Conversões da Pressão:
1 bar = 0,1 MPa
= 10^2 kPa

H_2O

Tabela A-4 **(Continuação)**

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 5,0 bar = 0,50 MPa (T_{sat} = 151,86°C)				p = 7,0 bar = 0,70 MPa (T_{sat} = 164,97°C)			
Sat.	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213	0,2729	2572,5	2763,5	6,7080
180	0,4045	2609,7	2812,0	6,9656	0,2847	2599,8	2799,1	6,7880
200	0,4249	2642,9	2855,4	7,0592	0,2999	2634,8	2844,8	6,8865
240	0,4646	2707,6	2939,9	7,2307	0,3292	2701,8	2932,2	7,0641
280	0,5034	2771,2	3022,9	7,3865	0,3574	2766,9	3017,1	7,2233
320	0,5416	2834,7	3105,6	7,5308	0,3852	2831,3	3100,9	7,3697
360	0,5796	2898,7	3188,4	7,6660	0,4126	2895,8	3184,7	7,5063
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938	0,4397	2960,9	3268,7	7,6350
440	0,6548	3028,6	3356,0	7,9152	0,4667	3026,6	3353,3	7,7571
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873	0,5070	3126,8	3481,7	7,9299
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522	0,5738	3298,5	3700,2	8,1956
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952	0,6403	3476,6	3924,8	8,4391
	p = 10,0 bar = 1,0 MPa (T_{sat} = 179,91°C)				p = 15,0 bar = 1,5 MPa (T_{sat} = 198,32°C)			
Sat.	0,1944	2583,6	2778,1	6,5865	0,1318	2594,5	2792,2	6,4448
200	0,2060	2621,9	2827,9	6,6940	0,1325	2598,1	2796,8	6,4546
240	0,2275	2692,9	2920,4	6,8817	0,1483	2676,9	2899,3	6,6628
280	0,2480	2760,2	3008,2	7,0465	0,1627	2748,6	2992,7	6,8381
320	0,2678	2826,1	3093,9	7,1962	0,1765	2817,1	3081,9	6,9938
360	0,2873	2891,6	3178,9	7,3349	0,1899	2884,4	3169,2	7,1363
400	0,3066	2957,3	3263,9	7,4651	0,2030	2951,3	3255,8	7,2690
440	0,3257	3023,6	3349,3	7,5883	0,2160	3018,5	3342,5	7,3940
500	0,3541	3124,4	3478,5	7,7622	0,2352	3120,3	3473,1	7,5698
540	0,3729	3192,6	3565,6	7,8720	0,2478	3189,1	3560,9	7,6805
600	0,4011	3296,8	3697,9	8,0290	0,2668	3293,9	3694,0	7,8385
640	0,4198	3367,4	3787,2	8,1290	0,2793	3364,8	3783,8	7,9391
	p = 20,0 bar = 2,0 MPa (T_{sat} = 212,42°C)				p = 30,0 bar = 3,0 MPa (T_{sat} = 233,90°C)			
Sat.	0,0996	2600,3	2799,5	6,3409	0,0667	2604,1	2804,2	6,1869
240	0,1085	2659,6	2876,5	6,4952	0,0682	2619,7	2824,3	6,2265
280	0,1200	2736,4	2976,4	6,6828	0,0771	2709,9	2941,3	6,4462
320	0,1308	2807,9	3069,5	6,8452	0,0850	2788,4	3043,4	6,6245
360	0,1411	2877,0	3159,3	6,9917	0,0923	2861,7	3138,7	6,7801
400	0,1512	2945,2	3247,6	7,1271	0,0994	2932,8	3230,9	6,9212
440	0,1611	3013,4	3335,5	7,2540	0,1062	3002,9	3321,5	7,0520
500	0,1757	3116,2	3467,6	7,4317	0,1162	3108,0	3456,5	7,2338
540	0,1853	3185,6	3556,1	7,5434	0,1227	3178,4	3546,6	7,3474
600	0,1996	3290,9	3690,1	7,7024	0,1324	3285,0	3682,3	7,5085
640	0,2091	3362,2	3780,4	7,8035	0,1388	3357,0	3773,5	7,6106
700	0,2232	3470,9	3917,4	7,9487	0,1484	3466,5	3911,7	7,7571

Tabela A-4 *(Continuação)*

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 40 bar = 4,0 MPa (T_{sat} = 250,4°C)				p = 60 bar = 6,0 MPa (T_{sat} = 275,64°C)			
Sat.	0,04978	2602,3	2801,4	6,0701	0,03244	2589,7	2784,3	5,8892
280	0,05546	2680,0	2901,8	6,2568	0,03317	2605,2	2804,2	5,9252
320	0,06199	2767,4	3015,4	6,4553	0,03876	2720,0	2952,6	6,1846
360	0,06788	2845,7	3117,2	6,6215	0,04331	2811,2	3071,1	6,3782
400	0,07341	2919,9	3213,6	6,7690	0,04739	2892,9	3177,2	6,5408
440	0,07872	2992,2	3307,1	6,9041	0,05122	2970,0	3277,3	6,6853
500	0,08643	3099,5	3445,3	7,0901	0,05665	3082,2	3422,2	6,8803
540	0,09145	3171,1	3536,9	7,2056	0,06015	3156,1	3517,0	6,9999
600	0,09885	3279,1	3674,4	7,3688	0,06525	3266,9	3658,4	7,1677
640	0,1037	3351,8	3766,6	7,4720	0,06859	3341,0	3752,6	7,2731
700	0,1110	3462,1	3905,9	7,6198	0,07352	3453,1	3894,1	7,4234
740	0,1157	3536,6	3999,6	7,7141	0,07677	3528,3	3989,2	7,5190
	p = 80 bar = 8,0 MPa (T_{sat} = 295,06°C)				p = 100 bar = 10,0 MPa (T_{sat} = 311,06°C)			
Sat.	0,02352	2569,8	2758,0	5,7432	0,01803	2544,4	2724,7	5,6141
320	0,02682	2662,7	2877,2	5,9489	0,01925	2588,8	2781,3	5,7103
360	0,03089	2772,7	3019,8	6,1819	0,02331	2729,1	2962,1	6,0060
400	0,03432	2863,8	3138,3	6,3634	0,02641	2832,4	3096,5	6,2120
440	0,03742	2946,7	3246,1	6,5190	0,02911	2922,1	3213,2	6,3805
480	0,04034	3025,7	3348,4	6,6586	0,03160	3005,4	3321,4	6,5282
520	0,04313	3102,7	3447,7	6,7871	0,03394	3085,6	3425,1	6,6622
560	0,04582	3178,7	3545,3	6,9072	0,03619	3164,1	3526,0	6,7864
600	0,04845	3254,4	3642,0	7,0206	0,03837	3241,7	3625,3	6,9029
640	0,05102	3330,1	3738,3	7,1283	0,04048	3318,9	3723,7	7,0131
700	0,05481	3443,9	3882,4	7,2812	0,04358	3434,7	3870,5	7,1687
740	0,05729	3520,4	3978,7	7,3782	0,04560	3512,1	3968,1	7,2670
	p = 120 bar = 12,0 MPa (T_{sat} = 324,75°C)				p = 140 bar = 14,0 MPa (T_{sat} = 336,75°C)			
Sat.	0,01426	2513,7	2684,9	5,4924	0,01149	2476,8	2637,6	5,3717
360	0,01811	2678,4	2895,7	5,8361	0,01422	2617,4	2816,5	5,6602
400	0,02108	2798,3	3051,3	6,0747	0,01722	2760,9	3001,9	5,9448
440	0,02355	2896,1	3178,7	6,2586	0,01954	2868,6	3142,2	6,1474
480	0,02576	2984,4	3293,5	6,4154	0,02157	2962,5	3264,5	6,3143
520	0,02781	3068,0	3401,8	6,5555	0,02343	3049,8	3377,8	6,4610
560	0,02977	3149,0	3506,2	6,6840	0,02517	3133,6	3486,0	6,5941
600	0,03164	3228,7	3608,3	6,8037	0,02683	3215,4	3591,1	6,7172
640	0,03345	3307,5	3709,0	6,9164	0,02843	3296,0	3694,1	6,8326
700	0,03610	3425,2	3858,4	7,0749	0,03075	3415,7	3846,2	6,9939
740	0,03781	3503,7	3957,4	7,1746	0,03225	3495,2	3946,7	7,0952

Tabela A-4 **(Continuação)**

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	p = 160 bar = 16,0 MPa (T_{sat} = 347,44°C)				p = 180 bar = 18,0 MPa (T_{sat} = 357,06°C)			
Sat.	0,00931	2431,7	2580,6	5,2455	0,00749	2374,3	2509,1	5,1044
360	0,01105	2539,0	2715,8	5,4614	0,00809	2418,9	2564,5	5,1922
400	0,01426	2719,4	2947,6	5,8175	0,01190	2672,8	2887,0	5,6887
440	0,01652	2839,4	3103,7	6,0429	0,01414	2808,2	3062,8	5,9428
480	0,01842	2939,7	3234,4	6,2215	0,01596	2915,9	3203,2	6,1345
520	0,02013	3031,1	3353,3	6,3752	0,01757	3011,8	3378,0	6,2960
560	0,02172	3117,8	3465,4	6,5132	0,01904	3101,7	3444,4	6,4392
600	0,02323	3201,8	3573,5	6,6399	0,02042	3188,0	3555,6	6,5696
640	0,02467	3284,2	3678,9	6,7580	0,02174	3272,3	3663,6	6,6905
700	0,02674	3406,0	3833,9	6,9224	0,02362	3396,3	3821,5	6,8580
740	0,02808	3486,7	3935,9	7,0251	0,02483	3478,0	3925,0	6,9623
	p = 200 bar = 20,0 MPa (T_{sat} = 365,81°C)				p = 240 bar = 24,0 MPa			
Sat.	0,00583	2293,0	2409,7	4,9269				
400	0,00994	2619,3	2818,1	5,5540	0,00673	2477,8	2639,4	5,2393
440	0,01222	2774,9	3019,4	5,8450	0,00929	2700,6	2923,4	5,6506
480	0,01399	2891,2	3170,8	6,0518	0,01100	2838,3	3102,3	5,8950
520	0,01551	2992,0	3302,2	6,2218	0,01241	2950,5	3248,5	6,0842
560	0,01689	3085,2	3423,0	6,3705	0,01366	3051,1	3379,0	6,2448
600	0,01818	3174,0	3537,6	6,5048	0,01481	3145,2	3500,7	6,3875
640	0,01940	3260,2	3648,1	6,6286	0,01588	3235,5	3616,7	6,5174
700	0,02113	3386,4	3809,0	6,7993	0,01739	3366,4	3783,8	6,6947
740	0,02224	3469,3	3914,1	6,9052	0,01835	3451,7	3892,1	6,8038
800	0,02385	3592,7	4069,7	7,0544	0,01974	3578,0	4051,6	6,9567
	p = 280 bar = 28,0 MPa				p = 320 bar = 32,0 MPa			
400	0,00383	2223,5	2330,7	4,7494	0,00236	1980,4	2055,9	4,3239
440	0,00712	2613,2	2812,6	5,4494	0,00544	2509,0	2683,0	5,2327
480	0,00885	2780,8	3028,5	5,7446	0,00722	2718,1	2949,2	5,5968
520	0,01020	2906,8	3192,3	5,9566	0,00853	2860,7	3133,7	5,8357
560	0,01136	3015,7	3333,7	6,1307	0,00963	2979,0	3287,2	6,0246
600	0,01241	3115,6	3463,0	6,2823	0,01061	3085,3	3424,6	6,1858
640	0,01338	3210,3	3584,8	6,4187	0,01150	3184,5	3552,5	6,3290
700	0,01473	3346,1	3758,4	6,6029	0,01273	3325,4	3732,8	6,5203
740	0,01558	3433,9	3870,0	6,7153	0,01350	3415,9	3847,8	6,6361
800	0,01680	3563,1	4033,4	6,8720	0,01460	3548,0	4015,1	6,7966
900	0,01873	3774,3	4298,8	7,1084	0,01633	3762,7	4285,1	7,0372

Tabela A-5 Propriedades da Água Líquida Comprimida

T °C	$v \times 10^3$ m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	$v \times 10^3$ m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	p = 25 bar = 2,5 MPa (T_{sat} = 223,99°C)				p = 50 bar = 5,0 MPa (T_{sat} = 263,99°C)			
20	1,0006	83,80	86,30	0,2961	0,9995	83,65	88,65	0,2956
40	1,0067	167,25	169,77	0,5715	1,0056	166,95	171,97	0,5705
80	1,0280	334,29	336,86	1,0737	1,0268	333,72	338,85	1,0720
100	1,0423	418,24	420,85	1,3050	1,0410	417,52	422,72	1,3030
140	1,0784	587,82	590,52	1,7369	1,0768	586,76	592,15	1,7343
180	1,1261	761,16	763,97	2,1375	1,1240	759,63	765,25	2,1341
200	1,1555	849,9	852,8	2,3294	1,1530	848,1	853,9	2,3255
220	1,1898	940,7	943,7	2,5174	1,1866	938,4	944,4	2,5128
Sat.	1,1973	959,1	962,1	2,5546	1,2859	1147,8	1154,2	2,9202
	p = 75 bar = 7,5 MPa (T_{sat} = 290,59°C)				p = 100 bar = 10,0 MPa (T_{sat} = 311,06°C)			
20	0,9984	83,50	90,99	0,2950	0,9972	83,36	93,33	0,2945
40	1,0045	166,64	174,18	0,5696	1,0034	166,35	176,38	0,5686
80	1,0256	333,15	340,84	1,0704	1,0245	332,59	342,83	1,0688
100	1,0397	416,81	424,62	1,3011	1,0385	416,12	426,50	1,2992
140	1,0752	585,72	593,78	1,7317	1,0737	584,68	595,42	1,7292
180	1,1219	758,13	766,55	2,1308	1,1199	756,65	767,84	2,1275
220	1,1835	936,2	945,1	2,5083	1,1805	934,1	945,9	2,5039
260	1,2696	1124,4	1134,0	2,8763	1,2645	1121,1	1133,7	2,8699
Sat.	1,3677	1282,0	1292,2	3,1649	1,4524	1393,0	1407,6	3,3596
	p = 150 bar = 15,0 MPa (T_{sat} = 342,24°C)				p = 200 bar = 20,0 MPa (T_{sat} = 365,81°C)			
20	0,9950	83,06	97,99	0,2934	0,9928	82,77	102,62	0,2923
40	1,0013	165,76	180,78	0,5666	0,9992	165,17	185,16	0,5646
80	1,0222	331,48	346,81	1,0656	1,0199	330,40	350,80	1,0624
100	1,0361	414,74	430,28	1,2955	1,0337	413,39	434,06	1,2917
140	1,0707	582,66	598,72	1,7242	1,0678	580,69	602,04	1,7193
180	1,1159	753,76	770,50	2,1210	1,1120	750,95	773,20	2,1147
220	1,1748	929,9	947,5	2,4953	1,1693	925,9	949,3	2,4870
260	1,2550	1114,6	1133,4	2,8576	1,2462	1108,6	1133,5	2,8459
300	1,3770	1316,6	1337,3	3,2260	1,3596	1306,1	1333,3	3,2071
Sat.	1,6581	1585,6	1610,5	3,6848	2,036	1785,6	1826,3	4,0139
	p = 250 bar = 25 MPa				p = 300 bar = 30,0 MPa			
20	0,9907	82,47	107,24	0,2911	0,9886	82,17	111,84	0,2899
40	0,9971	164,60	189,52	0,5626	0,9951	164,04	193,89	0,5607
100	1,0313	412,08	437,85	1,2881	1,0290	410,78	441,66	1,2844
200	1,1344	834,5	862,8	2,2961	1,1302	831,4	865,3	2,2893
300	1,3442	1296,6	1330,2	3,1900	1,3304	1287,9	1327,8	3,1741

Conversões da Pressão:
1 bar = 0,1 MPa
= 10^2 kPa

H_2O

Tabela A-6 **Propriedades da Água Saturada (Sólido-Vapor): Tabela de Temperatura**

Conversões da Pressão: 1 bar = 0,1 MPa = 10^2 kPa

Temp. °C	Pressão kPa	Volume Específico m^3/kg		Energia Interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		
		Sólido Sat. $v_i \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Sólido Sat. u_i	Subl. u_{ig}	Vapor Sat. u_g	Sólido Sat. h_i	Subl. h_{ig}	Vapor Sat. h_g	Sólido Sat. s_i	Subl. s_{ig}	Vapor Sat. s_g
0,01	0,6113	1,0908	206,1	−333,40	2708,7	2375,3	−333,40	2834,8	2501,4	−1,221	10,378	9,156
0	0,6108	1,0908	206,3	−333,43	2708,8	2375,3	−333,43	2834,8	2501,3	−1,221	10,378	9,157
−2	0,5176	1,0904	241,7	−337,62	2710,2	2372,6	−337,62	2835,3	2497,7	−1,237	10,456	9,219
−4	0,4375	1,0901	283,8	−341,78	2711,6	2369,8	−341,78	2835,7	2494,0	−1,253	10,536	9,283
−6	0,3689	1,0898	334,2	−345,91	2712,9	2367,0	−345,91	2836,2	2490,3	−1,268	10,616	9,348
−8	0,3102	1,0894	394,4	−350,02	2714,2	2364,2	−350,02	2836,6	2486,6	−1,284	10,698	9,414
−10	0,2602	1,0891	466,7	−354,09	2715,5	2361,4	−354,09	2837,0	2482,9	−1,299	10,781	9,481
−12	0,2176	1,0888	553,7	−358,14	2716,8	2358,7	−358,14	2837,3	2479,2	−1,315	10,865	9,550
−14	0,1815	1,0884	658,8	−362,15	2718,0	2355,9	−362,15	2837,6	2475,5	−1,331	10,950	9,619
−16	0,1510	1,0881	786,0	−366,14	2719,2	2353,1	−366,14	2837,9	2471,8	−1,346	11,036	9,690
−18	0,1252	1,0878	940,5	−370,10	2720,4	2350,3	−370,10	2838,2	2468,1	−1,362	11,123	9,762
−20	0,1035	1,0874	1128,6	−374,03	2721,6	2347,5	−374,03	2838,4	2464,3	−1,377	11,212	9,835
−22	0,0853	1,0871	1358,4	−377,93	2722,7	2344,7	−377,93	2838,6	2460,6	−1,393	11,302	9,909
−24	0,0701	1,0868	1640,1	−381,80	2723,7	2342,0	−381,80	2838,7	2456,9	−1,408	11,394	9,985
−26	0,0574	1,0864	1986,4	−385,64	2724,8	2339,2	−385,64	2838,9	2453,2	−1,424	11,486	10,062
−28	0,0469	1,0861	2413,7	−389,45	2725,8	2336,4	−389,45	2839,0	2449,5	−1,439	11,580	10,141
−30	0,0381	1,0858	2943,0	−393,23	2726,8	2333,6	−393,23	2839,0	2445,8	−1,455	11,676	10,221
−32	0,0309	1,0854	3600,0	−396,98	2727,8	2330,8	−396,98	2839,1	2442,1	−1,471	11,773	10,303
−34	0,0250	1,0851	4419,0	−400,71	2728,7	2328,0	−400,71	2839,1	2438,4	−1,486	11,872	10,386
−36	0,0201	1,0848	5444,0	−404,40	2729,6	2325,2	−404,40	2839,1	2434,7	−1,501	11,972	10,470
−38	0,0161	1,0844	6731,0	−408,06	2730,5	2322,4	−408,06	2839,0	2430,9	−1,517	12,073	10,556
−40	0,0129	1,0841	8354,0	−411,70	2731,3	2319,6	−411,70	2838,9	2427,2	−1,532	12,176	10,644

Fonte: J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill e J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1978.