

Sumário

1 Conceitos Introdutórios e Definições 3

- 1.1 Usando a Termodinâmica 4**
- 1.2 Definindo Sistemas 4**
 - 1.2.1 *Sistemas Fechados 4*
 - 1.2.2 *Volumes de Controle 6*
 - 1.2.3 *Selecionando a Fronteira do Sistema 7*
- 1.3 Descrevendo Sistemas e Seus Comportamentos 7**
 - 1.3.1 *Pontos de Vista Macroscópico e Microscópico da Termodinâmica 8*
 - 1.3.2 *Propriedade, Estado e Processo 8*
 - 1.3.3 *Propriedades Extensivas e Intensivas 8*
 - 1.3.4 *Equilíbrio 9*
- 1.4 Medindo Massa, Comprimento, Tempo e Força 9**
 - 1.4.1 *Unidades SI 10*
 - 1.4.2 *Unidades Inglesas de Engenharia 11*
- 1.5 Volume Específico 11**
- 1.6 Pressão 12**
 - 1.6.1 *Medidas de Pressão 13*
 - 1.6.2 *Empuxo 14*
 - 1.6.3 *Unidades de Pressão 14*
- 1.7 Temperatura 15**
 - 1.7.1 *Termômetros 16*
 - 1.7.2 *Escala de Temperatura Kelvin e Rankine 17*
 - 1.7.3 *Escala Celsius e Fahrenheit 17*
- 1.8 Projeto de Engenharia e Análise 18**
 - 1.8.1 *Projeto 18*
 - 1.8.2 *Análise 18*
- 1.9 Metodologia para a Solução de Problemas de Termodinâmica 19**
- Resumo do Capítulo e Guia de Estudos 21**

2 Energia e a Primeira Lei da Termodinâmica 31

- 2.1 Revendo os Conceitos Mecânicos de Energia 32**

- 2.1.1 *Trabalho e Energia Cinética 32*
- 2.1.2 *Energia Potencial 33*
- 2.1.3 *Unidades para a Energia 34*
- 2.1.4 *Conservação de Energia em Mecânica 34*
- 2.1.5 *Comentário Final 35*

2.2 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Trabalho 35

- 2.2.1 *Convenção de Sinais e Notação 35*
- 2.2.2 *Potência 36*
- 2.2.3 *Modelando o Trabalho de Expansão ou Compressão 37*
- 2.2.4 *Trabalho de Expansão ou Compressão em Processos Reais 38*
- 2.2.5 *Trabalho de Expansão ou Compressão em Processos em Quase Equilíbrio 38*
- 2.2.6 *Outros Exemplos de Trabalho 41*
- 2.2.7 *Outros Exemplos de Trabalho em Processos em Quase Equilíbrio 42*
- 2.2.8 *Forças e Deslocamentos Generalizados 43*

2.3 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Energia 43

2.4 Transferência de Energia por Calor 44

- 2.4.1 *Convenção de Sinais, Notação e Taxa de Transferência de Calor 44*
- 2.4.2 *Modos de Transferência de Calor 45*
- 2.4.3 *Comentários Finais 47*

2.5 Contabilizando a Energia: Balanço de Energia para Sistemas Fechados 47

- 2.5.1 *Aspectos Importantes do Balanço de Energia 48*
- 2.5.2 *Utilizando o Balanço de Energia: Processos em Sistemas Fechados 50*
- 2.5.3 *Utilizando o Balanço da Taxa de Energia: Operação em Regime Permanente 53*
- 2.5.4 *Utilizando o Balanço da Taxa de Energia: Operação em Regime Transiente 55*

2.6 Análise de Energia para Ciclos 57

- 2.6.1 *Balanço de Energia para um Ciclo 57*
- 2.6.2 *Ciclos de Potência 58*
- 2.6.3 *Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor 59*

2.7	Armazenamento de Energia	60
2.7.1	Visão Geral	60
2.7.2	Tecnologias de Armazenamento	60
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	61

3 Avaliando Propriedades 75

3.1	Conceitos Introdutórios	76
3.1.1	Fase e Substância Pura	76
3.1.2	Definindo o Estado	76
	Avaliando Propriedades:	
	Considerações Gerais	77
3.2	Relação $p-v-T$	77
3.2.1	Superfície $p-v-T$	77
3.2.2	Projeções da Superfície $p-v-T$	78
3.3	Estudando Mudança de Fase	80
3.4	Obtendo Propriedades Termodinâmicas	82
3.5	Avaliando Pressão, Volume Específico e Temperatura	82
3.5.1	Tabelas de Líquido e de Vapor	82
3.5.2	Tabelas de Saturação	85
3.6	Avaliando a Energia Interna Específica e a Entalpia	88
3.6.1	Apresentando a Entalpia	88
3.6.2	Obtendo os Valores de u e h	88
3.6.3	Estados de Referência e Valores de Referência	89
3.7	Avaliando Propriedades Utilizando Programas de Computador	90
3.8	Aplicando o Balanço de Energia Usando Propriedades Tabeladas e Programas de Computador	91
3.8.1	Utilizando Tabelas de Propriedades	92
3.8.2	Utilizando um Programa de Computador	95
3.9	Apresentando os Calores Específicos c_v e c_p	96
3.10	Avaliando Propriedades de Líquidos e Sólidos	97
3.10.1	Aproximações para Líquidos Utilizando Dados de Líquido Saturado	97
3.10.2	Modelo de Substância Incompressível	98
3.11	Diagrama de Compressibilidade Generalizada	100

3.11.1	Constante Universal dos Gases, $\bar{R}$	100
3.11.2	Fator de Compressibilidade, Z	101
3.11.3	Dados de Compressibilidade Generalizada, Diagrama Z	102
3.11.4	Equações de Estado	104

Avaliando Propriedades com o Uso do Modelo de Gás Ideal 105

3.12	Apresentando o Modelo de Gás Ideal	105
3.12.1	A Equação de Estado de Gás Ideal	105
3.12.2	Modelo de Gás Ideal	105
3.12.3	Interpretação Microscópica	107
3.13	Energia Interna, Entalpia e Calores Específicos de Gases Ideais	107
3.13.1	Relações Δu , Δh , Δc_v e c_p	107
3.13.2	Utilizando Funções Relativas ao Calor Específico	109
3.14	Aplicando o Balanço de Energia Utilizando Tabelas de Gás Ideal, Calores Específicos Constantes e Programas de Computador	110
3.14.1	Utilizando Tabelas de Gás Ideal	110
3.14.2	Utilizando Calores Específicos Constantes	111
3.14.3	Utilizando Programas de Computador	113
3.15	Relações de Processos Politrópicos	116
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	118

4 Análise do Volume de Controle Utilizando Energia 133

4.1	Conservação de Massa para um Volume de Controle	134
4.1.1	Desenvolvendo o Balanço da Taxa de Massa	134
4.1.2	Analisando a Vazão Mássica	135
4.2	Formas do Balanço de Massa em Termos de Taxa	135
4.2.1	Formulação do Balanço da Taxa de Massa para Escoamento Unidimensional	135
4.2.2	Formulação do Balanço da Taxa de Massa para Regime Permanente	136
4.2.3	Formulação Integral do Balanço da Taxa de Massa	137
4.3	Aplicações do Balanço da Taxa de Massa	137
4.3.1	Aplicação em Regime Permanente	137

4.3.2	<i>Aplicação Dependente do Tempo (Transiente)</i>	138	4.12	Análise Transiente	163
4.4	Conservação de Energia para um Volume de Controle	140	4.12.1	<i>Balanço de Massa na Análise Transiente</i>	164
4.4.1	<i>Desenvolvendo o Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle</i>	140	4.12.2	<i>Balanço de Energia na Análise Transiente</i>	164
4.4.2	<i>Avaliando o Trabalho para um Volume de Controle</i>	141	4.12.3	<i>Aplicações da Análise Transiente</i>	165
4.4.3	<i>Formulação de Escoamento Unidimensional do Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle</i>	142		Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	172
4.4.4	<i>Formulação Integral do Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle</i>	142	5	A Segunda Lei da Termodinâmica	193
4.5	Análise de Volumes de Controle em Regime Permanente	143	5.1	Introduzindo a Segunda Lei	194
4.5.1	<i>Formulações em Regime Permanente dos Balanços das Taxas de Massa e de Energia</i>	143	5.1.1	<i>Estimulando o Uso da Segunda Lei</i>	194
4.5.2	<i>Considerações sobre a Modelagem de Volumes de Controle em Regime Permanente</i>	144	5.1.2	<i>Oportunidades para Desenvolver Trabalho</i>	195
4.6	Bocais e Difusores	145	5.1.3	<i>Aspectos da Segunda Lei</i>	195
4.6.1	<i>Considerações sobre a Modelagem de Bocais e Difusores</i>	145	5.2	Enunciados da Segunda Lei	196
4.6.2	<i>Aplicação para um Bocal de Vapor</i>	146	5.2.1	<i>Enunciado de Clausius da Segunda Lei</i>	196
4.7	Turbinas	147	5.2.2	<i>Enunciado de Kelvin–Planck da Segunda Lei</i>	196
4.7.1	<i>Considerações sobre a Modelagem de Turbinas a Vapor e a Gás</i>	147	5.2.3	<i>Enunciado da Entropia da Segunda Lei</i>	198
4.7.2	<i>Aplicação para uma Turbina a Vapor</i>	148	5.2.4	<i>Resumo da Segunda Lei</i>	198
4.8	Compressores e Bombas	150	5.3	Processos Reversíveis e Irreversíveis	198
4.8.1	<i>Considerações sobre a Modelagem de Compressores e Bombas</i>	150	5.3.1	<i>Processos Irreversíveis</i>	199
4.8.2	<i>Aplicações para um Compressor de Ar e um Sistema de Bombeamento</i>	151	5.3.2	<i>Demonstrando a Irreversibilidade</i>	200
4.8.3	<i>Sistemas de Armazenamento de Energia por meio de Bombagem Hídrica e Ar Comprimido</i>	154	5.3.3	<i>Processos Reversíveis</i>	201
4.9	Trocadores de Calor	154	5.3.4	<i>Processos Internamente Reversíveis</i>	202
4.9.1	<i>Considerações sobre a Modelagem de Trocadores de Calor</i>	155	5.4	Interpretando o Enunciado de Kelvin–Planck	203
4.9.2	<i>Aplicações para um Condensador de uma Instalação de Potência e o Resfriamento de um Computador</i>	156	5.5	Aplicando a Segunda Lei a Ciclos Termodinâmicos	204
4.10	Dispositivos de Estrangulamento	159	5.6	Aspectos da Segunda Lei de Ciclos de Potência Interagindo com Dois Reservatórios	204
4.10.1	<i>Considerações sobre a Modelagem de Dispositivos de Estrangulamento</i>	159	5.6.1	<i>Limite da Eficiência Térmica</i>	204
4.10.2	<i>Usando um Calorímetro de Estrangulamento para Determinar o Título</i>	160	5.6.2	<i>Corolários da Segunda Lei para Ciclos de Potência</i>	205
4.11	Integração de Sistemas	161	5.7	Aspectos da Segunda Lei Relativos aos Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor Interagindo com Dois Reservatórios	206
			5.7.1	<i>Limites dos Coeficientes de Desempenho</i>	206
			5.7.2	<i>Corolários da Segunda Lei para Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor</i>	207
			5.8	As Escalas de Temperatura Kelvin e Internacional	208

5.8.1	<i>A Escala Kelvin</i>	208	6.6.3	<i>Trabalho e Transferência de Calor em um Processo Internamente Reversível de Água</i>	241
5.8.2	<i>O Termômetro de Gás</i>	209	6.7	Balanço de Entropia para Sistemas Fechados	243
5.8.3	<i>Escala Internacional de Temperatura</i>	210	6.7.1	<i>Interpretando o Balanço de Entropia para um Sistema Fechado</i>	244
5.9	Medidas de Desempenho Máximo para Ciclos Operando entre Dois Reservatórios	210	6.7.2	<i>Avaliando Geração e Transferência de Entropia</i>	244
5.9.1	<i>Ciclos de Potência</i>	210	6.7.3	<i>Aplicações do Balanço de Entropia para um Sistema Fechado</i>	244
5.9.2	<i>Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor</i>	212	6.7.4	<i>Balanço da Taxa de Entropia para Sistemas Fechados</i>	247
5.10	Ciclo de Carnot	215	6.8	Sentido dos Processos	249
5.10.1	<i>Ciclo de Potência de Carnot</i>	215	6.8.1	<i>Princípio do Aumento de Entropia</i>	249
5.10.2	<i>Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor de Carnot</i>	216	6.8.2	<i>Interpretação Estatística da Entropia</i>	251
5.10.3	<i>Resumo do Ciclo de Carnot</i>	217	6.9	Balanço da Taxa de Entropia para Volumes de Controle	252
5.11	A Desigualdade de Clausius	217	6.10	Balanços de Taxas para Volumes de Controle em Regime Permanente	253
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	219	6.10.1	<i>Volumes de Controle com uma Entrada e uma Saída em Regime Permanente</i>	253
6	Utilizando a Entropia	231	6.10.2	<i>Aplicações dos Balanços de Taxas a Volumes de Controle em Regime Permanente</i>	254
6.1	Entropia – Uma Propriedade do Sistema	232	6.11	Processos Isentrópicos	259
6.1.1	<i>Definindo a Variação de Entropia</i>	232	6.11.1	<i>Considerações Gerais</i>	259
6.1.2	<i>Avaliando a Entropia</i>	233	6.11.2	<i>Utilizando o Modelo de Gás Ideal</i>	260
6.1.3	<i>Entropia e Probabilidade</i>	233	6.11.3	<i>Ilustrações: Processos Isentrópicos do Ar</i>	262
6.2	Obtendo Valores de Entropia	233	6.12	Eficiências Isentrópicas de Turbinas, Bocais, Compressores e Bombas	264
6.2.1	<i>Valores para Vapor Superaquecido</i>	233	6.12.1	<i>Eficiência Isentrópica de Turbinas</i>	264
6.2.2	<i>Valores de Saturação</i>	233	6.12.2	<i>Eficiência Isentrópica de Bocais</i>	267
6.2.3	<i>Valores para Líquidos</i>	234	6.12.3	<i>Eficiência Isentrópica de Compressores e Bombas</i>	269
6.2.4	<i>Determinação por Computador</i>	234	6.13	Calor e Trabalho em Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente	271
6.2.5	<i>Utilizando Gráficos de Entropia</i>	234	6.13.1	<i>Calor Transferido</i>	271
6.3	Introduzindo as Equações $T dS$	235	6.13.2	<i>Trabalho</i>	271
6.4	Variação de Entropia para uma Substância Incompressível	237	6.13.3	<i>Trabalho em Processos Politrópicos</i>	272
6.5	Variação de Entropia de um Gás Ideal	237		Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	274
6.5.1	<i>Utilizando Tabelas de Gás Ideal</i>	238	7	Análise da Exergia	295
6.5.2	<i>Assumindo Calores Específicos Constantes</i>	239	7.1	Apresentação da Exergia	296
6.5.3	<i>Determinação por Código Computacional</i>	239	7.2	Conceituação de Exergia	296
6.6	Variação de Entropia em Processos Internamente Reversíveis	240			
6.6.1	<i>Área Representativa da Transferência de Calor</i>	240			
6.6.2	<i>Aplicação do Ciclo de Carnot</i>	241			

7.2.1	<i>Ambiente e Estado Morto</i>	297	8.2.3	<i>Efeitos das Pressões da Caldeira e do Condensador no Ciclo de Rankine</i>	364
7.2.2	<i>Definição de Exergia</i>	297	8.2.4	<i>Principais Perdas e Irreversibilidades</i>	365
7.3	Exergia de um Sistema	298	8.3	Melhoria do Desempenho – Superaquecimento, Reaquecimento e Ciclo Supercrítico	369
7.3.1	<i>Aspectos da Exergia</i>	299	8.4	Melhoria do Desempenho – Ciclo de Potência a Vapor Regenerativo	374
7.3.2	<i>Exergia Específica</i>	300	8.4.1	<i>Aquecedores de Água de Alimentação Abertos</i>	374
7.3.3	<i>Variação de Exergia</i>	302	8.4.2	<i>Aquecedores de Água de Alimentação Fechados</i>	378
7.4	Balanço de Exergia para Sistemas Fechados	302	8.4.3	<i>Aquecedores de Água de Alimentação Múltiplos</i>	379
7.4.1	<i>Apresentação de Balanço de Exergia para um Sistema Fechado</i>	302	8.5	Outros Aspectos do Ciclo de Potência a Vapor	383
7.4.2	<i>Balanço da Taxa de Exergia para Sistemas Fechados</i>	306	8.5.1	<i>Fluido de Trabalho</i>	383
7.4.3	<i>Destruição e Perda de Exergia</i>	306	8.5.2	<i>Cogeração</i>	383
7.4.4	<i>Balanço de Exergia</i>	308	8.5.3	<i>Captura e Armazenamento de Carbono</i>	384
7.5	Balanço da Taxa de Exergia para Volumes de Controle em Regime Permanente	310	8.6	Estudo de Caso: Considerações sobre a Exergia de uma Planta de Potência a Vapor	386
7.5.1	<i>Comparação entre Energia e Exergia para Volumes de Controle em Regime Permanente</i>	312	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	392	
7.5.2	<i>Avaliação da Destruição de Exergia em Volumes de Controle em Regime Permanente</i>	312	9	Sistemas de Potência a Gás	409
7.5.3	<i>Balanço de Exergia para Volumes de Controle em Regime Permanente</i>	317	Considerando Motores de Combustão Interna	410	
7.6	Eficiência Exergética (Eficiência da Segunda Lei)	320	9.1	Apresentação da Terminologia do Motor	410
7.6.1	<i>Adequação do Uso Final à Fonte</i>	320	9.2	Ciclo de Ar-Padrão Otto	412
7.6.2	<i>Eficiências Exergéticas de Componentes Usuais</i>	322	9.3	Ciclo de Ar-Padrão Diesel	416
7.6.3	<i>Uso das Eficiências Exergéticas</i>	324	9.4	Ciclo de Ar-Padrão Dual	420
7.7	Termoeconomia	324	Considerando as Instalações de Potência com Turbinas a Gás	423	
7.7.1	<i>Custo</i>	325	9.5	Modelando Instalações de Potência com Turbinas a Gás	423
7.7.2	<i>Utilização de Exergia em Projetos</i>	325	9.6	Ciclo de Ar-Padrão Brayton	424
7.7.3	<i>Custo da Exergia em um Sistema de Cogeração</i>	326	9.6.1	<i>Calculando as Transferências de Calor e Trabalho Principais</i>	424
Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	330		9.6.2	<i>Ciclo de Ar-Padrão Ideal Brayton</i>	425
8	Sistemas de Potência a Vapor	351	9.6.3	<i>Considerando Irreversibilidades e Perdas nas Turbinas a Gás</i>	430
Introdução à Geração de Potência	352		9.7	Turbinas a Gás Regenerativas	433
Sistemas de Potência a Vapor	355				
8.1	Introdução às Usinas de Potência a Vapor	355			
8.2	O Ciclo de Rankine	358			
8.2.1	<i>Modelagem do Ciclo de Rankine</i>	358			
8.2.2	<i>Ciclo Ideal de Rankine</i>	360			

9.8	Turbinas a Gás Regenerativas com Reaquecimento e Inter-resfriamento	437
9.8.1	<i>Turbinas a Gás com Reaquecimento</i>	437
9.8.2	<i>Compressão com Inter-resfriamento</i>	438
9.8.3	<i>Reaquecimento e Inter-resfriamento</i>	443
9.8.4	<i>Ciclos Ericsson e Stirling</i>	446
9.9	Ciclos Combinados Baseados em Turbinas a Gás	447
9.9.1	<i>Ciclo de Potência Combinado de Turbina a Gás e a Vapor</i>	447
9.9.2	<i>Cogeração</i>	453
9.10	Instalações de Potência com Gaseificação Integrada ao Ciclo Combinado	453
9.11	Turbinas a Gás para Propulsão de Aeronaves	454
	Considerando o Escoamento Compressível Através de Bocais e Difusores	458
9.12	Conceitos Preliminares do Escoamento Compressível	459
9.12.1	<i>Equação da Quantidade de Movimento para Escoamento Permanente Unidimensional</i>	459
9.12.2	<i>Velocidade do Som e Número de Mach</i>	460
9.12.3	<i>Determinação de Propriedades no Estado de Estagnação</i>	462
9.13	Análise do Escoamento Unidimensional Permanente em Bocais e Difusores	463
9.13.1	<i>Efeitos da Variação de Área em Escoamentos Subsônicos e Supersônicos</i>	463
9.13.2	<i>Efeitos da Pressão a Jusante sobre a Vazão Mássica</i>	465
9.13.3	<i>Escoamento Através de um Choque Normal</i>	466
9.14	Escoamento de Gases Ideais com Calores Específicos Constantes em Bocais e Difusores	468
9.14.1	<i>Funções de Escoamento Isentrópico</i>	468
9.14.2	<i>Funções de Choque Normal</i>	471
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	475

10 Sistemas de Refrigeração e de Bombas de Calor 493

10.1	Sistemas de Refrigeração a Vapor	494
10.1.1	<i>Ciclo de Refrigeração de Carnot</i>	494
10.1.2	<i>Desvios do Ciclo de Carnot</i>	495

10.2	Análise dos Sistemas de Refrigeração por Compressão de Vapor	495
10.2.1	<i>Avaliação do Trabalho e das Transferências de Calor Principais</i>	496
10.2.2	<i>Desempenho de Sistemas de Compressão de Vapor Ideais</i>	496
10.2.3	<i>Desempenho dos Sistemas Reais de Compressão de Vapor</i>	499
10.2.4	<i>O Diagrama p-h</i>	502
10.3	Selecionando Refrigerantes	502
10.4	Outras Aplicações dos Sistemas de Compressão de Vapor	505
10.4.1	<i>Armazenamento de Frio</i>	505
10.4.2	<i>Ciclos em Cascata</i>	506
10.4.3	<i>Compressão Multiestágio com Inter-resfriamento</i>	507
10.5	Refrigeração por Absorção	507
10.6	Sistemas de Bombas de Calor	509
10.6.1	<i>Ciclo de Bomba de Calor de Carnot</i>	509
10.6.2	<i>Bombas de Calor por Compressão de Vapor</i>	509
10.7	Sistemas de Refrigeração a Gás	512
10.7.1	<i>Ciclo de Refrigeração Brayton</i>	512
10.7.2	<i>Outras Aplicações de Refrigeração a Gás</i>	516
10.7.3	<i>Ar-Condicionado Automotivo Usando Dióxido de Carbono</i>	517
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	518

11 Relações Termodinâmicas 531

11.1	Utilização das Equações de Estado	532
11.1.1	<i>Conceitos Introdutórios e Definições</i>	532
11.1.2	<i>Equações de Estado com Duas Constantes</i>	532
11.1.3	<i>Equações de Estado com Múltiplas Constantes</i>	536
11.2	Relações Matemáticas Importantes	537
11.3	Desenvolvimento de Relações entre Propriedades	539
11.3.1	<i>Diferenciais Exatas Principais</i>	540
11.3.2	<i>Relações entre Propriedades a partir de Diferenciais Exatas</i>	540
11.3.3	<i>Funções Termodinâmicas Fundamentais</i>	544
11.4	Cálculo das Variações de Entropia, Energia Interna e Entalpia	545

11.4.1	<i>Considerações sobre a Mudança de Fase</i>	545
11.4.2	<i>Considerações sobre Regiões Monofásicas</i>	548
11.5	Outras Relações Termodinâmicas	552
11.5.1	<i>Expansividade Volumétrica e Compressibilidades Isotérmica e Isentrópica</i>	552
11.5.2	<i>Relações que Envolvem Calores Específicos</i>	554
11.5.3	<i>O Coeficiente de Joule-Thomson</i>	557
11.6	Construção das Tabelas de Propriedades Termodinâmicas	558
11.6.1	<i>Desenvolvimento de Tabelas por Integração Utilizando Dados da Relação $p-v-T$ e do Calor Específico</i>	558
11.6.2	<i>Desenvolvimento de Tabelas Através da Diferenciação de uma Função Termodinâmica Fundamental</i>	559
11.7	Diagramas Generalizados de Entalpia e Entropia	562
11.8	Relações $p-v-T$ para Misturas de Gases	567
11.9	Análise dos Sistemas Multicomponentes	572
11.9.1	<i>Propriedades Molares Parciais</i>	572
11.9.2	<i>Potencial Químico</i>	574
11.9.3	<i>Funções Termodinâmicas Fundamentais para Sistemas Multicomponentes</i>	575
11.9.4	<i>Fugacidade</i>	576
11.9.5	<i>Solução Ideal</i>	579
11.9.6	<i>Potencial Químico para Soluções Ideais</i>	580
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	581

12 Mistura de Gases Ideais e Aplicações à Psicrometria 593

	Misturas de Gases Ideais: Considerações Gerais	594
12.1	Descrição da Composição da Mistura	594
12.2	Relacionando p, V e T para Misturas de Gases Ideais	597
12.3	Estimativa de U, H, S e Calores Específicos	598
12.3.1	<i>Estimativa de U e H</i>	598
12.3.2	<i>Estimativa de c_v e c_p</i>	599
12.3.3	<i>Estimativa de S</i>	599
12.3.4	<i>Trabalhando em uma Base Mássica</i>	599
12.4	Análise de Sistemas que Envolvem Misturas	600

12.4.1	<i>Processos com Misturas à Composição Constante</i>	600
12.4.2	<i>Misturando Gases Ideais</i>	606

Aplicações à Psicrometria 611

12.5	Apresentação dos Princípios da Psicrometria	611
12.5.1	<i>Ar úmido</i>	611
12.5.2	<i>Razão de Mistura, Umidade Relativa, Entalpia de Mistura e Entropia de Mistura</i>	612
12.5.3	<i>Modelando o Ar Úmido em Equilíbrio com a Água Líquida</i>	614
12.5.4	<i>Estimativa da Temperatura de Ponto de Orvalho</i>	614
12.5.5	<i>Estimativa da Razão de Mistura por Meio da Temperatura de Saturação Adiabática</i>	619
12.6	Psicrômetros: Medição das Temperaturas de Bulbo Úmido e de Bulbo Seco	620
12.7	Cartas Psicrométricas	621
12.8	Análise de Processos de Condicionamento de Ar	622
12.8.1	<i>Aplicando Balanços de Massa e de Energia aos Sistemas de Condicionamento de Ar</i>	622
12.8.2	<i>Condicionamento de Ar Úmido a Composição Constante</i>	623
12.8.3	<i>Desumidificação</i>	626
12.8.4	<i>Umidificação</i>	629
12.8.5	<i>Resfriamento Evaporativo</i>	631
12.8.6	<i>Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido</i>	634
12.9	Torres de Resfriamento	637
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	639

13 Misturas Reagentes e Combustão 653

Fundamentos da Combustão 654

13.1	Introdução à Combustão	654
13.1.1	<i>Combustíveis</i>	654
13.1.2	<i>Modelagem de Ar de Combustão</i>	655
13.1.3	<i>Determinação dos Produtos de Combustão</i>	657
13.1.4	<i>Balanços de Energia e de Entropia para Sistemas Reagentes</i>	661
13.2	Conservação de Energia — Sistemas Reagentes	662

13.2.1	<i>Avaliação da Entalpia de Sistemas Reagentes</i>	662
13.2.2	<i>Balanços de Energia para Sistemas Reagentes</i>	663
13.2.3	<i>Entalpia de Combustão e Poderes Caloríficos</i>	669
13.3	Determinação da Temperatura Adiabática de Chama	672
13.3.1	<i>Utilização de Dados Tabelados</i>	672
13.3.2	<i>Utilização de Programa de Computador</i>	673
13.3.3	<i>Comentários Finais</i>	675
13.4	Células a Combustível	675
13.4.1	<i>Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons</i>	677
13.4.2	<i>Célula a Combustível de Membrana de Óxido Sólido</i>	678
13.5	Entropia Absoluta e a Terceira Lei da Termodinâmica	678
13.5.1	<i>Avaliação da Entropia para Sistemas Reagentes</i>	679
13.5.2	<i>Balanços de Entropia para Sistemas Reagentes</i>	679
13.5.3	<i>Avaliação da Função de Gibbs para Sistemas Reagentes</i>	684
	Exergia Química	685
13.6	Conceituando a Exergia Química	685
13.6.1	<i>Equações de Trabalho para Exergia Química</i>	686
13.6.2	<i>Estimando a Exergia Química em Outros Casos</i>	687
13.6.3	<i>Comentários Finais</i>	688
13.7	Exergia Química-Padrão	688
13.7.1	<i>Exergia Química-Padrão de um Hidrocarboneto: C_aH_b</i>	689
13.7.2	<i>Exergia Química-Padrão de Outras Substâncias</i>	692
13.8	Aplicando a Exergia Total	692
13.8.1	<i>Calculando a Exergia Total</i>	693
13.8.2	<i>Calculando Eficiências Exergéticas de Sistemas Reagentes</i>	698
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	700

14 Equilíbrio de Fases e Químico 715

Fundamentos do Equilíbrio 716

14.1	Introduzindo Critérios de Equilíbrio	716
14.1.1	<i>Potencial Químico e Equilíbrio</i>	717
14.1.2	<i>Estimando Potenciais Químicos</i>	718
	Equilíbrio Químico	719
14.2	Equação de Reação de Equilíbrio	719
14.2.1	<i>Caso Introdutório</i>	720
14.2.2	<i>Caso Geral</i>	720
14.3	Cálculo de Composições de Equilíbrio	721
14.3.1	<i>Constante de Equilíbrio para Misturas de Gases Ideais</i>	721
14.3.2	<i>Exemplos do Cálculo de Composições de Equilíbrio de Misturas Reagentes de Gases Ideais</i>	723
14.3.3	<i>Constante de Equilíbrio para Misturas e Soluções</i>	728
14.4	Mais Exemplos da Utilização da Constante de Equilíbrio	729
14.4.1	<i>Determinação da Temperatura de Equilíbrio de Chama</i>	729
14.4.2	<i>Equação de Van't Hoff</i>	733
14.4.3	<i>Ionização</i>	733
14.4.4	<i>Reações Simultâneas</i>	735
	Equilíbrio de Fases	737
14.5	Equilíbrio entre Duas Fases de uma Substância Pura	737
14.6	Equilíbrio de Sistemas Multicomponentes e Multifásicos	738
14.6.1	<i>Potencial Químico e Equilíbrio de Fases</i>	738
14.6.2	<i>A Regra das Fases de Gibbs</i>	740
	Resumo do Capítulo e Guia de Estudos	741

Apêndices Tabelas, Figuras e Diagramas 749

Índice de Tabelas em Unidades SI 749

Índice de Tabelas em Unidades Inglesas 797

Índice de Figuras e Diagramas 845

Índice 860

Respostas dos Problemas Seleccionados.
Consulte o Ambiente virtual de aprendizagem do GEN e tenha acesso a este e outros conteúdos mediante cadastro.