

TERMODINÂMICA PARA ENGENHARIA

CLITO AFONSO

2.^a Edição
REVISTA E AUMENTADA

AUTOR

Clito Afonso

TÍTULO

Termodinâmica para Engenharia | 2.ª edição

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Praça da Corujeira n.º 38 . 4300-144 PORTO

Tel: 220 939 053 . E-mail: geral@quanticaeditora.pt . www.quanticaeditora.pt

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados

Tel. 220 104 872 . Fax 220 104 871 . info@booki.pt – www.booki.pt

APOIOS

RACE – Refrigeration & Air Conditioning Engineering · www.race.com.pt

CENFIM – Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica · www.cenfim.pt

ALPHA ENGENHARIA – Equipamentos e Soluções Industriais · www.alphaengenharia.pt

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

André Oliveira

Delineatura, Produção de Comunicação, Lda.

IMPRESSÃO

Fevereiro, 2021

DEPÓSITO LEGAL

470257/20



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2021 | Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

536 Calor. Termodinâmica. Física estatística

536.7 Termodinâmica. Energética

ISBN

Papel: 9789899017269

E-book: 9789899017276

Catálogo da publicação

Família: Bases de Engenharia

Subfamília: Outros

	AGRADECIMENTOS	XII
	PREFÁCIO À SEGUNDA EDIÇÃO	XIII
	NOMENCLATURA	XIV
1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	NOTA INTRODUTÓRIA	19
1.2.	OBJETIVO DA TERMODINÂMICA	20
2.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	23
2.1.	DEFINIÇÃO DE TERMODINÂMICA	25
2.2.	SISTEMA TERMODINÂMICO, VIZINHANÇA, FRONTEIRA	26
2.2.1.	Tipos de Sistemas	28
2.2.2.	Tipos de Fronteira	31
2.3.	PROPRIEDADES, ESTADO, EQUAÇÕES DE ESTADO E TRANSFORMAÇÕES	32
2.3.1.	Propriedades	32
2.3.2.	Estado e Equações de Estado	34
2.3.3.	Transformação	35
2.4.	FASE	37
2.5.	EQUILÍBRIO	37
2.6.	REVERSIBILIDADE	39
3.	ENERGIA	41
3.1.	INTRODUÇÃO	43
3.2.	ENERGIA DE UM SISTEMA SOB O PONTO DE VISTA MICROSCÓPICO	43
3.3.	ENERGIA DE UM SISTEMA SOB O PONTO DE VISTA MACROSCÓPICO	46
3.4.	MEDIÇÃO DA PROPRIEDADE ENERGIA	49
3.5.	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA	50
3.5.1.	Trabalho de Fronteira	50
3.5.2.	Trabalho de um Ciclo	58
3.5.3.	Trabalho ao Veio	59
3.5.4.	Outras Formas de Trabalho	60
3.5.5.	Temperatura e Lei Zero da Termodinâmica	61
3.5.6.	Calor	63
3.5.7.	Comparação entre Trabalho e Calor	68
3.6.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	69
4.	PROPRIEDADES DE SUBSTÂNCIAS PURAS, SIMPLES E COMPRESSÍVEIS	79
4.1.	INTRODUÇÃO	81
4.2.	SUBSTÂNCIA PURA, SIMPLES E COMPRESSÍVEL	81
4.3.	COMPORTAMENTO DE UMA SUBSTÂNCIA PURA, SIMPLES E COMPRESSÍVEL NA FASE LÍQUIDA E DE VAPOR	83

4.3.1.	Superfície p-v-T	86
4.3.2.	Tabelas Termodinâmicas	88
4.3.3.	Título	90
4.4.	EQUAÇÕES DE ESTADO	92
4.4.1.	Gases Perfeitos	93
4.4.2.	Gás Perfeito versus Vapor Sobreaquecido	96
4.4.3.	Equação de Van der Waals	97
4.4.4.	Equação de Clausius	100
4.4.5.	Equação de Redlich-Kwong	100
4.4.6.	Equação de Battie-Bridgeman	101
4.4.7.	Equação de Benedict-Webb-Rubin	101
4.4.8.	Equação de Martin e Hou	101
4.4.9.	Equações de Estado Viriais	102
4.4.10.	Princípio dos Estados Correspondentes	103
4.4.11.	Considerações Finais sobre as Equações de Estado	106
4.5.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	107
4.6.	ANEXO	116
5.	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	119
5.1.	INTRODUÇÃO	121
5.2.	PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA	121
5.3.	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA – CICLOS	122
5.4.	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA APLICADA A SISTEMAS FECHADOS	124
5.4.1.	Primeira Lei da Termodinâmica – Sistemas Fechados	124
5.4.2.	Consequências da Primeira Lei da Termodinâmica	125
5.4.3.	Primeira Lei da Termodinâmica em Termos de Potência	127
5.4.4.	Propriedade Termodinâmica Entalpia	128
5.4.5.	Calores Específicos	130
5.4.6.	Energia Interna, Entalpia e Calores Específicos de Gases Perfeitos	132
5.4.7.	Tabelas de Gases Perfeitos	135
5.4.8.	Relações entre p, v e T de Gases Perfeitos	137
5.4.9.	Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada a Processos Politrópicos que envolvam Gases Perfeitos	140
5.4.10.	Calores Específicos de Substâncias Incompressíveis	141
5.5.	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA APLICADA A PROCESSOS – SISTEMAS ABERTOS	141
5.5.1.	Princípio da Conservação da Massa	142
5.5.2.	Primeira Lei da Termodinâmica aplicada a Sistemas Abertos	146
5.5.3.	Primeira Lei da Termodinâmica aplicada a Sistemas Abertos, Regime Permanente	149
5.5.4.	Primeira Lei da Termodinâmica aplicada a Sistemas Abertos, Regime Transitório	155
5.6.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	156

6.	SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	175
6.1.	INTRODUÇÃO	177
6.2.	SENTIDO DE OCORRÊNCIA DE PROCESSOS ESPONTÂNEOS	177
6.3.	OUTROS ASPETOS ASSOCIADOS À SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	179
6.4.	RESERVATÓRIOS DE ENERGIA TÉRMICA	181
6.5.	MÁQUINAS TÉRMICAS MOTORAS	181
6.6.	MÁQUINAS TÉRMICAS INVERSAS	185
6.7.	EFICIÊNCIA TÉRMICA	187
6.8.	ENUNCIADOS DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	190
6.8.1.	Enunciado de Kelvin-Planck	190
6.8.2.	Enunciado de Clausius	191
6.8.3.	Equivalência dos Enunciados de Kelvin-Planck e de Clausius	192
6.9.	PROCESSOS REVERSÍVEIS E IRREVERSÍVEIS	192
6.9.1.	Atrito	193
6.9.2.	Transferência de Calor com Diferença Finita de Temperaturas	195
6.9.3.	Expansão ou Compressão em Processos de Não Equilíbrio	196
6.9.4.	Expansão Irresistida	197
6.9.5.	Processos Interna e Externamente Reversíveis	197
6.10.	CICLO DE CARNOT	199
6.11.	COROLÁRIOS DO CICLO DE CARNOT	202
6.12.	ESCALA TERMODINÂMICA DE TEMPERATURAS	203
6.13.	EFICIÊNCIA DAS MÁQUINAS DE CARNOT	206
6.14.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	206
7.	ENTROPIA	213
7.1.	INTRODUÇÃO	215
7.2.	DESIGUALDADE DE CLAUSIUS	215
7.3.	ENTROPIA	216
7.3.1.	Relações TdS	219
7.3.2.	Entropia de Substâncias Puras Simples e Compressíveis	220
7.3.3.	Variação de Entropia de Processos Irreversíveis	224
7.4.	PRINCÍPIO DO AUMENTO DA ENTROPIA	227
7.4.1.	Balço Entrópico de Sistemas Fechados	230
7.4.2.	Balço Entrópico de Sistemas Abertos	234
7.5.	RENDIMENTO ISENTRÓPICO DE EQUIPAMENTOS (sistemas abertos)	238
7.6.	TRABALHO DE SISTEMAS ABERTOS	240
7.7.	TERCEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	242
7.8.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	244
8.	EXERGIA	257
8.1.	INTRODUÇÃO	259
8.2.	CARACTERÍSTICAS DAS FORMAS ORGANIZADAS E DESORGANIZADAS DE ENERGIA	259

8.3.	ESTADO DE REFERÊNCIA	261
8.4.	EXERGIA DE UM VOLUME DE CONTROLO	263
8.4.1.	Exergia Associada ao Trabalho	263
8.4.2.	Exergia Associada ao Calor	263
8.4.3.	Exergia Associada a um Fluxo de Massa	267
8.5.	EXERGIA DE UM SISTEMA FECHADO	270
8.6.	IRREVERSIBILIDADES E BALANÇOS EXERGÉTICOS DE SISTEMAS	272
8.6.1.	Balanço Exérgético de um Sistema Fechado	274
8.6.2.	Balanço Exérgético de um Sistema Aberto	276
8.7.	RENDIMENTO EXERGÉTICO DE MÁQUINAS TÉRMICAS	277
8.8.	RENDIMENTO EXERGÉTICO DE EQUIPAMENTOS QUE OPEREM EM REGIME PERMANENTE	282
8.9.	OS 3 E's – ENERGIA, ENTROPIA E EXERGIA	284
8.10.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	285
9.	RELAÇÕES TERMODINÂMICAS	291
9.1.	INTRODUÇÃO	293
9.2.	DIFERENCIAIS EXATOS	293
9.3.	RELAÇÕES DE MAXWELL	299
9.4.	RELAÇÕES TERMODINÂMICAS QUE ENVOLVAM A ENERGIA INTERNA, ENTALPIA E ENTROPIA	302
9.5.	EQUAÇÃO DE CLAPEYRON – MUDANÇA DE FASE E EQUILÍBRIO	307
9.6.	OUTRAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	311
9.7.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	315
10.	SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA	323
10.1.	INTRODUÇÃO	325
10.2.	MÁQUINAS TÉRMICAS MOTORAS	326
10.2.1.	Rendimento Termodinâmico	327
10.2.2.	Razão de Trabalho	329
10.2.3.	Consumo Específico de Vapor ou de Gás	330
10.3.	CICLOS TERMODINÂMICOS MOTORES DE COMBUSTÃO EXTERNA	330
10.3.1.	Ciclo de Carnot	331
10.3.2.	Ciclo de Rankine Simples	335
10.3.3.	Ciclo Rankine com Sobreaquecimento	340
10.3.4.	Ciclo Rankine com Reaquecimento	344
10.3.5.	Ciclo Rankine Regenerativo	347
10.3.6.	Ciclo Rankine Orgânico e Binário	351
10.4.	CICLOS TERMODINÂMICOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	356
10.4.1.	Ciclo Joule-Brayton Simples	357
10.4.2.	Ciclo Joule-Brayton Regenerativo	367
10.4.3.	Ciclo Joule-Brayton com Compressão e Expansão por Andares	372

10.4.4.	Ciclo Otto	377
10.4.5.	Ciclo Diesel	381
10.4.6.	Ciclo Sabathíe ou Misto	384
10.4.7.	Ciclo Stirling	386
10.4.8.	Pressão Média Efetiva	387
10.5.	CICLOS COMBINADOS DE VAPOR E DE GÁS	388
10.6.	CICLOS FRIGORÍFICOS	389
10.6.1.	Ciclo Frigorífico de Carnot	390
10.6.2.	Ciclo Frigorífico de Compressão de Vapor	393
10.6.3.	Ciclo Frigorífico de Compressão de Vapor Real	399
10.6.4.	Ciclos Frigoríficos com Compressão por Andares	400
10.6.5.	Ciclos Frigoríficos com Expansão por Andares	404
10.6.6.	Sistemas em Cascata	406
10.6.7.	Fluidos Frigorigéneos	408
10.6.7.1.	Designação e Grupos dos Fluidos Frigorigéneos	409
10.6.7.2.	Características de um Fluido Frigorigéneo Ideal	415
10.6.7.3.	Fluidos Frigorigéneos e o Meio Ambiente	419
10.6.8.	Ciclos de Absorção	421
10.7.	BOMBAS DE CALOR	424
10.8.	OUTROS SISTEMAS PRODUTORES DE ELETRICIDADE	424
10.9.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	426
11.	COGERAÇÃO	435
11.1.	INTRODUÇÃO	437
11.2.	COGERAÇÃO IDEAL	439
11.3.	ÍNDICES DE DESEMPENHO	441
11.4.	EXEMPLOS DE CENTRAIS DE COGERAÇÃO	442
11.4.1.	Sistema base: Ciclo de Rankine	442
11.4.2.	Sistema base: Ciclo de Joule-Brayton	445
11.4.3.	Sistema base: Ciclo Motores Alternativos	448
11.4.4.	Sistema base: Ciclo Combinado	449
11.5.	TRIGERAÇÃO	450
11.6.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	450
12.	MISTURAS GASOSAS NÃO REATIVAS	455
12.1.	INTRODUÇÃO	457
12.2.	COMPOSIÇÃO DE UMA MISTURA GASOSA	457
12.3.	LEIS DAS MISTURAS GASOSA	458
12.3.1.	Lei de Gibbs-Dalton	458
12.3.2.	Equação de Estado de uma Mistura de Gases Perfeitos	460
12.3.3.	Lei de Amagat	462
12.3.4.	Relação entre as Frações Molar, Volúmica e Mássica	463
12.4.	IRREVERSIBILIDADE DO PROCESSO DE MISTURA	464
12.5.	EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	466

13. PSICROMETRIA	473
13.1. INTRODUÇÃO	475
13.2. AR HÚMIDO	475
13.3. QUANTIFICAÇÃO DO TEOR DE VAPOR DE ÁGUA NO AR HÚMIDO	476
13.3.1. Humidade absoluta	476
13.3.2. Humidade Relativa	477
13.3.3. Ponto de Orvalho	478
13.4. PROPRIEDADES DO AR HÚMIDO	479
13.4.1. Massa Volúmica	479
13.4.2. Volume Específico	480
13.4.3. Entalpia	480
13.4.4. Temperatura Adiabática de Saturação e Temperatura de Bolbo Húmido	481
13.5. CARTAS PSICROMÉTRICAS	485
13.5.1. Desenvolvimento das Cartas Psicrométricas	485
13.5.2. Diagramas Psicrométricos	493
13.5.3. Processos Elementares com Ar Húmido	494
13.5.4. Aquecimento ou Arrefecimento Sensível	495
13.5.5. Aquecimento e Humidificação	496
13.5.6. Humidificação	498
13.5.7. Arrefecimento com Desumidificação	499
13.5.8. Mistura Adiabática de Dois Fluxos	500
13.6. SISTEMAS QUE ENVOLVEM PROCESSOS ELEMENTARES DE PSICROMETRIA	502
13.6.1. Condicionamento de Ar	502
13.6.2. Torres de Arrefecimento	504
13.6.3. Processo de Compressão de Ar	506
13.7. EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	506
14. REAÇÕES QUÍMICAS	515
14.1. INTRODUÇÃO	517
14.2. COMBUSTÃO	517
14.3. PROCESSO DE COMBUSTÃO	519
14.4. ENTALPIAS DE REAÇÃO, DE COMBUSTÃO E DE FORMAÇÃO	524
14.5. PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	528
14.6. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA	529
14.7. BALANÇO ENTRÓPICO DE SISTEMAS REATIVOS	529
14.8. EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO	530
BIBLIOGRAFIA	DXL
REFERÊNCIAS	DXLII
ÍNDICE DE FIGURAS	DXLIII
ÍNDICE DE TABELAS	DXLVIII
ÍNDICE REMISSIVO	DXLIX

1.1. NOTA INTRODUTÓRIA

“A theory is the more impressive the greater the simplicity of its premises is, the more different kinds of things it relates, and the more extended is its area of applicability.

Therefore, the deep impression that classical thermodynamics made upon me.”

It is the only physical theory of universal content, concerning which I am convinced that, within the framework of the applicability of its basic concepts, it will never be overthrown.

Albert Einstein

Esta afirmação lapidar do cientista Albert Einstein, que não foi propositadamente traduzida para que nenhum sentido fosse perdido, mostra a abrangência e a importância que a Termodinâmica tem no nosso universo.

De forma oposta, e de modo satírico, um outro famoso cientista de sua graça Arnold Sommerfeld, respondeu da seguinte forma a uma pergunta que lhe tinha sido feita sobre o motivo pelo qual não se dedicava exclusivamente à Termodinâmica: “A primeira vez que estudei Termodinâmica não compreendi nada; à segunda julguei que tinha compreendido a menos de uma ou outra coisa; à terceira apercebi-me que definitivamente não compreendia nada de Termodinâmica.”

De alguma maneira, esta resposta, se bem que Figurativa, pretende ilustrar a existência de uma aparente complexidade associada a este ramo da ciência, quer pela existência de alguns conceitos novos nem sempre fáceis de se interiorizarem, quer pelas possíveis vertentes de ordem metafísica a si inerentes.

Porém, e estritamente sob o ponto de vista de Engenharia, a abordagem ao estudo da Termodinâmica pode ser feita de uma forma sistemática e dirigida, tornando-se deste modo o seu estudo fácil e aplicado.

É um lugar comum dizer-se que o rigor científico é incompatível com uma fácil compreensão dos fenómenos físicos. Pretendeu-se assim com este texto realizar-se uma simbiose das suas situações opostas de modo a poder fazer “passar-se” os conceitos sem, no entanto, fugir minimamente ao rigor científico.

Para que a utilização de energia tenha podido ocorrer e tenha sido posta ao serviço do homem, ele teve necessidade de compreender as leis que regem quer as suas transformações, quer a sua utilização, o que aconteceu fundamentalmente nos dois últimos séculos com o estabelecimento das Leis da Termodinâmica e invenções que marcaram definitivamente a nossa era. Basta recordar a máquina de vapor de Watt, símbolo do início da industrialização e das conseqüentes mudanças sociais, económicas e culturais. Como disse um popular autor inglês, em 1868: “O homem está para Deus assim com a máquina a vapor está para o homem”. Tem sido argumentado que a energia é a chave do avanço da civilização e que a evolução das sociedades humanas é dependente da conversão de energia para uso humano. Assistiu-se assim, ao longo do tempo, a uma utilização crescente de energia que se encontra intimamente associado com o estágio de desenvolvimento de determinada sociedade, de tal forma que George Basalla propôs uma relação entre ambos, designada por equação “energia-civilização”. Seja qual for o grau de incerteza nesta fórmula, a maior parte das pessoas crê na mesma.

Alguns exemplos de sistemas que são tratados na Termodinâmica são indicados na Figura 1.1.

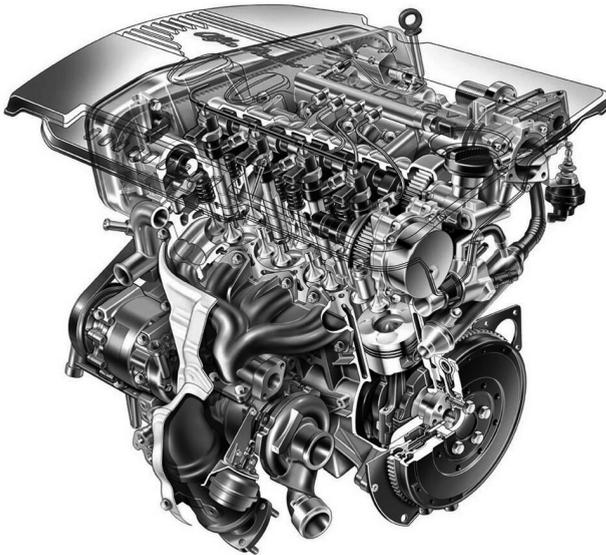


FIG. 1.1. Propulsor de Exemplos de sistemas abordados no âmbito da Termodinâmica.

2.1. DEFINIÇÃO DE TERMODINÂMICA

Etimologicamente a palavra "Termodinâmica" deriva das palavras gregas *therme* – calor – e *dynamics* – força. De um modo geral pode definir-se a Termodinâmica como a ciência que estuda a energia e as suas diferentes formas bem como as suas interações com a matéria.

Devido à generalidade inerente a esta definição, é costume dizer-se que a Termodinâmica não é um ramo particular das ciências físicas cujo objetivo seria o estudo de uma categoria especial de fenómenos, mas sim uma forma de estudá-los, aplicável a todos, uma forma de os observar, resumindo um estado de espírito.

De igual modo, o seu campo de aplicação extravasa em muito a área da Engenharia Mecânica, sendo então mais conveniente redefinir a Termodinâmica como a ciência que estuda a energia e transformações energéticas tais como calor e trabalho e as propriedades das substâncias envolvidas nessas transformações.

Tal como noutras ciências, a base da Termodinâmica reside na observação experimental e, baseada no princípio da conservação da energia, rege-se por quatro princípios (leis) fundamentais:

- Lei Zero da Termodinâmica, que trata do equilíbrio térmico.
- Primeira Lei da Termodinâmica, que postula o carácter conservativo da energia.
- Segunda Lei da Termodinâmica, que se relaciona com a noção de irreversibilidade e da propriedade entropia.
- Terceira Lei da Termodinâmica, que trata das propriedades da matéria na vizinhança da temperatura zero.

Os princípios não são demonstráveis, nem por via experimental nem por via lógica, embora sejam induzidos de factos experimentais dispersos e complexos. São “verdades” gerais que persistem válidas em todas as situações particulares. É através da verificação experimental em situações particulares, designadamente através das consequências deles resultantes, que os princípios se impõem à nossa aceitação e, essa característica, distingue-os dos postulados e axiomas matemáticos.

A Termodinâmica não é um ramo particular das ciências físicas cujo objetivo seria o estudo de uma categoria especial de fenómenos, mas sim uma forma de estudá-los, aplicável a todos, uma forma de os observar. Em suma, um estado de espírito.

localizar as irreversibilidades inerentes à evolução de um dado sistema. Mostra-se na Figura 2.1. um sistema constituído por propulsor de uma aeronave. Note-se que um dado sistema pode ser constituído por vários subsistemas conforme se pode visualizar na Figura 2.1. (subsistema compressor, câmara de combustão e turbina).

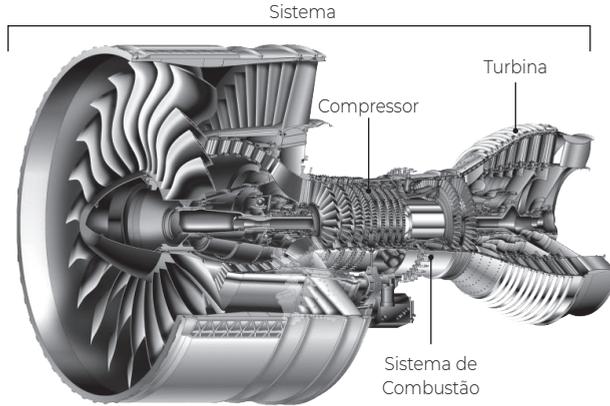


FIG. 2.1. Sistema termodinâmico. Adaptado de [3].

Quando se define um sistema termodinâmico está-se implicitamente a identificar tudo o que esteja à sua volta e que com ele interaja, ou seja a sua vizinhança, Figura 2.2.

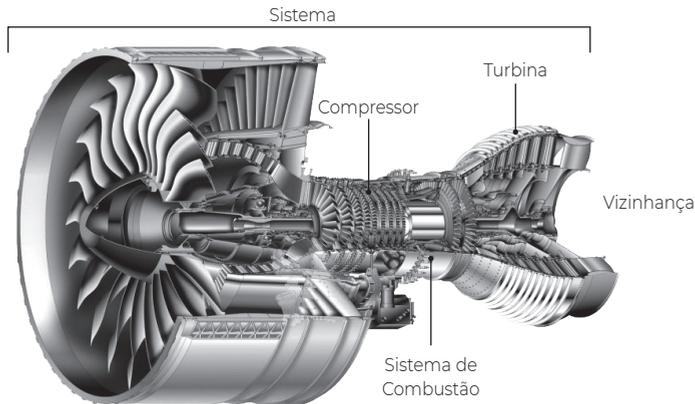


FIG. 2.2. Sistema e vizinhança.

3.1. INTRODUÇÃO

Como referido no capítulo introdutório, o centro de gravidade da Termodinâmica roda em torno da energia. É assim importante definir este conceito, apesar de todos nós termos ideias intuitivas sobre ele.

Pode dizer-se que não existe uma única definição que satisfaça a todos. Dependendo do contexto em que se esteja a trabalhar, assim a energia é definida de uma ou outra maneira, se bem que, em última instância, todas elas tenham pontos em comum.

Assim, na Mecânica, define-se energia como a capacidade de um sistema em realizar trabalho. Porém, como se verá aquando da Segunda Lei da Termodinâmica, esta definição não é a mais adequada na Termodinâmica. Por outro lado, o conceito de energia sob o ponto de vista Termodinâmico é mais amplo do que o seu conceito estritamente mecanicista.

A energia de uma qualquer substância pode ser analisada de duas maneiras distintas: sob o ponto de vista microscópico e sob o ponto de vista macroscópico. Enquanto no primeiro caso a energia está relacionada com a estrutura e grau de atividade molecular da matéria, sendo por isso independente de qualquer sistema referencial de eixos, no segundo caso relaciona-se com a energia que o sistema possui como um todo relativamente a um dado sistema referencial. Analisam-se nas secções seguintes estes dois pontos de vista.

3.2. ENERGIA DE UM SISTEMA SOB O PONTO DE VISTA MICROSCÓPICO

Sob este ponto de vista, a energia está associada às moléculas de uma substância. Sabe-se da Física que cada uma das suas partículas de uma molécula possui várias espécies microscópicas de energia que podem ser agrupadas em quatro tipos: energia sensível, latente, química e nuclear.

Energia sensível:

- as moléculas têm energia devido ao seu movimento de translação – energia de translação;
- nas moléculas poliatómicas a massa não se encontra concentrada num ponto, possuindo então energia rotacional;
- se os átomos de uma molécula vibrarem relativamente ao centro de massa, eles têm energia vibratória.

Os modos de transferência de calor são expressões que explicitam melhor a possibilidade de haver movimento no meio em que se transfere calor. Assim têm-se três modos de transferência de calor:

- condução: modo básico que se identifica com o transporte molecular, mecanismo típico dos meios sólidos ou fluidos em repouso;
- convecção: modo próprio dos fluidos em movimento em que o transporte molecular é potenciado com o transporte global (do próprio escoamento e o transporte de turbilhões quando o escoamento é turbulento). Se o movimento do fluido for provocado por uma bomba ou ventilador ou outra fonte externa ao processo de transferência de calor (por exemplo, vento) a convecção diz-se forçada, Figura 3.11.; Se o movimento do fluido for causado pelas diferenças de densidade do fluido provocadas pela própria transferência de calor, a convecção diz-se natural, Figura 3.12..



FIG. 3.11. Convecção forçada.



FIG. 3.12. Convecção natural.

4.1. INTRODUÇÃO

Como referido, a Termodinâmica é uma ciência que para além do estudo de transformações energéticas, trata também das propriedades físicas das substâncias envolvidas naquelas transformações.

Neste capítulo analisa-se como, a partir das propriedades termodinâmicas mensuráveis de uma substância, pressão, temperatura e volume, se pode obter a relação entre elas, ou seja, a sua equação de estado. Mostra-se também como podem ser obtidas as tabelas de propriedades termodinâmicas, uma ferramenta útil para a resolução de maior parte de problemas de engenharia que envolvam análise termodinâmica.

De entre as substâncias passíveis de serem analisadas, abordar-se-ão aqui exclusivamente as designadas por substâncias puras, simples e compressíveis.

4.2. SUBSTÂNCIA PURA, SIMPLES E COMPRESSÍVEL

Uma substância designa-se por pura se forem satisfeitas simultaneamente as seguintes condições:

1. for homogénea na composição (a parte é igual ao todo). Composição significa a mesma proporção relativa dos elementos químicos na amostra;
2. for homogénea na agregação química (na parte e no todo). Significa que os elementos químicos têm de estar combinados da mesma maneira;
3. invariável na agregação química (ao longo do tempo).

Para uma mais fácil compreensão deste conceito atente-se na Figura 4.1.

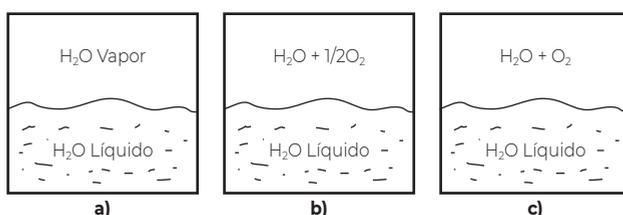


FIG. 4.1. Ilustração da definição de substância pura.

Verifica-se que:

- a primeira condição de substância pura é satisfeita tanto na situação a) como na b) (o hidrogénio e o oxigénio apresentam-se na relação de 2:1 na parte e no todo). Porém, na situação c), enquanto na parte inferior o hidrogénio e o oxigénio encontram-se relacionados na razão de 2:1, na parte superior a razão é de 1:1. Assim, o exemplo mostrado na Figura 4.1.c) não é uma substância pura;

Como facilmente se verifica, o diagrama $T-v$ representado na Figura 4.5., não é mais do que a projeção da superfície da Figura 4.6 no plano horizontal. De igual modo poder-se-iam obter mais dois diagramas, nomeadamente o $p-T$ e o $p-v$, pela projeção da superfície em dois planos verticais diferentes, respetivamente representados nas Figuras 4.7. e 4.8.

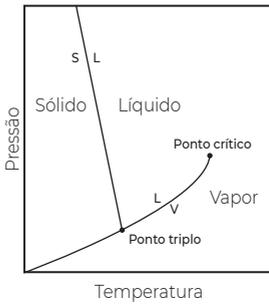


FIG. 4.7. Superfície $p-T$ da água. Adaptado de [4].

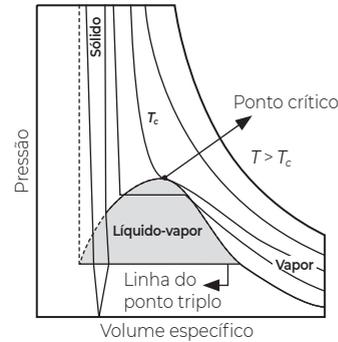


FIG. 4.8. Superfície $p-v$ da água. Adaptado de [4].

Como se constata pelas Figuras anteriores, a água é uma substância especial, já que se expande durante a solidificação. A maior parte das substâncias conhecidas tem um comportamento oposto, ou seja, durante a solidificação contraem-se. Mostra-se na Figura 4.9. a superfície $p-v-T$ de tais substâncias. A partir desta superfície poder-se-iam obter três diagramas termodinâmicos projetando-a em outros tantos planos, tal como mencionado anteriormente.

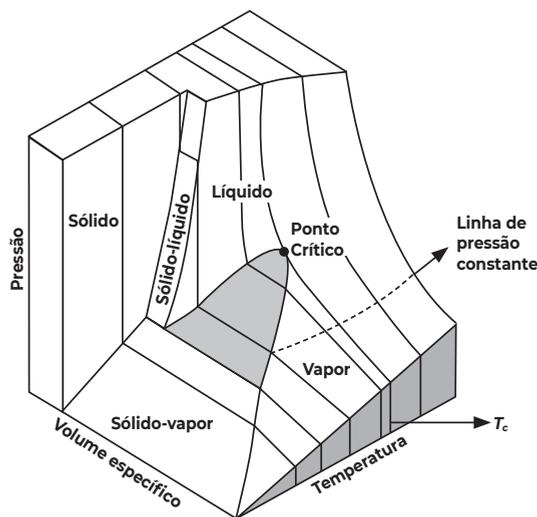


FIG. 4.9. Superfície $p-v-T$ de substâncias normais. Adaptado de [4].

5.1. INTRODUÇÃO

Analisou-se no terceiro capítulo o conceito de energia bem como as diversas formas que ela se pode revestir, sem se mencionar como elas se relacionam entre si. Isto é feito neste capítulo recorrendo-se ao princípio da conservação da energia ou, o que é o mesmo quando aplicado a sistemas termodinâmicos, à Primeira da Lei da Termodinâmica (PLT). Esta lei é uma lei de conservação, em oposição à Lei Zero da Termodinâmica que é uma lei de equilíbrio.

O princípio da conservação da energia ou a Primeira da Lei da Termodinâmica é considerada a mais importante e fundamental lei da natureza que a ciência conhece. A sua validade foi sempre confirmada nas mais diversas situações. Este princípio é um facto acerca da natureza sem nenhuma exceção.

O princípio é introduzido nas secções seguintes onde também se mostra como pode ser aplicado a sistemas termodinâmicos.

5.2. PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

O princípio da conservação da energia diz que " a energia não pode ser criada nem destruída". Num dado processo, uma forma qualquer de energia pode ser transformada numa outra, mas para um sistema e vizinhança onde ocorreu essa transformação, o total mantém-se constante.

Esta lei é baseada na evidência experimental e não pode, portanto, ser demonstrada.

Não se conhecem exceções a esta lei, mesmo aquando da formulação da teoria da relatividade em que se mostrou que:

$$E = mc^2$$

em que neste caso c é a velocidade da luz.

Segundo esta teoria, a massa pode ser convertida em energia e vice-versa. Assim sendo, pode dizer-se que a massa é uma forma de energia e então o princípio da conservação da energia continua válido.

Para um sistema qualquer, pode então dizer-se que:

$$[\text{energia que entra}] - [\text{energia que sai}] = [\text{saldo} = \text{variação da energia do sistema}]$$

De forma análoga e reportando ao nosso quotidiano, tudo se passa de forma idêntica com as contas bancárias (se nada de errado ocorrer...) bastando substituir a energia por euros no balanço acima indicado:

$$[€ \text{ que entram}] - [€ \text{ que saem}] = [\text{saldo} = \text{variação de } €]$$

6.1. INTRODUÇÃO

Em capítulos anteriores mostrou-se como o princípio da conservação da massa e o princípio da conservação da energia poderiam ser utilizados para a análise de sistemas termodinâmicos. Estes princípios, porém, podem não ser só por si suficientes, sendo então necessário fazer-se recurso a uma lei adicional, a Segunda Lei da Termodinâmica.

Neste capítulo faz-se a apresentação formal da Segunda Lei da Termodinâmica bem como de alguns corolários dela decorrentes.

6.2. SENTIDO DE OCORRÊNCIA DE PROCESSOS ESPONTÂNEOS

Sabe-se da experiência diária que todos os processos físicos evoluem espontaneamente para um estado de equilíbrio quer interno quer externo. Assim, existe escoamento de líquido de uma região mais elevada para outra mais baixa, os gases expandem-se de regiões de alta pressão para os de baixas pressões, existe transferência de energia sob a forma de calor de corpos a altas temperaturas para os de baixa temperatura, há difusão de massa de zonas de altas concentrações para as de baixas concentrações, etc., ou seja, um dado processo somente pode ocorrer espontaneamente numa única direção.

A título de exemplo, analisa-se mais detalhadamente três situações conforme mostrado na Fig.6.1.

Na primeira situação, Fig.6.1. a), um sistema a uma temperatura T_i é posto em contacto com ar atmosférico que se encontra a uma temperatura inferior, T_0 . É natural que devido à diferença de temperatura entre ambos, haja transferência de energia sob a forma de calor do corpo para o meio ambiente até que aquele atinja a temperatura do ar. De acordo com o princípio da conservação da energia, o decréscimo da energia interna do corpo será igual ao acréscimo da energia da energia interna do ar. Este processo ocorre naturalmente. Porém, o processo inverso não ocorrerá espontaneamente, isto é, não haverá uma diminuição da energia interna do ar acompanhada de um acréscimo da temperatura do corpo de T_0 a T_i , apesar de à luz da Primeira Lei da Termodinâmica, por si só, tal seja possível (o sistema poderia ser, por exemplo, o café quente numa chávena deixada sobre uma mesa).

Na segunda situação, Fig.6.1. b), o ar encerrado no depósito, a uma pressão p_i superior à atmosférica, p_0 , escoar-se-á espontaneamente para o meio ambiente assim que a válvula seja aberta até que haja uma igualdade de pressões entre o interior e o exterior do depósito. Porém, sabe-se da experiência comum, que o processo inverso não ocorrerá espontaneamente. Isto é, o ar ambiente à pressão

As diversas formas de energia assinaladas na Fig.6.5 são:

Q_H – calor cedido pela fonte quente à água;

Q_L – calor rejeitado pelo vapor que condensa, à fonte fria;

W_{exp} – trabalho realizado pelo vapor durante a expansão na turbina, entre a pressão da caldeira e a pressão do condensador;

W_B – trabalho necessário para comprimir a água que condensou desde a pressão de condensação até à pressão da caldeira.

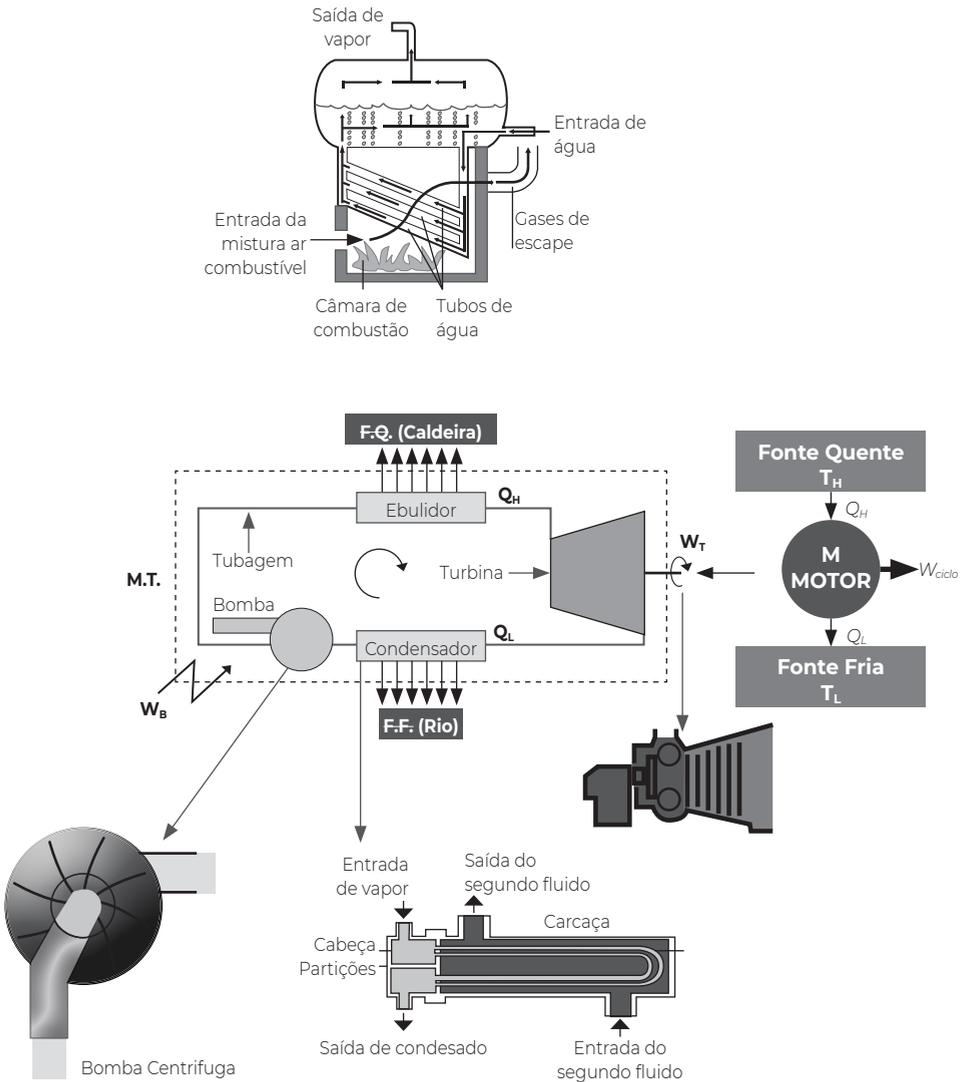


FIG. 6.5. Central térmica. Adaptado de [8].

7.1. INTRODUÇÃO

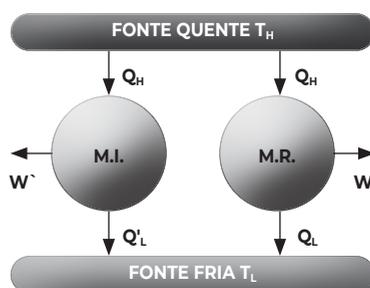
No capítulo anterior foi formalmente apresentada a Segunda Lei da Termodinâmica e analisaram-se alguns corolários dela decorrente. Neste capítulo desenvolve-se a desigualdade de Clausius que é a base para a dedução da propriedade entropia. Mostra-se como a Segunda Lei da Termodinâmica pode ser aplicada a processos cíclicos bem como a sistemas que evoluam segundo processos não cíclicos, mostrando-se como se podem fazer balanços entrópicos de sistemas.

7.2. DESIGUALDADE DE CLAUSIUS

Contrariamente ao que sucedia com a Primeira Lei da Termodinâmica, a Segunda, matematicamente falando, trata fundamentalmente de desigualdades (por exemplo, uma máquina irreversível tem um rendimento menor do que uma reversível a operar entre os mesmos reservatórios térmicos, etc.).

Outra desigualdade fundamental decorrente da Segunda Lei da Termodinâmica é a desigualdade de Clausius que, como se verá, permite definir uma nova propriedade termodinâmica, a entropia.

Para se demonstrar esta desigualdade, considere-se a Fig.7.1, que representa dois reservatórios térmicos caracterizados pelas suas temperaturas, respetivamente T_H e T_L e duas máquinas térmicas a operar entre ambos, sendo uma irreversível e a outra reversível. Considerando inicialmente esta última, ela recebe da fonte quente Q_H unidades de energia sob a forma de calor, rejeita Q_L unidades de energia para a fonte fria realizando uma quantidade de trabalho W_{rev} . Atendendo à definição termodinâmica de temperaturas, tem-se:



M.R. – motor reversível M.I. – motor irreversível

FIG. 7.1. Ilustração usada para a demonstração da desigualdade de Clausius.

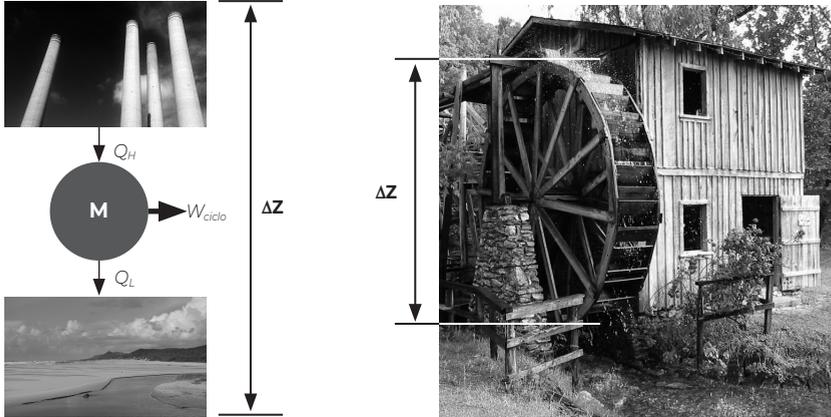
$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_L}{T_L}$$

Genericamente, para qualquer ciclo reversível:

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = 0 \quad (7.2.)$$

Assim, para a azenha ou barragem, a potência mecânica que se obtém é dada pela variação da energia potencial da água entre duas dadas cotas:

$$\dot{W} = [g(z_2 - z_1)] \dot{m}$$



que pode ser reescrita como:

$$\dot{W} = (p_2 - p) \dot{m} \quad (7.31)$$

onde, por simplicidade, p é a energia potencial ($p = gz$).

Relativamente à máquina térmica motora, a potência mecânica é:

$$\dot{W} = -\dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad (7.32)$$

Sendo a máquina térmica motora reversível, pela desigualdade de Clausius e atendendo à definição de entropia:

$$\frac{\dot{Q}_H}{T_H} = \frac{\dot{Q}_L}{T_L} = \Delta\dot{S}$$

Substituindo na equação 7.32 obtém-se:

$$\dot{W} = \Delta\dot{S} (T_L - T_H)$$

Designando \dot{S} por $\Delta\dot{S}$ obtém-se:

$$\dot{W} = \dot{S} (T_L - T_H) \quad (7.33)$$

Assim, também se pode exprimir a potência obtida no motor térmico como sendo proporcional ao desnível térmico entre as fontes quente T_H e fria T_L tal como acontecia na barragem, equação 7.31.

8.1. INTRODUÇÃO

No capítulo 6 viu-se como a partir de um reservatório de energia térmica se podia converter a sua energia sob a forma de calor em trabalho. Para tanto, e como se disse, tinha que recorrer-se a máquinas térmicas motoras. Pela definição da Segunda Lei da Termodinâmica, mesmo estas não permitiam a conversão total da energia térmica em trabalho, pelo que parte dela teria que ser rejeitada a uma fonte fria sem qualquer proveito (poluição). Nas máquinas motoras, uma vez conhecido o seu rendimento e a quantidade de energia sob a forma de calor disponível na fonte quente é possível saber qual a quantidade de energia que efetivamente podia ser convertida em energia trabalho. No entanto nada se mencionou acerca de qual seria o máximo trabalho possível obter com a energia disponível na mesma fonte quente. Nas máquinas térmicas inversas passa-se o mesmo: por exemplo, numa máquina frigorífica, sabendo-se a quantidade de calor a retirar da fonte fria e o COP sabe-se qual o trabalho necessário fornecer à máquina (se fosse uma bomba de calor passar-se-ia o mesmo). No entanto, atendendo aos reservatórios de energia térmica em jogo, não se mencionou acerca do mínimo trabalho possível obter em máquinas deste tipo.

Toda esta análise acerca do trabalho nas máquinas térmicas teve por base a Primeira Lei da Termodinâmica e implicitamente os enunciados da Segunda Lei. Poder-se-ia também referir outros exemplos, tal como o máximo trabalho possível obter de uma substância em escoamento devido à sua energia total e compará-lo com o trabalho efetivamente realizado, por exemplo numa turbina.

Assim, é importante saber qual o máximo trabalho que se pode obter de um dado reservatório de energia térmica ou de um escoamento de uma substância de forma a poder comparar-se com o trabalho efetivamente realizado de modo a poder avaliar se se está a fazer o melhor aproveitamento possível dos recursos energéticos disponíveis.

Esta análise é feita recorrendo conjuntamente à Primeira e à Segunda Lei da Termodinâmica. Tal é realizado com o auxílio de um conceito novo, o da exergia.

8.2. CARACTERÍSTICAS DAS FORMAS ORGANIZADAS E DESORGANIZADAS DE ENERGIA

Antes de se introduzir o conceito de exergia, recapitula-se de seguida as diferentes formas que a energia se pode revestir associadas às suas características e qualidade. Esta pode ser vista, como anteriormente mencionado, à sua capacidade de provocar mudanças. Por exemplo, e como mais adiante se verá, a qualidade de 100 kJ de energia elétrica é maior que a mesma quantidade de energia se ela se encontrar num reservatório de energia térmica a 1000 K e ainda maior se ela se encontrar a 500 K tomando como referência uma temperatura ambiente de, por

9.1. INTRODUÇÃO

Foi estudado em capítulos anteriores, que as propriedades termodinâmicas que podiam ser medidas eram a pressão, a temperatura, o volume e a massa. A partir destas, era possível obter as diversas equações de estado explanadas no capítulo 4. É de mencionar que, de forma indireta, é também possível obter valores experimentais de mais algumas propriedades. É o caso dos calores específicos através de calorímetros.

As propriedades termodinâmicas deduzíveis, tais como a energia interna, entalpia e entropia entre outras que serão introduzidas mais tarde neste capítulo, podem também ser calculadas através das propriedades mensuráveis mencionadas. O procedimento a seguir passa pela integração dos diferenciais daquelas propriedades fazendo simultaneamente recurso às equações de estado. Para tanto é necessário desenvolver o que se designa por relações termodinâmicas. Entre outras, neste capítulo, abordar-se-ão aquelas que permitem calcular as propriedades deduzíveis a partir de dados experimentais.

A importância do estudo das relações termodinâmicas, reside também no facto de que para muitas substâncias de trabalho, por exemplo os novos fluidos frigorigêneos, existir somente um escasso conjunto de dados experimentais, havendo assim necessidade de se fazer recurso aos seus valores para se poderem obter os valores das restantes propriedades termodinâmicas. Tal é feito recorrendo a relações termodinâmicas.

As variações elementares das propriedades termodinâmicas são descritas por diferenciais exatos, pelo que na secção seguinte faz-se uma revisão das ferramentas matemáticas básicas relativas a diferenciais exatos para se poder posteriormente estabelecer as relações termodinâmicas.

9.2. DIFERENCIAIS EXATOS

Pelo postulado de estado viu-se que duas propriedades termodinâmicas independentes x e y (também designadas por funções de estado ou variáveis de estado) eram suficientes para se definir um estado termodinâmico de uma substância pura simples e compressível. As restantes propriedades, por exemplo z (também função de estado e não calor nem trabalho), ficavam deste modo univocamente definidas: $z = z(x, y)$. Tal significa que, se houver alteração do valor das propriedades independentes x e y para novos valores x' e y' , a propriedade z tomará um novo valor z' independentemente do tipo de processo que tenha ocorrido. A função z pode então ser representada num diagrama tridimensional, Fig. 9.1.

Esta relação tem de verificar a equação 9.3 para que o calor pudesse ser considerado como um diferencial exato. Porém:

$$\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial T \partial V}\right)_V + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

Como não se verifica a equação 9.3, o calor não é uma função de estado, não sendo assim um diferencial exato, mesmo que o calor tenha sido trocado de forma reversível.

Porém, quando $Mdx + Ndy$ não for um diferencial exato, como no caso precedente, pode ser transformado num exato multiplicando-o por um fator de integração como mostrado de seguida. Deste modo, e novamente fazendo-se recurso à equação da Primeira Lei da Termodinâmica, esta pode ser multiplicada pelo fator de integração “ $1/T$ ”, obtendo-se:

$$\frac{\delta Q_{rev}}{T} = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV$$

Como se viu no capítulo 7, equação 7.6, o membro da esquerda é por definição a variação elementar da entropia, uma propriedade termodinâmica. Então esta última equação pode ser escrita como:

$$\frac{\delta Q_{rev}}{T} = dS = \frac{dU}{T} + \frac{p}{T} dV$$

O facto de esta equação já ser um diferencial exato é uma consequência direta da Segunda Lei da Termodinâmica, não decorrendo de nenhuma dedução matemática.

Substituindo nesta equação a 9.4:

$$dS = \left[\frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + \frac{p}{T} \right] dV + \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT$$

sendo esta da forma $dz = Mdx + Ndy$ e, portanto, sendo um diferencial exato tem que satisfazer a equação 9.3:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_V &= \frac{1}{T} \frac{\partial^2 U}{\partial T \partial V} - \frac{1}{T^2} \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + \frac{1}{T} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - \frac{p}{T^2} \\ &\quad \left(\frac{\partial N}{\partial V}\right)_T + \frac{1}{T} \frac{\partial^2 U}{\partial T \partial V} \end{aligned}$$

Igualando as duas derivadas parciais e rearranjando tem-se:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - p$$

que é uma relação que todos os sistemas termodinâmicos compostos por uma substância pura numa só fase satisfazem. Esta relação pode ser facilmente verificada se a substância for um gás perfeito. Sendo o membro da esquerda desta última equação a derivada parcial da energia interna relativamente ao volume

10.1. INTRODUÇÃO

Uma das áreas importantes da Termodinâmica passa pelo estudo de máquinas térmicas. Estas destinam-se a converter parcialmente calor em trabalho (de acordo com o enunciado de Kelvin Planck da Segunda Lei da Termodinâmica) e são designadas por Máquinas Térmicas Motoras, Fig. 10.1, ou retirar calor de um reservatório de energia térmica a uma dada temperatura e transferi-lo para um outro a mais alta temperatura (de acordo com o enunciado de Clausius da Segunda Lei da Termodinâmica) sendo então designadas por Máquinas Frigoríficas ou Bombas de Calor, Fig. 10.2.

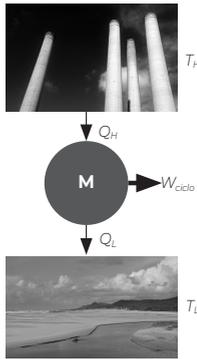


FIG. 10.1. Máquina Térmica Motora.

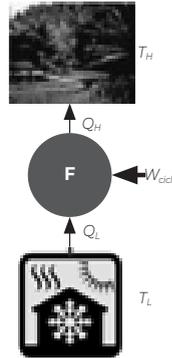


FIG. 10.2. Máquina Frigorífica.

As máquinas térmicas motoras podem ser classificadas de acordo como o calor é fornecido ao fluido de trabalho. Se aquele for transferido para o fluido de trabalho a partir de uma fonte externa (por exemplo caldeira, etc.), designa-se por máquina motora de combustão externa. Se o calor for obtido por um processo de combustão com o próprio fluido de trabalho da máquina, esta designa-se então de combustão interna. De um modo geral, na primeira situação, está-se perante máquinas motoras a vapor (o fluido de trabalho pode mudar de fase dentro da máquina) à exceção do motor de Stirling em que o fluido de trabalho é um gás, e no segundo caso perante máquinas motoras a gás (o fluido de trabalho encontra-se sempre na fase gasosa), Fig.10.3.

	PRODUÇÃO DE ENERGIA		REFRIGERAÇÃO
Sistemas	Máquinas térmicas Motoras		Frigoríficos, Bombas de Calor, Ar Condicionado.
	Combustão externa	Combustão Interna	
Ciclos	Carnot Rankine Stirling	J. Brayton Otto Diesel Misto etc.	Compressão de vapor Absorção J. Brayton Inverso etc.
	Ciclos Fechados	Ciclos Abertos	

FIG. 10.3. Classificação das Máquinas Térmicas.

11.1. INTRODUÇÃO

Nos vários sistemas mecânicos analisados, o propósito último era a produção de trabalho (eletricidade). Para tal e como viu, fornece-se calor a um fluido de trabalho numa fonte quente, que o converte parcialmente em trabalho numa máquina térmica, sendo a restante energia rejeitada a uma fonte fria (rios, lagos etc.) – energia de poluição (como se viu, este é o preço que tem de se pagar de forma poder produzir-se trabalho). A acrescer a isto, se o consumidor de eletricidade estiver longe do local da sua produção, existem ainda perdas não desprezáveis na transmissão da eletricidade devidas ao efeito de Joule na própria rede de transmissão e distribuição elétrica, chegando deste modo ao consumidor, e em termos médios, somente cerca de 43 % do total da energia despendida na central sob a forma de combustível, Fig. 11.1.

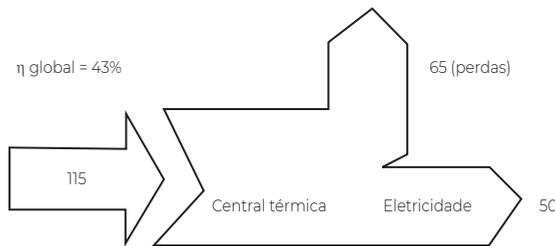


FIG. 11.1. Sistema convencional de produção de eletricidade.

Porém, em vários processos industriais, para além das necessidades em trabalho – eletricidade – necessita-se também de calor para processos de produção, designado por calor de processo, por exemplo na indústria química, transformação de madeira em papel, refinação do petróleo, metalúrgica, têxtil, processamento de alimentos, edifícios, etc. Normalmente este é conseguido através de vapor, tipicamente a pressões entre 5 e 7 atm e a temperaturas entre os 150 a 200 °C. Uma forma de se obter esta energia-calor seria, queimar um dado combustível numa caldeira que vaporizaria o H_2O com destino ao processo onde este fosse necessário. Aí condensaria e regressaria de novo à caldeira, Fig. 11.2. (desprezando as perdas de carga nas tubagens bem como o trabalho da bomba).

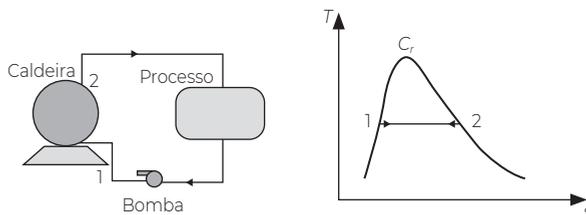


FIG. 11.2. Produção de calor para um processo.

12.1. INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores analisaram-se sistemas em que o fluido de trabalho era uma única substância pura simples e compressível. Mesmo quando se trataram sistemas em que o fluido de trabalho era tido como gás, por exemplo o ar, este foi considerado como uma única substância pura. Como mais adiante se verá, o ar é uma mistura de substâncias puras.

Falou-se aqui do ar, mas em inúmeros processos industriais o fluido de trabalho é constituído por uma mistura de gases diversos, pelo que existe a necessidade de se poder determinar as propriedades destas misturas. Porém, se fosse feita uma abordagem idêntica à existente para o ar puro, em que existem tabelas termodinâmicas onde constam as suas diversas propriedades, verifica-se que o número de tabelas para as mais diversas possibilidades de misturas tenderia facilmente para o infinito, o que seria impraticável.

Deste modo, há necessidade de se poder calcular as propriedades termodinâmicas de uma qualquer mistura gasosa, a partir de conceitos básicos termodinâmicos e de tabelas já existentes para cada gás de per si, eliminando assim a elaboração de tabelas para as diversas misturas possíveis.

Neste capítulo analisa-se a teoria das misturas gasosas, considerando-as que têm comportamento de gás perfeito e mostra-se como as suas propriedades termodinâmicas podem ser facilmente calculadas a partir de conceitos básicos.

12.2. COMPOSIÇÃO DE UMA MISTURA GASOSA

Considere-se para já, a mistura de gases designada por ar puro, ou seco porque não se considerou a presença do vapor de água, Tabela 4.1., onde está representada a sua composição bem como a percentagem, em volume, de cada um dos constituintes de uma amostra.

TABELA 12.1.

Composição do ar puro (% em volume).

Gás	% Volúmica
Azoto	78,084
Oxigénio	20,948
Argon	0,934
Dióxido de carbono	0,031
Neon, Hélio, outros	0,003
TOTAL	100,000

Como decorre, o somatório das percentagens volúmicas de cada constituinte “i” do ar puro tem que ser igual a 100%. Sabe-se também que este ar puro tem as seguintes propriedades:

$$R = 0,287 \text{ kJ}(\text{kgK})^{-1}; c_p = 1,005 \text{ kJ}(\text{kgK})^{-1}; c_v = 0,718 \text{ kJ}(\text{kgK})^{-1}$$

13.1. INTRODUÇÃO

A psicrometria é o estudo das propriedades de misturas e ar seco e de vapor de água, onde eventualmente possa ocorrer mudança de fase.

O estudo destas misturas é fundamental para o cálculo e dimensionamento de uma grande variedade de instalações, nomeadamente as frigoríficas, as de ar condicionado, as de secagem e as das torres de arrefecimento entre outras. Tal tem a ver com o facto de que, comum a todas elas, o ar atmosférico, também designado por ar húmido, desempenhar um papel fundamental.

Analisa-se nas secções seguintes como se podem determinar as propriedades deste tipo de misturas.

13.2. AR HÚMIDO

A análise do ar húmido, constituído por uma mistura de ar seco (considerado puro) e de vapor de água nas aplicações mais correntes de Engenharia é feita considerando-se as seguintes hipóteses:

1. a fase sólida ou líquida não contém gases dissolvidos;
2. a fase gasosa pode ser analisada como uma mistura de gases perfeitos;
3. existindo equilíbrio entre a fase gasosa e a líquida, a pressão parcial do vapor será igual à pressão de saturação correspondente à temperatura da mistura ou, dito de outro modo, o equilíbrio entre a fase gasosa e a condensada não é influenciada pelos outros componentes.

Das três hipóteses mencionadas é oportuno que se demonstre a segunda. Enquanto o ar seco (ausência de vapor de água), cuja composição padrão se mostra na Tabela 13.1., tem um comportamento de gás perfeito, a situação relativa ao vapor de água não é tão clara.

TABELA 13.1.

Composição do ar padrão ao nível do mar.

Gás	% Volúmica
Azoto	78,084
Oxigénio	20,948
Argon	0,934
Dióxido de carbono	0,031
Neon, Hélio, outros	0,003

A massa molecular do ar seco conforme indicada é: $M = 28,96 \text{ kgkmol}^{-1}$.

14.1. INTRODUÇÃO

Em todos os processos anteriormente analisados o (s) fluido (s) de trabalho não sofriam qualquer alteração da composição química ao longo dos mesmos, sendo então considerados como sistemas não reativos: as energias em jogo relacionavam-se com energia sensível e com a energia latente – mudanças de fase. Mesmo quando se analisou a teoria das misturas gasosas, esteve sempre subjacente que não existia nenhuma reação química entre os diversos elementos constituintes da mesma.

No entanto muitos processos envolvem reações químicas das substâncias em jogo em que a composição química é alterada: sistemas reativos. Nestes, para além das energias mencionadas, tem também que se ter em conta com a energia química, isto é, a energia associada à ligação dos átomos entre si nas moléculas, que são rompidas, dando origem a novas moléculas.

Estes processos encontram-se presentes nas mais diversas situações, designadamente no corpo humano, na formação de ferrugem, etc.

Como se viu aquando das máquinas térmicas motoras, estas necessitam para o seu funcionamento, para além das fontes frias naturais, de fontes quentes, a temperaturas elevadas. Estas, no entanto, não existem naturalmente no nosso planeta, à exceção da energia geotérmica, pelo que deverão ser criadas artificialmente. O processo mais comum de as obter é conseguido através de reações químicas, tipicamente através da combustão de hidrocarbonetos onde se libertam grandes quantidades de energia a elevadas temperaturas.

Nas secções seguintes são analisados os sistemas reativos, em particular o da combustão.

14.2. COMBUSTÃO

Nesta secção apresentam-se alguns conceitos fundamentais relativamente à combustão. Antes de esta ser definida, é, no entanto, necessário ter-se presente dois conceitos a saber: combustível e comburente.

Define-se combustível como qualquer material que possa ser queimado para libertação de energia. Os combustíveis mais usuais são os hidrocarbonetos, cuja fórmula química geral é:



Os hidrocarbonetos existem na fase sólida (p. ex. o carvão), na fase líquida (p. ex. a gasolina) ou na fase gasosa (p. ex. o gás natural). Os combustíveis líquidos são obtidos por destilação do crude: os hidrocarbonetos mais voláteis vaporizam primeiro (gasolina), seguindo-se o querosene, diesel e o fuel óleo.

TERMODINÂMICA PARA ENGENHARIA

CLITO AFONSO

2.^a Edição

REVISTA E AUMENTADA

Sobre a obra

A Termodinâmica é, de entre as grandes áreas científicas e técnicas, uma área-mãe por excelência visto que suporta a problemática da conversão energética calor vs. trabalho ou energia térmica-energia mecânica e constitui o lastro das ciências da vida.

No presente contexto de um manual de Termodinâmica dirigido especialmente aos alunos de Engenharia Mecânica, valorizam-se os princípios básicos e estrutura-se a conceptualização e a estratégia da utilização da Termodinâmica em torno da noção de sistema e das suas interações com a referência que é o ambiente.

Certamente que a Termodinâmica, nesse contexto, elabora nas máquinas térmicas como ciclos específicos que respondem às necessidades do homem na sua senda histórica, desde a manipulação do fogo e do conforto habitacional, passando pela máquina a vapor (séc. XVIII) e a máquina frigorífica e os motores térmicos, verdadeiros suportes do desenvolvimento da segunda Era Industrial.

Especialmente orientado para a formação de alunos de engenharia mecânica, serve de alicerce a muitas áreas das ciências térmicas, tais como transferência de calor, mecânica dos fluidos, máquinas térmicas, química, combustão e ciência dos materiais, entre outras. Existem numerosos textos sobre esta temática, o que poderá tornar difícil por parte dos leitores a escolha. Pretende-se com este livro que todos os conceitos relevantes da Termodinâmica sejam englobados de forma sistemática num único texto coerente que possa servir para os cursos de engenharia e de física, quer do segundo, quer do terceiro ciclo.

Sobre o autor

Clito Afonso

Professor Associado com Agregação no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), tendo iniciado a atividade como Assistente Eventual em 1978, ano da sua Licenciatura. Concluiu o Mestrado em Engenharia Térmica em 1986 e o Doutoramento em Engenharia Mecânica em 1989, na mesma escola. Prestou provas para a Agregação em Engenharia Mecânica no ano de 2004. Fez toda a carreira docente, de investigação e consultoria industrial no DEMec, IDMEC – pólo FEUP – e INEGI. É regente de várias unidades curriculares na área da termodinâmica aplicada, ventilação e sistemas frigoríficos do primeiro, segundo e terceiro ciclos. Foi, e é, responsável/investigador de vários projetos inovadores de I&D de âmbito Nacional (FCT) e internacional (EU), incidindo nas áreas científicas citadas, com particular destaque nos sistemas frigoríficos. Faz parte do Conselho Consultivo do Organismo de Certificação de Pessoas (OCP) do Centro Tecnológico para a Indústria Térmica, Energia e Ambiente (CENTERM), é membro do quadro de diretores da World Society of Sustainable Energy Technologies (WSSET) e pertence à Sociedade Espanhola de Ciências e Técnicas do Frio (SECYTF).

Apoios



Também disponível em formato e-book



www.engebook.pt

engebook