

Yunus A. Çengel

Michael A. Boles

termodinâmica

T E R C E I R A E D I Ç Ã O



Mc
Graw
Hill

Colg 2005/000 p 1-17
p. 133-133

Termodinâmica

Adquirido com recursos do
Programa de Pós-graduação
em Física da Agência Anísio
ES/LQ/USP

Termodinâmica

3.^a Edição

Yunus A. Çengel

University of Nevada, Reno

Michael A. Boles

North Carolina State University

Revisão técnica

Jorge Martins

Universidade do Minho

Tradução

Eurico Rodrigues

Universidade do Minho

João Paulo Ferreira

Escola Superior de Biotecnologia

Universidade Católica Portuguesa



McGraw-Hill

LISBOA • SÃO PAULO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • GUATEMALA
MADRID • MÉXICO • NOVA IORQUE • PANAMÁ • SAN JUAN • SANTIAGO
AUCKLAND • HAMBURGO • LONDRES • MILÃO • MONTREAL • NOVA DELI
PARIS • SINGAPURA • SYDNEY • TÓQUIO • TORONTO

McGraw-Hill

A Division of The McGraw-Hill Companies



TERMODINÂMICA

Copyright © 2001 da Editora McGraw-Hill de Portugal, L.^{da}

Do original: *Thermodynamics: An Engineering Approach*, Third Edition
Copyright © 1998, 1994, 1989 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Todos os direitos para a língua portuguesa reservados pela
Editora McGraw-Hill de Portugal, L.^{da}

Estrada de Alfragide, Edifícios Mirante, Bloco A-1, Alfragide, 2724-512 AMADORA, PORTUGAL

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, guardada pelo sistema "retrieval" ou transmitida por qualquer modo ou por qualquer outro meio, seja electrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros, sem prévia autorização, por escrito, do Editor.

Depósito legal: 167 097/01

ISBN: 972-773-097-3

(Edição original, ISBN: 0-07-913238-3, The McGraw-Hill Companies, Inc., NY, edição em inglês)
3E1P06012M52T5

Junho de 2001

Coordenação Editorial: Susana Calhau
Coordenação de Produção: Sofia Costa Marques
Composição e paginação: Nuno de Carvalho
Impressão: SIG – Sociedade Industrial Gráfica

Impresso em Portugal – Printed in Portugal

Sobre os autores

Yunus A. Çengel obteve o seu doutoramento em Engenharia Mecânica pela Universidade Estatal da Carolina do Norte (EUA) e juntou-se ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Nevada, Reno (EUA), onde lecciona disciplinas de licenciatura e mestrado em Termodinâmica e Transferência de Calor, além de ser investigador. Tem publicações principalmente nas áreas de termodinâmica, transferência de calor por radiação, convecção natural, energia solar, energia geotérmica, conservação de energia e ensino de engenharia. Tem também publicado os livros *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* e *Heat Transfer: A Practical Approach*, ambos editados pela McGraw-Hill. Tem liderado equipas de estudantes de engenharia em numerosas unidades fabris do norte de Nevada e Califórnia (EUA) para a realização de auditorias energéticas e elaborou relatórios de conservação de energia. O Dr. Çengel foi eleito professor excepcional pela secção estudantil da ASME da Universidade Estatal da Carolina do Norte e da Universidade de Nevada, Reno. É membro da American Society for Engineering Education (ASEE).

Michael A. Boles é professor associado de Engenharia Mecânica e Aeroespacial da Universidade Estatal da Carolina do Norte (EUA) onde obteve o seu doutoramento em Engenharia Mecânica e é professor distinguido pela associação de estudantes. O Dr. Boles recebeu numerosas distinções e citações por excelência na educação em engenharia. Obteve o prémio *SAE Ralph R. Teetor Education* e foi eleito por duas vezes para a Academy of Outstanding Teachers. Foi reconhecido por diversas vezes pela secção estudantil da ASME como professor excepcional e como membro da faculdade com maior impacto nos estudantes de engenharia. O Dr. Boles é especialista em transferência de calor e dedica-se ao estudo da solução numérica e analítica em mudança de fase e secagem em meios porosos. É membro da American Society of Mechanical Engineers, da American Society for Engineering Education e da Sigma Xi.

Os professores Çengel e Boles receberam a *ASEE Meriam/Wiley Distinction Author* em 1992, em reconhecimento pela sua excelência na autoria da primeira edição deste livro.

Índice geral

Prefácio à edição portuguesa	xxvii
Prefácio	xxix
Nomeclatura	xxxvii
1 ■ CONCEITOS BÁSICOS DE TERMODINÂMICA	1
1-1 Termodinâmica e energia	2
1-2 Nota sobre unidades e dimensões	3
1-3 Sistemas abertos e sistemas fechados	8
1-4 Formas de energia	9
1-5 Propriedades de um sistema	15
1-6 Estado e equilíbrio	16
1-7 Processos e ciclos	17
1-8 Postulado de estado	18
1-9 Pressão	19
1-10 A temperatura e a lei zero da termodinâmica	23
1-11 Aspectos termodinâmicos de sistemas biológicos	27
1-12 Sumário	34
Referências e sugestões de leitura	36
Exercícios	36

2 ■ PROPRIEDADES DAS SUBSTÂNCIAS PURAS	47
2-1 Substância pura	48
2-2 Fases de uma substância pura	48
2-3 Processos de mudança de fase de substâncias puras	49
2-4 Diagramas de propriedades para processos de mudança de fase	55
2-5 Pressão de vapor e equilíbrio de fase	62
2-6 Tabelas de propriedades	66
2-7 A equação de estado de gases perfeitos	77
2-8 Factor de compressibilidade — a medida do desvio de comportamento de gás perfeito	79
2-9 Outras equações de estado	84
2-10 Sumário	88
Referências e sugestões de leitura	90
Exercícios	90
3 ■ PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA: SISTEMAS FECHADOS	103
3-1 Introdução	104
3-2 Transferência de calor	104
3-3 Trabalho	111
3-4 Formas mecânicas de trabalho	115
3-5 A primeira lei da termodinâmica	127
3-6 Abordagem sistemática na resolução de problemas	133
3-7 Calores específicos	140
3-8 Energia interna, entalpia e calores específicos de gases perfeitos	142
3-9 Energia interna, entalpia e calores específicos de sólidos e de líquidos	151
3-10 Refrigeração e congelamento de alimentos	155
3-11 Sumário	166
Referências e sugestões de leitura	168
Exercícios	168
4 ■ PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA: VOLUMES DE CONTROLO	193
4-1 Análise termodinâmica de volumes de controlo	194

4-2	Escoamento em regime permanente	200
4-3	Alguns dispositivos de escoamento em regime permanente	205
4-4	Processos de escoamento não permanente	220
4-5	Sumário	228
	Referências e sugestões de leitura	230
	Exercícios	230
5	SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	251
5-1	Introdução à segunda lei da termodinâmica	252
5-2	Reservatórios de energia térmica	253
5-3	Máquinas térmicas	254
5-4	Rendimento de conversões de energia	260
5-5	Frigoríficos e bombas de calor	265
5-6	Máquinas de movimento perpétuo	271
5-7	Processos reversíveis e irreversíveis	273
5-8	Ciclo de Carnot	278
5-9	Princípios de Carnot	281
5-10	Escala de temperatura termodinâmica	282
5-11	Máquina térmica de Carnot	284
5-12	Frigorífico e bomba de calor de Carnot	288
5-13	Frigoríficos domésticos	291
5-14	Sumário	295
	Referências e sugestões de leitura	297
	Exercícios	297
6	ENTROPIA: UMA MEDIDA DA DESORDEM	319
6-1	Entropia	320
6-2	Princípio do aumento de entropia	324
6-3	Variação da entropia de substâncias puras	327
6-4	Processos isentrópicos	331
6-5	O que é a entropia	333
6-6	Diagramas de propriedades que envolvem entropia	337
6-7	As equações $T ds$	339
6-8	Variação da entropia de líquidos e de sólidos	341

4-2	Escoamento em regime permanente	200
4-3	Alguns dispositivos de escoamento em regime permanente	205
4-4	Processos de escoamento não permanente	220
4-5	Sumário	228
	Referências e sugestões de leitura	230
	Exercícios	230
5 ■ SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA		251
5-1	Introdução à segunda lei da termodinâmica	252
5-2	Reservatórios de energia térmica	253
5-3	Máquinas térmicas	254
5-4	Rendimento de conversões de energia	260
5-5	Frigoríficos e bombas de calor	265
5-6	Máquinas de movimento perpétuo	271
5-7	Processos reversíveis e irreversíveis	273
5-8	Ciclo de Carnot	278
5-9	Princípios de Carnot	281
5-10	Escala de temperatura termodinâmica	282
5-11	Máquina térmica de Carnot	284
5-12	Frigorífico e bomba de calor de Carnot	288
5-13	Frigoríficos domésticos	291
5-14	Sumário	295
	Referências e sugestões de leitura	297
	Exercícios	297
6 ■ ENTROPIA: UMA MEDIDA DA DESORDEM		319
6-1	Entropia	320
6-2	Princípio do aumento de entropia	324
6-3	Varição da entropia de substâncias puras	327
6-4	Processos isentrópicos	331
6-5	O que é a entropia	333
6-6	Diagramas de propriedades que envolvem entropia	337
6-7	As equações $T ds$	339
6-8	Varição da entropia de líquidos e de sólidos	341

6-9	Variação da entropia de gases perfeitos	344
6-10	Trabalho reversível de escoamento em regime permanente	352
6-11	Minimizar o trabalho de um compressor	356
6-12	Redução do custo do ar comprimido	360
6-13	Rendimentos isentrópicos de dispositivos com escoamento em regime permanente	370
6-14	Balanço de entropia	378
6-15	Sumário	392
	Referências e sugestões de leitura	395
	Exercícios	396

7 ■ EXERGIA: UMA MEDIDA DO POTENCIAL DE TRABALHO 419

7-1	Exergia: potencial de trabalho de energia	420
7-2	Trabalho reversível e irreversibilidade	423
7-3	Rendimento da segunda lei η_{ii}	427
7-4	Exergia associada a ec , ep , u , Pv e h	430
7-5	Variação da exergia de um sistema	434
7-6	Transferência de exergia por calor, trabalho e massa	438
7-7	Princípio de decréscimo da exergia e de destruição da exergia	441
7-8	Balanço de exergia: sistemas fechados	442
7-9	Balanço de exergia: volumes de controlo	455
7-10	Aspectos quotidianos da segunda lei	463
7-11	Sumário	467
	Referências e sugestões de leitura	469
	Exercícios	470

8 ■ CICLOS DE POTÊNCIA 487

8-1	Considerações básicas na análise de ciclos de potência	488
8-2	O ciclo de Carnot e o seu valor na engenharia	490
8-3	Hipóteses para o ar padrão	492
8-4	Síntese de motores alternativos	493
8-5	Ciclo de Otto: o ciclo ideal para motores de ignição por faísca	494
8-6	Ciclo diesel: o ciclo ideal de motores de ignição	

por compressão	500
8-7 Ciclos Stirling e Ericsson	504
8-8 Ciclo de Brayton: o ciclo ideal para turbinas a gás	508
8-9 Ciclo de Brayton com regeneração	516
8-10 Ciclo de Brayton com arrefecimento intermédio, reaquecimento e regeneração	519
8-11 Ciclos ideais de propulsão a jacto	523
8-12 Análise da segunda lei de ciclos de potência a gás	530
8-13 Sumário	533
Referências e sugestões de leitura	535
Exercícios	536
9 ■ CICLOS A VAPOR E COMBINADOS	555
9-1 Ciclo a vapor de Carnot	556
9-2 Ciclo de Rankine: o ciclo ideal de potência a vapor	557
9-3 Desvio entre os ciclos de potência a vapor reais e ideais	561
9-4 Como se pode aumentar o rendimento do ciclo de Rankine?	564
9-5 Ciclo de Rankine ideal com reaquecimento	568
9-6 Ciclo de Rankine regenerativo ideal	571
9-7 Análise da segunda lei de ciclos de potência a vapor	580
9-8 Co-geração	582
9-9 Ciclos a vapor binários	587
9-10 Ciclos de potência combinados a gás e a vapor	589
9-11 Sumário	592
Referências e sugestões de leitura	594
Exercícios	595
10 ■ CICLOS FRIGORÍFICOS	615
10-1 Máquinas frigoríficas e bombas de calor	616
10-2 Ciclo de Carnot inverso	617
10-3 Ciclo frigorífico ideal por compressão de vapor	619
10-4 Ciclos frigoríficos reais por compressão de vapor	623
10-5 Seleção do refrigerante indicado	625
10-6 Sistemas de bombas de calor	627
10-7 Sistemas inovadores de refrigeração por compressão de vapor	628

10-8	Ciclos frigoríficos a gás	637
10-9	Sistemas de refrigeração por absorção	640
10-10	Sistemas termoelétricos de refrigeração e de potência	644
10-11	Sumário	646
	Referências e sugestões de leitura	647
	Exercícios	648
11 ■ RELAÇÕES DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS		663
11-1	Um pouca de matemática — derivadas parciais e expressões associadas	664
11-2	Relações de Maxwell	669
11-3	Equação de Clapeyron	670
11-4	Expressões gerais para du , dh , ds , c_v e c_p	673
11-5	Coefficiente de Joule-Thompson	680
11-6	Cálculo de Δh , Δu e Δs de gases reais	682
11-7	Sumário	687
	Referências e sugestões de leitura	689
	Exercícios	689
12 ■ MISTURAS GASOSAS		697
12-1	Composição de uma mistura de gases: frações mássica e molar	698
12-2	Comportamento P - v - T de misturas gasosas: gases perfeitos e reais	700
12-3	Propriedades de misturas gasosas: gases perfeitos e reais	705
12-4	Sumário	713
	Referências e sugestões de leitura	715
	Exercícios	715
13 ■ MISTURAS DE GÁS-VAPOR E CONDICIONAMENTO DO AR		723
13-1	Ar seco e ar atmosférico	724
13-2	Humidade absoluta e humidade relativa do ar	725
13-3	Temperatura de orvalho	727
13-4	Temperatura de saturação adiabática e temperatura	731

de termómetro húmido	729
13-5 Carta psicrométrica	732
13-6 Conforto e ar-condicionado	733
13-7 Processos de condicionamento de ar	735
13-8 Sumário	748
Referências e sugestões de leitura	750
Exercícios	751
14 ■ REACÇÕES QUÍMICAS	763
14-1 Combustíveis e combustão	764
14-2 Processos de combustão teóricos e reais	767
14-3 Entalpia de formação e entalpia de combustão	772
14-4 Análise de sistemas reactivos de acordo com a primeira lei	776
14-5 Temperatura adiabática de chama	781
14-6 Variações de entropia em sistemas reactivos	784
14-7 Análise de sistemas reactivos de acordo com a segunda lei	786
14-8 Sumário	792
Referências e sugestões de leitura	795
Exercícios	795
15 ■ EQUILÍBRIO QUÍMICO E EQUILÍBRIO DE FASES	809
15-1 Critério de equilíbrio químico	810
15-2 Constante de equilíbrio para misturas de gases perfeitos	812
15-3 Algumas observações sobre o K_p de misturas de gases perfeitos	815
15-4 Equilíbrio químico para reacções simultâneas	820
15-5 Variação de K_p com a temperatura	822
15-6 Equilíbrio de fases	823
15-7 Sumário	832
Referências e sugestões de leitura	834
Exercícios	834
16 ■ TERMODINÂMICA DOS ESCOAMENTOS GASOSOS DE ALTA VELOCIDADE	843
16-1 Propriedades de estagnação	844
16-2 Velocidade do som e número de Mach	848

16-3	Escoamento isentrópico monodimensional	852
16-4	Escoamento isentrópico em tubeiras	859
16-5	Ondas de choque normais no escoamento em tubeiras	867
16-6	Escoamento através de tubeiras e difusores reais	873
16-7	Tubeiras de vapor	879
16-8	Sumário	882
	Referências e sugestões de leitura	886
	Exercícios	886

ANEXO 1 ■ TABELAS E CARTAS DE PROPRIEDADES (UNIDADES SI) 897

Tabela A-1	Massa molar, Constante de gás e propriedades do ponto crítico	898
Tabela A-2	Calores específicos de gás perfeito de diversos gases comuns	899
Tabela A-3	Propriedades de líquidos, sólidos e alimentos vulgares	902
Tabela A-4	Água saturada — Tabela de temperatura	904
Tabela A-5	Água saturada — Tabela de pressão	906
Tabela A-6	Água sobreaquecida	908
Tabela A-7	Água líquida comprimida	912
Tabela A-8	Gelo saturado–vapor de água	913
Figura A-9	Diagrama $T-s$ da água	914
Figura A-10	Diagrama de Mollier da água	915
Tabela A-11	Frigorigénio 134a saturado — Tabela de temperatura	916
Tabela A-12	Frigorigénio 134 saturado — Tabela de pressão	917
Tabela A-13	Frigorigénio 134a sobreaquecido	918
Figura A-14	Diagrama $P-h$ para o frigorigénio 134a	920
Tabela A-15	Funções de escoamento compressível unidimensional e isentrópico para um gás perfeito com calores específicos e massa molar constantes e $k = 1,4$	921
Tabela A-16	Funções de onda de choque normal unidimensional para um gás perfeito com calores específicos e massa molar constantes e $k = 1,4$	922
Tabela A-17	Propriedades de gás perfeito do ar	923
Tabela A-18	Propriedades de gás perfeito do azoto, N_2	925

Tabela A-19	Propriedades de gás perfeito do oxigénio, O ₂	927
Tabela A-20	Propriedades de gás perfeito do dióxido de carbono, CO ₂	929
Tabela A-21	Propriedades de gás perfeito do monóxido de carbono, CO	931
Tabela A-22	Propriedades de gás perfeito do hidrogénio, H ₂	933
Tabela A-23	Propriedades de gás perfeito do vapor de água, H ₂ O	934
Tabela A-24	Propriedades de gás perfeito do oxigénio monoatómico, O	936
Tabela A-25	Propriedades de gás perfeito do hidróxido, OH	936
Tabela A-26	Entalpia de formação, função de Gibbs de formação e entropia absoluta a 25° C e 1 atm	937
Tabela A-27	Entalpia de combustão e entalpia de vaporização a 25° C e 1 atm	938
Tabela A-28	Logaritmos de base e da constante de equilíbrio K_p	939
Tabela A-29	Constantes que surgem nas equações de estado de Beattie-Bridgeman e Benedict-Webb-Rubin	940
Figura A-30	Carta de compressibilidade generalizada de Nelson-Obert	941
Figura A-31	Carta de entalpia residual generalizada	944
Figura A-32	Carta de entropia residual generalizada	945
Figura A-33	Carta psicrométrica à pressão absoluta de 1 atm	946

ANEXO 2 ■ TABELAS E CARTAS DE PROPRIEDADES (UNIDADES INGLESAS) 947

Tabela A-1E	Massa molar, constante de gás e propriedades do ponto crítico	948
Tabela A-2E	Calores específicos de gás perfeito de diversos gases comuns	949
Tabela A-3E	Propriedades de líquidos, sólidos e alimentos vulgares	952
Tabela A-4E	Água saturada — Tabela de temperatura	954
Tabela A-5E	Água saturada — Tabela de pressão	955
Tabela A-6E	Água sobreaquecida	957
Tabela A-7E	Água líquida comprimida	961
Tabela A-8E	Gelo saturado-vapor de água	962
Figura A-9E	Diagrama $T-s$ da água	963

Tabela A-10E	Diagrama de Mollier da água	964
Tabela A-11E	Frigorigénio 134a saturado — Tabela de temperatura	965
Tabela A-12E	Frigorigénio 134 saturado — Tabela de pressão	966
Tabela A-13E	Frigorigénio 134a sobreaquecido	967
Figura A-14E	Diagrama $P-h$ para o frigorigénio 134a	969
Tabela A-17E	Propriedades de gás perfeito do ar	970
Tabela A-18E	Propriedades de gás perfeito do azoto, N_2	972
Tabela A-19E	Propriedades de gás perfeito do oxigénio, O_2	974
Tabela A-20E	Propriedades de gás perfeito do dióxido de carbono, CO_2	976
Tabela A-21E	Propriedades de gás perfeito do monóxido de carbono, CO	978
Tabela A-22E	Propriedades de gás perfeito do hidrogénio, H_2	980
Tabela A-23E	Propriedades de gás perfeito do vapor de água, H_2O	981
Tabela A-26E	Entalpia de formação, função de Gibbs de formação e entropia absoluta a $77^\circ F$ e 1 atm	983
Tabela A-27E	Entalpia de combustão e entalpia de vaporização a $77^\circ F$ e 1 atm	984
Tabela A-29E	Constantes que surgem nas equações de estado de Beattie-Bridgeman e Benedict-Webb-Rubin	985
Figura A-33E	Carta psicrométrica à pressão absoluta de 1 atm	986

ANEXO 3 ■ PROGRAMA DE COMPUTADOR:

INTRODUÇÃO AO EES

987

Resumo	987
Informação básica	987
Exemplo de um problema de Termodinâmica	991
Carregar um ficheiro Textbook	998

ÍNDICE REMISSIVO

1001

Lista de exemplos

CAPÍTULO 1 ■ CONCEITOS BÁSICOS DE TERMODINÂMICA

EXEMPLO 1-1	Detecção de erro por inconsistência de unidades	7
EXEMPLO 1-2	Obtenção de fórmulas através de unidades	8
EXEMPLO 1-3	Um automóvel a combustível nuclear	14
EXEMPLO 1-4	Pressão absoluta de uma câmara de vácuo	20
EXEMPLO 1-5	Medição de pressão através de um manómetro	20
EXEMPLO 1-6	Medição da pressão atmosférica através de um manómetro	22
EXEMPLO 1-7	Efeito do peso de um êmbolo na pressão no interior de um cilindro	22
EXEMPLO 1-8	Expressão do incremento de temperatura nas diversas unidades	26
EXEMPLO 1-9	Queima das calorias ingeridas numa refeição	31
EXEMPLO 1-10	Perda de peso através da mudança para batatas fritas sem gordura	34

CAPÍTULO 2 ■ PROPRIEDADES DAS SUBSTÂNCIAS PURAS

EXEMPLO 2-1	Descida da temperatura de um lago devido à evaporação	64
EXEMPLO 2-2	Determinação da pressão de líquido saturado	67

EXEMPLO 2-3	Determinação da temperatura de vapor saturado	68
EXEMPLO 2-4	Variação de volume e de energia durante a evaporação	68
EXEMPLO 2-5	A pressão e o volume de uma mistura saturada	70
EXEMPLO 2-6	Propriedades de uma mistura de líquido e vapor saturado	71
EXEMPLO 2-7	Determinação da energia interna de vapor sobreaquecido	72
EXEMPLO 2-8	Determinação da temperatura de vapor sobreaquecido	73
EXEMPLO 2-9	Tratamento do líquido comprimido como líquido saturado	74
EXEMPLO 2-10	Utilização de tabelas de vapor para a determinação de propriedades	75
EXEMPLO 2-11	Determinação da massa de um gás perfeito	79
EXEMPLO 2-12	Utilização da carta generalizada para determinar o volume específico	82
EXEMPLO 2-13	Utilização das cartas generalizadas para determinar a pressão	83
EXEMPLO 2-14	Diferentes métodos para determinar a pressão de um gás	86
CAPÍTULO 3 ■ PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA: SISTEMAS FECHADOS		
EXEMPLO 3-1	Transferência de calor de um corpo humano	110
EXEMPLO 3-2	Queima de uma vela num recinto fechado	113
EXEMPLO 3-3	Aquecimento de uma batata num forno	113
EXEMPLO 3-4	Aquecimento de um forno através de transferência de trabalho	114
EXEMPLO 3-5	Aquecimento de um forno através de transferência de calor	114
EXEMPLO 3-6	Identificação das interações de calor e de trabalho	115
EXEMPLO 3-7	Trabalho de fronteira durante um processo a volume constante	119
EXEMPLO 3-8	Trabalho de fronteira durante um processo a pressão constante	119
EXEMPLO 3-9	Trabalho de fronteira durante um processo isotérmico	120

EXEMPLO 3-10	Potência necessária para um automóvel subir um declive	122
EXEMPLO 3-11	Potência necessária para acelerar um automóvel	123
EXEMPLO 3-12	Transmissão de potência através de um veio de um automóvel	124
EXEMPLO 3-13	Expansão de um gás contra uma mola	125
EXEMPLO 3-14	Arrefecimento de um fluido num reservatório	133
EXEMPLO 3-15	Aquecimento de um gás a pressão constante	136
EXEMPLO 3-16	Expansão livre de água num reservatório vazio	138
EXEMPLO 3-17	Avaliação de ΔU de um gás perfeito	146
EXEMPLO 3-18	Aquecimento de um gás num reservatório por agitação	147
EXEMPLO 3-19	Aquecimento de um gás através de uma resistência	148
EXEMPLO 3-20	Aquecimento de um gás à pressão constante	149
EXEMPLO 3-28	Arrefecimento de um bloco de ferro por água	152
EXEMPLO 3-22	Entalpia de líquido comprimido	153
EXEMPLO 3-23	Aumento da temperatura devido a um estalo	154
EXEMPLO 3-24	Arrefecimento de bananas num recinto refrigerado	159
EXEMPLO 3-25	Congelamento de um frango numa caixa	165

CAPÍTULO 4 ■ PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA: VOLUMES DE CONTROLO

EXEMPLO 4-1	Desaceleração do ar num difusor	206
EXEMPLO 4-2	Aceleração de vapor numa tubeira	207
EXEMPLO 4-3	Compressão de ar através de um compressor	209
EXEMPLO 4-4	Produção de potência numa turbina a vapor	210
EXEMPLO 4-5	Expansão de fluido frigorigénio 134a num frigorífico	212
EXEMPLO 4-6	Mistura de água fria e quente num chuveiro	213
EXEMPLO 4-7	Arrefecimento de frigorigénio 134a por água	215
EXEMPLO 4-8	Aquecimento eléctrico de uma casa	218
EXEMPLO 4-9	Bombear água de um poço	218
EXEMPLO 4-10	Enchimento de um reservatório rígido com vapor de água	224
EXEMPLO 4-11	Cozinhar com uma panela de pressão	226

CAPÍTULO 5 ■ SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

EXEMPLO 5-1	Potência produzida por uma máquina térmica	258
EXEMPLO 5-2	Consumo de combustível de um automóvel	259
EXEMPLO 5-3	Custos de utilização de um fogão eléctrico e de um a gás	264
EXEMPLO 5-4	Rejeição de calor de um frigorífico	268
EXEMPLO 5-5	Aquecimento de uma habitação através de uma bomba de calor	269
EXEMPLO 5-6	Análise de um máquina térmica de Carnot	286
EXEMPLO 5-7	Uma proposta para um frigorífico questionável	290
EXEMPLO 5-8	Aquecimento de uma residência através de uma bomba de calor de Carnot	290
EXEMPLO 5-9	Funcionamento deficiente da iluminação do interior de um frigorífico	294

CAPÍTULO 6 ■ ENTROPIA: UMA MEDIDA DE DESORDEM

EXEMPLO 6-1	Variação de entropia durante um processo isotérmico	323
EXEMPLO 6-2	Geração de entropia durante um processo de geração de calor	326
EXEMPLO 6-3	Variação da entropia de uma substância contida num reservatório	328
EXEMPLO 6-4	Variação da entropia durante um processo a pressão constante	330
EXEMPLO 6-5	Expansão isentrópica de vapor de água numa turbina	332
EXEMPLO 6-6	O diagrama $T-s$ de um ciclo de Carnot	338
EXEMPLO 6-7	Efeito da massa volúmica de um líquido na entropia	342
EXEMPLO 6-8	Economia na substituição de uma válvula por uma turbina	343
EXEMPLO 6-9	Variação da entropia de um gás perfeito	347
EXEMPLO 6-10	Compressão isentrópica do ar num motor de automóvel	350
EXEMPLO 6-11	Compressão isentrópica de um gás perfeito	352
EXEMPLO 6-12	Compressão de uma substância nas fases líquida ou gasosa	354
EXEMPLO 6-13	Trabalho admitido para diversos processos de compressão	359

EXEMPLO 6-14	Poupança de custo e energia pela reparação de fugas de ar	364
EXEMPLO 6-15	Redução da pressão de saída de forma a diminuir os custos	369
EXEMPLO 6-16	Rendimento isentrópico de uma turbina a vapor	372
EXEMPLO 6-17	Efeito do rendimento na potência a fornecer a um compressor	374
EXEMPLO 6-18	Efeito do rendimento na velocidade de saída de uma tubeira	376
EXEMPLO 6-19	Geração de entropia numa parede	384
EXEMPLO 6-20	Geração de entropia durante um processo de estrangulamento	385
EXEMPLO 6-21	Entropia gerada pela imersão de um bloco quente num lago	386
EXEMPLO 6-22	Geração de entropia num tanque misturador	388
EXEMPLO 6-23	Geração de entropia associada à transferência de calor	389

CAPÍTULO 7 ■ EXERGIA: UMA MEDIDA DE POTENCIAL DE TRABALHO

EXEMPLO 7-1	Produção de potência máxima por um aerogerador	421
EXEMPLO 7-2	Transferência de exergia num forno	422
EXEMPLO 7-3	Taxa de irreversibilidade de uma máquina térmica	424
EXEMPLO 7-4	Irreversibilidade durante o arrefecimento de um bloco de ferro	425
EXEMPLO 7-5	Aquecimento potencial de um bloco de ferro quente	426
EXEMPLO 7-6	Rendimento da segunda lei de resistências térmicas	429
EXEMPLO 7-7	Potencial de trabalho do ar comprimido contido num reservatório	436
EXEMPLO 7-8	Variação de exergia durante um processo de compressão	437
EXEMPLO 7-9	Expressão geral do balanço de exergia para sistema fechados	445
EXEMPLO 7-10	Destruição da exergia durante a condução de calor	445
EXEMPLO 7-11	Destruição da exergia durante a expansão de vapor	447
EXEMPLO 7-12	Exergia destruída durante a mistura de um gás	449

EXEMPLO 7-13	Imersão de um bloco de ferro quente na água	451
EXEMPLO 7-14	Destruição da exergia durante a transferência de calor para um gás	453
EXEMPLO 7-15	Análise da segunda lei de uma turbina a vapor	458
EXEMPLO 7-16	Destruição da exergia durante a mistura de fluidos	460
EXEMPLO 7-16	Carregamento de um sistema de armazenamento de ar comprimido	461

CAPÍTULO 8 ■ CICLOS DE POTÊNCIA

EXEMPLO 8-1	Derivação do rendimento de um ciclo de Carnot	491
EXEMPLO 8-2	Ciclo de Otto ideal	498
EXEMPLO 8-3	Ciclo de Diesel ideal	503
EXEMPLO 8-4	Rendimento térmico do ciclo de Ericsson	507
EXEMPLO 8-5	Ciclo simples ideal de Brayton	513
EXEMPLO 8-6	Ciclo real de uma turbina a gás	515
EXEMPLO 8-7	Ciclo real de turbina a gás com regeneração	518
EXEMPLO 8-8	Uma turbina a gás com reaquecimento e arrefecimento intermédio	521
EXEMPLO 8-9	Ciclo ideal de propulsão a jacto	525
EXEMPLO 8-10	Análise de segunda lei de um ciclo de Otto	531

CAPÍTULO 9 ■ CICLOS A VAPOR E COMBINADOS

EXEMPLO 9-1	Ciclo de Rankine simples ideal	559
EXEMPLO 9-2	Ciclo de potência a vapor real	562
EXEMPLO 9-3	Efeitos da temperatura e da pressão da caldeira no rendimento	566
EXEMPLO 9-4	Ciclo de Rankine ideal com reaquecimento	570
EXEMPLO 9-5	Ciclo de Rankine ideal com regeneração	576
EXEMPLO 9-6	Ciclo de Rankine ideal com reaquecimento e regeneração	578
EXEMPLO 9-7	Irreversibilidade de um ciclo de Rankine ideal	581
EXEMPLO 9-8	Central de co-geração ideal	585
EXEMPLO 9-9	Ciclo de potência combinado gás-vapor	593

CAPÍTULO 10 ■ CICLOS FRIGORÍFICOS

EXEMPLO 10-1	Ciclo frigorífico ideal por compressão de vapor	621
EXEMPLO 10-2	Ciclo frigorífico real por compressão de vapor	624

EXEMPLO 10-3	Ciclo frigorífico em cascata de dois estágios	631
EXEMPLO 10-4	Ciclo frigorífico em dois estágios com câmara de <i>flash</i>	632
EXEMPLO 10-5	Ciclo simples de refrigeração a gás perfeito	639

CAPÍTULO 11 ■ RELAÇÕES DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

EXEMPLO 11-1	Aproximação de quantidades diferenciais por diferenças	664
EXEMPLO 11-2	Derivada total vs. derivada parcial	666
EXEMPLO 11-3	Verificação das relações de reciprocidade e cíclica	668
EXEMPLO 11-4	Verificação das relações de Maxwell	670
EXEMPLO 11-5	Avaliação de h_{fg} de uma substância a partir dos valores de P - v - T	671
EXEMPLO 11-6	Extrapolação dos dados tabelados através da equação de Clapeyron	672
EXEMPLO 11-7	Variação de energia interna de um gás de van der Waals	678
EXEMPLO 11-8	Energia interna como função somente da temperatura	679
EXEMPLO 11-9	Diferença entre calores específicos de um gás perfeito	680
EXEMPLO 11-10	Coefficiente de Joule-Thompson de um gás perfeito	682
EXEMPLO 11-11	Cálculo de Δh e Δs de oxigénio a pressão elevada	685

CAPÍTULO 12 ■ MISTURAS GASOSAS

EXEMPLO 12-1	Fracções mássica e molar de uma mistura gasosa	699
EXEMPLO 12-2	Comportamento P - v - T de uma mistura de gases não perfeitos	703
EXEMPLO 12-3	Mistura de dois gases perfeitos num reservatório	707
EXEMPLO 12-4	Destuição de exergia durante uma mistura de gases perfeitos	708
EXEMPLO 12-5	Aquecimento de uma mistura de gases reais	710

**CAPÍTULO 13 ■ MISTURAS DE GÁS-VAPOR
E CONDICIONAMENTO DO AR**

EXEMPLO 13-1	Quantidade de vapor de água no ar ambiente	726
EXEMPLO 13-2	Embaciamento das janelas de uma casa	728
EXEMPLO 13-3	Humidade absoluta e relativa do ar	731
EXEMPLO 13-4	Utilização da carta psicrométrica	733
EXEMPLO 13-5	Aquecimento e humidificação do ar	737
EXEMPLO 13-6	Arrefecimento e desumidificação do ar	739
EXEMPLO 13-7	Arrefecimento evaporativo de ar	742
EXEMPLO 13-8	Mistura de ar condicionado com ar exterior	744
EXEMPLO 13-9	Arrefecimento de uma central térmica por uma torre de arrefecimento	747

CAPÍTULO 14 ■ REACÇÕES QUÍMICAS

EXEMPLO 14-1	Balanço da equação de combustão	766
EXEMPLO 14-2	Temperatura de orvalho dos produtos de combustão	768
EXEMPLO 14-3	Combustão de um combustível gasoso com ar húmido	769
EXEMPLO 14-4	Análise em sentido inverso de um processo de combustão	771
EXEMPLO 14-5	Cálculo da entalpia de combustão	775
EXEMPLO 14-6	Análise de combustão em regime permanente de acordo com a primeira lei	778
EXEMPLO 14-7	Análise de combustão em um calorímetro de bomba de acordo com a primeira lei	780
EXEMPLO 14-8	Temperatura adiabática de chama de uma combustão em regime permanente	782
EXEMPLO 14-9	Trabalho reversível associado a um processo de combustão	787
EXEMPLO 14-10	Análise de combustão adiabática de acordo com a segunda-lei	788
EXEMPLO 14-11	Análise de combustão isotérmica de acordo com a segunda-lei	790

CAPÍTULO 15 ■ EQUILÍBRIO QUÍMICO E EQUILÍBRIO DE FASES

Lista de exemplos

EXEMPLO 15-1	Constante de equilíbrio de um processo de dissociação	814
EXEMPLO 15-2	Temperatura de dissociação do hidrogénio	814
EXEMPLO 15-3	Composição de equilíbrio a uma dada temperatura	818
EXEMPLO 15-4	Efeito de gases inertes na composição de equilíbrio	819
EXEMPLO 15-5	Composição de equilíbrio para reacções simultâneas	820
EXEMPLO 15-6	Entalpia de reacção de um processo de combustão	823
EXEMPLO 15-7	Equilíbrio de fases para uma mistura saturada	825
EXEMPLO 15-8	Fracção molar de vapor de água na superfície de um lago	829
EXEMPLO 15-9	Quantidade de ar dissolvido na água	830
EXEMPLO 15-10	Difusão de hidrogénio numa placa de níquel	831
EXEMPLO 15-11	Composição de diferentes fases de uma mistura	831

CAPÍTULO 16 ■ TERMODINÂMICA DOS ESCOAMENTOS GASOSOS DE ALTA VELOCIDADE

EXEMPLO 16-1	Propriedade de estagnação de um escoamento	845
EXEMPLO 6-2	Compressão de ar de alta velocidade num avião	875
EXEMPLO 16-3	Número de Mach do ar na entrada de um difusor	850
EXEMPLO 16-4	Número de Mach do vapor de água a alta velocidade	851
EXEMPLO 16-5	Escoamento de um gás através de uma conduta convergente-divergente	852
EXEMPLO 16-6	Temperatura e pressão crítica no escoamento de um gás	857
EXEMPLO 16-7	Efeito da contrapressão no caudal mássico	862
EXEMPLO 16-8	Escoamento de um gás através de uma tubeira convergente	863

EXEMPLO 16-9	Escoamento do ar através de uma tubeira convergente-divergente	866
EXEMPLO 16-10	Ponto de entropia máxima da linha de Fanno	871
EXEMPLO 16-11	Ondas de choque em tubeiras convergente-divergente	872
EXEMPLO 16-12	Escoamento através de uma tubeira convergente não isentrópica	875
EXEMPLO 16-13	Escoamento através de um difusor não isentrópico	878
EXEMPLO 16-14	Escoamento de vapor através de uma tubeira convergente-divergente	880

Prefácio à edição portuguesa

A tradução de um livro como este obrigou a cuidados especiais, pois trata-se de uma abordagem em engenharia sobre temas muito vastos, incluindo, além da termodinâmica, a mecânica dos fluidos, a transferência de calor, a química, os motores térmicos e a refrigeração. Cada um destes campos do saber usa nomenclatura própria, pelo que por vezes se torna quase impossível encontrar termos comuns. Por esta razão foi desenvolvido um grande esforço de modo a tentar harmonizar a terminologia.

Relativamente à obra, é difícil imaginar um livro mais cativante sobre este tipo de matéria. Os conceitos são introduzidos com uma linguagem simples e agradável, o que associado às muitas ilustrações, proporciona uma fácil leitura e aprendizagem.

Um dos aspectos inéditos deste livro reside na abordagem aos sistemas biológicos, à dietética e ao congelamento de alimentos, sob o ponto de vista da termodinâmica. Os vários exemplos expostos ao longo do texto abordam uma grande variedade de temas comuns ao dia a dia e incluem os aspectos económicos para que os alunos melhorem a sua sensibilidade relativamente a este aspecto. Ao longo do desenvolvimento de cada capítulo existem diversos exemplos resolvidos, específicos a cada tema a ser abordado. Cada capítulo termina com um elevado número de exercícios, alguns conceptuais, sobre o tema tratado. Antes destes exercícios encontra-se um sumário que pode ser utilizado como formulário, tanto por alunos como por professores.

Sempre que aparecem custos decidiu-se usar o euro, dada a sua utilização na Europa e a sua quase paridade com o dólar.

Um agradecimento muito especial ao Doutor Heitor de Almeida e a outros colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, pelo auxílio valioso que prestaram.

Prefácio



A termodinâmica é a ciência básica que estuda a energia, sendo, desde há muito tempo, parte essencial do currículo dos cursos de Engenharia em todo o Mundo. Este texto introdutório destina-se a *cursos de licenciatura* em Engenharia e contém material suficiente para duas disciplinas sequenciais de Termodinâmica.

A abordagem *clássica* e tradicional, ou macroscópica, é usada ao longo deste texto, com argumentos microscópicos a servir de suporte, quando necessário. Esta abordagem vai ao encontro da intuição dos estudantes, facilitando a aprendizagem da matéria.

A filosofia que contribuiu para a popularidade da primeira edição mantém-se inalterada: falar directamente para as mentes dos engenheiros de amanhã, de uma forma simples mas precisa, encorajar o pensamento criativo e desenvolver uma compreensão profunda da matéria. O nosso objectivo na primeira edição foi o de oferecer um compêndio de engenharia para *ser lido por estudantes* com interesse e entusiasmo em vez de ser usado como um livro de referência para resolver problemas. Pretendemos chegar às mentes curiosas e guiá-las numa viagem agradável através do mundo maravilhoso da Termodinâmica e explorar esta ciência excitante. A resposta entusiástica que recebemos dos leitores da primeira edição, vinda de pequenos institutos e grandes universidades, indica que os nossos objectivos foram alcançados.

A termodinâmica é por vezes encarada como uma matéria difícil, e a maioria dos estudantes evita-a. Os autores acreditam que, contrariamente, a termodinâmica é uma matéria simples e que um espírito observador não deverá ter

qualquer dificuldade em compreendê-la. Apesar de tudo, os princípios da termodinâmica são baseados na nossa *experiência do dia-a-dia* e em *observações experimentais*.

A termodinâmica é uma ciência básica madura, e os tópicos abordados nos textos introdutórios estão bem estabelecidos. Basicamente, os textos diferem apenas na abordagem utilizada. Neste texto, utiliza-se uma abordagem *mais física e intuitiva*. Estabelecem-se frequentemente *paralelos* entre a matéria e o dia-a-dia dos estudantes, de forma a que possam relacioná-la com o que já sabem.

O engenheiro de ontem passava a maior parte do tempo a substituir valores em fórmulas de modo a obter resultados numéricos. Nos dias de hoje, toda a manipulação de fórmulas e tratamento numérico é realizado por computadores. O engenheiro do futuro deverá compreender claramente os princípios básicos, de modo a perceber, formular e interpretar os resultados até mesmo dos problemas mais complexos. Foi efectuado um esforço neste sentido, de modo a encaminhar os alunos nesta direcção.

Os assuntos são apresentados a um nível capaz de ser seguido, sem problemas, pelos alunos. De facto, o material é *auto-instrutivo*, libertando o docente para utilizar o tempo de aulas de uma forma mais produtiva.

A ordem de abordagem é realizada do mais simples para o mais geral. Ou seja, inicia-se com o caso mais simples e adicionam-se complexidades, uma de cada vez. Desta forma, os princípios básicos são repetidamente aplicados aos diferentes sistemas, e os estudantes dominam a aplicação destes princípios em vez de simplificarem a fórmula geral. Visto que os princípios da termodinâmica são baseados em observações experimentais, todas as derivações deste texto assentam em *bases físicas*; assim, são fáceis de seguir e compreender.

A matéria da disciplina é coberta com uma ordem lógica. Primeiro são revistos diversos conceitos e definidos alguns novos, de modo a estabelecer uma base firme para o desenvolvimento dos princípios da termodinâmica. Em seguida, são apresentadas as propriedades das substâncias puras e a utilização das tabelas de propriedades. Nesta altura, é apresentada a aproximação a um gás perfeito, em conjunto com outras equações de estado. O desvio de comportamento em relação a um gás perfeito é examinado através da utilização das cartas de compressibilidade. Depois da apresentação dos conceitos de calor e de trabalho, apresenta-se o princípio de conservação de energia aplicado a um sistema fechado. Após uma discussão sobre o escoamento de energia, desenvolve-se o princípio de conservação de energia aplicado a volumes de controlo, primeiro para sistemas com escoamento em regime permanente e seguidamente para sistemas generalizados com escoamento em regime não permanente. O desenvolvimento das expressões da segunda lei é realizado da mesma maneira, dando-se ênfase à geração de entropia. Os conceitos de exergia, de trabalho reversível e de destruição de exergia são apresentados através da utilização de exemplos familiares, antes de serem aplicados a sistemas complexos de engenharia. Os princípios termodinâmicos são então aplicados às diversas áreas da engenharia.

NOVIDADES DA TERCEIRA EDIÇÃO

Mudanças pedagógicas

Todas as características das edições anteriores foram mantidas, tendo sido adicionadas algumas novidades. Com a excepção das revisões importantes dos Capítulos 6 e 7 e da adição de algumas secções novas noutros capítulos, o corpo do texto permanece em tudo inalterado. As mudanças mais significativas desta edição são apresentadas em seguida.

- **É retirada a ênfase da utilização da convenção formal dos sinais de calor e de trabalho.** Em vez disso, foi adoptada para as interacções uma abordagem intuitiva e unificada. Os balanços de massa, de energia, de entropia e de exergia aplicados a qualquer sistema sujeito a qualquer processo são expressos por

Balanço de massa:

$$m_{\text{adm}} - m_{\text{sai}} = \Delta m_{\text{sistema}}$$

Balanço de energia:

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Transferência de energia} \\ \text{através de calor, trabalho e massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

Balanço de entropia:

$$\underbrace{S_{\text{adm}} - S_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Transferência de entropia} \\ \text{através de calor e massa}}} - \underbrace{S_{\text{ger}}}_{\substack{\text{Geração de entropia}}} = \underbrace{\Delta S_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação de entropia}}}$$

Balanço de exergia:

$$\underbrace{X_{\text{adm}} - X_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Transferência de exergia} \\ \text{através de calor, trabalho e massa}}} - \underbrace{X_{\text{destruída}}}_{\substack{\text{Destruição de exergia}}} = \underbrace{\Delta X_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação de exergia}}}$$

As expressões anteriores reforçam o conceito que durante um processo real existe conservação de massa e de energia, geração de entropia e destruição de exergia. Encorajam-se os estudantes a utilizar estas formas de balanços nos capítulos iniciais, depois de terem especificado o sistema, de modo a simplificá-lo para o problema dado. Nos capítulos posteriores utiliza-se uma abordagem menos rígida.

- **Um programa de computador totalmente novo baseado no EES (Engineering Equation Solver) permite aos estudantes resolver problemas de projecto e propor questões do tipo «e se».** Este programa, descrito de uma forma pormenorizada no Prefácio e no Anexo 3, incorpora agora a capacidade facilitada de resolução de equações e permite ao utilizador realizar estudos paramétricos e de optimização em sistemas termodinâmicos, debitando os resultados sob a forma de gráficos e de tabelas.

- **É utilizada uma abordagem mais estruturada nos problemas que servem de exemplo, mantendo-se um estilo informal.** Começando no Capítulo 3, nos problemas que necessitam da aplicação de balanço, o *sistema* é claramente identificado, todos os aspectos específicos do problema são analisados, todos os pressupostos realizados e as suas justificações listadas.
- **Os exercícios repetidos em diferentes sistemas de unidades foram eliminados, com o intuito de poupar espaço.** Contudo, os exercícios em unidades inglesas são ainda designados por um «E» a seguir ao número do exercício, para um reconhecimento facilitado; é apresentada a *análise* e os resultados *discutidos*.
- **Adicionaram-se novos exemplos e numerosos exercícios incluindo alguns de projecto.** Muitos problemas reais que tratam da *termoeconomia* e o valor em dólares* de diversas medidas de conservação de energia foram incorporados nos diversos capítulos para ajudar os estudantes a desenvolver uma compreensão do valor monetário da energia. Alguns exercícios novos tratam do *impacte ambiental* da conversão da energia e da sua conservação e da emissão de poluentes e de gases para a atmosfera.
- Em resposta aos tratados internacionais que proibiram a utilização de *frigorifénio R12*, devido ao efeito destrutivo da camada de azono, **foram eliminadas as tabelas de frigorifénio R12 do anexo** (foram mantidas no programa de computador desta edição) e todos os exemplos que tratavam do frigorifénio R12 foram substituídos pelo frigorifénio R134a.
- **Informação recente acerca dos novos desenvolvimentos de sistemas termodinâmicos**, tal como a nova geração de turbinas a gás de elevado rendimento que foi incorporada ao longo do texto.

Mudanças de conteúdo

Com a excepção de algum refinamento, o corpo principal do texto permanece no seu todo, inalterado. As mudanças marcantes nos diversos capítulos são resumidas em seguida para quem já está familiarizado com a edição anterior.

- No Capítulo 1, as discussões sobre energia interna foram revistas e ampliadas, tendo sido acrescentadas discussões sobre dispositivos de medição de pressão. A antiga Secção 3-10 «Aspectos termodinâmicos de sistemas biológicos» foi movida para este capítulo, de modo a pôr os estudantes, mais cedo, em contacto com interessante tópico. Foram adicionadas mais discussões sobre a condição física incluindo uma dieta proposta pelos autores.
- No Capítulo 2 adicionou-se uma nova secção «Pressão de vapor e equilíbrio de fases» para pôr os estudantes em contacto com a dinâmica dos processos de mudança de fase e de transferência de massa. A Secção 2-3 foi também aumentada com discussões acerca de algumas consequências interessantes da dependência da temperatura e da pressão de saturação.

* Nota do editor: Sempre que possível converteram-se dólares em euros.

- No Capítulo 3, uma nova secção «Refrigeração e congelamento de alimentos» foi adicionada para mostrar a relevância da termodinâmica na vida quotidiana. A expressão da primeira lei foi desenvolvida novamente, utilizando uma abordagem intuitiva.
- No Capítulo 4, o desenvolvimento das expressões da primeira lei foi amplamente revisto.
- No Capítulo 5, adicionaram-se duas secções novas, «Rendimentos de conversão de energia» e «Frigoríficos domésticos». Na primeira são apresentados o rendimento de combustão, o rendimento motor, o rendimento de iluminação, o rendimento global e o poder calorífico de diversos combustíveis. Na seguinte, são discutidas diversas formas de conservar energia quando se utiliza um frigorífico.
- No Capítulo 6, foi adicionada uma secção nova, «Redução do custo de ar comprimido», para que os futuros engenheiros tenham conhecimentos práticos sobre a minimização do consumo de um compressor, uma vez que este é uma fracção significativa do consumo energético total de unidades fabris. É novamente explanado o balanço de entropia, agora apresentado no fim do capítulo.
- No Capítulo 7, o termo «disponibilidade» foi substituído por «exergia» devido ao uso universal deste último. De forma idêntica, o termo «irreversibilidade» foi substituído por «destruição de exergia». Este capítulo foi extensivamente revisto, de modo a incorporar o conceito de balanço de exergia.
- No Capítulo 8, foram ampliadas as discussões sobre rendimentos de turbinas, de modo a incorporar os recentes desenvolvimentos.
- No Capítulo 14, foram revistas as expressões dos balanços de energia e da entropia.
- No Capítulo 15, a secção «Equilíbrio de fase» foi ampliada de modo a incluir a lei de Henry e o equilíbrio de fase sólido e gasoso.

Ferramentas pedagógicas

As **figuras** são ferramentas de aprendizagem importantes que ajudam os estudantes a visualizar a situação. Atraem a atenção e estimulam a curiosidade e o interesse. Este texto faz uso de gráficos e, provavelmente, contém mais figuras e ilustrações do que qualquer outro livro de termodinâmica. Algumas figuras não funcionam da forma tradicional. Em vez disso, servem como meio de sublinhar algumas frases importantes que poderiam passar despercebidas no texto. A figura de banda desenhada «Blondie» é utilizada para estabelecer alguns pontos importantes de uma forma humorística e também para quebrar a rotina.

Cada capítulo contém **numerosos exemplos resolvidos** que clarificam a matéria e ilustram a aplicação dos princípios básicos. Para a solução destes exercícios, é utilizada uma abordagem consistente e sistemática, sendo dada

atenção à utilização apropriada das unidades. Um **esboço** e um **diagrama do processo** são incluídos na maior parte dos exemplos para ilustrar a geometria e o tipo de processo envolvido.

Um **breve sumário** é incluído no fim de cada capítulo para uma revisão dos conceitos básicos e expressões mais importantes. É seguido de uma lista de referências que apresentam um nível apropriado para os estudantes que abordam a termodinâmica pela primeira vez. Os sumários também podem ser utilizados como formulários durante exames para os professores que preferem testes sem consulta mas permitem a utilização de expressões.

Os **exercícios de fim de capítulo** encontram-se agrupados por tópicos específicos pela ordem em que foram apresentados, tornando a selecção destes mais fácil tanto para os docentes como para os alunos. Os problemas de cada grupo iniciam-se com questões conceptuais, indicadas por «C», para verificar o nível de compreensão, por parte dos estudantes, dos conceitos básicos. Os problemas que envolvem cálculo numérico são dispostos por ordem crescente de complexidade, sendo necessário para os últimos um elevado nível de compreensão. Os problemas agrupados em **exercícios de revisão** são mais abrangentes, não estando ligados directamente a qualquer secção do capítulo. Os exercícios de **computação, projecto e trabalhos** são realizados para encorajar o estudantes a utilizarem computadores na resolução destes, para realizarem opções do ponto de vista da engenharia e conduzirem pesquisas independentes sobre os tópicos de interesse, relatando os factos de uma forma profissional. Alguns exercícios relacionados com a segurança foram incluídos para sublinhar este aspecto. As respostas a alguns exercícios são apresentadas imediatamente após o enunciado do exercício.

Os programas EES, apresentados na disquete que acompanha este livro* e discutidos em seguida, foram desenvolvidos para resolver alguns dos exercícios propostos. Estes exercícios, apresentados no final de cada capítulo, são identificados pelo símbolo de . Cada programa contém comentários pormenorizados e ajuda disponível. Estes programas devem ajudar o aluno a dominar os conceitos importantes, sem o peso de realizar cálculos necessários anteriormente. O comando Load Textbook do EES irá gerar um *menu* separado para estes programas, de modo a que possam ser facilmente acedidos.

Reconhecendo o facto de que as unidades inglesas são ainda muito utilizadas em certas indústrias, **ambas as unidades, SI e inglesas, são utilizadas neste texto**, sendo dada ênfase às unidades SI. O material do texto pode ser coberto, utilizando a combinação de unidades SI/inglesas ou somente as SI,

* Nota do editor: O conteúdo da disquete é apresentado na sua versão original, em língua inglesa.

dependendo da preferência do docente. As tabelas de propriedades e as cartas em anexo são apresentadas em ambas as unidades, exceptuando aquelas que são adimensionais. Os exercícios, as tabelas e as cartas em unidades inglesas são designadas por «E» após o número, para fácil reconhecimento. Factores de conversão frequentemente utilizados e constantes físicas são apresentadas no final do livro.

SUPLEMENTOS*

O **EES (Engineering Equation Solver)** é um programa que permite a solução de equações algébricas e diferenciais com valores iniciais. O EES pode realizar optimizações, análises paramétricas e regressões lineares e não lineares permitindo também a obtenção de gráficos de qualidade. O EES permite um funcionamento intuitivo, sendo fácil de dominar. As equações podem ser introduzidas sob qualquer forma e em qualquer ordem, visto que o programa realiza os arranjos automaticamente, de modo a resolver as equações da maneira mais eficiente.

O EES é particularmente útil para problemas de termodinâmica, pois a maior parte dos dados necessários para a resolução encontra-se incluída no programa. Por exemplo, as tabelas de vapor de água encontram-se dispostas de modo a que qualquer propriedade termodinâmica possa ser obtida a partir de uma função incluída em termos de outras propriedades. Uma capacidade semelhante está disponível para todas as substâncias. O EES permite também ao utilizador introduzir os seus próprios dados de propriedades ou relações funcionais com tabelas, sendo as funções internas escritas com o EES ou compiladas externamente através de Pascal, C, C++ ou Fortran. Problemas práticos interessantes podem ter soluções implícitas que por vezes não são apresentadas devido à complexidade matemática envolvida. O EES permite ao utilizador concentrar os seus esforços nos conceitos, libertando-o das tarefas rotineiras.

O **Instructor's Manual** (Manual do Professor) foi preparado com um processador de texto científico, fornecendo as soluções pormenorizadas e completas dos exercícios de fim de capítulo. As soluções podem ser copiadas para a preparação de transparências para discussões nas aulas.

O **Instructor's Resource CD** (CD de Referência do Professor) encontra-se também disponível para quem adoptar este texto, contendo figuras incluídas no texto para apresentações em PowerPoint e também o manual de soluções completo, o suporte magnético do EES e tabelas e cartas dos anexos.

* Nota do editor: Os suplementos apenas estão disponíveis na sua versão original, em língua inglesa.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de aproveitar esta oportunidade para agradecer a todos os utilizadores das primeiras duas edições, em mais de 150 institutos e universidades nos Estados Unidos e Canadá e em todos os outros países, pelos seus comentários, elogios e críticas construtivas. Um agradecimento especial para as faculdades que realizaram a revisão da terceira edição com um olho crítico e fizeram sugestões valiosas para melhoramentos:

Ralph C. Aldredge III, *University of California, Davis*
Major Michael Fabian, *United States Air Force Academy*
Bakhtiar Farouk, *Drexel University*
Costas P. Grigoropoulos, *University of California, Berkeley*
Charles M. Harman, *Duke University*
Karim J. Nasr, *GMI Engineering and Management Institute*
G. P. Peterson, *The Texas A & M University*
Ramendra P. Roy, *Arizona State University*
Elaine P. Scott, *Virginia Polytechnic Institute and State University*
J. Edwards Sunderland, *University of Massachusetts*

Gostaríamos também de agradecer a todos os que reviram a segunda edição: Joseph Augustos, *Manhattan College*; Daisie Boettner, *United States Military Academy*; Frank J. DeLuise, *University of Rhode Island*; Jerry Drummond, *The University of Akron*; Jerry Dunn, *Texas Tech University*; Jeffrey W. Hodgson, *University of Tennessee*; Vincent J. Lopardo, *United States Naval Academy*; A. K. MacPherson, *Lehigh University*; M. Pinar Menguc, *University of Kentucky*; Alan Parkinson, *Brigham Young University*; Larry Simmons, *University of Portland*; e James Strozier, *University of Utah*. Estamos agradecidos a estas pessoas pelos conselhos e sugestões para melhoramentos. Também agradecemos aos nossos colegas de outros países que tiveram a árdua tarefa de traduzir a segunda edição deste livro em diversas línguas, entre as quais o chinês, o grego, o japonês, o coreano, o espanhol e o turco.

Estamos gratos pela resposta entusiástica que este livro recebeu e esperamos que os melhoramentos realizados nesta nova edição o venha a tornar mais apelativo. Os vossos comentários e críticas são bem vindos e serão muito apreciados.

Finalmente, gostaríamos de expressar gratidão às nossas esposas Zehra e Sylvia e aos nossos filhos pela sua paciência, compreensão, encorajamento e apoio ao longo deste projecto.

YUNUS A. ÇENGEL
MICHAEL A. BOLES

Nomenclatura

<i>a</i>	Aceleração, m/s ²
<i>a</i>	Energia livre específica de Helmholtz, kJ/kg
<i>A</i>	Área, m ²
<i>A</i>	Energia livre Helmholtz, kJ
<i>AF</i>	Relação ar-combustível
<i>B</i>	Binário, Nm
<i>C</i>	Velocidade do som, m/s
<i>c</i>	Calor específico, kJ/(kg·K)
<i>c_p</i>	Calor específico a pressão constante, kJ/(kg · K)
<i>c_v</i>	Calor específico a volume constante, kJ/(kg · K)
<i>COP</i>	Coefficiente de desempenho
<i>COP_{BC}</i>	Coefficiente de desempenho de uma bomba de calor
<i>COP_{MF}</i>	Coefficiente de desempenho de uma máquina frigorífica
<i>d, D</i>	Diâmetro, m
<i>e</i>	Energia total específica, kJ/kg
<i>E</i>	Energia total, kJ
<i>EER</i>	Energy efficiency rating
<i>F</i>	Força, N
<i>FA</i>	Relação combustível-ar

g	Aceleração da gravidade, m/s^2
g	Energia livre específica de Gibbs, kJ/kg
G	Energia livre de Gibbs total, kJ
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção, $W/(m^2 \cdot K)$
h	Entalpia específica, kJ/kg
H	Entalpia, kJ
h_C	Entalpia de combustão, $kJ/kmol$ combustível
\bar{h}_f	Entalpia de formação, $kJ/kmol$
h_R	Entalpia de reacção, $kJ/kmol$
PCS	Poder calorífico superior, $kJ/kmol$ combustível
i	Irreversibilidade específica, kJ/kg
I	Corrente eléctrica, A
I	Irreversibilidade, kJ
k	Relação de calores específicos, c_p/c_v
k_t	Condutividade térmica $W/(m \cdot K)$
K_p	Constante de equilíbrio
ec	Energia cinética específica, kJ/kg
Ec	Energia cinética, kJ
PCI	Poder calorífico inferior, $kJ/kmol$ combustível
m	Massa, kg
\dot{m}	Caudal mássico, kg/s
M	Massa molar, $kg/kmol$
PME	Pressão média efectiva, kPa
w	Fracção mássica
N	Número de moles, $kmol$
P	Pressão, kPa
P_{cr}	Pressão crítica, kPa
P_i	Pressão parcial, kPa
P_m	Pressão da mistura, kPa
P_R	Pressão reduzida
P_v	Pressão de vapor, kPa
P_0	Pressão ambiente, kPa
ep	Energia potencial específica, kJ/kg
Ep	Energia potencial, kJ
q	Transferência de calor por unidade de massa, kJ/kg
Q	Transferência de calor, kJ
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor (potência térmica), kW
Q_Q	Calor da fonte quente, kJ
Q_F	Calor da fonte fria, kJ
r	Taxa de compressão

r	Constante de gás, kJ/(kg · K)
r_c	Relação de combustão
r_p	Relação de pressões
R_u	Constante universal dos gases, kJ/(kmol · K)
s	Entropia específica, kJ/(kg · K)
S	Entropia, kJ/K
s_{ger}	Entropia gerada específica, kJ/(kg · K)
S_{ger}	Entropia gerada, kJ/K
t	Tempo, s
T	Temperatura, °C ou K
T_{cr}	Temperatura crítica, K
T_{orv}	Temperatura de orvalho, °C
T_f	Temperatura do fluido, °C
T_Q	Temperatura da fonte quente, K
T_F	Temperatura da fonte fria, K
T_R	Temperatura reduzida
T_{th}	Temperatura de termómetro húmido, °C
T_0	Temperatura ambiente, °C ou K
u	Energia interna específica, kJ/kg
U	Energia interna, kJ
v	Volume específico, m ³ /kg
v_{cr}	Volume específico crítico, m ³ /kg
v_r	Volume específico relativo
v_R	Volume específico pseudo-reduzido
V	Volume, m ³
\mathcal{V}	Velocidade, m/s
w	Trabalho por unidade de massa, kJ/kg
W	Trabalho total, kJ
\dot{W}	Potência, kW
W_{adm}	Trabalho admitido, kJ
W_{sai}	Trabalho saído, kJ
W_{rev}	Trabalho reversível, kJ
x	Título
x	Exergia específica, kJ/kg
X	Exergia total, kJ
y	Fracção molar
z	Elevação/cota, m
Z	Factor de compressibilidade
Z_h	Factor de entalpia residual
Z_s	Factor de entropia residual

Nomenclatura

Alfabeto grego

α	Absorvidade
α	Compressibilidade isotérmica, 1/kPa
β	Coefficiente de expansão volumétrica, 1/K
Δ	Varição finita
ε	Emissividade
η_t	Rendimento térmico
η_{II}	Rendimento relativo à segunda lei
θ	Energia total de um fluido em escoamento, kJ/kg
μ_{JT}	Coefficiente de Joule-Thomson, K/kPa
μ	Potencial químico, kJ/kg
ν	Coefficiente estequiométrico
ρ	Massa volúmica, kg/m ³
ρ_s	Densidade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, w/(m ² · K ⁴)
σ_n	Tensão normal, N/m ²
σ_s	Tensão superficial, N/m ²
ϕ	Humidade relativa
ϕ	Exergia de escoamento nulo, kJ/kg
ψ	Exergia de escoamento, kJ/kg
ω	Humidade absoluta ou específica, kg _{H₂O} /kg _{ar seco}

Índices

<i>a</i>	ar
abs	Absoluto
<i>r</i>	Real
atm	Atmosférico
med	Médio
<i>c</i>	Combustão
cr	Crítico
VC	Volume de controlo
<i>s, sai</i>	Condições de saída
<i>f</i>	Líquido saturado
<i>fg</i>	Diferença na propriedade entre líquido e vapor saturado
<i>g</i>	Vapor saturado
ger	Geração
<i>Q</i>	Temperatura elevada (de fonte quente)
<i>e, adm</i>	Condições de entrada
<i>i</i>	componente <i>i</i>
<i>F</i>	Temperatura baixa (de fonte fria)

<i>m</i>	Mistura
<i>r</i>	Relativo
<i>R</i>	Reduzido
rev	Reversível
<i>s</i>	Isentrópico
sat	Saturação
viz	Vizinhança
<i>va</i>	Vapor de água
0	Estado de referência
1	Estado inicial ou de entrada
2	Estado final ou de saída