

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA TERMODINÂMICA

UMA ABORDAGEM
HISTÓRICA E CONCEITUAL



Conselho Editorial da LF Editorial

Amílcar Pinto Martins - Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell - Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva - Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes - UNED, Madri

Iran Abreu Mendes - Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford - Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo - Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa - Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras - Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia - Universidade de Lisboa

Teresa Vergani - Universidade Aberta de Portugal

JEFFERSON A. R. DA CUNHA
WELLINGTON P. DE QUEIRÓS

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA TERMODINÂMICA

UMA ABORDAGEM
HISTÓRICA E CONCEITUAL



2025

Copyright © 2025 os autores
1ª Edição

Direção editorial: Victor Pereira Marinho e José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Cunha, Jefferson A. R. da
Introdução ao estudo da termodinâmica: uma abordagem histórica e conceitual / Jefferson A. R. da Cunha, Wellington P. de Queirós. – 1. ed. – São Paulo: LF Editorial, 2025.

Bibliografia
ISBN 978-65-5563-552-2

1. Física 2. Termodinâmica - Estudo e ensino I. Queirós, Wellington P. de II. Título.

25-251651

CDD-536.7

Índices para catálogo sistemático:
1. Termodinâmica: Física 536.7

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida
sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.

Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107
da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



EDITORIAL

LF Editorial

www.livrariadafisica.com.br

www.lfeditorial.com.br

(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP

(11) 3936-3413 | Editora

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Apresentação | 2 |
| Os Autores | 3 |
| 1 <i>Temperatura e Equilíbrio Térmico</i> | 4 |
| 1.1 Termodinâmica e os sistemas termodinâmicos | 4 |
| 1.2 Temperatura, equilíbrio térmico e a lei zero da termodinâmica | 5 |
| 1.2.1 Temperatura | 5 |
| 1.2.2 Como medir a temperatura - os primeiros termômetros | 6 |
| 1.2.3 Como medir temperatura - termômetros e termopares | 9 |
| 1.2.4 Unidade de medida de temperatura | 10 |
| 1.2.5 Equilíbrio térmico e a lei zero da termodinâmica | 10 |
| 1.3 Escalas de temperatura e o termômetro de gás a volume constante | 11 |
| 1.3.1 Escala Fahrenheit de temperatura | 13 |
| 1.3.2 Escala Celsius de temperatura | 14 |
| 1.3.3 O Termômetro de gás a volume constante e a escala Kelvin de temperatura | 15 |
| 1.4 Dilatação térmica linear, superficial e volumétrica | 18 |
| 1.5 Atividades conceituais | 21 |
| 1.6 Exercícios e problemas | 21 |
| 2 <i>Calor e a Primeira lei da Termodinâmica</i> | 25 |
| 2.1 Calor como forma de energia | 25 |
| 2.1.1 Histórico sobre a natureza do calor | 26 |
| 2.2 Energia mecânica e calor | 30 |
| 2.2.1 Caloria | 31 |
| 2.2.2 Joule | 31 |
| 2.2.3 O equivalente mecânico do calor | 33 |
| 2.3 Capacidade térmica, calor específico e calor de transformação | 35 |
| 2.3.1 Capacidade térmica | 35 |
| 2.3.2 Calor específico | 35 |
| 2.3.3 Calor de transformação | 36 |
| 2.4 Transferência de calor: condução, convecção e irradiação | 39 |
| 2.4.1 Transferência de energia na forma calor por condução | 39 |
| 2.4.2 Transferência de energia na forma de calor por convecção | 40 |
| 2.4.3 Transferência de energia na forma de calor por irradiação | 40 |
| 2.5 Trabalho de um sistema termodinâmico | 42 |
| 2.5.1 Processos termodinâmicos | 42 |
| 2.5.2 Cálculo do trabalho de um sistema termodinâmico | 44 |
| 2.6 Um breve histórico da primeira lei da termodinâmica | 45 |
| 2.7 Energia interna | 48 |
| 2.8 Atividades conceituais | 50 |
| 2.9 Exercícios e problemas | 51 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | <i>O Modelo do Gás Ideal</i> | 55 |
| 3.1 | Equação de estado de um gás ideal | 55 |
| 3.1.1 | O número de Avogadro | 56 |
| 3.1.2 | Lei de Boyle-Mariotte (processo isotérmico) | 57 |
| 3.1.3 | Lei de Gay-Lussac (processo isocórico) | 58 |
| 3.1.4 | Lei de Charles (processo isobárico) | 58 |
| 3.1.5 | Lei dos gases ideais | 59 |
| 3.2 | Trabalho de um gás ideal | 61 |
| 3.3 | Gás ideal e as equações barométricas (opcional) | 61 |
| 3.4 | Modelo cinético-molecular do gás ideal | 64 |
| 3.5 | Calor específico molar de um gás ideal | 67 |
| 3.6 | Equação de um processo adiabático | 70 |
| 3.7 | Determinação do coeficiente de expansão adiabática no experimento de Eduard Rüchardt (opcional) | 71 |
| 3.8 | Graus de liberdade e o princípio da equipartição da energia | 72 |
| 3.9 | Graus de liberdade e o coeficiente de expansão adiabática | 75 |
| 3.10 | A função de distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann | 75 |
| 3.11 | Atividades conceituais | 78 |
| 3.12 | Exercícios e problemas | 79 |
| 4 | <i>Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica</i> | 84 |
| 4.1 | Introdução | 85 |
| 4.2 | Processos reversíveis e irreversíveis | 85 |
| 4.3 | Histórico da busca do homem por máquinas térmicas para a realização de trabalho | 87 |
| 4.4 | Máquinas e ciclos termodinâmicos | 89 |
| 4.4.1 | Ciclo Otto | 90 |
| 4.4.2 | Ciclo Diesel | 92 |
| 4.4.3 | Ciclo Stirling | 94 |
| 4.4.4 | Ciclo Brayton - Joule (opcional) | 96 |
| 4.5 | Refrigeradores | 97 |
| 4.6 | Segunda lei da termodinâmica | 99 |
| 4.7 | O ciclo de Carnot | 101 |
| 4.8 | A entropia de Clausius | 104 |
| 4.9 | Entropia como uma função de estado | 106 |
| 4.10 | Processos cíclicos irreversíveis e a desigualdade de Clausius | 108 |
| 4.11 | Atividades conceituais | 111 |
| 4.12 | Exercícios e problemas | 112 |
| 5 | <i>Análise Estatística do Conceito de Entropia</i> | 117 |
| 5.1 | Cálculo da Entropia na expansão livre do gás ideal | 118 |
| 5.2 | O modelo de distribuição de Boltzmann | 119 |
| 5.3 | Microestados, macroestados e a multiplicidade de estados | 121 |
| 5.4 | Microestados, macroestados e níveis de energia | 123 |
| 5.5 | Entropia estatística na expansão livre | 126 |
| 5.6 | Evolução da entropia mediante variação do volume e energia do sistema | 129 |
| 5.7 | Multiplicidade de estados e calor | 130 |
| 5.8 | Entropia e probabilidade | 131 |
| 5.9 | Distribuição de Boltzmann e a função de partição | 133 |
| 5.10 | Atividades conceituais | 134 |
| 5.11 | Exercícios e problemas | 135 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Representação do Termoscópio de Galileu. | 6 |
| 1.2 | Termômetro indicando as leituras de temperatura na escala Fahrenheit e Celsius. | 8 |
| 1.3 | Dois metais diferentes A e B com junções mantidas à temperaturas T_1 e T_2 | 9 |
| 1.4 | Relação entre temperatura e a propriedade termométrica. | 12 |
| 1.5 | Termômetro de gás a volume constante. | 15 |
| 1.6 | Extrapolação de $p \times T$, para $p \rightarrow 0$. Independente do gás todos os termômetros indicarão a menor temperatura possível $-273,15^\circ\text{C}$ | 16 |
| | | |
| 2.1 | Versão reduzida do aparato completo do experimento de agitação da água através das pás ([11], 1850, p. 65). O calorímetro utilizado por Joule tinha diâmetro de 0,84 m e as massas eram soltas de uma altura de 0,34 m. | 33 |
| 2.2 | Esquema ilustrativo do procedimento de Joule. Desenho feito para verificar as posições do termômetro, pás e altura h. | 34 |
| 2.3 | Condução do calor entre dois corpos. | 39 |
| 2.4 | Sistema termodinâmico. | 42 |
| 2.5 | Processos termodinâmicos. | 43 |
| 2.6 | Trabalho e calor na mudança de estado. | 48 |
| | | |
| 3.1 | Gás ideal monoatômico em uma caixa. N moléculas distribuídas em n mols. | 56 |
| 3.2 | Diagrama $p \times V$ de um gás ideal. | 59 |
| 3.3 | Massa de ar submetida à força gravitacional e pressão atmosférica. | 61 |
| 3.4 | Correção na expressão barométrica, levando em conta a velocidade de rotação da Terra e a variação da gravidade com a altura. | 64 |
| 3.5 | Molécula em uma caixa. | 64 |
| 3.6 | Processos isotérmicos e adiabáticos em um gás ideal. | 70 |
| 3.7 | Experimento de Rüchardt para a determinação do fator γ | 71 |
| 3.8 | Molécula (a) diatômica e (b) monoatômica. | 73 |
| 3.9 | Função de distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann para três temperaturas, 100, 300 e 600 K. O valor adotado para a massa foi o Nitrogênio, $m = 4.65 \times 10^{-26}$ kg | 76 |
| | | |
| 4.1 | Gás dentro de um recipiente em que pode receber ou ceder calor Q. Também podemos mudar o volume do gás colocando ou retirando grãos de areia. | 86 |
| 4.2 | Desenho esquemático da Eolípila de Heron. | 87 |
| 4.3 | Máquina térmica de Thomas Savery usada para bombear águas das minas alagadas. | 88 |
| 4.4 | Máquina térmica de Thomas Newcomen. | 88 |
| 4.5 | Máquina térmica de James Watt. | 89 |
| 4.6 | Fluxo de calor e trabalho em uma máquina térmica. | 90 |
| 4.7 | Ciclo Otto. | 91 |
| 4.8 | Ciclo Diesel. | 93 |
| 4.9 | Ciclo teórico de um motor Stirling. | 94 |
| 4.10 | Ciclo Brayton - Joule. | 96 |
| 4.11 | Procedimento experimental do funcionamento de um refrigerador. | 97 |
| 4.12 | Diagrama de fluxo de calor e trabalho no funcionamento de um refrigerador. | 98 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.13 | Funcionamento de um refrigerador. | 99 |
| 4.14 | Diagrama $p \times V$ do Ciclo de Carnot. | 102 |
| 4.15 | Diagrama de fluxo de calor. | 104 |
| 4.16 | Processo reversível de um gás ideal. | 106 |
| 4.17 | (a) Máquina reversível. (b) Máquina irreversíveis. | 108 |
| 4.18 | Ciclo irreversível. | 108 |
| 4.19 | Ciclo irreversível composto por um caminho reversível e um caminho irreversível. | 109 |
| | | |
| 5.1 | Expansão livre de um gás ideal. | 118 |
| 5.2 | Entropia na expansão livre de um gás ideal. | 118 |
| 5.3 | Contagem do número de microestados e macroestados jogando quatro moedas. | 122 |
| 5.4 | Distribuição de partículas em níveis de energia seguindo a distribuição de Boltzmann. | 123 |
| 5.5 | Distribuição de oito partículas em cinco níveis de energia | 123 |
| 5.6 | Representação das multiplicidades de microestados, W em A , B e C , para um macroestado de energia. Para todos os macroestados $N = 3$ e $E = 3$ | 124 |
| 5.7 | Elevação da multiplicidade de um estado acrescentando uma unidade energética. | 125 |
| 5.8 | Multiplicidade de estados na termalização de duas barras. | 126 |
| 5.9 | Variação da multiplicidade W na expansão livre do gás ideal. | 126 |
| 5.10 | Multiplicidade de estados na expansão livre de um gás ideal. | 127 |
| 5.11 | Entropia e multiplicidade de estados na expansão livre de um gás ideal. | 127 |
| 5.12 | Multiplicidade em função do número de partículas. | 128 |
| 5.13 | Evolução da distribuição de partículas em duas caixas. | 128 |
| 5.14 | Termalização de dois sistemas de dois níveis. | 132 |
| 5.15 | Entropia do sistema $A + B$ na termalização em função da energia E_B | 133 |

Apresentação

Este livro foi escrito com o objetivo de ser uma primeira leitura para estudantes universitários, nos semestres iniciais dos cursos de física, química, engenharia e áreas afins, sobre termodinâmica e fenômenos térmicos. Este texto se diferencia dos demais livros da área por introduzir e trabalhar os temas e conceitos utilizando uma abordagem histórica, contextualizando os fatos de uma época que foram importantes para o estabelecimento dos conceitos e teorias apresentados nos livros didáticos.

A estratégia da descrição de contexto social e histórico é intensamente utilizada nesta leitura, pois acreditamos que essa metodologia é fundamental para a compreensão dos fenômenos térmicos. O estudante é levado a analisar, em uma retrospectiva histórica, os personagens envolvidos nessa construção, bem como os desafios conceituais e tecnológicos que foram discutidos, aprofundados e superados. A escolha dessa abordagem surge da experiência dos autores ainda estudantes nas disciplinas básicas do curso de física, pois, ao estudar os textos tradicionais, sempre se deparavam com questionamentos que somente poderiam ser respondidos recorrendo a livros ou artigos de história da ciência.

Em nossa experiência como professores de Física, percebemos que os livros tradicionais raramente apresentam de forma adequada questionamentos sobre a origem e o desenvolvimento de conceitos como temperatura, calor, energia interna, primeira e segunda leis da termodinâmica, entropia, entre outros. A abordagem, muitas vezes limitada a breves definições ou contextualizações superficiais, não favorece um aprendizado significativo.

Observamos também que certos conceitos e teorias deveriam ser apresentados considerando os contextos social, histórico e epistemológico em que foram desenvolvidos, para que os estudantes compreendam de fato o que estão estudando. Acreditamos que essa abordagem pode auxiliar futuros professores de Física a enriquecer suas aulas e explorar temas pouco abordados nos livros didáticos do ensino médio. Aspectos da filosofia da ciência também estão presentes neste texto, pois tratamos da construção e superação de modelos. Esses processos de ruptura e consolidação de novos paradigmas são fundamentais na formação docente em Física.

*Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha
Wellington Pereira de Queirós*

Os Autores

Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha

Graduou-se em Física pela Universidade Federal de Goiás (UFG), onde concluiu o bacharelado e a licenciatura. Posteriormente, obteve o título de mestre em Física pela mesma instituição. Em seguida, realizou o doutorado em Física pela Universidade de Brasília (UnB). Atualmente, é professor no Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (UFG), onde desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão. Sua produção científica é marcada por estudos sobre auto-organização e formação de padrões em sistemas biológicos, além de pesquisas sobre sistemas dinâmicos e equações de dinâmica populacional. Além de suas pesquisas teóricas, tem forte atuação na pesquisa em Ensino de Ciências, com ênfase nas seguintes áreas: História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física; Formação, Práticas e Desenvolvimento Profissional Docente no Ensino de Ciências e Tecnologias da Informação e Comunicação no Ensino de Física.

Wellington Pereira de Queirós

Nasceu em Formosa no Estado de Goiás em 1978. É Doutor em Educação para Ciências (Área de concentração: Ensino de Ciências e Matemática) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP-Bauru) com estágio sanduíche no programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) mestre, bacharel e licenciado em Física pela Universidade Federal de Goiás (UFG), licenciado em Matemática e Pedagogia. Atualmente é professor na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e colaborador na Universidade Federal de Goiás (UFG). Suas principais linhas de pesquisa são: História, Filosofia e Sociologia da Ciência na Educação em Ciências e Tecnologia; Relações Ciência-Tecnologia-Sociedade e Ambiente (CTSA) na Educação em Ciências e Tecnologia; Formação de Professores de Ciências, Física e Matemática, Ensino-Aprendizagem Crítico e Estudos Decoloniais.

Capítulo 1

Temperatura e Equilíbrio Térmico

Objetivos

Neste capítulo discutiremos o conceito de temperatura, o processo de termalização entre dois corpos e o fenômeno da dilatação térmica dos materiais. Para que o aprendizado nesta unidade seja alcançado, destacamos os seguintes objetivos que devem nortear a leitura dos estudantes ao longo do texto:

- Entender, por meio da História da Ciência, como as escalas de temperatura e os procedimentos de medida de temperatura foram construídos e se estabeleceram na sociedade;
- Compreender os objetivos da termodinâmica, como definir um sistema termodinâmico e sua vizinhança, estado termodinâmico e mudança de estado e equação de estado;
- Analisar como surge o conceito de temperatura de um sistema e equilíbrio térmico;
- Verificar como as diversas escalas de temperatura que conhecemos são definidas;
- Investigar por que as dimensões de um corpo mudam quando sua temperatura varia.

1.1 Termodinâmica e os sistemas termodinâmicos

A termodinâmica é a parte da Física que se dedica ao estudo dos fenômenos térmicos em uma abordagem macroscópica. Um sistema termodinâmico pode ser qualquer porção de matéria que ocupa um certo volume no espaço, e o espaço que circunda nossa porção material é tido como vizinhança do sistema. Um exemplo de sistema na mecânica pode ser uma pedra lançada, e, neste caso, sua vizinhança seria o espaço ao seu redor, juntamente com o planeta Terra e os demais astros. Na termodinâmica, um sistema e sua vizinhança podem ser, por exemplo, a água em uma panela e tudo ao seu redor que possa trocar calor e matéria com este sistema.

De forma análoga ao que ocorre na mecânica, na termodinâmica também estudamos um sistema por meio da descrição do *estado* deste sistema. Na mecânica, esses estados podem ser carac-

terizados pela posição e velocidade, como no caso de uma pedra caindo. Neste estudo, estamos interessados em analisar como essas variáveis mudam de um estado para outro. Para um sistema termodinâmico, como um gás confinado em um recipiente, as variáveis de interesse que o definem são: a *pressão*, que mede a taxa de transferência temporal do momento linear das moléculas do gás por unidade de área, se chocando contra as paredes do recipiente; a *temperatura*, que é uma indicação do nível de agitação das moléculas; e o volume, que é o espaço ocupado pelas partículas no espaço, ou seja, o volume do recipiente. Este conjunto de variáveis é composto por medidas macroscópicas realizadas em laboratório com o uso de termômetros, manômetros e outros instrumentos, e representam médias de processos microscópicos que ocorrem em tempos e dimensões extremamente pequenas.

Quando estudamos as mudanças dos estados de um sistema, tanto na mecânica quanto na termodinâmica, fazemos uso de uma equação chamada *equação de estado*. Esta equação de estado depende das variáveis de estado e é responsável por definir cada ponto no espaço destas variáveis, ou seja, ela define o estado do sistema. A equação de estado é a lei que estabelece a mudança de um estado para outro no espaço das variáveis de estado. Quando um corpo executa um movimento unidimensional com velocidade constante, a equação de estado do espaço (x, v_0) deste sistema mostra uma reta horizontal em v_0 . Se esta partícula estivesse em queda livre, teríamos uma parábola no espaço (y, v) , que seria a equação de estado deste sistema, determinando sua evolução temporal e cada ponto no espaço das variáveis de estado deste sistema.

A termodinâmica é fundamentada em observações macroscópicas do estado e mudança do estado de um sistema, enquanto a análise destes processos de um ponto de vista microscópico é o objetivo da física estatística. Existe naturalmente uma conexão e uma correspondência entre as variáveis microscópicas, como posição e velocidade das partículas que compõem um gás, com as variáveis macroscópicas, como pressão, volume e temperatura, mas estas conexões não são imediatas e requerem um estudo mais sistematizado.

No início da nossa trajetória pela compreensão dos fenômenos térmicos, nos atentaremos primeiramente ao estudo das variáveis macroscópicas e às formulações empíricas das leis. Em seguida, faremos uma investigação de como conectar essas variáveis com as variáveis que descrevem o estado microscópico de partículas do sistema, por meio do modelo cinético do gás ideal.

1.2 Temperatura, equilíbrio térmico e a lei zero da termodinâmica

1.2.1 Temperatura

O termo *temperatura* está muito ligado às experiências diárias de todos nós. Mesmo sem compreendermos este conceito de forma científica, nós fazemos uso dele e o comparamos no dia a dia. Se algum objeto está frio ou quente, isso depende necessariamente da comparação deste objeto com um segundo. Utilizando o sentido do tato, dizer que algo está frio ou quente, se

comparado a outro objeto, é uma informação útil em determinadas situações, mas subjetiva e muito imprecisa. Se realizarmos uma experiência para medir temperaturas apenas utilizando nosso tato, podemos ser enganados.

Imaginem uma experiência em que mergulhamos nossa mão direita em um recipiente contendo água quente e nossa mão esquerda em um recipiente contendo água gelada. Em seguida, colocamos as duas mãos em um terceiro recipiente contendo água a uma temperatura intermediária. Para a mão direita, a água estará fria, e para a mão esquerda, a água estará quente.

Outra propriedade que engana nosso sentido do tato é a condutividade térmica dos materiais. Imagine uma porta de madeira e sua maçaneta de metal do lado de fora de uma casa em uma manhã de inverno. Quando tocamos a maçaneta e, em seguida, a porta, mesmo estando ambas à mesma temperatura do ambiente externo, relataremos que a maçaneta está mais fria que a porta. Hoje sabemos que isso ocorre devido ao fato da maçaneta perder calor mais rapidamente que a madeira.

Com as experiências anteriores, concluímos que nossos sentidos podem ser enganados ao tentar medir a temperatura de determinados corpos e, com isso, precisamos de um mecanismo mais confiável para esta tarefa.

1.2.2 Como medir a temperatura - os primeiros termômetros

As primeiras tentativas de se medir uma temperatura surgiram na Grécia antiga. Fílon de Bizâncio (século III a.C.) e Heron de Alexandria (século I a.C.), descreveram em suas obras um aparelho que mostrava a relação entre a expansão do ar e a variação da temperatura, o qual foi conhecido no século XVII como termoscópio, um projeto precursor do termômetro.

Somente na idade moderna (1453-1789) é que se conseguiu construir aparelhos de relativa precisão para medir temperaturas. Um dos primeiros foi construído por Galileu Galilei (1564-1642), conforme mostra a Figura 1.1, cujo princípio físico era a expansão do ar. Inicialmente, Galileu aqueceu um bulbo com um tubo longo com a finalidade de retirar o ar contido dentro dele; em seguida, inverteu o tubo mergulhando-o em um vaso contendo líquido, que podia ser água colorida, etanol, vinho, etc. Isso fez com que o líquido subisse no tubo até atingir o equilíbrio hidrostático. Quando o bulbo ficava em contato com um terceiro corpo, ambos entravam em equilíbrio térmico, e se obtinha uma nova marcação para o nível do líquido, indicando os graus de quente e frio que atualmente seria a medida da temperatura. Cabe salientar que Galileu não utilizou alguma escala

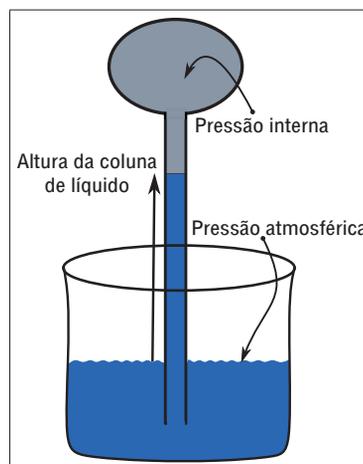


Figura 1.1: Representação do Termoscópio de Galileu.

termométrica, comparando a altura da coluna de líquido quando este estava em contato com um corpo com temperatura bem definida. O grande problema deste termômetro é a sua sensibilidade à variação da pressão atmosférica onde ele se encontrava, pois era um instrumento aberto ao meio exterior.

Mesmo com esses problemas, o termoscópio de Galileu foi utilizado em versões mais aperfeiçoadas, como por exemplo, a adaptação realizada pelo médico italiano Santorio Santorio (1561-1636), que criou uma escala termométrica no termoscópio de Galileu, considerado como o primeiro inventor do termômetro clínico. Ele relacionou os níveis que a coluna de água alcançava quando em contato com o gelo fundido e a chama de uma vela, dividindo em 110 partes iguais esse intervalo de marcações.

Uma melhoria ao termoscópio de Galileu e Santorio foi implementada pelo médico Jean Rey (1582-1632) em 1630, ao considerar a água como substância termométrica. No aparelho tipo-Rey, enchemos um longo, mas fino, tubo de vidro aberto à atmosfera, com água e observamos a dilatação da água em marcações no tubo quando em contato com corpos que desejamos medir a temperatura.

Os aparelhos de Galileu, Santorio e Rey tinham o inconveniente da dependência da temperatura medida com a pressão atmosférica local. Para contornar esse problema, houve contribuições de várias pessoas, uma delas foi Fernando II de Toscana (1610-1670), ao construir um termômetro com a extremidade do tubo fechada. Além disso, mudou a substância termométrica para o etanol, pois tinha o ponto de congelamento mais baixo que o da água.

Desenvolvimentos posteriores na construção do termômetro ocorreram com a fundação, em Florença, da Academia Dei Cimento (1657-1667). Um dos avanços foi a adoção do mercúrio como substância termométrica. O formato dos termômetros era idêntico ao dos termômetros de hoje; eram fechados (ao contrário dos termoscópios), eliminando assim a influência direta da pressão atmosférica na medida. No entanto, antes do fechamento, o ar não era expulso, impedindo com isso a dilatação uniforme do líquido. Ao que tudo indica, os pontos fixos eram as temperaturas do inverno e verão florentinos.

O primeiro cientista a apontar a necessidade de se ter dois pontos fixos para se definir uma escala de temperatura foi Joachin Dalence (1640-1707), no ano de 1688. Com base no termômetro de etanol, estabeleceu como pontos fixos o ponto de fusão do gelo e da manteiga correspondentes respectivamente -10° e $+10^{\circ}$ dividindo o intervalo entre elas em 20 partes iguais. Posteriormente, em 1694, o físico italiano Carlos Benaldini (1615-1698) substituiu o ponto de fusão da manteiga pelo da ebulição da água.

Para alguns cientistas do século XVIII, uma das discussões importantes dessa época foi a escolha de pontos fixos de uma escala termométrica. Isaac Newton, em 1701, em seu artigo sobre a lei do resfriamento, mencionava a ebulição da água como segundo ponto fixo em uma escala. Existia uma grande dificuldade em se estabelecer um padrão de ponto fixo, e empregavam-se as mais

variadas misturas: água + gelo, gelo + sal de cozinha, gelo + cinzas, gelo + carvão, neve + etanol, entre outros. Além disso, havia dificuldade na escolha da substância termométrica; além da água, mercúrio e etanol, também foram empregados o alcatrão, óleo de linhaça e azeite de oliva. Com isso, a medida da temperatura, nesse tempo, ficava a critério de cada um.

Daniel G. Fahrenheit (1686-1736) deu uma grande contribuição para o desenvolvimento da termometria, pois conseguiu construir um termômetro de mercúrio de uso prático, de menor tamanho, e adotou o procedimento de, antes de fechar o termômetro, fervê-lo para retirar o ar do interior. Devido ao mercúrio aderir às paredes do tubo dos termômetros, a substância mais utilizada na época era o álcool, mas como o ponto de ebulição deste era muito baixo, $78,3^{\circ}\text{C}$, isso dificultava a medida de altas temperaturas. Os cientistas misturavam água, mas a dilatação não era uniforme. Fahrenheit conseguiu solucionar esse problema desenvolvendo um método de depuração do mercúrio para que o mesmo não aderisse ao tubo de vidro. Dessa forma, construiu um termômetro que permitiu medir temperaturas muito acima do ponto de ebulição da água e abaixo do ponto de fusão do gelo.

Para toda grandeza física definida, sempre foi difícil estabelecer um padrão a ser obedecido. A medida da temperatura também enfrentou esse problema, devido a questões culturais, inúmeras guerras e divergências no entendimento dos fenômenos térmicos, surgiram variados procedimentos, materiais e escalas de temperatura. Na Europa do século XVIII, há registro de um grande número de escalas em uso, mas três se popularizaram mais: a escala de René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757), de 1730, ($^{\circ}\text{R}$), usando o álcool como substância a se dilatar e considerando dois pontos fixos como a temperatura do gelo em 0°R e o ponto de ebulição da água em 80°R . A escala de Fahrenheit, de 1714 ($^{\circ}\text{F}$), onde os pontos fixos eram a temperatura de uma mistura de água, gelo e sal em 0°F e a temperatura do corpo humano em 100°F . A escala proposta por Anders Celsius (1701 - 1744) em 1742, $^{\circ}\text{C}$, em que o ponto de congelamento (de gelo) vale 0°C e o de ebulição na outra vale 100°C . Os valores atribuídos aos pontos fixos na escala Celsius foram invertidos em sugestão do médico sueco Carl von Linné (1707-1778).

Como discutido nesta seção, o critério estabelecido da 'sensibilidade' para avaliação das temperaturas é vago e impreciso. Diante disso, houve a necessidade de se estabelecer um instrumento padronizado de medida que independa do sentido do tato. Assim, foi construído o termômetro, um instrumento para medir a temperatura dos corpos. Ele faz uso de comparações entre a variação de propriedades das substâncias, como volume, pressão, resistência elétrica, para relacioná-las com a variação de temperatura. A maneira mais fácil de estabelecer uma escala termométrica é achar uma substância que possua uma propriedade que se modifica de modo regular com a tem-

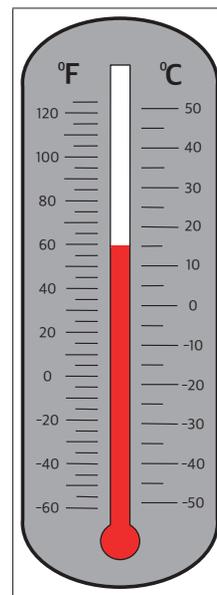


Figura 1.2: Termômetro indicando as leituras de temperatura na escala Fahrenheit e Celsius.

peratura e seja prática de usar.

1.2.3 Como medir temperatura - termômetros e termopares

Os termopares e pirômetros são os instrumentos de medida utilizados para medir altas temperaturas. Os termopares são usados para medir uma faixa de temperatura de -200°C a 1700°C . São os termômetros mais utilizados em laboratórios de pesquisa e na indústria. O princípio de funcionamento de um termopar é baseado no efeito Seebeck, em homenagem ao físico Thomas Johann Seebeck (1770-1831). Os estudos de Seebeck mostraram que, ao unir os extremos de dois metais diferentes, como mostrado na Figura 1.3, e submeter as junções A e B a temperaturas distintas T_1 e T_2 , é gerada uma força eletromotriz (fem). Assim, uma das junções é colocada em contato com o objeto cuja temperatura se quer determinar, enquanto a outra junção é mantida à temperatura constante, chamada de temperatura de referência. Geralmente, usa-se a temperatura de fusão do gelo como referência. Para pequenas diferenças de temperatura entre as junções, a força eletromotriz é proporcional a essa diferença:

$$V = k(T_1 - T_2) \quad (1.1)$$

Sendo que k é o coeficiente de Seebeck, a constante termoelétrica, que depende do material dos fios e da temperatura. Assim, a temperatura do objeto pode ser determinada por meio da medição da força eletromotriz que é gerada. A constante de Seebeck é pequena, ou seja, a força eletromotriz gerada é pequena para grandes variações de temperatura.

Os pirômetros medem a temperatura a partir da radiação emitida pelo objeto. Becquerel (1852-1908) foi um dos precursores da ideia de um instrumento que medisse a temperatura a partir da radiação emitida pelo corpo. No entanto, essa ideia foi colocada em prática por Henri-Louis Le Chatelier em 1892, com a construção do primeiro modelo de pirômetro óptico.

Diferentemente dos termopares, os pirômetros não necessitam de contato físico e existem pelo menos dois tipos: os pirômetros ópticos, que detectam a temperatura correspondente à radiação do espectro visível, e os pirômetros de radiação, que compreendem o espectro do visível até o infravermelho curto. São utilizados em laboratórios e indústrias para medir temperaturas acima de 750°C , como nos processos de fusão de metais, em interiores de fornos e em superfícies.

Os pirômetros de radiação relacionam a temperatura com a emissividade da radiação do corpo que se quer medir a temperatura. Existem pelo menos três tipos: faixa larga, faixa única e relação de duas cores. O de faixa larga procura medir a maior quantidade possível de energia emitida pelo corpo quente, também chamado de pirômetro de radiação total. O faixa única, como o próprio nome já diz, funciona em uma faixa estreita do espectro de energia com centro em um ponto em

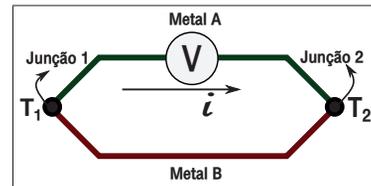


Figura 1.3: Dois metais diferentes A e B com junções mantidas à temperaturas T_1 e T_2 .

que se quer medir a temperatura. O de relação de duas cores mede a emissividade de energia que corresponde a duas faixas estreitas e divide uma pela outra.

1.2.4 Unidade de medida de temperatura

A temperatura é uma característica do estado termodinâmico de um determinado sistema, assim como a pressão e o volume. A pressão, no Sistema Internacional de Unidades (SI) (ver Tabela 1.1), é dada em pascal (Pa), que por sua vez pode ser escrita nas unidades fundamentais de quilograma (kg), metro (m) e segundo (s), como $Pa = kg/m \cdot s^2$. A temperatura faz

Tabela 1.1: As sete unidades fundamentais do sistema Internacional (SI).

| Grandeza | Unidade | Símbolo |
|-----------------------|------------|---------|
| Comprimento | Metro | m |
| Massa | Quilograma | kg |
| Tempo | Segundo | s |
| Corrente Elétrica | Ampère | A |
| Temperatura | Kelvin | K |
| Quantidade de Matéria | Mol | mol |
| Intensidade Luminosa | Candela | cd |

parte da relação das sete grandezas fundamentais do SI e é medida em kelvin (K). Para exemplificar essa denominação fundamental, diferente de outras unidades, ela não pode ser quantificada em termos de quilograma, metro e segundo, como fizemos anteriormente com o pascal. Este aspecto fundamental também exemplifica a complexidade dos fenômenos térmicos e a dificuldade que existe em estabelecer uma relação entre temperatura e algumas grandezas de natureza mecânica que são quantificadas em termos de quilograma, metro e segundo.

1.2.5 Equilíbrio térmico e a lei zero da termodinâmica

Para discutirmos o conceito de equilíbrio térmico e a lei zero da termodinâmica, é preciso entender primeiramente como a vizinhança de um sistema termodinâmico afeta este sistema por meio de suas paredes e, também, compreender de forma geral o que é equilíbrio termodinâmico. Os sistemas termodinâmicos estão em contato com suas vizinhanças por meio de paredes. As paredes que permitem a troca de calor destes sistemas com suas vizinhanças são chamadas diatérmicas. As paredes que não permitem nenhuma troca de calor são chamadas adiabáticas. Estas paredes também podem ser fixas ou móveis.

Nas mudanças de estado de um sistema termodinâmico, $(p_1, V_1, T_1) \rightarrow (p_2, V_2, T_2)$, estamos registrando os valores da pressão, volume e temperatura, que são medidas experimentais em um estado inicial e comparando com um outro estado final. Para que possamos fazer esses registros, necessariamente estas variáveis não devem mudar ao longo do tempo, ou então não estaremos computando o estado de equilíbrio do sistema nas situações inicial e final.

Quando, a partir de um determinado momento, as variáveis de estado de um sistema não variam com relação ao tempo, dizemos que o sistema está em equilíbrio térmico. Caso estas variáveis macroscópicas de estado estejam mudando no tempo, dizemos que este sistema está fora do

equilíbrio térmico. Quando as medidas de pressão, temperatura e volume de um determinado sistema estão constantes no tempo, ou seja, quando o sistema está em equilíbrio térmico, poderíamos imaginar que esta condição é microscopicamente estática. No entanto, na realidade, o movimento das moléculas do sistema é incessante, e o que medimos é a média destes movimentos aleatórios que não se altera no tempo.

Para compreendermos o conceito de temperatura, devemos examinar um experimento sobre o equilíbrio térmico entre corpos. Considere três corpos: A , B e C em equilíbrio térmico individualmente e que possuem paredes diatérmicas. Suponha que o corpo A esteja quente ao nosso toque, se comparado ao corpo B , que apresenta uma sensação de frio quando colocamos nossa mão sobre ele. Os corpos A e B são então colocados em contato por meio de suas paredes e atingem o equilíbrio térmico depois de um determinado tempo. Percebemos este equilíbrio, pois a sensação térmica é igual para os dois corpos. Nesta condição, dizemos que A e B estão em equilíbrio térmico entre si. Caso não soubéssemos se A e B estão ou não em equilíbrio térmico, poderíamos utilizar o corpo C (um termoscópio) para tal verificação. Operacionalmente, se o corpo C estiver em equilíbrio térmico com A e B , necessariamente A e B estão em equilíbrio térmico entre si. Este resultado é conhecido como Lei Zero da Termodinâmica e pode ser enunciado como:

Lei Zero da Termodinâmica: *Se dois corpos, A e B , estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C (Termoscópio), então A e B estão em equilíbrio térmico entre si.*

A Lei Zero trata da existência da temperatura, que é uma propriedade de um corpo em equilíbrio térmico. Quando corpos com valores diferentes desta propriedade são colocados em contato, estes atingirão um novo estado de equilíbrio e terão um mesmo valor para esta propriedade, temperatura, que será igual para ambos. Apesar de ter uma apresentação simples, esta lei não decorre diretamente de um raciocínio lógico, mas sim de resultados experimentais. A Lei Zero da Termodinâmica, foi assim denominada por Ralph H. Fowler no início do século XX, após um extenso desenvolvimento experimental. Fowler reconheceu que essa lei era fundamental, pois sem ela o próprio conceito de temperatura não poderia ser estabelecido. Como as primeiras duas leis da Termodinâmica já estavam consolidadas, a introdução desse princípio básico levou à criação do nome "Lei Zero", garantindo uma apresentação mais lógica da teoria. Desde então, essa denominação é amplamente utilizada em física.

1.3 Escalas de temperatura e o termômetro de gás a volume constante

Como discutimos anteriormente, nossa percepção fisiológica de temperatura não é adequada para classificar diversos sistemas quanto a esta propriedade de estado, mas podemos distinguir sistemas que tenham as mesmas variáveis de estado analisando a relação destas variáveis com respeito à temperatura. Se estivermos observando um sistema que consiste de uma barra metálica fina, o estado deste sistema pode ser caracterizado por (L, T) onde T é a percepção de temperatura

e L seu comprimento. Experimentalmente, existe uma relação linear entre estas variáveis, que pode ser escrita, introduzindo uma constante de proporcionalidade α' como:

$$T(L) = \alpha' L. \quad (1.2)$$

Se considerarmos um sistema constituído por um gás em um recipiente de volume fixo, podemos estudar este sistema através da evolução do estado (p, T) , sendo p a pressão do gás, que pode ser medida com o uso de um manômetro. Para este sistema, podemos relacionar diferentes temperaturas pela relação:

$$T(p) = \alpha'' p, \quad (1.3)$$

com α'' uma constante que estabelece a igualdade.

Generalizando, para um sistema qualquer que tenha uma variável de estado Z relacionada linearmente com a temperatura T , podemos escrever a dependência desta temperatura com Z , por:

$$T(Z) = \alpha Z. \quad (1.4)$$

A variável Z é chamada de Propriedade Termométrica, relacionada ao sistema que chamamos de Substância Termométrica. Operacionalmente, a equação 1.4 é a equação de uma reta e, como tal, precisamos definir pontos para traçarmos seu gráfico. A partir desta reta, poderemos encontrar qualquer valor de temperatura, sabendo a correspondente propriedade termométrica. Os pontos de definição das temperaturas da nossa reta, são chamados Pontos Fixos e a temperatura correspondente é chamada Temperatura de Ponto Fixo. Para a nossa propriedade termométrica arbitrária Z , podemos definir duas temperaturas de ponto fixo para encontrarmos nossa equação de reta: (Z_1, T_1) e (Z_2, T_2) , como ilustrado na figura 1.4. Analisando a relação dos triângulos da figura 1.4, podemos escrever:

$$\frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} = \frac{T - T_1}{Z - Z_1}. \quad (1.5)$$

Isolando a temperatura T , na equação anterior, teremos a relação:

$$T = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{Z_2 - Z_1} (Z - Z_1) \quad (1.6)$$

Definindo-se as temperaturas de ponto fixo, T_2 e T_1 , relacionadas com as propriedades termométricas, Z_2 e Z_1 , de uma substância termométrica em contato com um corpo, podemos encontrar

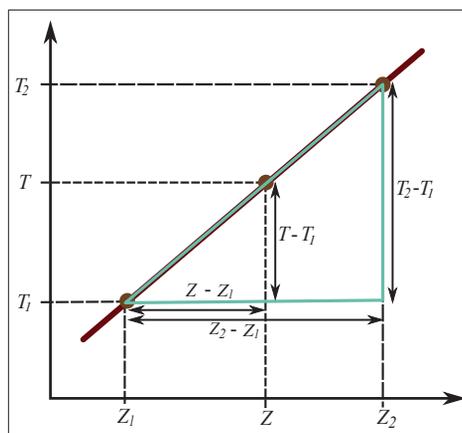


Figura 1.4: Relação entre temperatura e a propriedade termométrica.

uma terceira temperatura, a qual queremos determinar, apenas encontrando o equilíbrio térmico da nossa substância termométrica, Z , com esse terceiro corpo de temperatura T .

1.3.1 Escala Fahrenheit de temperatura

Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 - 1736), físico alemão, foi o inventor do termômetro por dilatação utilizando o mercúrio como substância termométrica e da escala Fahrenheit. O trabalho de Fahrenheit tem início com Ole Christensen Roemer (1644 - 1710), um astrônomo dinamarquês que usou eclipses das luas de Júpiter para medir a velocidade da luz pela primeira vez em 1676. Roemer desenvolveu sua própria escala de temperatura para usar com os termômetros de álcool em vidro que ele construiu. Seus termômetros atraíram a atenção de Gabriel Fahrenheit, então fabricante de instrumentos meteorológicos na Holanda. Em 1708, Fahrenheit esteve em Copenhague e conheceu os termômetros de Roemer baseados em dois pontos fixos. Como ponto fixo inferior, usou uma mistura de gelo, água e sal para atingir as temperaturas mais baixas conseguidas experimentalmente, que ele atribuiu o valor zero. Para o ponto fixo superior considerou o ponto de ebulição da água, tomando arbitrariamente como 60 graus. Fahrenheit continuou fabricando termômetros como os de Roemer, em 1714 conseguiu superar problemas técnicos dos termômetros de álcool, substituindo por mercúrio. O uso do mercúrio ampliou a faixa de medição de temperatura desde bem abaixo do zero de Roemer até bem acima do ponto de ebulição da água. Além disso, o mercúrio expande e se contrai de forma mais uniforme do que os outros líquidos então utilizados.

Inicialmente Fahrenheit estabeleceu uma escala em que os pontos fixos eram: a temperatura da água, gelo e cloreto de amônio ($0\text{ }^{\circ}\text{F}$) e a temperatura do corpo humano ($100\text{ }^{\circ}\text{F}$). Com o objetivo de eliminar as temperaturas negativas de suas observações meteorológicas adotou várias escalas, uma delas considerou a temperatura de fusão do gelo para 8° e de ebulição 24° . Fahrenheit, por volta de 1717, passou a adotar essa escala, no entanto, para tornar as medidas mais precisas em seu termômetro de mercúrio filtrado dividiu o tamanho de cada grau em quatro partes iguais, sendo 32° para fusão do gelo e 96° para o corpo humano. Assim, a escala Fahrenheit foi baseada nestes dois pontos fixos, somente após a sua morte é que se substituiu a temperatura do corpo humano para a temperatura de ebulição da água, no caso o valor conhecido de 212° .

Como discorremos acima, a escala Fahrenheit pode ser definida como: ($Z_1, 32\text{ }^{\circ}\text{F}$) ponto de congelamento da água e ($Z_2, 212\text{ }^{\circ}\text{F}$) ponto de ebulição da água. Com isso teremos a equação 1.6, escrita como:

$$T_F = 32\text{ }^{\circ}\text{F} + \frac{(Z - Z_1)}{Z_2 - Z_1} 180\text{ }^{\circ}\text{F} \quad (1.7)$$

Existem alguns pontos que podem ser vantajosos na escolha da escala Fahrenheit. Por exemplo, a possibilidade de em países frios as temperaturas ambientes assumirem valores positivos, o que não ocorre na escala Celsius. Outro aspecto interessante é que essa escala é bastante prática com relação ao estado febril das pessoas, quando a febre precisa ser controlada com medica-