



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE NACIONAL



**A TERMODINÂMICA DENTRO E FORA DO EQUILÍBRIO: UMA PROPOSTA
DIDÁTICA PARA O ENSINO DE QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO**

HUMBERTO GOMES DA SILVA NETO

RECIFE

2025

HUMBERTO GOMES DA SILVA NETO

**A TERMODINÂMICA DENTRO E FORA DO EQUILÍBRIO: UMA PROPOSTA
DIDÁTICA PARA O ENSINO DE QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Química pelo Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional – PROFQUI.

Orientador: Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto

RECIFE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecária - Suely Manzi - CRB-4 809

S586t Silva Neto, Humberto Gomes da
 A termodinâmica dentro e fora do equilíbrio: uma proposta didática
 para o ensino de química do ensino médio / Humberto Gomes da
 Silva Neto. – 2025.
 171 f.: il.

 Orientador: Luciano de Azevedo Soares Neto.
 Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal
 Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Química
 em Rede Nacional, Recife, BR-PE, 2025.
 Inclui bibliografia e apêndice(s)

 1. Química – Estudo e ensino 2. Termodinâmica - História
 3. Reações químicas 4. Prigogine, I. (Ilya) - 1917-2003 I. Soares Neto,
 Luciano de Azevedo, orient. II. Título

CDD 540

HUMBERTO GOMES DA SILVA NETO

**A TERMODINÂMICA DENTRO E FORA DO EQUILÍBRIO: UMA PROPOSTA
DIDÁTICA PARA O ENSINO DE QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Química, conferido pelo Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional - PROFQUI, da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Professor Orientador: Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto

Aprovada em: 28/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto
(Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof. Dr. Joacy Vicente Ferreira
(Examinador interno)
Instituto Federal de Pernambuco – IFPE, *campus* Recife

Prof. Dr. Hélcio José Batista (Examinador externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

*Dedico esta dissertação à minha
mãe, Maria das Graças Dias da
Costa.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho:

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir realizar mais este sonho, o de me tornar mestre em Química. Agradeço à minha mãe, Maria das Graças, por sempre acreditar em mim e me incentivar nos estudos. Estendo meu agradecimento a toda a minha família: Helena, Marcelo e Bárbara (irmãos); Cauã, Sofia e Camila (sobrinhos); Ary (pai) e Tamires (cunhada), pelo apoio incondicional.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano de Azevedo Soares Neto, por me apresentar à fascinante Ordem dos Caos e à Termodinâmica Fora do Equilíbrio, temas que despertaram meu entusiasmo ao longo do mestrado.

Sou especialmente grato ao meu amigo Cleiton Luiz, cuja motivação, incentivo e sugestão foram determinantes para que eu conhecesse este mestrado e decidisse me inscrever. Foi graças a ele que essa jornada acadêmica teve início.

Aos colegas da turma do PROFQUI 2023, e aos amigos que o mestrado me proporcionou, em especial Maely Albuquerque, Beatriz Moraes, Nelândia Naiara, Karolinny Gomes, Pedro Campelo, Ronald Prazeres e Rodrigo Lima, deixo meu agradecimento especial. Vocês foram essenciais nessa caminhada.

A todos, minha eterna gratidão!

RESUMO

SILVA NETO, Humberto Gomes da. **A termodinâmica dentro e fora do equilíbrio:** uma proposta didática para o ensino de química do ensino médio. 2025. Dissertação (Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2025.

Partindo da constatação de que os materiais didáticos convencionais se restringem majoritariamente à termodinâmica clássica — centrada em sistemas em equilíbrio —, esta pesquisa propõe ampliar esse escopo ao incluir a termodinâmica fora do equilíbrio, um campo emergente que oferece explicações mais abrangentes para fenômenos irreversíveis presentes no cotidiano e em diversas áreas do conhecimento. Casos como o desdobramento de proteínas, a formação de estruturas biológicas complexas, a cristalização e as reações oscilantes revelam comportamentos auto-organizados mediados por leis termodinâmicas que desafiam a linearidade dos modelos tradicionais. Este trabalho teve como objetivo principal analisar a elaboração e a avaliação de um livro em formato PDF, voltado para professores de Química do Ensino Médio, abordando a História da Termodinâmica desde os precursores da Primeira Lei até as Reações Oscilantes, com destaque para a Termodinâmica Fora do Equilíbrio — um tema ainda pouco explorado no contexto escolar. A metodologia da pesquisa desenvolveu-se em três etapas: revisão bibliográfica sobre os marcos históricos e científicos da termodinâmica; produção do material didático com linguagem acessível e contextualizada; e avaliação da sua aplicabilidade, realizada por meio de um questionário aplicado a docentes da área. Os resultados apontam que os professores participantes possuem formação sólida e experiência significativa, o que valida suas contribuições. A maioria atua no Ensino Médio, mas revelou nunca ter abordado em sala conteúdos relacionados à termodinâmica fora do equilíbrio, evidenciando uma lacuna no ensino tradicional. O livro, por sua vez, foi amplamente bem avaliado: todos os participantes consideraram os temas relevantes, e mais de 90% apontaram que o conteúdo está adequado às necessidades dessa etapa de ensino. Destacaram-se ainda a linguagem acessível, os exemplos do cotidiano e a organização visual do material. Além disso, o produto mostrou-se alinhado à Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e compatível com metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Problemas, o Ensino por Investigação e a Sala de Aula Invertida, sendo considerado aplicável por mais de 90% dos respondentes. Conclui-se, portanto, que o material elaborado é um recurso pedagógico viável, inovador e necessário, pois contribui para ampliar a abordagem da termodinâmica no Ensino Médio, favorecendo práticas mais reflexivas, investigativas e alinhadas às demandas contemporâneas da educação em Ciências da Natureza. O material didático, como produto educacional, estará disponível gratuitamente online, permitindo amplo acesso aos interessados no tema.

Palavras-chave: História da termodinâmica; Ilya Prigogine; reações oscilantes.

ABSTRACT

SILVA NETO, Humberto Gomes da. **Thermodynamics inside and outside equilibrium: a didactic proposal for teaching chemistry in high school.** 2025. Dissertation (Professional Master's in National Network for Chemistry Education) – Federal Rural University of Pernambuco, Recife, 2025.

Starting from the observation that conventional teaching materials are primarily limited to classical thermodynamics, which focuses on systems in equilibrium, this research proposes expanding this scope to include nonequilibrium thermodynamics. This is an emerging field that offers broader explanations for irreversible phenomena observed in everyday life and across various areas of knowledge. Cases such as protein unfolding, the formation of complex biological structures, crystallization, and oscillating reactions reveal self-organizing behaviors governed by thermodynamic laws that challenge the linearity of traditional models. The main objective of this work was to analyze the creation and evaluation of a book in PDF format, specifically designed for high school Chemistry teachers. The book explores the history of thermodynamics, from the precursors of the First Law to oscillating reactions, with a focus on the topic of non-equilibrium thermodynamics, which is still little explored in the school context. The research methodology was structured in three stages: a bibliographic review on the historical and scientific milestones of thermodynamics; the development of didactic material using accessible and contextualized language; and an evaluation of its applicability, carried out through a questionnaire administered to Chemistry teachers. The results indicate that the participating teachers have solid academic backgrounds and significant teaching experience, which validates their contributions. Most of them work in high school education but reported never having addressed content related to nonequilibrium thermodynamics in their classes, revealing a gap in traditional teaching approaches. The book, in turn, was widely evaluated: all participants considered the topics relevant, and more than 90% stated that the content was appropriate for the needs of this educational level. The accessible language, real-life examples, and visual organization of the material were also highlighted as positive aspects. Furthermore, the product proved to be aligned with the Brazilian National Common Curricular Base (BNCC) and compatible with active teaching methodologies, such as Problem-Based Learning, Inquiry-Based Teaching, and the Flipped Classroom approach, being considered applicable by more than 90% of respondents. In conclusion, the developed material is a viable, innovative, and necessary pedagogical resource, as it contributes to expanding the approach to thermodynamics in high school, promoting more reflective and investigative teaching practices that are aligned with the contemporary demands of science education. The educational material, as an educational product, will be made available online free of charge, enabling broad access for those interested in the subject.

Keywords: History of thermodynamics; Ilya Prigogine; oscillating reactions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Máquina a vapor de Thomas Newcomen	25
Figura 2 -	Máquina a vapor de James Watt	26
Figura 3 -	Página do livro “ <i>Réflexions sur la puissance motrice du feu</i> ” de Sadi Carnot (à esquerda) e do seu autorretrato (à direita).....	28
Figura 4 -	Esquema de uma máquina térmica	29
Figura 5 -	Esboço original de Carnot do seu livro “ <i>Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance</i> ” para a operação de uma máquina térmica	30
Figura 6 -	(a) Émile Clapeyron e (b) o primeiro gráfico PV de um ciclo termodinâmico, da publicação do artigo de Clapeyron de 1834 (à direita)	31
Figura 7 -	Josiah Willard Gibbs, físico e químico norte-americano considerado um dos fundadores da termodinâmica estatística e da físico-química. Sua assinatura aparece abaixo da fotografia	37
Figura 8 -	Ludwig Boltzmann aos 24 anos de idade (1869)	39
Figura 9 -	Túmulo de Ludwig Boltzmann com sua famosa equação ($S = k \cdot \log W$)	43
Figura 10 -	Ilya Prigogine (1917-2003) e a termodinâmica fora do equilíbrio	51
Figura 11 -	Ilya Prigogine recebendo o Prêmio Nobel de Química em 1977 das mãos do Rei Karl XVI Gustav	53
Figura 12 -	Diagrama esquemático de bifurcação de um sistema químico não linear	55
Figura 13 -	Reação BZ agitada mostrando mudanças de cor ao longo do tempo...	59
Figura 14 -	Oscilador espacial baseado no sistema Belousov-Zhabotinsky	61
Figura 15 -	Sequência das mudanças de cor na reação relógio de iodo oscilante de Briggs-Rauscher	62
Figura 16 -	Estrutura visual (A) e textual (B) do livro paradidático <i>Desvendando a História da Termodinâmica</i>	67
Figura 17 -	Estrutura visual (C) e textual (D) do livro paradidático <i>Desvendando a História da Termodinâmica</i>	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Formações acadêmicas dos participantes da entrevista	73
Gráfico 2 -	Atuação dos professores por rede de ensino	74
Gráfico 3 -	Atuação dos professores por nível de ensino	75
Gráfico 4 -	Tempo de experiência em sala de aula dos entrevistados	75
Gráfico 5 -	Frequência de uso da História da Ciência como recurso didático	76
Gráfico 6 -	Familiaridade dos professores com a TFE e as reações oscilantes	77
Gráfico 7 -	Percepção dos professores sobre a relevância da TFE e das reações oscilantes no Ensino Médio	78
Gráfico 8 -	Percepções sobre a adequação do conteúdo ao Ensino Médio	78
Gráfico 9 -	Percepções sobre a linguagem, diagramação e organização visual do material	79
Gráfico 10 -	Percepção dos professores sobre a adequação do material às diretrizes da BNCC	80
Gráfico 11 -	Metodologias consideradas adequadas por docentes para aplicação do produto educacional	81
Gráfico 12 -	Disposição dos professores em recomendar o produto educacional.....	82

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BZ	Belousov-Zhabotinsky
deS	Fluxo de entropia
diS	Entropia gerada dentro do sistema
GEO	Gas <i>evolucion ocillator</i>
L	Coeficiente fenomenológico
ω	Microestados associados e um macroestado específico
P	Pressão
S	Entropia
SDS	Sulfato dodecil de sódio
T	Temperatura
U	Energia interna
V	Volume
Φ	Função de dissipação
W	Trabalho
X	Força motriz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 HISTÓRIA DA CIÊNCIA.....	16
3.1.1 A Importância da História da Ciência para o Ensino de Química	16
3.2 A HISTÓRIA DA TERMODINÂMICA	18
3.2.1 As primeiras ideias sobre calor	19
3.2.2 Contexto histórico e a revolução industrial.....	23
3.2.3 As máquinas térmicas	24
3.2.4 As reflexões de Sadi Carnot e a expansão dos estudos termodinâmicos	28
3.2.5 A primeira Lei da Termodinâmica e a contribuição brilhante de Helmholtz	32
3.2.6 A Segunda Lei da Termodinâmica e a entropia de Clausius.....	34
3.2.7 A contribuição de Boltzmann à irreversibilidade na Termodinâmica Estatística ..	39
3.2.8 A Termodinâmica fora do equilíbrio	44
3.2.9 Ilya Prigogine	49
3.2.10 Estruturas dissipativas	53
3.2.11 As fascinantes reações oscilantes.....	58
4 METODOLOGIA.....	64
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	64
4.2 SUJEITOS DA PESQUISA	64
4.3 CONSTRUÇÃO DO PRODUTO	64
4.4 INSTRUMENTO DA PESQUISA PARA COLETA DE DADOS	65
4.5 PRODUTO EDUCACIONAL	66

4.5.1 Construção e características do produto educacional.....	66
4.5.2 Sugestões de estratégias pedagógicas para utilização do produto educacional	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
5.1 PERFIL DOS RESPONDENTES	73
5.2 AVALIAÇÃO DO MATERIAL DIDÁTICO.....	77
5.3 OPINIÃO QUALITATIVA DOS PARTICIPANTES.....	82
5.3.1 Pontos fortes destacados pelos docentes	83
5.3.2 Pontos fracos e sugestões de melhoria	84
6 CONCLUSÃO.....	86
REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICE	95
APÊNDICE A – Questionário Avaliativo enviado aos Professores	95
APÊNDICE B - Respostas à questão 14 do questionário do Google Forms	98
APÊNDICE C - Respostas à questão 15 do questionário do Google Forms	100
APÊNDICE D - Livro Paradidático (Produto Educacional).....	102

1 INTRODUÇÃO

“A ciência é um diálogo aberto com a natureza”

Ilya Prigogine

Este trabalho propõe a utilização da História da Ciência no ensino de Química, com foco na história da Termodinâmica. A motivação para esta investigação surgiu da observação de que a maioria dos materiais didáticos de ensino médio se limitam a abordar apenas os fundamentos da termodinâmica clássica (Barzykina, 2020), ou seja, a termodinâmica em equilíbrio. Essa limitação também é observada no nível de graduação (Dourado; Marchiori, 2019). Contudo, a termodinâmica fora do equilíbrio, que trata de processos irreversíveis e fenômenos como dissipação de energia, fluxo de calor e transporte de massa em sistemas abertos, é um campo de estudo emergente e de extrema relevância, especialmente a partir do século XX.

A termodinâmica passou por uma evolução significativa em sua visão teórica ao longo dos séculos. Originalmente enraizada em leis deterministas e visões mecanicistas, ela conseguiu expandir-se para além desses conceitos simplistas, incorporando ideias como entropia, equilíbrio termodinâmico e, crucialmente, termodinâmica fora do equilíbrio. Este avanço é reflexo da capacidade da ciência de se adaptar e superar paradigmas estabelecidos, o que destaca a importância de entender não apenas os fundamentos da termodinâmica, mas também suas aplicações em situações reais.

Um dos objetivos desta abordagem histórica é demonstrar para os estudantes o desenvolvimento da termodinâmica, sua importância e extensão ao se referir à termodinâmica fora do equilíbrio, citando exemplos presentes no cotidiano. A pesquisa realizada focou-se na questão: Como utilizar a História da Ciência para promover a ampliação da discussão sobre a espontaneidade das reações químicas em sistemas fora do equilíbrio, incluindo o caso das reações oscilantes, no ensino médio?

A evolução da Termodinâmica é um testemunho da adaptabilidade e da profundidade da ciência. Desde o século XVIII, com o desenvolvimento das principais teorias químicas durante a Revolução Industrial na Inglaterra até os dias atuais, a Termodinâmica expandiu-se para abordar reações irreversíveis em sistemas fora do equilíbrio, como as reações oscilantes. Essas reações, que exibem variações periódicas notáveis, foram extensivamente estudadas pelo físico-químico russo Ilya Prigogine, cujo trabalho pioneiro lhe rendeu o Prêmio Nobel de Química em 1977.

Apesar da importância dessas reações, elas raramente são abordadas no ensino médio ou superior. No entanto, seu estudo oferece uma oportunidade valiosa para ampliar a discussão sobre entropia e a espontaneidade dos processos naturais, além de possibilitar uma compreensão mais profunda de como a organização pode ocorrer espontaneamente sem violar as leis da Termodinâmica. No contexto do ensino de Química, a compreensão da espontaneidade de um processo é fundamental para sua aprendizagem.

Justifica-se abordar a termodinâmica fora do equilíbrio no ensino médio devido à relevância e ao impacto desse conceito em diversos fenômenos observados no cotidiano e em áreas científicas diversas. O desdobramento de proteínas, a formação da dupla hélice do DNA, a formação das bolhas de sabão e a cristalização constituem exemplos concretos de auto-organização sob controle termodinâmico (Capra; Luisi, 2014). Segundo o bioquímico Luisi, a auto-organização é uma característica dos sistemas dinâmicos e está geralmente fora do equilíbrio (Luisi, 2013).

Portanto, abordar a termodinâmica fora do equilíbrio no ensino médio permite ampliar a discussão sobre a espontaneidade das reações químicas, incluindo as reações oscilantes, e contribui na difusão desse conhecimento pouco explorado no âmbito educacional. Além disso, proporciona aos estudantes uma visão ampla e contextualizada sobre a natureza e a diversidade dos processos termodinâmicos.

Diante da importância de abordar a termodinâmica fora do equilíbrio no ensino médio, surgiu a ideia de confeccionar um livro sobre o tema no formato pdf, para ser utilizado como material de apoio no planejamento e execução de aulas do ensino médio, podendo também ser utilizado na graduação. O material didático pode ser impresso ou digital e será disponibilizado gratuitamente via plataforma, o que permite alcançar pessoas em todo o país.

Como forma de validação do conteúdo do livro paradidático, foi elaborado um questionário composto por 15 perguntas, distribuídas em três blocos: o primeiro destinado à caracterização do perfil dos participantes; o segundo, à avaliação do material didático; e o terceiro, à coleta de opiniões qualitativas, no qual os participantes puderam expressar livremente suas percepções, observações e sugestões sobre o material.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar e validar um livro paradidático digital no formato em PDF sobre a História da Termodinâmica, abordando desde os precursores da Primeira Lei até as Reações Oscilantes, como ferramenta de apoio pedagógico para professores de Química do Ensino Médio, visando a ampliação da discussão sobre a espontaneidade de reações químicas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Revisar a literatura especializada em História da Ciência e Termodinâmica, a fim de selecionar os conceitos e eventos históricos relevantes para a construção do livro paradidático, com foco especial na Termodinâmica Fora do Equilíbrio, uma área relativamente pouco explorada.
- b) Desenvolver o conteúdo do livro paradidático digital, com enfoque na evolução histórica da Termodinâmica, desde seus precursores até as Reações Oscilantes, e com uma linguagem acessível para o professor de Ensino Médio.
- c) Elaborar e aplicar um instrumento de pesquisa (questionário) para coletar a percepção de professores de Química do Ensino Médio sobre a adequação, relevância e potencial de aplicação do material didático proposto.
- d) Analisar os dados qualitativos e quantitativos obtidos no questionário para identificar as contribuições e as possíveis melhorias do livro paradidático, bem como a sua aceitação na comunidade de professores.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a base teórica que sustenta a pesquisa, articulando os principais conceitos de História da Ciência com o ensino de Química. A abordagem teórica tem como foco a importância de recursos didáticos na promoção de um aprendizado mais contextualizado e aprofundado. A discussão perpassará o desenvolvimento histórico da Termodinâmica, desde seus fundamentos clássicos até a compreensão de sistemas fora do equilíbrio.

3.1 HISTÓRIA DA CIÊNCIA

A história da ciência desempenha um papel fundamental no ensino de disciplinas científicas, como a Química. A integração de perspectivas históricas no currículo pode enriquecer a compreensão dos alunos sobre o desenvolvimento dos conceitos científicos, proporcionar contexto aos avanços teóricos e tecnológicos e humanizar a ciência ao destacar as contribuições e os desafios enfrentados pelos cientistas ao longo do tempo. Este trabalho aborda a importância da história da ciência no ensino de Química, explorando suas contribuições para a formação dos alunos, a contextualização do conhecimento científico e o desenvolvimento de uma compreensão crítica e reflexiva da ciência.

3.1.1 A Importância da História da Ciência para o Ensino de Química

A inclusão da história da ciência no ensino de Química contribui significativamente para a formação integral dos estudantes. Ao apresentar a ciência como um processo dinâmico e evolutivo, a história da ciência ajuda os alunos a entenderem que o conhecimento científico não é estático, mas está sempre em desenvolvimento. Isso pode estimular uma visão mais crítica e aberta do aprendizado científico, encorajando os estudantes a questionarem, investigarem e contribuírem para o avanço do conhecimento.

No artigo “Contribuições da História da Ciência para o Ensino da Química: Uma Proposta para Trabalhar o Tópico Radioatividade”, Barp (2013) destaca que o uso da História da Ciência em sequências didáticas motiva os alunos e promove uma compreensão mais coerente da ciência e do método científico. Desse modo, ela permite que os alunos vejam a Química em um contexto mais amplo, conectando descobertas científicas a eventos históricos, culturais e sociais. Essa abordagem pode tornar o ensino de Química mais interessante e relevante para os alunos, ao mostrar como a ciência influencia e é influenciada pela sociedade.

De acordo com Pires *et al.* (2019),

[...] a utilização da História da Ciência como um agente significativo no ensino de Ciências [...] possibilita ao estudante reconhecer os diversos elementos humanos (sociais, políticos, econômicos etc.) que influenciam a prática científica, proporcionando, assim, uma visão crítica da ciência, além de aproximar os temas de ciência ao cotidiano do estudante, auxiliando-o no seu letramento científico (Pires *et al.*, 2019, p. 179).

Essa perspectiva é corroborada por inúmeras pesquisas que destacam a importância de situar os conceitos científicos em seus contextos históricos (Spillane, 2013, Moreira; Porto, 2010, Callegario *et al.*, 2015, Guimarães; Guiomar, 2019).

Por exemplo, ao estudar a história da termodinâmica, os alunos podem aprender sobre os experimentos de Joule e a formulação das leis da termodinâmica, o que pode ajudá-los a entender melhor esses conceitos complexos.

Ao adotar essa perspectiva histórica, os estudantes são expostos a uma narrativa mais completa e humanizada da ciência, onde se destacam os desafios, erros e correções que fazem parte do processo científico. Essa abordagem contribui para desmistificar a ciência como um conjunto de verdades absolutas e imutáveis, apresentando-a como uma atividade humana em constante evolução. Isso é crucial para desenvolver nos alunos uma atitude mais investigativa e menos dogmática, essencial para o progresso científico e tecnológico.

No entanto, a maneira como muitos livros didáticos apresentam a História da Ciência é frequentemente inadequada como aponta Caluzi e Marques (2005),

[...] a história das ciências não é aquela presente em alguns livros didáticos, paradidáticos e até de Ensino Superior, na qual se valoriza um feito científico importante, uma descoberta com “data e hora marcada” que foi prontamente aceita pela comunidade de cientistas da época e que colocou seu descobridor num patamar insubstituível (Caluzi; Marques, 2005, p. 3)

Em confirmação a esse contexto, os resultados da pesquisa de Vidal e Porto (2012) indicam que a história da ciência presente nos livros didáticos tem sido frequentemente apresentada de forma linear e superficial, priorizando nomes e datas, o que não condiz com seu papel no ensino. Além disso, o foco predominante em problemas algorítmicos nos materiais didáticos, bem como em testes, avaliações e exames, contribui para a fragmentação do conhecimento, prejudicando o desenvolvimento de habilidades de pensamento crítico e compreensão conceitual (Lin, 1998).

Dessa forma, o papel dos professores é essencial para mudar esse cenário, pois eles utilizam o livro didático e são frequentemente cobrados pelas instituições de ensino para fazê-lo.

Segundo Porto (2010), o conteúdo de história da ciência encontrado nos livros didáticos nem sempre está alinhado com as recomendações contemporâneas para o ensino de ciências. Em seu trabalho, Pires *et al.* (2019) argumentam que um professor bem capacitado no uso da história da ciência terá melhores condições para avaliar criticamente as informações históricas presentes nos livros didáticos e reafirmar, dentro das relações de poder no ambiente educacional, a necessidade de mudanças nesses materiais. Ele sugere que a proposição de materiais complementares contribuiria para essa mudança, não apenas preenchendo as lacunas na abordagem histórica dos livros didáticos, mas também rompendo com a prática de depender exclusivamente desses livros para o planejamento das aulas.

No presente contexto, foi empreendido o esforço de desenvolver e validar um livro paradidático digital em formato PDF destinado gratuitamente aos professores de Química do Ensino Médio, abrangendo o tema da História da Termodinâmica, desde os precursores da Primeira Lei até as Reações Oscilantes. A elaboração deste material será embasada em uma pesquisa bibliográfica detalhada e cuidadosa, visando não apenas fornecer suporte educacional, mas também promover uma compreensão crítica e reflexiva da ciência através de sua história.

Ao apresentar a ciência como um processo humano dinâmico e evolutivo, a história da ciência pode enriquecer a experiência de aprendizagem, tornando-a mais interessante, relevante e significativa para os alunos. Assim, a inclusão da história da ciência no currículo de Química é uma estratégia valiosa para a formação de estudantes mais bem informados, críticos e engajados.

3.2 A HISTÓRIA DA TERMODINÂMICA

Escrever sobre a história da termodinâmica não é uma tarefa simples. Nas palavras de Girolani (2020), ela é descrita como uma "tapeçaria intrincada". Essa expressão ressalta a complexidade da história da termodinâmica, composta por muitos elementos diferentes que se entrelaçam, formando um tecido denso de descobertas, teorias, experimentos e avanços tecnológicos. Cada fio dessa tapeçaria representa as contribuições individuais de cientistas, o desenvolvimento de conceitos e os avanços experimentais que, juntos, formam a rica e detalhada história da termodinâmica.

Nesta seção, abordaremos o marco inicial da história da termodinâmica que emergiu através de inúmeras contribuições ao longo do tempo sobre os conceitos de matéria, movimento e energia. Durante séculos, esses conceitos permearam as mentes de filósofos e cientistas, como Epicuro, Isaac Newton, Thomas Young, Lavoisier, Boyle e Joseph Black, cujas reflexões e descobertas serviram como base para que os pioneiros no desenvolvimento da termodinâmica.

3.2.1 As primeiras ideias sobre calor

No desenvolvimento histórico da ciência, as concepções sobre calor e fogo desempenharam um papel central na construção do conhecimento químico. Segundo Aurani (2015), as ideias iniciais sobre esses fenômenos foram marcadas por tentativas de compreender questões fundamentais, como a natureza do fogo, o comportamento dos materiais durante a combustão e o papel do ar nesse processo. Essas indagações, conforme a autora, estavam inseridas em uma síntese complexa que sucedeu a tradição alquímica, resultando no surgimento de teorias como o flogístico e, posteriormente, o calórico.

A teoria do flogisto, desenvolvida por Georg Ernst Stahl (1660-1734) e ampliada a partir das ideias de Johann Joachim Becher (1635-1682), foi um marco no desenvolvimento da química no século XVIII. Este conceito propunha a existência de uma substância chamada flogisto nos materiais inflamáveis. De acordo com essa teoria, o flogisto seria liberado durante a queima dos corpos (Filgueiras, 1995; Oliveira; Mendonça, 2019). Quanto mais rico for o material em flogisto, mais ele se inflama até que todo o flogisto fosse desprendido do material (Ramalho; Silva, 2022). Esse conceito, descrito como o "princípio da combustibilidade", imperou nas explicações sobre reações químicas e sua relação com o calor por quase um século, unificando os domínios mineral, vegetal e animal e oferecendo uma explicação global para os processos químicos (Oliva *et al.*, 2020).

Como destaca Soloveichik (1962), a teoria do flogisto dominou o pensamento químico por quase um século, fascinando tanto químicos quanto estudiosos de outras áreas. Essa teoria oferecia explicações para questões até então inexplicáveis, como a aparente perda de massa durante a combustão, a dependência do ar para que o combustível pudesse queimar e a natureza efêmera do processo de combustão.

Um dos principais defensores dessa teoria foi o cientista Joseph Priestley (1733-1804), que, junto a Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), acreditava firmemente que o flogisto era uma substância presente em tudo que fosse inflamável e que seria liberado no ar durante a queima. Ambos, de forma independente e quase concomitante, identificaram um gás responsável por

alimentar a combustão, denominado "ar desflogisticado" ou "ar de fogo". Esse gás é hoje reconhecido como oxigênio, nome dado por Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) e utilizado atualmente (Brito, 2008).

Scheele foi o primeiro a realizar essa descoberta por meio de experimentos envolvendo compostos como óxido de mercúrio, ácido nítrico e nitrato de potássio. No entanto, cometeu o erro de não publicar essa descoberta promissora imediatamente (Oliveira, 2017). Por outro lado, Priestley realizou experimentos semelhantes, aquecendo óxido de mercúrio e obtendo o mesmo resultado, mas publicou suas conclusões em 1774. Apenas três anos depois, Scheele publicou suas observações, mas o atraso fez com que Priestley fosse reconhecido como o principal responsável pela descoberta do oxigênio (Brito, 2008).

A ideia de que o flogisto seria uma substância tangível abriu caminho para medições das massas dos materiais envolvidos em reações químicas, um enfoque iniciado por Joseph Black (1728–1799) e continuado por seus sucessores. Black compartilhava os resultados de seus experimentos com os alunos das Universidades de Glasgow e Edimburgo, onde lecionava, embora tenha publicado pouco sobre seus trabalhos (Brito, 2008). Em seus estudos, ele observou que, durante a transformação do calcário em cal, ocorria uma perda de massa. Essa descoberta levou Black a questionar a validade da teoria do flogisto, evidenciando sua inconsistência.

Nesse contexto, Antoine Lavoisier emerge como figura central ao realizar uma série de experimentos fundamentados em medições meticulosas com o uso da balança (Brito, 2008).

Lavoisier demonstrou que, diferentemente do que postulava o iatroquímico Georg Ernst Stahl, os metais, ao serem queimados, não perdiam massa, mas, ao contrário, ganhavam. Esse aumento de massa ocorreu devido à sua combinação com um gás, posteriormente identificado como oxigênio (Oliveira; Mendonça, 2019). Essa descoberta foi fundamental para refutar a teoria do flogisto e introduzir uma abordagem mais rigorosa e quantitativa no estudo dos fenômenos químicos. Com base nessas evidências, Lavoisier substituiu o conceito de flogisto pela ideia de oxidação, propondo uma explicação mais precisa e fundamentada experimentalmente (Oliva, 2020). Essa inovação marcou o início da Revolução Química, consolidando as bases da química moderna.

Em 1787, Lavoisier contribuiu para a padronização da terminologia científica ao introduzir o termo "calórico" na obra *Méthode de Nomenclature Chimique*. No entanto, a autoria do termo é objeto de debate entre estudiosos: enquanto alguns atribuem sua criação a Lavoisier (Brito, 2008), outros defendem que Joseph Black foi o verdadeiro responsável por introduzi-lo (Pádua, 2009).

Lavoisier concebia o calórico como uma substância responsável pelo calor, interpretando-o como um fluido imponderável (invisível e de massa desprezível) que permeava os corpos e era a causa direta dos fenômenos térmicos. Outros cientistas, como o inglês Gregory, consideravam o calórico como um elemento do fogo, uma matéria associada ao fenômeno do fogo e aos fluidos calóricos. Esta última interpretação foi amplamente aceita, especialmente entre os químicos franceses (Aurani, 2015).

Nesse sentido, a teoria do calor, baseada no conceito de calórico, postulava a existência de um fluido autorrepulsivo e fortemente atraído pela matéria, capaz de penetrar em todos os corpos. Assim, aquecer significava adicionar calórico, enquanto resfriar implicava sua remoção (Aurani, 2015). Essa abordagem fornecia explicações para diversos fenômenos da época, sendo amplamente utilizada como base interpretativa no estudo do calor. No entanto, com as contribuições de Joseph Black e Benjamin Thompson (1753-1814), conhecido como Conde Rumford, surgiram questionamentos que marcaram uma transição importante no entendimento do calor, desafiando os fundamentos da teoria do calórico.

A introdução de instrumentos como o termômetro possibilitou uma análise mais precisa da relação entre calor e temperatura, contribuindo significativamente para a diferenciação desses conceitos por Joseph Black.

Entre suas contribuições mais notáveis, Black propôs o conceito de calor latente ao observar que, durante a fusão do gelo ou a ebulição da água, grandes quantidades de calor são absorvidas sem alteração perceptível de temperatura. Em um experimento, ele observou que o gelo exposto a temperatura ambiente derretia lentamente, mantendo sua temperatura constante até se transformar completamente em líquido. Esses resultados evidenciaram que o calor absorvido era utilizado na mudança de estado físico, e não no aumento da temperatura, reforçando o princípio da conservação do calor (Gomes, 2012). Por outro lado, a teoria do calórico, amplamente aceita na época, não conseguia explicar por que a temperatura permanecia constante durante essas transições, fomentando debates e contribuindo para a evolução do entendimento científico sobre o calor.

Na transição do século XVIII para o XIX, o Conde Rumford desafiou a teoria substancialista do calórico ao realizar experimentos na fabricação de canhões. Ele observou que o calor gerado pelo atrito entre a broca e o canhão era suficiente para ferver água, mesmo sem redução significativa do material metálico ou das propriedades térmicas do sistema (Gomes, 2012).

Na época, acreditava-se que o aquecimento decorria da liberação de "calórico", um fluido hipotético presente no metal, supostamente liberado durante o corte. No entanto,

Rumford percebeu que o calor continuava a ser produzido mesmo quando a broca perdia sua capacidade de corte e deixava de remover fragmentos do metal. Ele cronometrava o tempo necessário para ferver água enquanto a perfuração ocorria submersa e observou que o tempo era o mesmo, independentemente de a broca cortar ou não o material. Rumford argumentou que o calor parecia ser gerado em quantidades ilimitadas, o que não seria compatível com a ideia de uma substância material.

A teoria do calórico não conseguia explicar a variação de temperatura causada pelo atrito e nem a geração infinita de calor. Assim, Rumford concluiu que o calor era, na verdade, uma forma de movimento. Para ele, era impossível retirar completamente o calor de um sistema ou detectar qualquer variação de massa associada a ele. Dessa forma, o calor passou a ser entendido como uma manifestação do movimento das partículas.

Essas descobertas fortaleceram a associação entre calor e movimento ou vibração das partículas. Contudo, mesmo após as evidências empíricas de Rumford, a teoria do calórico continuou sendo defendida por cientistas como Carnot e Kelvin (Passos, 2009).

Uma curiosidade interessante é que o Conde Rumford se uniu a Marie-Anne Paulze, viúva de Antoine Lavoisier, um dos mais destacados defensores da teoria do calórico. A união aconteceu após a execução de Lavoisier durante a Revolução Francesa de 1794 (Chagas; Airolti, 1981).

Em 1843, o físico e químico inglês, James Prescott Joule (1818-1889) afirmou que Rumford estava certo ao atribuir o calor gerado pelo canhão à fricção, e não a alterações nas propriedades do metal (ood, 2019). O reconhecimento da contribuição de Rumford demorou a acontecer devido ao forte apego da comunidade científica à teoria do calórico, que definia o calor como uma substância material. Essa visão, predominante no final do século XVIII e início do XIX, tornava difícil aceitar que o atrito fosse capaz de gerar calor continuamente. Por isso, as ideias de Rumford, embora inovadoras, não foram imediatamente aceitas.

Décadas mais tarde, os experimentos realizados por Joule ajudaram a estabelecer um novo entendimento sobre a natureza do calor. Seu trabalho experimental foi realizado em um contexto em que o conceito de energia começava a ganhar maior clareza e aceitação, contribuindo para solidificar os fundamentos de uma ciência mais moderna e alinhada com as ideias inicialmente propostas por Rumford.

Julius Robert Von Mayer (1814-1878), entre 1842 e 1843, introduziu o conceito de equivalência mecânica entre calor e trabalho, descrevendo ambos como manifestações diferentes de energia que se transformam sem perdas. Hermann Ludwig Helmholtz (1821-1894), por sua vez, rejeitou a ideia de uma “força vital” ao demonstrar que a energia muscular

provinha da transformação da energia química dos alimentos, consolidando o calor como uma forma de energia. Seus estudos, que abarcavam calor, trabalho, eletricidade e magnetismo, trouxeram rigor matemático ao conceito e complementaram as experiências de Joule, que determinou o equivalente mecânico do calor entre 1843 e 1845 (Santolin, 2021). Esses avanços encerraram a era do “calórico” e estabeleceram as bases para a consolidação da Primeira Lei da Termodinâmica como o princípio da conservação da energia, um marco fundamental para a ciência moderna.

À medida que os estudos sobre o calor avançavam, tornava-se evidente a crescente dependência humana desse fenômeno, tanto para impulsionar o desenvolvimento de tecnologias quanto para atender às demandas energéticas da época. O calor não era apenas um recurso prático, mas um catalisador para o progresso, incentivando a busca por combustíveis mais eficientes e o aprimoramento das máquinas térmicas. Esse cenário marcava uma mudança profunda na relação entre ciência e sociedade, em que o domínio do calor se tornava essencial para a inovação industrial.

3.2.2 Contexto histórico e a revolução industrial

A Revolução Industrial teve início na Inglaterra entre 1750 e 1850, marcando uma transição significativa do sistema feudal e agrário para uma economia baseada no capitalismo emergente. Esse período não apenas transformou profundamente os meios de produção e as relações de trabalho, mas também redefiniu as estruturas sociais e econômicas em escala global.

Com o surgimento da indústria e a mecanização dos processos produtivos, ocorreu uma mudança radical na estrutura socioeconômica da Inglaterra. Emergiram duas classes sociais distintas e em conflito: a burguesia, que controlava os meios de produção e acumulava riquezas, e o proletariado, composto por trabalhadores urbanos que forneciam a mão de obra essencial para as fábricas. Essa dicotomia substituiu o antigo sistema feudal, onde a economia rural dependia de vastas propriedades e do trabalho servil dos camponeses sob o domínio dos senhores feudais (Oliveira, 2017).

Aos poucos, esse evento histórico se espalhou por grande parte da Europa, inclusive em regiões ao norte da França. Esse período foi caracterizado por uma ruptura com o sistema de trabalho feudal predominante na Idade Média, e pela adoção de uma produção mais artesanal e doméstica por uma pequena classe média urbana. Em adição, conforme observado por Pascoal (2016), os métodos científicos desenvolvidos durante a Revolução Científica do século XVII começaram a ser aplicados em diversas áreas do conhecimento, o que facilitou a transição de

indústrias artesanais para empresas mecanizadas, impulsionando o desenvolvimento do capitalismo industrial.

No século XVIII, a Inglaterra experimentou um período de prosperidade que transformou radicalmente o cenário social e as relações econômicas e políticas. A Revolução Industrial inglesa proporcionou um ambiente favorável para inovações tecnológicas e avanços científicos, que reformularam os meios de produção e fortaleceram a economia capitalista emergente.

Paralelamente, a França enfrentava a Revolução Francesa, com desafios políticos e militares que dificultavam sua capacidade de acompanhar o ritmo da industrialização inglesa. Apesar desses obstáculos, o país buscava avançar economicamente, politicamente e militarmente. Os esforços para aperfeiçoar as máquinas militares contribuíram significativamente para o desenvolvimento de soluções para problemas relacionados ao calor, um tema amplamente debatido entre cientistas como Stahl, Lavoisier e Joseph Black. Esses esforços focavam inevitavelmente na eficiência das máquinas térmicas.

Inúmeras máquinas térmicas foram desenvolvidas e aperfeiçoadas. O desenvolvimento das máquinas térmicas, impulsionado pela necessidade de melhorar a eficiência das operações industriais e militares, foi um dos marcos mais importantes desse período. A aplicação de princípios científicos na resolução de problemas práticos, como a conversão eficiente de calor em trabalho, exemplifica a integração crescente entre ciência e tecnologia que caracterizou a Revolução Industrial.

Assim, a Revolução Industrial não apenas transformou as estruturas econômicas e sociais da Inglaterra e da Europa, mas também lançou as bases para o avanço contínuo da tecnologia e da ciência. O estudo das máquinas térmicas, por exemplo, levou à formulação da segunda lei da termodinâmica, que se tornou um dos pilares da física moderna. Esse período de intensas mudanças e inovações moldou o mundo moderno, influenciando profundamente as relações de trabalho, a organização social e o desenvolvimento tecnológico.

3.2.3 As máquinas térmicas

A Revolução Industrial foi caracterizada pelo advento das máquinas a vapor, embora algumas delas já existissem antes desse marco histórico. Em 1699, o capitão Savery (1650-1715) foi o primeiro a construir a máquina a vapor e o chamou de "amigo do mineiro" (Ramírez, 1992). Essa máquina operava sob o princípio de vácuo, utilizando a condensação do vapor para extrair a água que inundava as minas. Conforme destacado por Silva e Errobidart (2024), as

inundações decorriam da grande quantidade de água nas jazidas, representando um sério desafio para a sociedade da época. O desenvolvimento dessa técnica permitiu a remoção do excesso de água das minas, viabilizando assim a fonte de energia necessária para manter as indústrias em funcionamento e proporcionar maior segurança aos trabalhadores envolvidos na extração do carvão mineral. Entretanto, consumia muito carvão e corria o perigo de explosões na caldeira em virtude das altas pressões do vapor que se formava.

Nesse contexto, as máquinas a vapor foram se aperfeiçoando. Em 1712, o ferreiro inglês Thomas Newcomen (1663-1729) desenvolveu uma máquina térmica revolucionária, projetada especificamente para operar em minas profundas, minimizando o risco de explosões, como ilustrado na **Figura 1**.

Figura 1. Máquina a vapor de Thomas Newcomen.



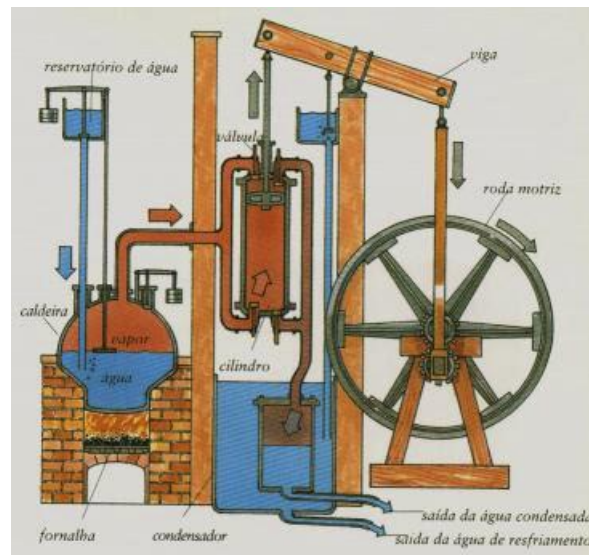
Fonte: Wikipedia (2025).

Além de ser capaz de bombear água para fora das minas, essa inovação também permitiu a elevação de cargas, tornando-se um avanço significativo para a época. A máquina de Newcomen rapidamente ganhou reconhecimento e utilização em toda a Europa ao longo do século XVIII.

Em 1763, um modelo da máquina de Newcomen, utilizado em demonstrações didáticas, apresentou defeitos e precisou de reparos. A tarefa foi atribuída a um jovem talentoso chamado James Watt (1736–1819), que trabalhava em uma oficina da Universidade de Glasgow. Watt mantinha uma relação próxima com alguns professores, atuando na manutenção de instrumentos científicos, na fabricação de aparatos e até mesmo auxiliando em demonstrações durante as aulas (Cavagnoli, 2025). A partir dessa experiência, em 1765, Watt propôs melhorias significativas para a máquina de Newcomen, marcando um importante avanço no desenvolvimento das máquinas térmicas.

Segundo Monroy (2016), Watt realizou meticulosas medições da pressão do vapor em diferentes temperaturas para entender como otimizar sua eficiência. Ele concluiu que separar o processo de expansão do processo de condensação poderia aumentar a eficiência do motor a vapor (Ramírez, 1992). Assim, desenvolveu o conceito de uma máquina de condensação, que incluía um condensador separado para o vapor, permitindo melhor controle e aproveitamento da energia, conforme ilustrado na **Figura 2**.

Figura 2. Máquina a vapor de James Watt.



Fonte: Wikipedia (2025).

A máquina a vapor de Watt não apenas se destacou na fundição e nas minas de carvão, mas também substituiu amplamente as máquinas de Newcomen devido à sua maior eficiência e versatilidade. Consumindo aproximadamente um terço menos de carvão que suas predecessoras, a invenção de Watt é frequentemente associada ao início da Revolução Industrial.

Além disso, James Watt estabeleceu o conceito do cavalo-vapor como unidade de medida para determinar a potência das máquinas. Baseado na capacidade de um cavalo de levantar uma carga específica, Watt definiu um cavalo-vapor como a potência necessária para elevar verticalmente 75 kg a uma velocidade de um metro por segundo.

Os contínuos aperfeiçoamentos no projeto inicial resultaram em novas patentes nos anos de 1781, 1782 e 1784. Essas melhorias garantiram que a máquina a vapor de Watt se tornasse um marco crucial no desenvolvimento industrial da época.

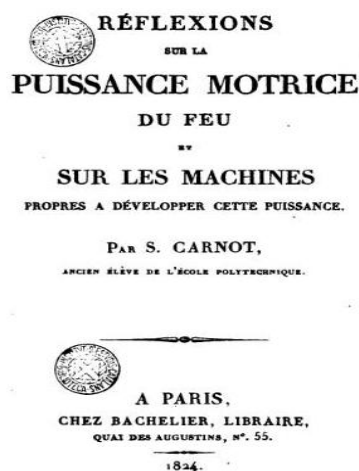
Percebe-se que o desenvolvimento das máquinas a vapor ocorreu principalmente na Inglaterra. Para compreender seu progresso e impacto no desenvolvimento científico, é essencial examinar sua origem prática e a crescente dependência da sociedade em sua eficiência.

De acordo com Sandler e Woodcock (2010), “costuma-se dizer que a termodinâmica deve mais à máquina térmica do que a máquina térmica à termodinâmica”. Empiricamente, os primeiros motores foram projetados para extrair água das minas e desenvolvidos por engenheiros e mecânicos sem nenhum conhecimento prévio sobre termodinâmica. Sem uma base teórica robusta para explicar seu funcionamento e desempenho, esses engenheiros foram incentivados a se tornarem cientistas, buscando explicações teóricas para aprimorar as máquinas.

Nesse contexto, destaca-se o jovem engenheiro militar francês Sadi Carnot (1796-1832), como ilustrado na **Figura 3**. Em 1824, Carnot publicou sua obra seminal intitulada “*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*”, na qual discute temas fundamentais como calor, potência e eficiência dos motores. Sua publicação marcou o início da termodinâmica como ciência moderna (Sandler; Woodcock, 2010).

A necessidade urgente de melhorar o desempenho dessas máquinas motivou cientistas a investigar suas causas e efeitos de maneira mais profunda, culminando no surgimento da termodinâmica como uma ciência consolidada. A ciência não apenas proporcionou entendimento sobre o funcionamento dessas máquinas, mas também influenciou seu aprimoramento, estabelecendo um ciclo de interação entre pesquisa teórica e aplicada. Esse fenômeno ilustra como avanços na compreensão científica promovem inovações práticas e, reciprocamente, como progressos na tecnologia impulsionam o desenvolvimento científico.

Figura 3. Página do livro “*Réflexions sur la puissance motrice du feu*” de Sadi Carnot (à esquerda) e seu autorretrato (à direita).



Nicolas Léonard Sadi Carnot

Fonte: Geopolicraticus (2025).

3.2.4 As reflexões de Sadi Carnot e a expansão dos estudos termodinâmicos

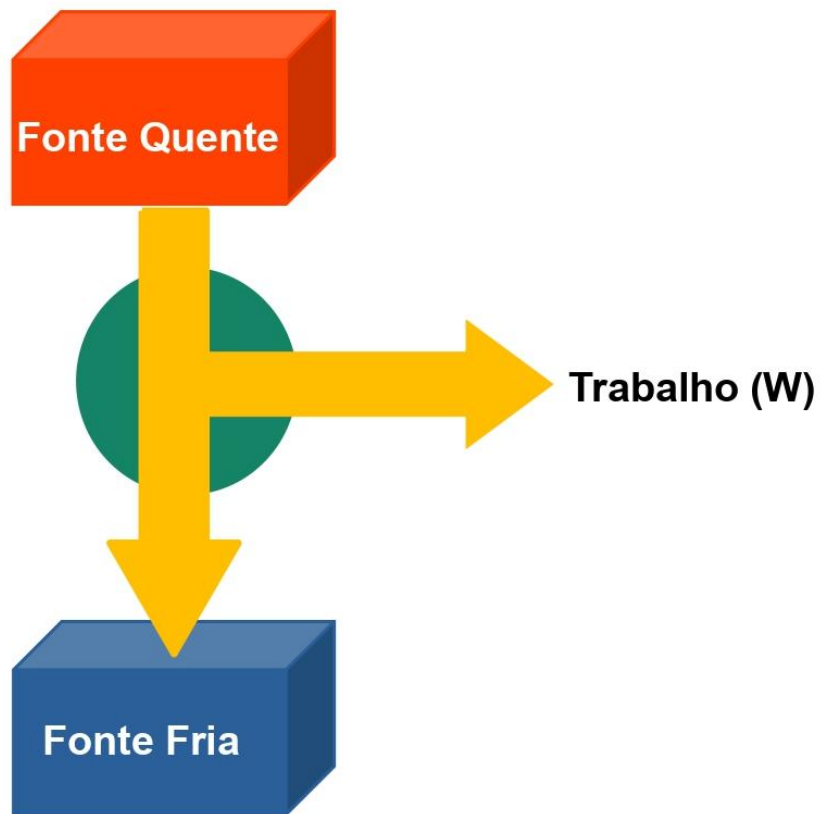
É importante destacar que a França estava em processo de reconstrução após a derrota na Batalha de Waterloo durante as Guerras Napoleônicas, ocorridas entre 1799 e 1815. Nesse cenário, Sadi Carnot, um jovem engenheiro militar francês, ingressou na Escola Polytechnique em 1812. Esta instituição era renomada por abrigar cientistas de destaque com conhecimentos avançados em química e física. Preocupado com o futuro de seu país, Carnot foi motivado a investigar profundamente as máquinas térmicas e entender por que seu desenvolvimento não progredia na França como na Inglaterra. Em 1824, ele publicou, às suas próprias custas, conforme afirma Girolami (2020), o livro "Reflexões sobre a Força Motriz do Fogo e sobre as Máquinas", onde apresentou suas ideias inovadoras sobre a eficiência das máquinas térmicas e os princípios que regem o calor e o trabalho.

De acordo com Ramírez (1992), Carnot analisou a máquina de Newcomen e observou que todas as máquinas térmicas da época compartilhavam certas características fundamentais:

- I) Fonte de calor de alta temperatura: Geralmente uma caldeira onde a água fervente gerava vapor.
- II) Resfriador de calor de baixa temperatura: Normalmente um recipiente de água fria ou o ar atmosférico.
- III) Dispositivo mecânico: Colocado entre as duas fontes, geralmente um pistão conectado a um balancim ou a um sistema de engrenagem planetária, cujo movimento cíclico periódico era utilizado para realizar trabalho.
- IV) Substância funcional: O vapor, necessário para o funcionamento da máquina.

Com essas observações, Carnot descobriu que o vapor ganhava calor ao ser aquecido na caldeira e, ao empurrar o pistão, parte desse calor era transformada em trabalho, enquanto o restante era transferido para o refrigerador. Concluiu que, nas máquinas a vapor, o calor, ao ser transmitido de uma fonte quente (temperatura alta) para uma fonte fria (temperatura baixa), é parcialmente convertido em trabalho como representado na **Figura 4**.

Figura 4. Esquema de uma máquina térmica.

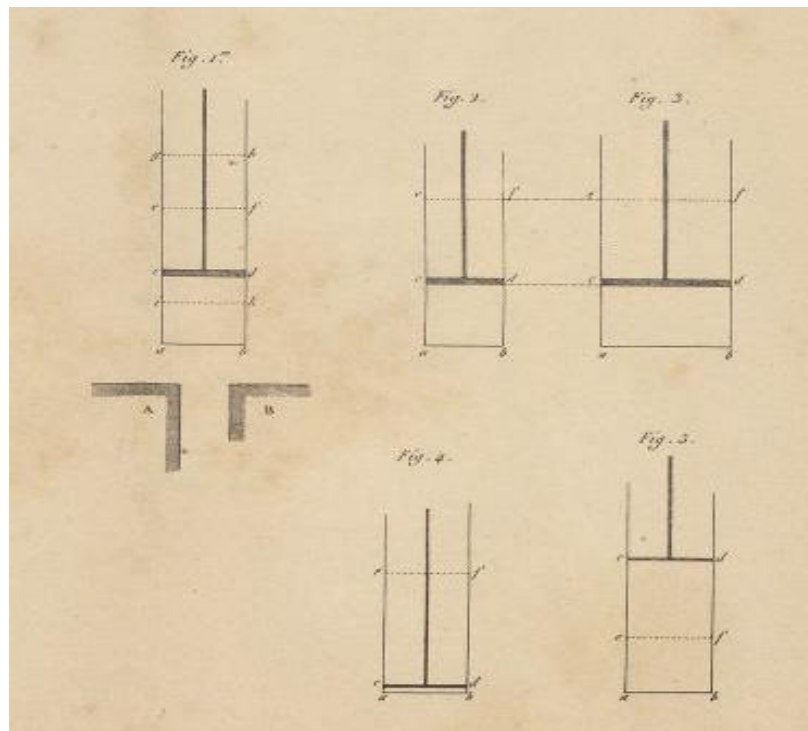


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Desse modo, para qualquer máquina térmica funcionar, é necessário ter uma fonte de calor de alta temperatura e um dissipador de calor de baixa temperatura. Assim, parte do calor sempre será transferida para o dissipador, impossibilitando a conversão total do calor em trabalho.

Particularmente, Carnot descobriu que o desempenho de uma máquina térmica depende da diferença de temperaturas das fontes térmicas entre as quais ela opera. Segundo Girolami (2020), Carnot não apresentou nenhuma fórmula para essa relação e afirmou que os resultados não dependiam da natureza da substância de trabalho (**Figura 5**).

Figura 5. Esboço original de Carnot do seu livro “*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance*” para a operação de uma máquina térmica.



Fonte: Firenze, Biblioteca del Museo Galileo.

Em seus estudos, Carnot questionou qual seria a quantidade máxima de trabalho que poderia ser obtida de uma determinada quantidade de calor fornecida, ou seja, qual seria o desempenho máximo que uma máquina térmica poderia atingir? Como resposta, ele idealizou uma máquina ideal que operasse de forma reversível entre duas fontes de calor a diferentes temperaturas. Essa máquina utilizaria um pistão perfeitamente ajustado e um fluido elástico, como um gás ou líquido, como meio de trabalho. Esse fluido se expandia e se contraía em um processo cíclico de quatro etapas, atualmente conhecido como ciclo de Carnot. Nesse contexto, o fluido serve como meio para converter energia térmica em trabalho mecânico.

Assim, ele demonstrou que nenhum motor térmico poderia ter um desempenho superior ao de sua máquina ideal. Ele enfatizou que uma característica fundamental para alcançar o desempenho máximo é a reversibilidade. Uma máquina reversível é aquela que, ao operar no sentido oposto, retorna, junto com seu entorno, ao seu estado inicial. Em contraste, uma máquina irreversível não consegue retornar às suas condições iniciais ao realizar o trabalho que executou anteriormente. Desse modo, uma máquina reversível realiza mais trabalho e tem um desempenho superior em comparação com uma máquina irreversível.

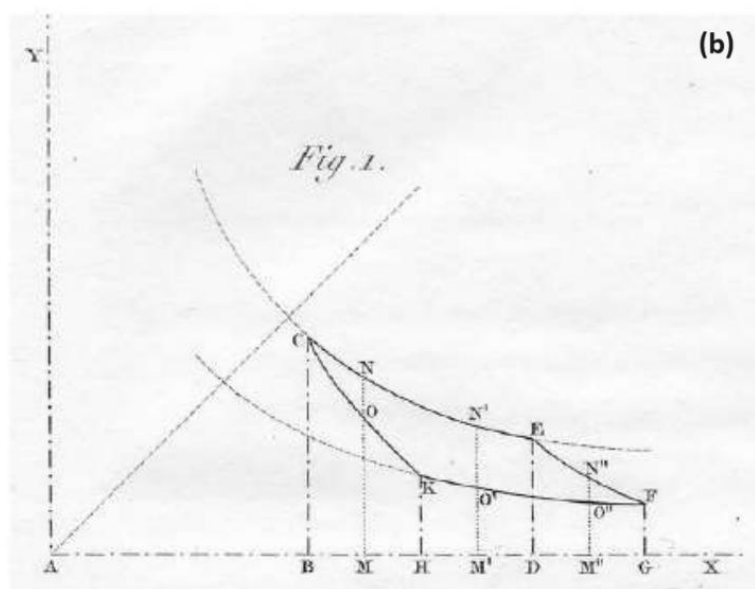
A análise e as conclusões de Carnot marcaram o início da termodinâmica (Sandler; Woodcock, 2010) como uma ciência consolidada e destacaram a interação crucial entre teoria

e prática no desenvolvimento científico e tecnológico. Infelizmente, seu livro teve pouca circulação na época (Ramírez, 1992). Além disso, Carnot não deixou nenhum relato sobre o seu método de cálculo de equivalência (Wisniak, 2008). Girolami (2020), diz que:

Os argumentos de Carnot eram em sua maioria não matemáticos, o que tornava suas ideias menos precisas, mas continham ideias novas e importantes que fundaram a ciência termodinâmica. Seu livro permaneceu desvalorizado durante muitos anos, e na verdade, era tão escasso que muitos cientistas posteriores nunca viram uma cópia (Girolami, 2020, p. 300).

Após uma década da publicação do livro de Sadi Carnot e dois anos após a sua morte, o engenheiro francês Benoît Pierre Émile Clapeyron (1799-1864) trouxe notoriedade ao meio científico com a publicação do seu artigo em 1834, intitulado “*Mémoire sur la Puissance Motrice de la Chaleur*” (Memórias sobre a Força Motriz do Calor). De acordo com Stanley e Woodcock (2010), Clapeyron apresentou o trabalho de Carnot de uma forma gráfica mais acessível e analítica, mostrando o ciclo de Carnot como uma curva fechada em um gráfico de pressão contra volume, conforme ilustrado na **Figura 6**.

Figura 6. (a) Émile Clapeyron e (b) o primeiro gráfico PV de um ciclo termodinâmico, da publicação do artigo de Clapeyron de 1834 (à direita).



Fonte: (a) Wikipédia e (b) artigo do *Journal of chemical & engineering data*.

Em 1843, Clapeyron desenvolveu ainda mais a ideia de processo reversível, já sugerida por Carnot, e fez uma declaração definitiva do princípio de Carnot, que é a primeira versão da 2ª Lei da Termodinâmica (Stanley; Woodcock, 2010).

É interessante notar que esse avanço ocorreu antes mesmo do desenvolvimento formal da Primeira Lei da Termodinâmica, o que demonstra que a história da termodinâmica não seguiu uma ordem linear de descobertas. Para muitos, a história da ciência obedece a um padrão linear, mas a evolução da termodinâmica nos permite desmistificar essa ideia equivocada.

Neste ponto, faremos uma pausa nesse relato histórico para considerar os preceitos que envolvem a Primeira Lei da Termodinâmica. Posteriormente, seguiremos com o desenvolvimento da Segunda Lei, inserindo novos conceitos que foram fundamentais para a consolidação da termodinâmica como ciência.

3.2.5 A primeira Lei da Termodinâmica e a contribuição brilhante de Helmholtz

A Primeira Lei da Termodinâmica, conhecida também como Lei da Conservação da Energia, é um princípio fundamental que estabelece a conservação da energia em um sistema isolado. Embora vários cientistas tenham deduzido essa conservação em suas análises, as incertezas conceituais sobre calor, energia e temperatura por vezes obscureciam essa conclusão óbvia.

Julius Robert Mayer (1814-1878) e James Prescott Joule são figuras centrais na história da Primeira Lei. Mayer foi o primeiro a enunciar o princípio da conservação de energia, enquanto Joule, por meio de meticulosa pesquisa experimental sobre o "equivalente mecânico do calor", fundamentou empiricamente essa lei (Sandler; Woodcock, 2010).

Em 1842, Julius Robert Mayer calculou pela primeira vez o equivalente mecânico do calor, em um papel ondulado à mão. O equivalente mecânico do calor compreende a quantidade de trabalho que pode ser obtida a partir de uma determinada quantidade de calor, ou vice-versa. Mayer forneceu uma derivação, apenas um número. Embora algumas fontes afirmem que este trabalho continha a Primeira Lei da Termodinâmica, isso não é verdade. Mayer mencionou que a energia (que ele chamou de "força") podia ser convertida em outras formas, mas isso não é o mesmo que a lei da conservação (Girolami, 2020).

O trabalho seguinte de Mayer, publicado em 1845 e intitulado “Movimento Orgânico em Conexão com a Nutrição”, apresentava uma compreensão muito melhor da física, mas foi rejeitado e ele decidiu publicar por conta própria. Nesse trabalho, Mayer considerou que o trabalho e o calor são formas diferentes de "força", que podem ser convertidas em outras formas, mas não destruídas (Girolami, 2020). A aceitação de Mayer como um dos colaboradores da conservação de energia não foi tão simples. Os fatos de não ser físico de carreira, ter comportamentos considerados excêntricos na época e ser extremamente rebuscado na sua

escrita dificultaram o processo. Mayer sofreu depressão, chegou a ser internado e banido da profissão de médico e só posteriormente foi reconhecido, ainda em vida, pelo seu trabalho (Santos, 2009).

Em 1847, o cervejeiro e físico inglês, James Prescott Joule (1818-1898), consegue resolver satisfatoriamente o problema do calor ao demonstrar experimentalmente a transformação da energia mecânica em calor. Com isso, estabeleceu o princípio da conservação da energia e a equivalência mecânica do calor. Com as teorias da conservação da quantidade de movimento e da conservação da massa, Joule contribuiu decisivamente para o estabelecimento da lei da conservação da energia, conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica.

Em 1848, Joule avançou mais ainda em suas pesquisas, com a publicação de um estudo sobre a teoria cinética dos gases. Neste trabalho, ele calculou a “velocidade das moléculas que constituem os gases e concluiu que a energia térmica de um gás é, na verdade, a energia de movimento (energia cinética) de suas moléculas” (Santos, 2009, p. 82).

De acordo com Sandler e Woodcock (2010), tanto o cervejeiro James Prescott Joule quanto o médico Julius Robert Mayer não eram particularmente eruditos. Foi o jovem acadêmico Helmholtz quem organizou suas descobertas e as apresentou de forma clara e inteligível à comunidade científica. Em 1847, ele decidiu publicar as descobertas de Mayer e Joule em um livro. No entanto, assim como Mayer em 1845, sua obra foi inicialmente rejeitada devido ao seu caráter não experimental. Helmholtz baseou sua derivação da conservação de energia na impossibilidade do movimento perpétuo e no modelo newtoniano das forças. Ele foi além de apenas articular os princípios de conservação; mostrou também como aplicar esses princípios a fenômenos reais. No conjunto, o livro de Helmholtz proporcionou a primeira declaração abrangente da Primeira Lei da Termodinâmica, afirmando que todas as formas de energia, como calor, luz, eletricidade e fenômenos químicos, podem ser transformadas umas nas outras, mas são indestrutíveis e não podem ser criadas (Girolami, 2020).

Entretanto, ressaltamos que essa formulação não foi contribuição exclusiva de Helmholtz, mas sim o resultado de uma construção coletiva envolvendo diversos cientistas. Alguns desses cientistas foram: Mayer, Joule, Colding entre outros. A história da Termodinâmica é marcada por características distintas que evidenciam sua importância na construção do conhecimento científico, intimamente ligado ao fortalecimento do trabalho coletivo e aos diversos contextos históricos, sociais, culturais, políticos e econômicos.

A Primeira Lei da Termodinâmica, com seu princípio de conservação de energia, estabeleceu um fundamento inabalável para a física moderna, demonstrando que, apesar das complexidades e diversidades dos fenômenos energéticos, há uma constância subjacente que

permeia todo o universo físico. A contínua aplicação e adaptação desses princípios em diversas áreas científicas e tecnológicas continuam a moldar o nosso entendimento e a abrir caminhos para novas descobertas e inovações no futuro.

3.2.6 A Segunda Lei da Termodinâmica e a entropia de Clausius

Retomando nossa narrativa, voltamos ao ano de 1834, quando Clapeyron proporcionou o devido reconhecimento a Sadi Carnot por meio da publicação de seu artigo detalhando os princípios essenciais das máquinas térmicas. Esse momento não apenas consagrou Carnot como um pioneiro na compreensão do funcionamento dos motores a vapor, mas também estabeleceu bases cruciais para o entendimento posterior da eficiência e limitações desses sistemas.

Conforme Girolami (2020), a Segunda Lei da Termodinâmica é atribuída a dois físicos, um de origem alemã e outro, irlandês, que trabalharam de forma independente: Rudolf Clausius (1823-1888) e William Thomson, conhecido como Lord Kelvin (1824-1907).

Inicialmente, as ideias de Carnot foram revisadas e expandidas por Clausius e Lord Kelvin, que propuseram correções significativas em seu trabalho original.

Em 1845, William Thomson concluiu sua graduação e começou a estagiar na França no laboratório do físico-químico Henri Regnault. Nesse período, trocou várias correspondências com o seu irmão James Thomson sobre o poder do fogo de gerar movimento.

Em 1847, Thomson participa de uma reunião anual da Associação Britânica para o Avanço da Ciência em Oxford e fica encantado com a apresentação de James Prescott Joule com a qual mantém contato por correspondência (Passos, 2009). Influenciado pelas ideias de Joule de que o calor e o trabalho se convertem um no outro, Thomson passou a questionar o pensamento de Carnot.

Em 1850, Clausius rejeitou a ideia de que o calor fosse substância em sua obra intitulada "*Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen*" (Sobre a força motriz do calor e as leis que podem ser derivadas dela para a própria teoria do calor). Para ele, o calor consiste em “um movimento das menores partes dos corpos.” Neste mesmo trabalho, afirmou que Carnot estava certo ao considerar a produção de trabalho como resultado da transferência de calor de uma fonte quente para uma fonte fria, mas estava errado em afirmar que todo o calor era transferido de uma fonte para outra. Parte do calor era transformado em trabalho, como afirmava Joule, e apenas o restante era transportado para a fonte de temperatura mais baixa. Clausius mencionou os experimentos de Joule e citou o cálculo do equivalente mecânico do calor realizado por Mayer

(Sandler; Woodcock, 2010). Foi neste artigo que pela primeira vez se nomeou a equivalência entre calor e energia mecânica como Primeira Lei da Termodinâmica, e onde a impossibilidade de o calor fluir de um corpo mais frio para um mais quente foi estabelecida como Segunda Lei da Termodinâmica (Girolami, 2020).

No mesmo ano (1850), Thomson formulou a Segunda Lei da Termodinâmica de maneira equivalente à de Clausius, afirmando: “É impossível obter trabalho mecânico de um sistema resfriando-o abaixo da temperatura de seu entorno mais frio.” Em outras palavras, não se pode extrair energia útil simplesmente transferindo calor de um corpo frio para outro ainda mais frio, sem um aporte externo de energia.

Em 1851, William Thomson descreve em seu artigo intitulado "Teoria Dinâmica do Calor" sua formulação da Segunda Lei, baseando-se nos resultados experimentais de Joule e nas observações de Regnault sobre o vapor. Ele enfatizou que o calor não é uma substância, mas sim um estado de movimento (Girolami, 2020). Além disso, Thomson abordou a irreversibilidade dos processos termodinâmicos, em que parte do calor se transforma em uma forma de energia que não pode ser recuperada, dissipando-se na energia cinética das partículas. Esta irreversibilidade resultante da perda energética, segundo ele, está intimamente ligada à direção do fluxo de calor. Na sua opinião, a indestrutibilidade da energia (1ª lei) e a dissipação energética (2ª lei) são compatíveis em virtude de que a energia dissipada não é destruída, mas simplesmente irrecuperável.

A compatibilidade entre as duas leis reside no entendimento de que, enquanto a energia total é conservada conforme postulado pela Primeira Lei da Termodinâmica, a capacidade de realizar trabalho útil diminui devido ao aumento da entropia, conceito introduzido por Clausius em 1865. A energia dissipada se transforma em calor ou outras formas de energia que se distribuem de maneira mais aleatória e menos organizada, tornando-se irrecuperável para a realização de trabalho útil. No entanto, essa energia dissipada permanece dentro do sistema, conforme o princípio de conservação de energia.

De acordo com Sandles e Woodcock (2010), Clausius fez uma simples observação de que a razão entre a entrada de calor e o calor rejeitado era consistentemente igual à razão entre a temperatura da fonte de calor e o dissipador de calor. Com isso, ele descobre a extensa propriedade termodinâmica de Carnot, que mais tarde chamou de “entropia”. A expressão “entropia”, segundo Clausius, lembra “energia” e deriva da palavra grega para “transformação” (ἔντροπη) (Souza; Diaz; Santos, 2013).

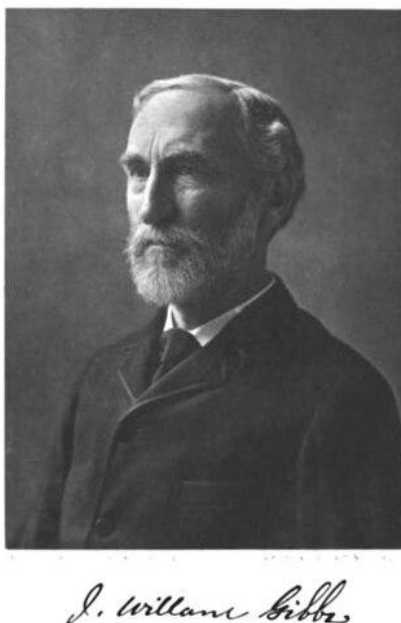
Em 1865, Clausius introduziu o termo "entropia" para representar uma quantidade termodinâmica que ele havia anteriormente descrito como o valor de equivalência ou conteúdo transformacional de um corpo.

A relação entre calor e temperatura possui características de propriedade, pois não se altera em um ciclo, mas também está associada à transferência de calor como uma função de caminho. Clausius termina seu artigo com a famosa afirmação que reflete a aplicação mais ampla possível das leis da termodinâmica: “A energia do universo é constante” (Primeira Lei), “e a entropia do universo tende ao máximo” (Segunda Lei) (Fontana; Santos, 2016).

A formulação de Clausius abrangia todos os processos, mas a importância de seu trabalho residia na definição de entropia como a razão entre dois parâmetros macroscópicos: o calor e a temperatura absoluta. A entropia, como uma função de estado, representou um salto significativo no entendimento da termodinâmica. Este conceito permitiu a Josiah Willard Gibbs (1839-1903) desenvolver princípios universais aplicáveis a todos os processos físicos, químicos e eletroquímicos do universo, fundamentando-os nas leis básicas de calor e trabalho (Sandler; Woodcock, 2010).

Willard Gibbs, **Figura 7**, é amplamente reconhecido como uma das mentes mais brilhantes da história da ciência, especialmente nas áreas de termodinâmica e mecânica estatística. Em seu artigo, Girolami (2020) destaca que o renomado cientista Wilhelm Ostwald (1853-1932), autor da Lei de Diluição, referiu-se a Gibbs como “sem dúvida o maior gênio científico que os Estados Unidos produziram”. No entanto, de forma curiosa, Gibbs nunca recebeu o devido reconhecimento em seu próprio país. Sua notoriedade, de fato, surgiu em outros locais, como na França, Inglaterra, Holanda, Alemanha e Noruega, onde suas contribuições foram amplamente valorizadas (Rosen, 1983). Sua notável capacidade de aplicar, de maneira pioneira, os conceitos termodinâmicos tanto à química quanto à física estabeleceu conexões profundas entre essas disciplinas, deixando um legado que influenciou e continua a influenciar gerações de pesquisadores.

Figura 7. Josiah Willard Gibbs (1839–1903), físico e químico norte-americano considerado um dos fundadores da termodinâmica estatística e da físico-química. Sua assinatura aparece abaixo da fotografia.



Fonte: Wikipédia (2025).

Em 1873, Gibbs publicou o artigo intitulado “Um Método de Representação Geométrica das Propriedades Termodinâmicas de Substâncias por Meio de Superfícies”, no qual apresentou pela primeira vez a energia de Gibbs. Ele demonstrou que um sistema atinge o equilíbrio em condições de temperatura (T) e pressão (P) constantes quando a quantidade $U - TS + PV$ (onde U é a energia interna, S é a entropia e V é o volume), atinge seu valor mínimo. Esta equação descreve o comportamento termodinâmico de um sistema em equilíbrio, relacionando a energia interna do sistema à entropia e ao volume. Além disso, Gibbs utilizou diagramas tridimensionais de entropia, energia e volume para ilustrar como essas superfícies podem ser aplicadas na análise da coexistência e das estabilidades relativas das fases gasosa, líquida e sólida de uma substância pura sob diferentes condições de temperatura e pressão (Girolami, 2020). Com essa abordagem inovadora, ele expandiu a visão da termodinâmica, incorporando fenômenos químicos e elásticos à discussão sobre o equilíbrio.

Gibbs desempenhou um papel fundamental na evolução do conceito de desordem associado à entropia, um conceito que ainda gerava ambiguidades no período. A Primeira Lei da Termodinâmica, proposta por Rudolf Clausius e outros, estabelecia que a energia não se perde nem se cria, mas apenas se transforma, sem fazer referência à desordem. A termodinâmica, nesse momento, estava focada nas trocas de calor e trabalho entre os sistemas,

com ênfase na conservação de energia. Foi a Segunda Lei da Termodinâmica, introduzida por Clausius, que deu origem ao conceito de entropia como uma medida do "desperdício" de energia nos processos irreversíveis, o que foi inicialmente associado ao aumento da desordem nos sistemas (Sandles; Woodcock, 2010). Embora a relação entre entropia e desordem ainda não fosse totalmente clara, a Segunda Lei indicava que os sistemas tendem a atingir estados de maior desorganização, como evidenciado no exemplo de um gás se expandindo em um recipiente.

A interpretação da entropia como uma medida de desordem foi consolidada nos trabalhos de Gibbs, especialmente ao aplicar conceitos da mecânica estatística. Enquanto a física clássica já discutia a equivalência entre calor e trabalho, Gibbs foi pioneiro ao aplicar essas ideias à estabilidade dos sistemas em equilíbrio, considerando a energia como uma função de múltiplas variáveis. Sua contribuição à mecânica estatística trouxe o conceito de "*ensemble*", uma distribuição de sistemas no espaço de fase que refletia o comportamento médio de um sistema físico, o que consolidou ainda mais a conexão entre as leis da termodinâmica e a mecânica estatística. Essa abordagem reforçou a visão de que a entropia está diretamente ligada à desordem, pois os sistemas em equilíbrio tendem a maximizar a entropia, aproximando-se de um estado de maior desagregação e maior desordem.

Seu trabalho sobre o equilíbrio das substâncias heterogêneas (1876) é considerado uma obra-prima e foi extremamente relevante para o avanço da físico-química. A importância dessa obra histórica de 320 páginas foi amplamente reconhecida fora dos Estados Unidos, especialmente por cientistas como Ostwald e Le Chatelier, que se encarregaram de traduzir seus artigos para o alemão e o francês, respectivamente, tornando suas ideias acessíveis a um público mais amplo (Oesper, 1955). A tradução dessas obras fundamentais ajudou a consolidar a influência de Gibbs na comunidade científica global, permitindo que suas descobertas, inicialmente publicadas em uma revista obscura, se espalhassem para além das fronteiras dos Estados Unidos e ganhassem reconhecimento internacional, especialmente na Europa.

As leis da termodinâmica não são meros postulados científicos, mas sim pilares fundamentais que governam a transformação e utilização da energia em todos os processos naturais e tecnológicos. A Primeira Lei garante a conservação da energia, enquanto a Segunda Lei, com seu princípio da entropia, revela a direção irreversível dos eventos termodinâmicos. Esses princípios não apenas delimitam os limites do trabalho útil que podemos extrair de uma fonte de energia, mas também nos lembram da complexidade e da ordem implícita nos fenômenos naturais.

3.2.7 A contribuição de Boltzmann à irreversibilidade na Termodinâmica Estatística

A termodinâmica é uma ciência que descreve os fenômenos macroscópicos dos sistemas em equilíbrio por meio de suas leis fundamentais. Dentre elas, a segunda lei da termodinâmica postula a irreversibilidade dos processos naturais, um conceito essencial para a compreensão da dissipação de energia. No entanto, a busca por uma explicação microscópica para essa irreversibilidade levou ao desenvolvimento da mecânica estatística, que correlaciona as propriedades termodinâmicas dos sistemas às leis dinâmicas do micromundo.

Os fundamentos dessa interpretação estatística foram lançados por James C. Maxwell (1831-1879) em 1860, ao desenvolver a distribuição das velocidades das moléculas de um gás. Posteriormente, em 1871, Maxwell publicou a obra "Teoria do Calor", destinada tanto a estudantes quanto a leigos interessados no tema. Esse trabalho não apenas proporcionou uma introdução acessível ao estudo da termodinâmica, mas também introduziu conceitos científicos inovadores (Girolami, 2020).

Segundo Souza, Dias e Santos (2013), Maxwell argumentou, ainda no século XIX, que a segunda lei da termodinâmica possui um caráter estatístico. Em 1872, essa perspectiva foi formalmente consolidada por Ludwig Boltzmann (1844-1906), **Figura 8**, físico austríaco que se destacou por suas contribuições à mecânica estatística. Conforme Thirring (1952), Boltzmann era um jovem brilhante, conhecido por seu temperamento forte e sua persistência em ideias inovadoras. Ele é reconhecido como um dos pensadores mais influentes da Áustria.

Figura 8. Ludwig Boltzmann aos 24 anos de idade (1869).



Fonte: Wikimedia (2025).

Decidido a considerar a segunda lei da termodinâmica sob a ótica da teoria das probabilidades, Boltzmann propôs interpretar esse princípio com base nas leis da mecânica, aplicado a um grande número de partículas. Essa abordagem o colocou em oposição a grandes

cientistas da época, como Ostwald — criador da lei de diluição dos ácidos e do conceito de mol (Lourenço; Marcondes, 2003) — que se tornaria seu maior rival científico. As ideias de Boltzmann, no entanto, só foram amplamente aceitas com o desenvolvimento da mecânica quântica em 1900, por Max Planck. Vale destacar que a ideia de energia quantizada não teve origem em Planck, mas em Boltzmann, que foi revelada por meio de correspondência, na qual sugeria a Planck tratar o problema da radiação do corpo negro com o método estatístico. Embora Planck não tenha sido inicialmente favorável a essa abordagem, ele acabou aceitando as sugestões de Boltzmann três anos depois. Esse mesmo conceito, posteriormente, seria fundamental para tornar Planck famoso. Boltzmann, por sua vez, já utilizava esse método para estabelecer, em 1872, seu famoso teorema H (Hertz, 2004).

Nesse contexto, dentre os trabalhos mais relevantes de Boltzmann, destaca-se o teorema H, que descreve como as velocidades das moléculas de um gás ideal se distribuem e associam a letra H a uma grandeza relacionada à entropia. Para visualizar esse conceito, imagine um balão cheio de gás. Dentro dele, existem trilhões de moléculas em movimento caótico, colidindo umas com as outras e com as paredes do balão. Algumas moléculas se movem rapidamente, outras mais lentamente, e essa distribuição de velocidades pode ser descrita matematicamente.

Para compreender melhor essa ideia, é essencial introduzir o conceito de microestados. Podemos ilustrá-lo com uma analogia do cotidiano: o comportamento dos alunos no intervalo da escola. Antes do sinal tocar, todos estão organizados dentro das salas de aula, sentados em seus lugares. Esse é um estado de baixa entropia, pois há poucas maneiras diferentes de organizar os alunos dessa forma (ou seja, poucos microestados possíveis).

No entanto, assim que o intervalo começa, os alunos saem e se espalham pelo pátio, corredores, cantina e quadra. Agora, há inúmeras maneiras diferentes de distribuir os alunos pela escola, caracterizando um estado de alta entropia. Assim como acontece com as moléculas de um gás, a tendência natural é que os alunos se espalhem aleatoriamente pelo ambiente disponível.

Esse comportamento exemplifica um princípio fundamental da termodinâmica: os processos naturais tendem a ocorrer na direção do aumento da entropia. De acordo com Reis, Bono e Bassi (2012), Boltzmann demonstrou que quanto maior o número de microestados correspondentes a um estado, maior a probabilidade desse estado ocorrer.

O mesmo raciocínio se aplica ao gás no balão. Há inúmeras maneiras de distribuir as moléculas dentro do espaço, mas a grande maioria dessas configurações resulta em um gás uniformemente espalhado. Por outro lado, a chance de todas as moléculas se agruparem

espontaneamente em um canto do balão é extremamente pequena – embora seja possível, a quantidade de microestados que permitiriam isso é insignificante em comparação com os microestados que resultaram na distribuição uniforme. Isso explica por que um gás sempre tende a se espalhar em um recipiente: a distribuição uniforme é simplesmente a mais provável.

Esse mesmo princípio pode ser aplicado às mudanças químicas. Considere, por exemplo, a dissolução de açúcar em água. Quando um cubo de açúcar é colocado em um copo d'água, suas moléculas comumente se espalham até ficarem distribuídas uniformemente. No início, o açúcar está concentrado em um único ponto, o que representa poucos microestados possíveis. À medida que ele se dissolve, surgem muito mais maneiras das moléculas se distribuírem na água, tornando essa configuração muito mais provável.

Essa ideia levou Boltzmann a uma conclusão fundamental: a irreversibilidade dos processos naturais não é uma regra fixa, mas sim uma questão de probabilidade. Embora seja teoricamente possível que todas as moléculas de açúcar se agrupem espontaneamente para formar um cubo novamente dentro da água, a chance disso ocorrer é tão pequena que, na prática, nunca observamos esse efeito. Por isso, a segunda lei da termodinâmica, que afirma que a entropia sempre aumenta, pode ser entendida como uma regra estatística. Para sistemas grandes, como um balão cheio de gás ou um copo de água com açúcar, os números envolvidos são tão gigantescos que essa tendência se manifesta como se fosse uma lei absoluta.

Segundo Ben-Naim (2012), a definição original de entropia, baseada na relação entre calor e temperatura, não oferecia uma interpretação molecular. Foi apenas em 1877 que Boltzmann sugeriu uma nova abordagem, vinculando a entropia ao número de microestados disponíveis para um sistema.

No entanto, essa formulação não foi aceita sem questionamentos. Após sua publicação, o teorema H enfrentou duas severas e significativas críticas (Gatti, 2016). A primeira, conhecida como Paradoxo da Reversibilidade (*Umkehrwand*), foi apresentada por Johann Josef Loschmidt (1821-1895) em 1877. Loschmidt argumentava que era impossível deduzir a irreversibilidade a partir das leis mecânicas, que são reversíveis. Para ilustrar seu ponto, propôs um experimento mental em que, ao inverter as velocidades de todas as partículas de um gás em um estado final (f), elas retornariam ao estado inicial (i), contradizendo a segunda lei. Em resposta, Boltzmann admitiu a coerência lógica do argumento, mas enfatizou que, na prática, a inversão de velocidades em um sistema com um número gigantesco de moléculas seria extremamente improvável, reforçando o caráter probabilístico da segunda lei (Dahmen, 2006).

A segunda crítica, conhecida como *Wiederkehrwand*, surgiu em 1896 e foi formulada pelo matemático alemão Ernest Zermelo (1871-1953). Baseando-se no teorema da recorrência de Poincaré, Zermelo argumentou que sistemas mecânicos sujeitos a forças conservativas retornariam, em algum momento, a estados próximos ao seu estado inicial, o que parecia contradizer a irreversibilidade da segunda lei. Boltzmann respondeu de maneira incisiva, destacando que, embora matematicamente correto, o tempo necessário para essa recorrência ocorrer seria imensamente maior do que a idade do Universo, tornando tal reversão irrelevante na prática. Ele reafirmou que improbabilidade não deve ser confundida com impossibilidade e que a segunda lei deve ser compreendida sob uma ótica estatística (Dahmen, 2006).

Com respostas afiadas e fundamentadas em seus princípios, Boltzmann triunfou brilhantemente sobre as críticas, consolidando a ideia de que a segunda lei da termodinâmica deve ser compreendida como uma lei estatística. De acordo com Dias (1994), ele demonstrou que reversões completas de entropia, embora teoricamente possíveis, são tão improváveis que podem ser desconsideradas em sistemas macroscópicos. Seria como encontrar um peixe no deserto do Saara, ou seja, um evento tão raro que, na prática, pode ser considerado desprezível em sistemas macroscópicos.

Nesse sentido, Boltzmann fortaleceu a visão probabilística da entropia, definindo-a como uma medida da multiplicidade de microestados correspondente a um estado macroscópico e estabelecendo, assim, as bases da termodinâmica moderna. A interpretação molecular da entropia levou Boltzmann a empregar termos como desordem e probabilidade quase como simultâneas, relacionando ambos ao número de microestados. De fato, quanto maior o número de microestados, maior a desordem e, conseqüentemente, maior a probabilidade do estado.

Esse conceito de "desordem molecular", essencial na termodinâmica estatística, está diretamente relacionado ao postulado do número de colisões (*Stosszahlansatz*). Esse postulado assume que as colisões entre moléculas ocorrem sem correlação prévia entre suas velocidades, garantindo, assim, a aplicabilidade do teorema. H. Em sua tese, Gatti (2016) enfatiza que essa hipótese é fundamental para a derivação da descoberta de Boltzmann, que expressa a entropia de forma estatística, fornecendo uma compreensão mais profunda dos processos irreversíveis.

Posteriormente, Ilya Prigogine (1917-2003) ampliou essa perspectiva, propondo que a irreversibilidade é uma característica intrínseca dos sistemas físicos, não apenas uma consequência estatística. Ele argumentou que moléculas individuais possuem instabilidade própria, o que reforça a irreversibilidade mesmo em nível nanoscópico.

Nesse sentido, a produção de entropia, inevitável em qualquer processo natural, também está relacionada à irreversibilidade temporal. A inequação $\Delta S \geq 0$ reflete essa assimetria, pois indica que a entropia sempre aumenta na direção do tempo. Embora a variável t não apareça explicitamente na equação, a assimetria temporal está implícita na desigualdade. Essa ideia se aplica a diversos fenômenos, como a expansão de um gás em um recipiente, onde a probabilidade de as moléculas se distribuírem aleatoriamente é muito maior do que a de se concentrarem em uma única região (Yin, 2016).

Ludwig Boltzmann percebeu essa relação entre a continuidade macroscópica e a microestrutura descontínua dos sistemas, formulando a famosa equação 1.

$$S = k \ln \omega \quad (\text{Equação 1})$$

Onde ω representa o número de microestados associados a um macroestado específico. Essa equação, que está gravada em sua lápide (Yin, 2016), sintetiza a conexão entre a entropia macroscópica e a estrutura microscópica dos sistemas. No entanto, também gerou um paradoxo: a equação foi derivada a partir das leis reversíveis da mecânica clássica, como discutido anteriormente, mas resulta na irreversibilidade dos processos macroscópicos.

Apesar de sua imensa contribuição para a física moderna, Boltzmann enfrentou forte oposição acadêmica e pessoal ao longo de sua carreira. Em 5 de setembro de 1906, Ludwig Boltzmann (**Figura 9**) cometeu suicídio, deixando uma lacuna significativa na comunidade científica. De acordo com Dahmen (2006), seus últimos anos de vida foram marcados por um quadro de saúde debilitado, agravado pelo ritmo intenso de trabalho e pelas exaustivas viagens aos Estados Unidos.

Figura 9. Túmulo de Ludwig Boltzmann em Viena com sua famosa equação ($S = k \cdot \log W$).



Fonte: Wikipédia (2025)

Pereira *et al.* (2021) chamam a atenção para um aspecto curioso das controvérsias na história da ciência, destacando o impacto negativo que a postura de Ostwald teve sobre sua confiança científica. Essa atitude, segundo alguns, gerou uma associação indireta entre ele e o trágico suicídio de Boltzmann. No entanto, como os autores ressaltam, esse mito, embora amplamente difundido em discursos anedóticos e textos históricos, não encontra respaldo em fontes confiáveis.

3.2.8 A Termodinâmica fora do equilíbrio

A termodinâmica é uma das teorias mais robustas da matéria, conforme destacado por Kapral (2008), pois descreve com precisão os sistemas macroscópicos em equilíbrio por meio de leis fenomenológicas bem condicionais. Essas teorias oferecem uma compreensão aprofundada das especificações de equilíbrio. No entanto, conforme apontado por Rastogi, Srivastava e Singh (1993), no contexto dos processos naturais, o equilíbrio é a exceção, não a regra. Exemplos típicos de características fora do equilíbrio incluem sistemas vivos e processos biológicos, nos quais a manutenção da organização depende de fluxos contínuos de energia e matéria.

Para abordar tais sistemas, surgiu a termodinâmica irreversível, expandindo os princípios da termodinâmica clássica ao investigar o comportamento de sistemas que operam longe do equilíbrio (Wei, 1966). Essa necessidade de ampliação decorre do fato de que, embora o conceito de equilíbrio seja central na termodinâmica, sua abordagem clássica é essencialmente termostática, externa para a caracterização dos estados finais de um processo (estados estacionários). Assim, torna-se imprescindível expandir uma análise para além do equilíbrio, explorando os processos irreversíveis.

Essa transição, no entanto, costuma começar pelo estudo de sistemas próximos ao equilíbrio, nos quais a termodinâmica linear desempenha um papel crucial ao estabelecer a relação entre as forças motrizes e os fluxos envolvidos nesses processos (Yin, 2016).

A termodinâmica fora do equilíbrio, também chamada de termodinâmica dos processos irreversíveis, aborda estados e processos que não estão em equilíbrio, com ênfase nas trocas de energia ou no fluxo de calor entre o sistema e o ambiente externo. Isso ocorre tanto em sistemas fechados quanto abertos. Nesse contexto, como a entropia é uma variável extensiva — ou seja, uma propriedade que depende da quantidade de matéria ou energia presente no sistema —, ela pode ser dividida em duas partes. Essa divisão é realizada por meio de um método de balanço

inspirado na hidrodinâmica, no qual uma parte está associada à mudança interna de entropia, enquanto a outra se refere à mudança externa de entropia (Equação 2).

$$dS = diS + deS \quad (\text{Equação 2})$$

Mais especificamente, diS representa a entropia gerada dentro do sistema devido a processos irreversíveis, como atrito, reações químicas irreversíveis e dissipação de calor. De acordo com Yin (2016), essa grandeza mede a irreversibilidade do processo dentro do sistema e sempre assume um valor positivo conforme a Segunda Lei da Termodinâmica, determinando a direção natural dos processos internos. Por outro lado, deS corresponde ao fluxo de entropia, relacionado à troca de massa ou energia entre o sistema e o ambiente. Esse fluxo pode apresentar valor positivo (quando o sistema recebe entropia do meio externo, como ao absorver calor de uma fonte quente) ou negativo (quando o sistema perde entropia para o ambiente, como ao transferir calor para uma fonte fria). No entanto, o deS nunca pode fazer com que o somatório total do sistema seja negativo, garantindo que a entropia total nunca diminua.

Na prática, quando um sistema recebe calor, sua entropia aumenta significativamente ($Se > 0$). Por outro lado, se ele perde calor, sua entropia pode diminuir localmente, já que a produção interna de entropia é suficiente para garantir que a entropia total do sistema nunca diminua.

Para ilustrar essa dinâmica, podemos considerar o funcionamento de uma célula viva mantendo a homeostase nos organismos. Nesse caso, temos os seguintes processos:

- O metabolismo gera calor e aumenta a entropia da célula ($Si > 0$);
- Para evitar um aumento descontrolado da entropia, o organismo libera calor para o ambiente ($Se < 0$);
- No entanto, a soma desses efeitos garante que $S \geq 0$, respeitando a Segunda Lei da Termodinâmica.

Desta forma, o método do balanço da entropia torna-se essencial para o estudo de sistemas fora do equilíbrio termodinâmico. Ele permite quantificar quanto a mudança de entropia deve à irreversibilidade interna e quanto está relacionada às trocas com o meio externo, contribuindo para a compreensão de processos naturais complexos.

Adicionalmente, é importante notar que, como o equilíbrio não é considerado, a conservação da entropia ($dS = 0$) é excluída. O tempo t pode ser introduzido na fórmula e a derivada temporal da produção de entropia (diS/dt) é chamada de taxa de produção de entropia (σ). O produto de σ e T é denominado função de dissipação (Φ), de acordo com a Equação 3.

$$\Phi = T\sigma = T \frac{d_i S}{dt} \quad (\text{Equação 3})$$

A função de dissipação mede a quantidade de energia convertida em formas não recuperáveis, como o calor gerado por atrito ou resistência elétrica. Em sistemas irreversíveis, a produção interna de entropia ($d_i S$) está associada a dissipação de energia. Quanto maior $d_i S$, maior será a perda de energia em processos dissipativos, dificultando a recuperação da energia útil. Nesse contexto, um exemplo clássico é o motor térmico, no qual a energia útil é convertida parcialmente em trabalho, enquanto uma parte é dissipada como calor, aumentando a entropia do sistema.

Além disso, o fluxo de entropia ($d_e S$) pode ser positivo ou negativo, representando, respectivamente, a entrada ou saída de entropia no sistema. Em um sistema onde $\Delta S < 0$, a entropia do sistema está atrapalhando. Isso pode ser interpretado como um fluxo de negentropia entrando no sistema para compensar a produção de entropia. A entrada de entropia negativa, ou negentropia, foi um conceito introduzido pelo físico Erwin Schrödinger (1887–1961) para explicar como os sistemas vivos conseguem manter ou até aumentar sua organização interna, contrariando a tendência natural de aumento da entropia.

Schrödinger sugeriu que, ao importar energia altamente organizada do ambiente (como alimentos ou luz solar) e exportar entropia (como calor e resíduos metabólicos), um organismo é capaz de manter sua estrutura e funcionalidade. A entrada de energia organizada representa a negentropia, que alimenta a produção de energia interna do sistema compensando a produção de entropia metabólica e permitindo a manutenção da vida e da organização biológica. Esse conceito não viola a Segunda Lei da Termodinâmica, pois, ao considerar o sistema e o ambiente juntos, a entropia total ainda aumenta. Assim, a entropia negativa é uma forma figurativa de descrever sistemas que mantêm ou aumentam sua ordem, apesar da tendência natural de aumento da entropia.

Outro exemplo ilustrativo é o funcionamento de um freezer. Ele mantém seu espaço interno frio e organizado ao expulsar entropia (calor) para o ambiente. A eletricidade fornecida ao motor do freezer representa um fluxo de negentropia, permitindo que a temperatura interna permaneça baixa. Desta forma, o freezer é capaz de manter seu estado ordenado apesar da tendência natural de aumento da entropia no ambiente externo.

Por outro lado, quando os fluxos de entropia negativa e a produção de entropia se igualam, o sistema atinge um estado estacionário fora do equilíbrio. Nesse caso, $d_i S > 0$ indica que o processo continua, enquanto $dS/dt = 0$ significa que o estado do sistema permanece

constante no tempo, caracterizando o estado estacionário. A taxa de produção de entropia (σ) é mínima nesse estado.

Na região próxima ao equilíbrio, pode-se considerar a existência de um equilíbrio local descrito pela Equação 4.

$$\sigma = \frac{d_i S}{dt} \geq 0 \quad (\text{Equação 4})$$

A equação indica que quando a produção de entropia é mínima, o sistema pode permanecer em um estado estacionário estável. Por outro lado, quando a produção de entropia aumenta consideravelmente, a estabilidade do sistema é prejudicada, levando-o a um novo estado ou até mesmo ao colapso. Isso explica por que sistemas longe do equilíbrio podem ser benéficos, pois:

- Eles dissipam energia, mas de forma controlada e contínua;
- Quando a dissipação de energia é mínima, o sistema permanece num estado estacionário estável;
- Se a dissipação aumentar drasticamente, o sistema pode mudar de estado ou colapsar.

Para ilustrar melhor essa ideia, imagine um redemoinho na água que mantém uma forma estável devido ao fluxo contínuo de energia. Se esse fluxo for interrompido, o redemoinho desaparece.

Com isso em mente, podemos perceber que a negentropia é necessária para manter o sistema em um estado estacionário. Ou seja, o sistema precisa receber energia organizada para evitar que a entropia aumente descontroladamente. Portanto, quando há um fluxo contante de entropia negativa, o sistema mantém sua estabilidade. No entanto, se esse fluxo for interrompido, a estabilidade do sistema é perdida, e ele pode colapsar no equilíbrio termodinâmico.

Um exemplo claro disso é organismo vivo, que precisa constantemente importar energia organizada (alimentos) e exportar entropia (calorias, resíduos). Caso esse fluxo seja interrompido, o organismo morre e sua estrutura se degrada até atingir o equilíbrio termodinâmico.

Além disso, o processo linear irreversível pode seguir para um estado estacionário próximo ao equilíbrio. A característica linear desses processos é que a taxa de fluxo é proporcional à força motriz (Yin, 2016). Ou seja, quando o estímulo e o efeito produzido aumentam proporcionalmente. Esse comportamento linear, por sua vez, é comum em características naturais, como condução de calor e gradiente de temperatura, fluxo de difusão e

gradiente de concentração, taxas de ocorrência e umidade química, entre outros. Por exemplo, quando você coloca um objeto quente em contato com um frio, o calor se transfere do quente para o frio até que ambos cheguem à mesma temperatura. A mesma coisa acontece quando algo está se espalhando de um lugar com maior concentração para um lugar com menor concentração. Esse tipo de comportamento é muito comum na natureza e acontece sempre que há uma diferença entre as condições de dois lugares, como no caso do calor se espalhar ou de emissão se difundir no ar ou na água.

Essas relações lineares podem ser expressas pelas chamadas relações fenomenológicas, que são descritas pela Equação 5.

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde J representa o fluxo generalizado, X é a força motriz e L é o coeficiente fenomenológico, que relaciona ambos os termos. Quando $i = k$, L_{ii} (ou L_{kk}) é chamado de coeficiente fenomenológico próprio; quando $i \neq k$, L_{ik} é chamado de coeficiente fenomenológico mútuo.

A simetria das relações de Onsager é fundamental, pois revela que os coeficientes fenomenológicos formam uma matriz simétrica, indicando que o fluxo de matéria pode ser induzido por um gradiente de temperatura e vice-versa (Yin, 2016). Esses efeitos de interdependência foram sintetizados por Lars Onsager em sua célebre relação recíproca: $L_{ik} = L_{ki}$. Como resultado, essas relações foram amplamente estudadas, demonstrando o caráter universal da lei da reciprocidade e sua aplicabilidade a diversas condições próximas ao equilíbrio. Essa constatação ressalta sua importância na formulação matemática da termodinâmica irreversível.

Assim, pode-se dizer que suas relações recíprocas representam uma chave para abrir a porta da tão temida e desafiadora a termodinâmica fora do equilíbrio, um campo que, diferentemente da abordagem tradicional, exige novos conceitos, variáveis e uma matemática altamente sofisticada (Umpierre, 2015).

Dessa forma, Onsager se torna um dos pioneiros nesse campo, e suas contribuições foram decisivas para o avanço da termodinâmica próximo ao equilíbrio. Em 1931, ele formulou as primeiras relações gerais da termodinâmica fora do equilíbrio na região linear, estabelecendo as relações recíprocas, essenciais para a compreensão dos processos de transporte em sistemas

termodinâmicos. Além disso, sua ampla aplicabilidade consolidou sua relevância e evidenciou a universalidade dessas leis.

Para aqueles que desejam aprofundar-se no tema, os estudos de Onsager sobre as relações recíprocas e as relações fenomenológicas podem ser consultados no artigo de Coleman e Truesdell (1960).

A partir de 1940, esforços para sistematizar o estudo de processos fora do equilíbrio conseguiram surgir, com contribuições de Onsager, Meixner, Casimir, de Groot e Prigogine (Chauí-Berlinck; Martins, 2013). Juntos, eles consolidaram a termodinâmica fora do equilíbrio como uma disciplina essencial para entender processos acoplados em estados estacionários. Isso teve um impacto profundo em diversas áreas, incluindo física, química, matemática, ciências aplicadas, engenharia e medicina.

Nesse contexto, Prigogine destacou a irreversibilidade dos processos naturais, um conceito fundamental na termodinâmica para o equilíbrio. A irreversibilidade está associada à ideia de trajetórias únicas que levam a transformações espontâneas, refletindo a flecha do tempo. Contudo, a existência de sistemas reversíveis, embora menos evidentes e com critérios ainda pouco claros, desafia as convenções convencionais, representando um campo de pesquisa menos explorado.

Embora a maioria das características naturais ocorra fora do equilíbrio, a hipótese de equilíbrio local ainda é usada para calcular a mudança de entropia nesses sistemas. Prigogine e seus colaboradores abordaram esse dilema ao explorar a teoria cinética e a termodinâmica irreversível de processos não lineares, buscando avanços que ultrapassem as hipóteses de equilíbrio local e ampliam a compreensão dos sistemas complexos.

3.2.9 Ilya Prigogine

Ilyy Romanovich Prigogine (**Figura 10**) nasceu em um contexto histórico conturbado, em 25 de janeiro de 1917, poucos meses antes da eclosão da Revolução Russa (Gilman, 2003). Este acontecimento teve um impacto significativo na vida de sua família, forçando-os a deixar o país no início de 1921 em busca de refúgio na Alemanha, onde viveram como imigrantes por quase 8 anos. Posteriormente, se estabeleceram de forma definitiva em Bruxelas, na Bélgica. Foi nessa cidade que Prigogine cursou o ensino secundário e, mais tarde, ingressou na universidade, dando continuidade à sua formação acadêmica. Seu pai, Roman Prigogine, era engenheiro químico formado pela Politécnica de Moscou, assim como seu irmão. No entanto, conforme relatado em sua autobiografia, Prigogine hesitou em seguir essa trajetória profissional,

apesar da forte influência familiar e acadêmica. Essa hesitação fica evidente na seguinte passagem:

Lembro-me de quanto hesitei antes de escolher essa direção; como vinha dos estudos clássicos cursados no Ateneu de Ixelles, meu interesse estava mais orientado para história e arqueologia, para não mencionar a música, especialmente o piano (Prigogine, 2003).

A citação revela sua paixão por diversas áreas do conhecimento, demonstrando uma busca por um entendimento amplo e uma valorização da diversidade intelectual. A menção ao piano ressalta seu envolvimento com a arte e a música, trazendo uma sensibilidade que transcendia o campo científico. Essa multiplicidade de interesses, sem dúvida, contribuiu para sua visão inovadora, refletida posteriormente em suas notáveis contribuições para a ciência.

Nesse contexto, a influência filosófica na vida de Prigogine começou durante sua adolescência, quando ele se sentiu profundamente fascinado pelo conceito de "Evolução Criativa" de Henri Bergson. Esse pensamento contestava vigorosamente o determinismo presente na perspectiva racional e mecanicista da ciência clássica, frequentemente referida como newtoniana (Carvalho, 2013). Mais tarde, essas ideias se tornariam pilares fundamentais em suas obras e pesquisas.

Já em 1937, aos vinte anos, Prigogine publicou três artigos: "Ensaio sobre Filosofia Física", "O problema do determinismo" e "A evolução". Nessas obras, abordou temas como causalidade, determinismo e indeterminismo, Mecânica Quântica, evolução biológica e tempo – este último se tornaria central em suas futuras pesquisas. Durante seu doutorado, foi orientado pelo renomado físico e matemático belga Théophile de Donder (1872-1957), um influente professor de Termodinâmica Teórica. Além disso, Prigogine recebeu orientação de Jean Timmermans (1882-1971), professor especializado em aplicações da Termodinâmica clássica em sistemas complexos. Ambos os orientadores exerceram uma influência duradoura no desenvolvimento do trabalho de Prigogine ao longo de sua carreira (Carvalho, 2015).

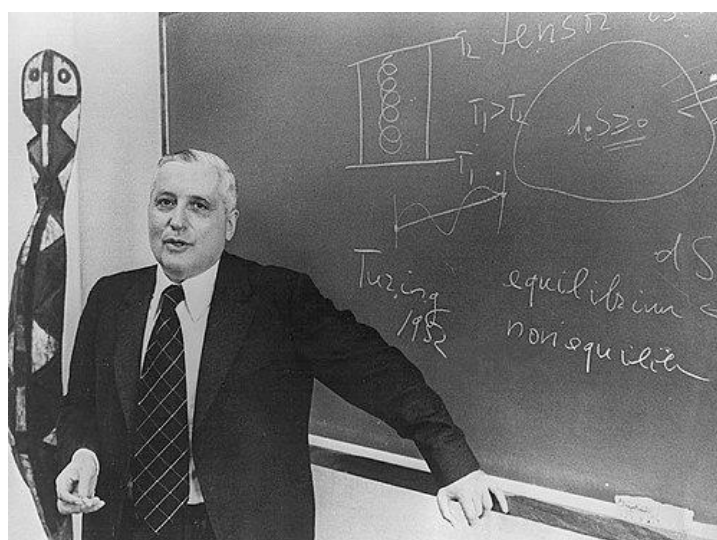
Em 1941, ele concluiu sua tese intitulada "Estudos Termodinâmicos de Fenômenos Irreversíveis". No entanto, esse marco acadêmico participou em um contexto desafiador, pois a comunidade científica da época demonstrava resistência ao estudo da termodinâmica fora do equilíbrio, uma área pouco reconhecida e considerada irrelevante pela maioria dos cientistas naquele período (Spire, 1999).

Apesar da atmosfera de desconfiança e da resistência dentro da academia, Prigogine não se deixou intimidar. Pelo contrário, em vez de se deixar desmotivar pela oposição declarada da

comunidade científica, Prigogine se destacou como um dos pioneiros no estudo dos fenômenos irreversíveis, extrapolando os limites da Termodinâmica Clássica.

Como reconhecimento de sua crescente influência no meio científico, Prigogine obteve a cidadania belga em 1949. Uma década depois, em 1959, tornou-se diretor de uma das mais renomadas entidades científicas do mundo, o Instituto Internacional de Física e Química de Solvay. Essa instituição desempenha um papel fundamental na promoção do diálogo entre cientistas e no avanço das teorias e pesquisas científicas (Carvalho, 2015).

Figura 10. Ilya Prigogine (1917-2003) e a termodinâmica fora do equilíbrio.



Fonte: Wikipédia (2025).

Durante a década de 1960, Prigogine dividiu seu tempo entre os Estados Unidos e a Europa, tornando-se professor de Química no Instituto Enrico Fermi da Universidade de Chicago, entre 1961 e 1966. Nesse período, seus estudos sobre sistemas fora do equilíbrio resultaram em modelos matemáticos, que obtiveram como reações químicas podem conduzir à formação de padrões complexos, culminando no surgimento das chamadas estruturas dissipativas (Gilman, 2003).

Nesse contexto, Capra e Luisi (2014) destacam que Prigogine se sentiu particularmente intrigado pela capacidade dos organismos vivos de manter seus processos passivos em condições de não equilíbrio. Fascinado por sistemas de equilíbrio térmico, ele se dedica a uma investigação aprofundada para compreender em quais situações essas condições podem se manter de forma estável.

Diante dessa intensa produção científica, em 1965, Prigogine foi laureado com o Prêmio Solvay, em reconhecimento por suas contribuições na investigação da Termodinâmica dos

Sistemas Complexos e dos processos irreversíveis (Prigogine, 2008, p. 10). Esse reconhecimento evidenciou a relevância de suas pesquisas e impulsionou ainda mais sua trajetória científica.

Dois anos depois, em 1967, durante uma apresentação intitulada “Estrutura, Dissipação e Vida”, Prigogine introduz uma descrição detalhada sobre estrutura dissipativa (Capra; Luisi, 2014), fruto de quase 20 anos de dedicação à pesquisa. Este conceito marcou um ponto crucial em sua carreira, ampliando seu campo de interesse para áreas diversas, como Cosmologia, a Física Molecular e a Biologia (Spire, 1999; Weber, 1991). Como consequência desse avanço, ele fundou cinco centros de pesquisa em diferentes países, os quais hoje são reconhecidos como os Centros Ilya Prigogine, dedicados aos estudos em Mecânica Estatística e Sistemas Complexos (Gilman, 2003).

Seguindo essa linha de aprofundamento teórico, em 1971, Prigogine coescreveu o livro “Estrutura, Estabilidade e Flutuações” ao lado do físico belga Paul Glansdorff (1904-1999). Essa colaboração representou um marco notável na história da ciência, pois trouxe avanços para a teoria das estruturas dissipativas.

Na obra, os autores exploraram minuciosamente os princípios fundamentais dessa teoria, expandindo os horizontes científicos ao abordar questões complexas que desafiam as concepções tradicionais da física. Além de consolidar os avanços teóricos anteriores, o livro traz novas perspectivas sobre a organização e a manutenção de sistemas complexos em condições de não equilíbrio, destacando a interação entre estrutura, estabilidade e flutuações em sistemas dinâmicos.

As contribuições de Prigogine e Glansdorff abriram novas possibilidades para a compreensão dos aspectos naturais, influenciando não apenas a física, mas também diversas áreas interdisciplinares da ciência. Seu trabalho ajudou a estabelecer um novo paradigma para o estudo dos sistemas dinâmicos, ampliando as fronteiras do conhecimento científico.

Nesse contexto, a dedicação exclusiva de Prigogine à pesquisa culminou no reconhecimento de que ele tanto merecia. Em 1977, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Química por suas contribuições à termodinâmica para fora do equilíbrio (**Figura 11**). Esse prêmio, portanto, consolidou sua posição como uma figura de destaque no cenário científico global, inaugurando uma nova fase em sua carreira. Além disso, durante esse período, ele foi contemplado com diversos prêmios internacionais, que consideraram tanto suas realizações científicas quanto filosóficas. Além disso, recebeu 54 títulos de Doutor Honoris Causa e foi eleito membro de diversas academias científicas (Mampia, 2023).

Figura 11. Ilya Prigogine recebendo o Prêmio Nobel de Química em 1977 das mãos do Rei Karl XVI Gustav.



Fonte: Research Gate (2025).

Décadas depois, em 1989, Prigogine recebeu o título de visconde, concedido pelo rei da Bélgica, como reconhecimento por sua brilhante trajetória científica. Sua carreira foi marcada por uma dedicação incansável ao estudo dos sistemas complexos. Contudo, seu legado vai além das descobertas científicas: ele criou um ambiente propício para a colaboração e a troca de ideias, fomentando um progresso contínuo na compreensão desses sistemas e na ciência como um todo.

No entanto, Prigogine faleceu em 28 de maio de 2003, em Bruxelas, deixando um marco significativo na ciência e na filosofia.

3.2.10 Estruturas dissipativas

A teoria das estruturas dissipativas foi estabelecida por Ilya Prigogine (1917–2003) da escola de Bruxelas nas décadas de 1960 e 1970. Essa teoria descreve a evolução ordenada de processos em sistemas abertos longe do equilíbrio, explicando como um sistema pode passar de um estado caótico para uma estrutura ordenada. Prigogine também descreveu as condições e comportamentos próximos ao ponto crítico de mudança de fase no sistema.

O termo "estruturas" é utilizado conforme a definição de Prigogine, mas, na prática, refere-se a "sistemas". Essas estruturas estão associadas a processos irreversíveis e demonstram que a ordem pode surgir longe do equilíbrio termodinâmico (Massoni, 2008).

As estruturas dissipativas emergem quando o sistema está fora do equilíbrio, consumindo energia de Gibbs e produzindo entropia, mas, ainda assim, mantendo um processo que se sustenta por um período, gerando auto-organização (Carvalho, 2012). Essas estruturas são formadas devido a flutuações na energia total do sistema e surgem a uma distância crítica do equilíbrio, criando novas organizações espaço-temporais, ou seja, ordem dentro da desordem.

As flutuações referem-se a desvios em relação ao valor médio estatístico das variáveis de um sistema. Embora a maioria das flutuações diminua gradualmente, algumas podem ser amplificadas quando o sistema está distante do equilíbrio, causando mudanças qualitativas. Essas flutuações desempenham um papel importante na formação de estruturas dissipativas, pois podem desencadear a transição para novos estados ordenados.

A vida e a auto-organização, por exemplo, só são possíveis longe do equilíbrio, onde o caos desempenha um papel construtivo (Massoni, 2008).

A auto-organização é o processo pelo qual um sistema organizacional se desenvolve espontaneamente, sem a necessidade de intervenção externa direta. Em sistemas fora do equilíbrio, esse fenômeno ocorre por meio da interação não linear entre seus componentes, resultando na formação de estruturas ordenadas e coerentes.

O caos refere-se à sensibilidade extrema às condições iniciais, em que pequenas diferenças nas condições iniciais podem levar a comportamentos completamente distintos ao longo do tempo, tornando o sistema imprevisível, apesar de ser determinístico. O caos é um fenômeno comum em sistemas não lineares fora do equilíbrio, e sua compreensão é crucial para estudar a complexidade e a imprevisibilidade das estruturas dissipativas.

A formação de uma estrutura dissipativa envolve três aspectos principais: instabilidades geradas por mudanças físico-químicas no sistema (causa interna), a inter-relação de flutuações de relaxamento lento que amplificam o parâmetro de ordem, e a dependência da dissipação de entropia negativa para manter o estado ordenado. Quando o sistema está fora do equilíbrio, há uma variedade de possibilidades, podendo ocorrer caos ou reações explosivas, o que dificulta a aplicação de causalidade decisiva.

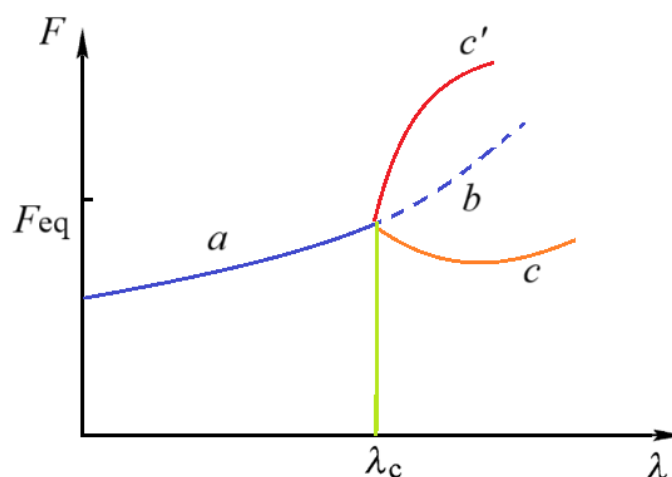
A teoria de Prigogine sugere que, para sistemas próximos ao equilíbrio, a tendência de desenvolvimento segue a segunda lei da termodinâmica ($dS \geq 0$), com a entropia aumentando gradualmente até o equilíbrio e a desordem. No entanto, em sistemas abertos longe do equilíbrio, o desenvolvimento do sistema pode aumentar a ordem e criar novas estruturas através de

flutuações locais e interações não lineares. A entrada de fluxo de negentrópia compensa a dissipação de entropia, permitindo que o sistema opere de maneira dinâmica e ordenada.

Em sistemas abertos, quando um parâmetro atinge um limiar crítico, ocorre uma mutação, transformando o estado caótico em um novo estado ordenado. O caos, nesse contexto, não é desordenado, mas sim um estado de não linearidade e bifurcação que pode alternar entre diferentes estados. Flutuações, funções do sistema e estruturas espaço-temporais interagem, resultando na formação de estruturas dissipativas dinâmicas e ordenadas.

A bifurcação ocorre quando um sistema atinge um ponto crítico e, a partir daí, pode seguir diferentes trajetórias de evolução. Esse processo é impulsionado por pequenas perturbações ou flutuações que induzem o sistema a mudar para um novo estado, que pode ser tanto ordenado quanto desordenado, sendo um elemento essencial para a formação de estruturas dissipativas. A seguir, a ilustração representada pela **Figura 12** mostra um esquema de bifurcação em um sistema.

Figura 12. Diagrama esquemático de bifurcação de um sistema químico não linear.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Quando um sistema está longe do equilíbrio, o processo estável começa a perder estabilidade. A Figura 12 ilustra essas condições, onde a ordenada F representa uma função de estado do sistema, como a concentração, e a abscissa λ representa a distância do equilíbrio. Quando $\lambda = 0$, o sistema está em equilíbrio. O ponto crítico $\lambda = \lambda_c$ é um ponto singular na trajetória de evolução. O princípio da produção mínima de entropia garante a estabilidade do processo dentro do intervalo de λ entre 0 e λ_c . Nesse intervalo, o sistema pode retornar a um estado compatível com as condições externas. Tanto o estado de equilíbrio quanto o estado

estável apresentam uniformidade espacial, invariância temporal e estabilidade frente a perturbações. No entanto, quando $\lambda > \lambda_c$, o estado estável perde sua estabilidade, e o processo deixa de seguir a linha b.

No estado crítico, pequenas perturbações ou flutuações podem induzir a mudança do sistema para um novo estado, desencadeando uma transformação de fase fora do equilíbrio. Esse novo estado pode ser desordenado (c') ou ordenado espaço-temporalmente (c), dependendo dos parâmetros de ordem. A coexistência de diferentes estados estáveis é conhecida como fenômeno de bifurcação, que pode ocorrer em múltiplos níveis. A desordem antes da bifurcação é caracterizada por alta simetria espaço-temporal, enquanto o novo estado ordenado resulta da quebra dessa simetria. A manutenção dessa estrutura depende do fluxo de negentrópia do ambiente, caracterizando-a como uma estrutura dissipativa.

Nesse contexto, as estruturas dissipativas requerem uma troca constante de energia e matéria com o ambiente para se sustentar. Prigogine destacou que o desequilíbrio pode, na verdade, ser uma fonte de ordem, e que processos irreversíveis podem levar à formação de novos estados da matéria, como as estruturas dissipativas. Tais estruturas geram organização e coerência espontaneamente em sistemas abertos, exemplificando as características da auto-organização. Portanto, a teoria das estruturas dissipativas estuda a mudança de sistemas abertos sob condições específicas, permitindo uma discussão aprofundada da evolução de diversos sistemas.

Um exemplo clássico que ilustra esse conceito é a solução de água com tensoativo (como o SDS - dodecil sulfato de sódio). Quando a concentração de tensoativo é baixa, as moléculas permanecem dispersas de maneira desordenada. No entanto, quando a concentração atinge um valor crítico (concentração crítica de micelas), as moléculas se organizam em estruturas chamadas micelas, que são esferas formadas por moléculas de tensoativo, onde as caudas hidrofóbicas se agrupam no interior e as cabeças hidrofílicas ficam para o exterior.

Esse processo de formação das micelas é um exemplo claro de auto-organização, em que uma estrutura ordenada emerge espontaneamente a partir de um estado desordenado. Para que as micelas se mantenham organizadas, ocorre uma troca constante de tensoativo entre a solução e as micelas, o que caracteriza o sistema como uma estrutura dissipativa. Assim, a manutenção das micelas depende de fluxos contínuos de energia e matéria do ambiente, uma característica essencial das estruturas dissipativas.

Assim, as estruturas dissipativas são sistemas que, apesar de permanecerem longe do equilíbrio, conseguem manter sua ordem interna por meio da troca constante de energia e

matéria com o ambiente. No caso das micelas, a organização das moléculas tensoativas depende dessa troca contínua, exemplificando como essas estruturas funcionam.

Nesse sentido, Prigogine ressalta o papel fundamental das estruturas dissipativas na natureza, afirmando que elas introduzem uma forma de criatividade: algo novo e espontâneo, não pré-determinado. Essa perspectiva sugere que o caos não se resume a mero acaso. Em vez disso, sistemas dinâmicos instáveis e caóticos não devem ser vistos apenas como desordenados; na verdade, sua instabilidade pode possibilitar a emergência de novos eventos e a formação de ordem a partir do caos (Carvalho, 2012, p. 31).

A famosa e fascinante reação oscilante de Belousov-Zhabotinsky (BZ), foi estudada por Prigogine que descobriu que se tratava de um caso de ocorrência de estrutura dissipativa *in vitro*:

Esse sistema aberto e muito afastado do equilíbrio, capaz de evoluir de modo a estruturar-se e organizar-se, sobrevive dissipando a energia ambiental no processo local, de modo que a queda que obtém na sua entropia interna é “paga” pela dissipação entrópica do seu ambiente (Vieira, 2003 p. 294).

As reações oscilantes, como a reação Belousov-Zhabotinsky (BZ), desafiaram os cientistas por muito tempo devido à sua complexidade e comportamento intrigante. Inicialmente, essas reações eram interpretadas como casos especiais de equilíbrio químico, no entanto, essa explicação revelou-se inadequada para compreender completamente o fenômeno. Foi somente com a introdução do conceito de estruturas dissipativas por Ilya Prigogine que se iniciou a entender esses sistemas. De acordo com a teoria das estruturas dissipativas, fora do equilíbrio, sistemas químicos podem desenvolver padrões de comportamento oscilatório e formar estruturas organizadas a partir do caos aparente.

A reação BZ, por exemplo, ilustra como sistemas fora do equilíbrio podem exibir comportamentos oscilatórios e formar padrões dinâmicos complexos. Esses padrões não se encaixam nas descrições tradicionais de equilíbrio químico, que pressupõem uma estabilidade estática. Através da abordagem de Prigogine, foi possível perceber que a "ordem na desordem" não é um paradoxo, mas sim uma característica fundamental de sistemas longe do equilíbrio. Esses sistemas, ao dissipar energia e matéria, criam novas formas de organização e dinâmica que desafiam a visão tradicional de desordem como mera aleatoriedade.

Portanto, a descoberta e a compreensão das reações oscilantes, como a BZ, foram fundamentais para expandir o conhecimento sobre o comportamento de sistemas químicos e biológicos fora do equilíbrio, revelando a complexidade e a ordem emergente que podem surgir em condições não convencionais (Barzykuna, 2020).

3.2.11 As fascinantes reações oscilantes

As reações oscilantes, ao longo de sua história, enfrentaram períodos de ceticismo e reconhecimento, passando por um processo de resistência antes de serem amplamente aceitas pela comunidade científica. Durante anos, pesquisadores dedicaram-se a compreender seu verdadeiro valor dentro do campo da ciência, especialmente no intrigante universo da termodinâmica fora do equilíbrio. Esses fenômenos desafiadores romperam paradigmas na química, provocando debates e redefinindo conceitos estabelecidos. Diante desse cenário, cientistas visionários perceberam que a chave para entender as reações oscilantes estava nas estruturas dissipativas, um avanço fundamental para a termodinâmica moderna.

Nesse sentido, as reações oscilantes representam uma manifestação real que exemplifica, de forma notável, os princípios da termodinâmica fora do equilíbrio.

Historicamente, Mazalla Jr. (1978) relata que os primeiros trabalhos publicados sobre reações oscilantes datam por volta de 1900. No entanto, estudos subsequentes de Epstein, Pojman e Steinbock (2006) descobriram que, já em 1828, Fechner (1801-1887) forneceu o primeiro relato sobre sistemas químicos oscilantes por meio de uma célula eletroquímica. Em 1899, Ostwald (1853-1932), conhecido por sua contribuição à ionização da água, relatou que a taxa de dissolução do cromo em ácidos apresentava oscilações periódicas, antecipando a formalização dessas ocorrências.

Inicialmente, acreditava-se que essas reações ocorriam apenas em sistemas heterogêneos e que seriam impossíveis em meios homogêneos. Entretanto, conforme Martins (2013), em 1910, A. J. Lotka observou oscilações em espécies intermediárias em sistemas homogêneos, resultantes da cinética desses sistemas. Esse fato foi um avanço importante para o campo, pois contrariava a visão predominante na época.

Somente em 1921, a primeira reação química oscilante homogênea foi descoberta por W. C. Bray, envolvendo uma reação catalítica de iodato na decomposição da água oxigenada (Jesus, 2018). Lotka teve a ousadia de formular uma explicação pioneira para esse fenômeno oscilante, estabelecendo as bases para a compreensão das reações oscilantes homogêneas.

Em 1931, H. Liebhafsky, aluno de Bray, estudou esse oscilador, que, segundo Jesus (2018), consistia em duas reações autocatalíticas acopladas e uma decomposição unimolecular, gerando oscilações sustentáveis. Esse sistema ficou conhecido como oscilador Bray-Liebhafsky (BL).

Além disso, no início da década de 1950, Boris Belousov descobriu que uma solução de ácido cítrico, bromato de potássio e sulfato de cério (IV) em ácido sulfúrico diluído não

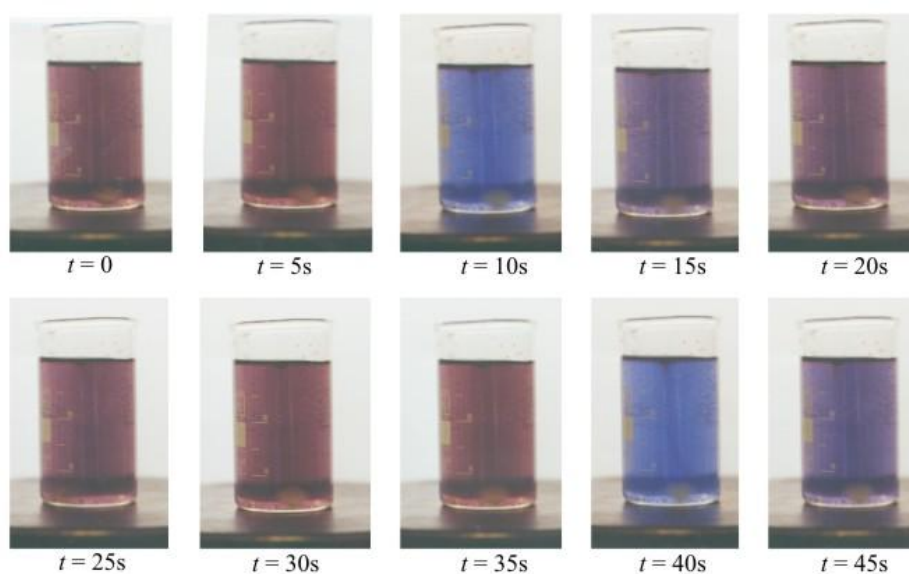
reagia diretamente ao equilíbrio, mas apresentava oscilações visíveis na cor da solução, alternando entre o incolor e o amarelo por um período significativo (Barzykina, 2020). Contudo, ao tentar publicar seus resultados, Belousov enfrentou resistência, pois muitos revisores acreditaram que as oscilações químicas violavam a segunda lei da termodinâmica (Epstein; Showalter, 1996).

Oito anos depois, o trabalho de Belousov finalmente apareceu em uma conferência. Mais tarde o manuscrito foi reconhecido e reproduzido, destacando a importância de sua descoberta (Barzykina, 2020).

Em 1961, Anatol Zhabotinsky, estudante de Belousov, investigou a ocorrência em detalhes e publicou seus resultados. Ele substituiu o ácido cítrico pelo ácido malônico e demonstrou que as oscilações na cor da solução eram causadas pelas oscilações na concentração de Ce^{+4} . Desde então, sistema químico e outros relacionados atraíram grande interesse (Barzykina, 2020).

A descoberta de Zhabotinsky, uma variação da descoberta de Belousov, ficou conhecida como reação de oscilação Belousov-Zhabotinsky (BZ), tornando-se uma interessante experiência de laboratório (**Figura 13**) (Mazalla Jr., 1978). Segundo Ilya Prigogine, ganhador do Prêmio Nobel de Química em 1977, considerou a reação BZ como a descoberta científica mais importante do século XX, superando a teoria quântica e a relatividade.

Figura 13. Uma mistura de reação BZ agitada mostrando mudanças de cor ao longo do tempo.



Fonte: Wikipédia (2025).

Os estudos das reações oscilantes em sistema aberto resultaram em várias descobertas, como as oscilações em dois ciclos e o caos químico (Jesus, 2018). Além disso, as estruturas dissipativas, aplicadas a uma variedade de processos em diversas áreas do conhecimento, surgiram após várias tentativas de compreensão do funcionamento e dos mecanismos das reações oscilantes.

Conforme Jesus (2018), ao longo dos últimos anos muitos sistemas oscilantes foram descobertos tanto em sistemas fechados quanto abertos. Ele acredita que muitos outros podem ser encontrados, tanto na área da química orgânica, utilizando carbono, quanto na inorgânica, utilizando metais de transição, enxofre e nitrogênio. Embora a maioria dos osciladores químicos sejam líquidos, também existem estudos sobre reações em fase gasosa, como os osciladores com evolução de gases (GEO – do inglês, *Gas Evolucion Oscillator*).

O primeiro oscilador desse tipo foi criado em 1916 por Morgan, mas o interesse por ele só aumentou a partir da década de 1960. A consequência consistia na desidratação do ácido fórmico por ácido sulfúrico concentrado, sendo observada a evolução oscilatória do monóxido de carbono. Como se pode perceber, no passado, como as oscilações não tinham espaço na comunidade científica, que se baseavam em leis determinísticas, ou que dificultavam a acessibilidade de muitos trabalhos (Santos; Maldaner, 2010).

Contudo, a partir dos anos 60, as reações oscilantes resultaram em ganhar notoriedade, pois pesquisas comprovaram que a termodinâmica precisaria passar por um processo de transformação, incorporando em seu contexto a organização da natureza em meio à desordem (Santos; Maldaner, 2010).

Em 1970, os pesquisadores Zaikin e Zhanitinsky observaram pela primeira vez um comportamento oscilatório de natureza espacial em uma reação química. Durante o experimento, ao espalharem uma fina camada de solução contendo bromato, ácido malônico, ácido bromomalônico, ácido sulfúrico e ferroína sobre uma placa de Petri, constataram a formação de padrões em forma de ondas químicas que se propagavam pela superfície da solução.

Figura 14. Oscilador espacial baseado no sistema Belousov-Zhabotinsky.



Fonte: Wikipédia (2025).

Esse fenômeno, conhecido como oscilação espacial, ocorre especialmente quando o sistema não está sob agitação constante. Diversas reações oscilantes com compostos orgânicos apresentam esse tipo de comportamento, mas a mais emblemática é a reação de Belousov-Zhabotinsky. Na ilustração (**Figura 14**), observa-se uma solução avermelhada pontuada por regiões azuladas em forma de anéis concêntricos. Esses anéis se movem através do meio reacional, gerando padrões em mosaico conhecidos como ondas químicas viajantes.

Outro marco significativo na compreensão das reações oscilantes foi a descoberta realizada por Thomas S. Briggs e Warren C. Rauscher, descrita por eles próprios em um artigo publicado em 1973 no *Journal of Chemical Education*.

Nós descobrimos uma reação oscilante do tipo relógio de iodo que apresenta mudanças cíclicas marcantes de incolor para dourado e depois para azul, utilizando reagentes simples. Essa reação é excelente para demonstrações em aula e pode ser adaptada para diversas investigações estudantis (Briggs; Rauscher, 1973, p. 496).

Essa reação, posteriormente reconhecida como Reação de Briggs-Rauscher, tornou-se uma das mais conhecidas e utilizadas no ensino de química experimental, devido ao seu forte apelo visual e à facilidade de reprodução em laboratório. A **figura 15** ilustra o efeito visual característico desse tipo de reação oscilante.

Figura 15. Sequência das mudanças de cor na reação de relógio de iodo oscilante de Briggs-Rauscher.



Fonte: Wikipédia (2025).

Em seu relato, Briggs e Rauscher (1973) destacam que a motivação para sua pesquisa veio da limitação das reações oscilantes anteriores, que exigiam reagentes caros ou exibiam variações de cor pouco perceptíveis. Sua formulação, por outro lado, oferece oscilações visíveis intensas e regulares, o que a torna ideal tanto para demonstrações didáticas quanto para investigações experimentais. A mistura desenvolvida — contendo iodato de potássio, peróxido de hidrogênio, ácido malônico, ácido perclórico (ou ácido sulfúrico), sulfato de manganês(II) e amido — mostrou-se eficaz mesmo com variações nas concentrações dos reagentes, e suas oscilações podem ser analisadas qualitativamente e quantitativamente, por meio da variação da concentração de íons iodeto ao longo do tempo.

A originalidade e o impacto da descoberta de Briggs e Rauscher vão além do caráter visual: sua reação reforça a importância do estudo de sistemas químicos fora do equilíbrio, aproximando o ensino de química dos debates contemporâneos em termodinâmica e cinética química. Além disso, a simplicidade da montagem experimental contribuiu para a disseminação da reação em contextos educacionais, fazendo dela um exemplo paradigmático de como descobertas científicas podem ter repercussões tanto acadêmicas quanto pedagógicas.

Em síntese, as reações oscilantes representam um marco notável na história da Química, não apenas por desafiar antigos paradigmas científicos, mas também por revelarem a complexidade e a beleza dos sistemas fora do equilíbrio. Sua trajetória — marcada por descobertas pioneiras, resistência inicial e posterior reconhecimento — reflete a dinâmica do avanço científico, em que ideias disruptivas gradualmente encontram espaço e transformam a compreensão consolidada. Fenômenos como as reações de Belousov-Zhabotinsky e Briggs-

Rauscher não apenas enriqueceram o campo da termodinâmica, mas também se consolidaram como ferramentas didáticas de grande impacto, capazes de despertar a curiosidade, o encantamento e o pensamento crítico em salas de aula e laboratórios. Ao tornar visível o invisível — como a organização emergente em meio ao aparente caos —, essas reações nos convidam a repensar os limites da ciência tradicional e a valorizar os caminhos interdisciplinares que unem teoria, prática e história no ensino de Química.

4 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, a metodologia adotada foi de natureza qualitativa, centrada no desenvolvimento e na validação de um produto educacional. O trabalho foi estruturado em três etapas principais: revisão bibliográfica, construção do material didático e avaliação por professores de Química do Ensino Médio.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente investigação se caracteriza como uma pesquisa de natureza qualitativa, por buscar compreender e explorar o potencial de um material didático sobre a termodinâmica fora do equilíbrio, um tema ainda pouco abordado. Diferentemente da abordagem quantitativa, que se concentra em dados mensuráveis, a pesquisa qualitativa visa aprofundar-se em um universo de significados, interpretações e compreensões subjetivas, o que se alinha à proposta de avaliar a percepção de professores. De acordo com Minayo (2010), essa abordagem favorece o desenvolvimento de novas perspectivas e categorias sobre o fenômeno investigado.

4.2 SUJEITOS DA PESQUISA

O estudo contou com a participação voluntária de 30 professores de Química e áreas afins, atuantes em diferentes níveis de ensino e em redes públicas e privadas. A escolha desses profissionais justifica-se por sua vivência em sala de aula e por seu conhecimento prático do currículo, assegurando a pertinência e a aplicabilidade do material. A diversidade de contextos educacionais dos participantes contribuiu para uma análise mais ampla e representativa do potencial do material em distintas realidades escolares. Cabe destacar que todos os participantes foram informados sobre os objetivos e princípios éticos da pesquisa, com garantia de anonimato, sigilo e participação voluntária mediante consentimento.

4.3 CONSTRUÇÃO DO PRODUTO

O produto educacional desenvolvido nesta dissertação consiste na confecção de um livro paradidático, intitulado "Desvendando a História da Termodinâmica", com foco na abordagem da Termodinâmica Fora do Equilíbrio. A primeira etapa da construção do material foi um levantamento bibliográfico minucioso, que serviu como base para a seleção de conceitos

e eventos históricos relevantes. O material didático digital foi concebido com uma linguagem clara e interativa, utilizando recursos visuais atrativos e uma diagramação cuidadosa para facilitar a compreensão. Alinhado a estudos sobre aprendizagem multimídia, como os de Mayer (2009), o paradidático foi elaborado e editado na plataforma digital Canva®. Essa escolha estratégica se deu por sua interface intuitiva e seus recursos de design, que possibilitaram a criação de um produto visualmente agradável, funcional e em sintonia com as demandas pedagógicas contemporâneas.

4.4 INSTRUMENTO DA PESQUISA PARA COLETA DE DADOS

Para a coleta de dados e a validação do material didático foi elaborado um questionário online por meio da plataforma Google Forms®. A escolha dessa ferramenta se deu por sua interface intuitiva, ampla acessibilidade e pela capacidade de organizar automaticamente as respostas, otimizando tanto a coleta quanto a tabulação dos dados para análise posterior.

O instrumento da pesquisa foi cuidadosamente elaborado com uma variedade de formatos — incluindo questões de múltipla escolha, escalas do tipo Likert e campos abertos para comentários —, estruturado com base na perspectiva de Gil (2002), que recomenda investigar junto aos participantes aspectos como “pontos fortes”, “pontos fracos” e “sugestões”. Essa diversidade de abordagens possibilitou uma análise mais ampla e multidimensional das percepções dos respondentes em relação ao produto educacional.

O instrumento foi dividido em três blocos distintos, descritos a seguir.

I) Bloco 1: Perfil do Respondente

Este bloco teve como objetivo coletar dados demográficos e profissionais dos participantes, tais como formação acadêmica, tempo de experiência docente e vínculo institucional. Com essas informações, tornou-se possível contextualizar as respostas e identificar padrões ou variações conforme o perfil dos respondentes, enriquecendo a análise dos dados.

II) Bloco 2: Avaliação do Material Didático (Livro Paradidático)

Considerado o núcleo da avaliação, este bloco explorou a percepção dos professores em relação a diversos aspectos do livro, como a relevância do conteúdo, aplicabilidade pedagógica,

clareza da linguagem, qualidade visual e organização didática. Foram utilizadas escalas de concordância para captar o grau de satisfação ou adequação em relação a cada item analisado.

III) Bloco 3: Opinião Qualitativa

Neste último bloco, os participantes puderam expressar livremente suas opiniões, observações e sugestões sobre o material. Essa etapa teve o papel de complementar os dados quantitativos, oferecendo uma visão mais rica e subjetiva da experiência de leitura, além de apontar melhorias que não seriam contempladas pelas questões fechadas.

O principal objetivo deste instrumento foi investigar a percepção dos docentes sobre a qualidade didática, estética e linguística do material didático, considerando sua viabilidade como recurso pedagógico no ensino de Química no Ensino Médio. Buscou-se, sobretudo, reunir impressões qualitativas sobre a clareza do conteúdo, a organização visual e a aplicabilidade do material em contextos educativos. A partir dessas contribuições, foi possível identificar os pontos fortes e fracos do produto educacional, bem como sugestões de aprimoramento, com vistas à sua futura implementação no ambiente escolar.

A aplicação do questionário foi realizada entre 2 e 12 de julho de 2025. Os dados coletados foram transcritos e analisados de forma qualitativa, buscando identificar os pontos fortes e fracos do material e suas contribuições para o ensino de Química.

4.5 PRODUTO EDUCACIONAL

4.5.1 Construção e características do produto educacional

A elaboração deste material didático, que resultou em um livro com caráter paradidático, foi marcada por um processo de amadurecimento e adaptação. A ideia inicial era propor algo mais simples e breve, com textos resumidos e muitas ilustrações, tornando o conteúdo mais leve e atrativo. No entanto, ao longo do desenvolvimento, percebeu-se que tratar da História da Termodinâmica exigia ir além: não seria possível preservar a originalidade das ideias e a riqueza dos fatos sem contemplar sua trajetória, ampla e repleta de passagens relevantes e instigantes.

Com o desenvolvimento da escrita, tornou-se evidente que o material foi adquirindo gradualmente o formato de um livro paradidático, possibilitando uma abordagem mais aprofundada, fundamentada e respeitosa da história e dos conceitos científicos relacionados à Termodinâmica. De acordo com Assis e Teixeira (2005), o paradidático, ao apresentar textos

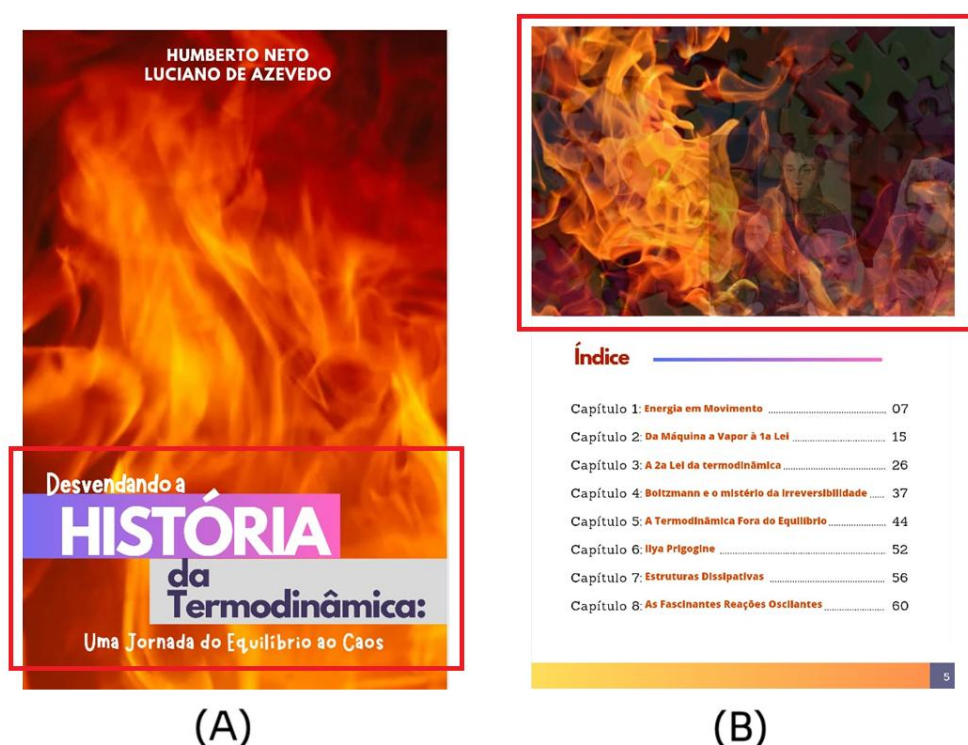
informativos, amplia o entendimento do conteúdo e favorece uma aprendizagem mais significativa, aspecto que orientou a estrutura adotada neste trabalho.

Na elaboração do material, optou-se intencionalmente por uma linguagem acessível e interativa, com o objetivo de envolver o leitor e estabelecer uma relação de proximidade. Tal escolha visa estimular a participação ativa do estudante em seu processo de aprendizagem. Conforme aponta Rodrigues (2015), os textos paradidáticos configuram-se como instrumentos pedagógicos capazes de facilitar a compreensão de conceitos científicos e, simultaneamente, de favorecer a reflexão crítica do aluno sobre o meio em que está inserido, contribuindo, assim, para a formação cidadã.

Tal perspectiva está em consonância com a proposta deste livro, que não se limita a apresentar conteúdos de forma acessível, mas procura também incentivar o pensamento crítico, a contextualização do conhecimento e o protagonismo dos estudantes no processo educativo.

A seguir, são apresentados imagens e trechos do livro paradidático (**Figura 16**), com destaque para suas características, funções e processo de construção. A intenção é evidenciar as escolhas feitas ao longo da elaboração do material, justificando tanto os aspectos didáticos quanto os visuais, de modo a demonstrar como cada elemento foi pensado para favorecer o ensino e a aprendizagem de Química no Ensino Médio.

Figura 16. Estrutura visual e textual do livro paradidático *Desvendando a História da Termodinâmica*.



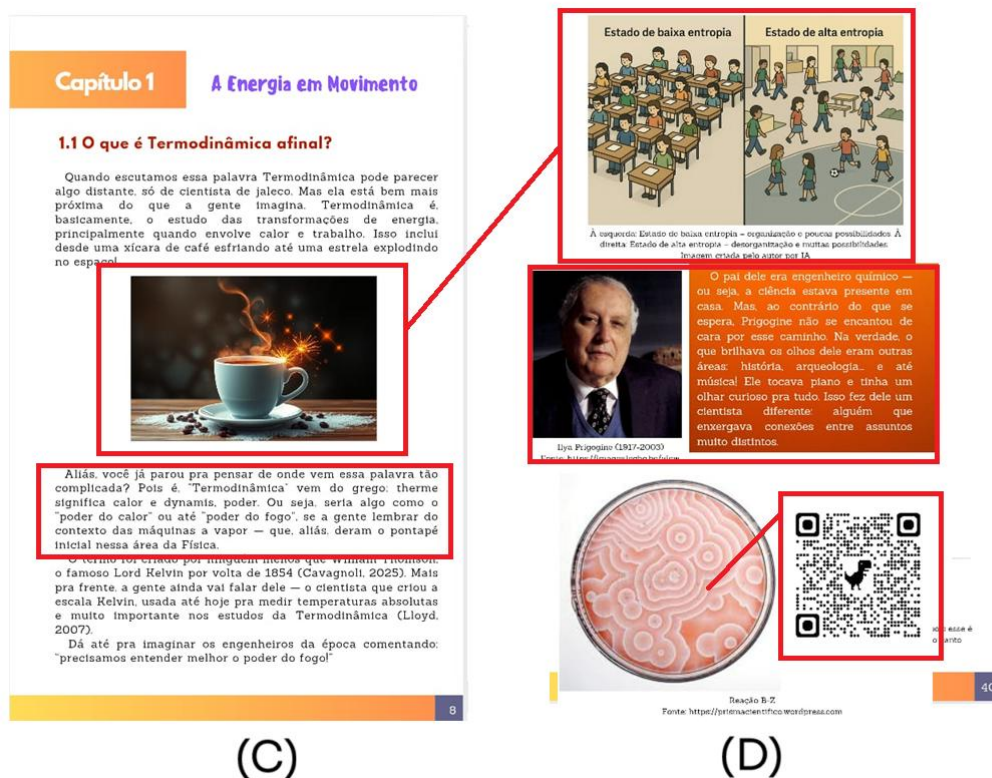
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O título em destaque como mostra a imagem (A) foi projetado com cores contrastantes e tipografia modernas, de modo a despertar o interesse imediato do leitor. A opção pelo termo “História” em maior evidência reforça o caráter narrativo e didático do material, enquanto o subtítulo “Uma Jornada do Equilíbrio ao Caos” sugere o percurso científico da Termodinâmica, articulando ciência e contexto histórico.

Na imagem (B), as figuras de cientistas, discretamente incorporadas ao fundo em meio às chamas, foram intencionalmente posicionadas para representar personagens centrais da Termodinâmica clássica e moderna. Essa escolha estética evidencia a preocupação em relacionar os conceitos apresentados à trajetória histórica de pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento da área, conferindo à narrativa uma dimensão humana e histórica.

Na **Figura 17** (C), a seguir, observa-se o uso de uma linguagem interativa e questionadora, concebida intencionalmente durante a elaboração do material para promover a interatividade e aproximar os termos científicos da experiência cotidiana dos leitores. Esse recurso favorece a compreensão de conceitos complexos, como a etimologia da palavra “Termodinâmica”, e evidencia a intenção de conciliar rigor científico com clareza didática — característica essencial de materiais paradidáticos voltados ao Ensino Médio.

Figura 17. Estrutura visual e textual do livro paradidático *Desvendando a História da Termodinâmica*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nas Figuras 17 (C) e (D) apresentadas, observa-se o uso estratégico de ilustrações geradas pela inteligência artificial Gemini, que atuou como uma importante aliada na criação de imagens educativas e atraentes para o livro paradidático. O quadrado vermelho ligando as imagens evidencia que ambas foram produzidas pela IA reforçando a contribuição tecnológica no material e destacando o cuidado com a qualidade visual e conceitual das ilustrações.

Em Figura 17 (D), observa-se uma faixa avermelhada que acompanha a fotografia do cientista Ilya Prigogine, semelhante à utilizada em outras passagens do livro, com o objetivo de destacar informações essenciais. Esse recurso visual facilita a leitura, evitando que se torne cansativa, e cumpre a função de guiar o leitor, promovendo uma compreensão mais imediata do conteúdo, sem comprometer a profundidade científica.

Verifica-se também a presença de um QR Code, empregado para enriquecer o material com conteúdos digitais complementares, como a visualização de reações oscilantes. Essa ferramenta interativa possibilita que o leitor acesse, de maneira rápida e prática, animações adicionais, promovendo uma aprendizagem mais dinâmica, contextualizada e envolvente.

Dessa forma, o uso combinado de IA para ilustrações, destaques visuais estratégicos e QR Codes demonstra um cuidado intencional em tornar o livro interativo, acessível e moderno, potencializando a compreensão de conceitos complexos como termodinâmica e reações oscilantes.

4.5.2 Sugestões de estratégias pedagógicas para utilização do produto educacional

O livro paradidático foi idealizado como uma ferramenta de apoio pedagógico para o professor de Química do Ensino Médio, especialmente no ensino de Termoquímica. A proposta visa ir além dos conceitos tradicionais, ampliando a discussão sobre a Termodinâmica e apresentando a ciência como um processo dinâmico e contínuo, muitas vezes não abordado nos livros didáticos convencionais.

O professor pode utilizar trechos do material para propor atividades que despertem o interesse dos estudantes, contribuindo para uma aprendizagem mais contextualizada e crítica.

As seções a seguir apresentam sugestões de estratégias de aplicação do livro em sala de aula, associadas a metodologias ativas que potencializam a construção do conhecimento.

I) Introdução à Termodinâmica Fora do Equilíbrio

Ao abordar os conceitos de processos espontâneos e não espontâneos, é possível introduzir a noção de sistemas que operam fora do equilíbrio, como ocorre em fenômenos biológicos e naturais. O metabolismo celular, a replicação do DNA ou o desdobramento de proteínas são exemplos presentes no livro que ilustram bem essa realidade. Esses tópicos permitem ao professor discutir a negentropia (ou entropia negativa), conceito introduzido por Schrödinger, que expressa a capacidade dos sistemas vivos de manter sua organização ao exportar entropia para o meio.

A sequência didática é uma metodologia adequada para essa abordagem, pois permite organizar as etapas de aprendizagem em momentos articulados, como uma aula expositiva inicial sobre os princípios da Segunda Lei da Termodinâmica, seguida de atividades investigativas sobre sistemas vivos e, por fim, a proposição de uma síntese coletiva com base nos exemplos extraídos do material didático.

Essa estratégia ajuda os alunos a compreenderem que a ideia de que “tudo tende à desordem” não é absoluta, e que a vida, como sistema aberto, desafia essa simplificação ao construir ordem em meio ao caos.

II) Exploração das Reações Oscilantes

O capítulo que trata das reações oscilantes — como a de Belousov-Zhabotinsky — oferece um recurso pedagógico potente para discutir tanto aspectos conceituais quanto filosóficos da ciência. A rejeição inicial dessa reação, por contrariar o paradigma da espontaneidade linear, permite ao professor problematizar a natureza da ciência e como ela evolui diante do inusitado.

A metodologia da Resolução de Problemas (RP) se encaixa bem neste contexto. O professor pode apresentar uma questão-problema como: “É possível que uma reação química oscile sem parar? Por quê?” — e, a partir das hipóteses dos alunos, promover uma investigação guiada por vídeos, artigos, simulações ou, se possível, a própria experimentação da reação B-Z.

Esse processo abre espaço para discutir também conceitos como bifurcação, introduzido por Prigogine, mostrando que certos sistemas, ao atingir determinados limiares, podem evoluir para estados inesperados e organizados. Essas bifurcações ajudam os alunos a entenderem que

a natureza pode seguir múltiplos caminhos possíveis, dependendo de pequenas variações nas condições iniciais.

Ao abordar a organização da matéria em sistemas abertos, é possível introduzir o conceito de estruturas dissipativas, ou seja, formas organizadas que emergem em ambientes que trocam continuamente energia com o meio externo. Fenômenos como a formação de redemoinhos, a organização das nuvens e o funcionamento de cidades constituem exemplos práticos e acessíveis aos alunos.

Uma estratégia eficaz para trabalhar esse tema é a utilização da Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP). Os estudantes podem ser desafiados a pesquisar e apresentar situações reais em que estruturas dissipativas se manifestam, estabelecendo conexões entre os conteúdos de Termodinâmica e fenômenos observáveis no cotidiano, abrangendo desde as ciências da natureza até as ciências sociais. O livro paradidático oferece suporte conceitual e histórico, permitindo que os alunos compreendam como ordem e complexidade podem emergir espontaneamente em ambientes caóticos, desde que haja fluxo de energia.

Essa abordagem favorece a interdisciplinaridade, o protagonismo estudantil e a construção colaborativa do conhecimento, além de promover o desenvolvimento do pensamento crítico e sistêmico. O material didático busca, assim, servir como ponto de partida para discussões aprofundadas, despertando a curiosidade dos alunos e destacando a relevância e a aplicabilidade da Termodinâmica em contextos que vão além dos livros didáticos convencionais. Ao integrar a História da Ciência a conceitos avançados, o professor contribui para que os estudantes desenvolvam uma visão crítica, contextualizada e reflexiva sobre o mundo que os cerca.

Sugere-se que a intervenção pedagógica seja distribuída em duas aulas. Na primeira, o professor realiza uma exposição detalhada e contextualizada da temática, apresentando conceitos fundamentais, exemplos práticos e recursos visuais que facilitem a compreensão dos alunos. Esse momento tem como objetivo fornecer a base teórica necessária para que os estudantes possam se familiarizar com o conteúdo, preparando-os para uma participação ativa na etapa seguinte.

Na segunda aula, propõe-se um ambiente de aprendizagem mais dinâmico e interativo, no qual sejam promovidos o debate e a reflexão crítica. Para isso, podem ser utilizados métodos pedagógicos ativos, como o estudo de caso, que permite aos alunos analisarem situações reais e aplicar os conceitos aprendidos; a aprendizagem baseada em problemas, que estimula a resolução colaborativa de desafios relacionados ao conteúdo; e a aprendizagem por projetos, que favorece a investigação aprofundada e a construção coletiva do conhecimento. Essas

metodologias incentivam o protagonismo estudantil, desenvolvem habilidades de pensamento crítico e promovem uma maior assimilação do conteúdo.

A divisão do tempo e das estratégias pedagógicas propostas está plenamente alinhada às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que valoriza o uso de metodologias ativas e a construção do conhecimento de forma contextualizada e significativa (Brasil, 2018). Ao equilibrar momentos expositivos e atividades interativas, a proposta contribui para o desenvolvimento das competências gerais e específicas previstas para o Ensino Médio, promovendo uma aprendizagem mais integral e adequada às demandas contemporâneas da educação brasileira.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

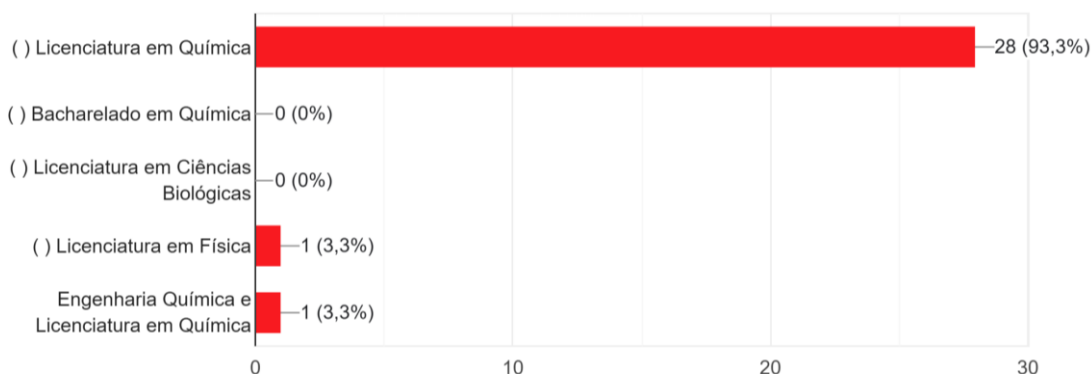
Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos por meio da aplicação do questionário elaborado para avaliar o livro paradidático “Desvendando a História da Termodinâmica: Uma Jornada do Equilíbrio ao Caos” (Apêndice A). A análise foi organizada conforme a estrutura dos três blocos do instrumento de coleta, respeitando os objetivos propostos em cada etapa. As respostas foram analisadas de forma descritiva, buscando identificar tendências, padrões e aspectos qualitativos relevantes para a compreensão da percepção dos docentes sobre o material educacional.

5.1 PERFIL DOS RESPONDENTES

O primeiro bloco do questionário teve como objetivo traçar o perfil profissional dos participantes, a fim de contextualizar suas respostas e interpretações a respeito do produto educacional proposto. Ao compreender o contexto formativo, a área de atuação e o grau de familiaridade dos respondentes com temas como História da Química e Termodinâmica Fora do Equilíbrio (TFE), é possível interpretar com mais precisão as avaliações e percepções levantadas nas etapas seguintes da pesquisa.

Participaram da pesquisa, de forma colaborativa, 30 professores atuantes no ensino de Química e em áreas correlatas. No que se refere à formação acadêmica, verificou-se uma predominância expressiva de licenciados em Química, que correspondem a 93,3% dos respondentes, conforme ilustrado no **Gráfico 1**.

Gráfico 1. Formações acadêmicas dos participantes da entrevista.

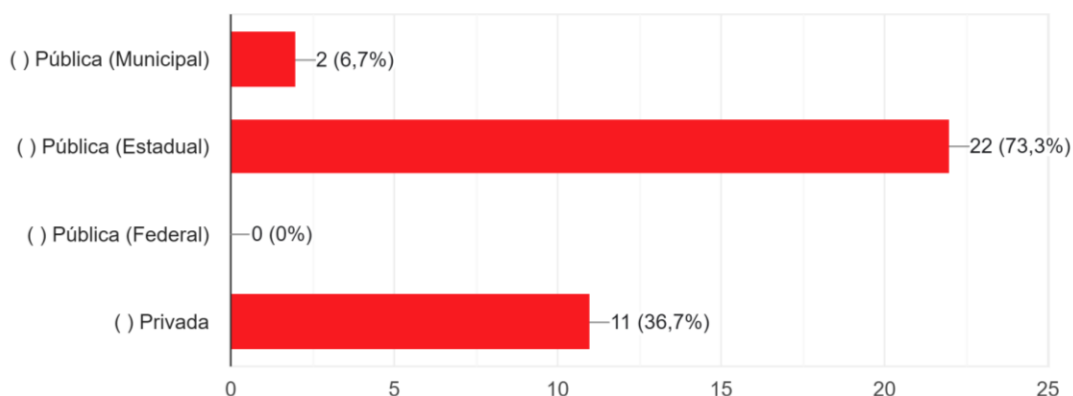


Fonte: Dados do autor (2025).

Esse dado evidencia que o questionário alcançou seu público-alvo com assertividade, permitindo uma análise fundamentada nas experiências de docentes com formação específica na área. Apenas um participante possuía formação em Física (3,3%) e outro indicou formação simultânea em Engenharia Química e Licenciatura em Química (3,3%), o que amplia ligeiramente a diversidade dos saberes presentes no grupo, mas sem comprometer o foco na Educação Química.

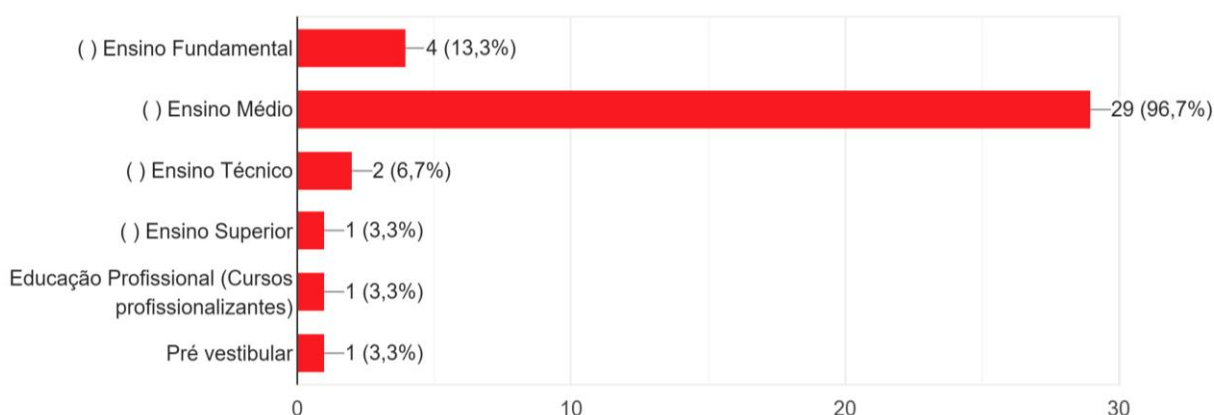
Quanto à esfera administrativa de atuação, os dados revelam que 73,3% dos professores atuam na rede pública estadual, 36,7% na rede privada e 6,7% na rede municipal. Ressalta-se que houve a possibilidade de marcar mais de uma opção, o que indica que alguns docentes trabalham simultaneamente em diferentes redes. Esse dado reforça a amplitude da atuação dos professores de Química, especialmente na rede estadual, onde o ensino médio é mais presente e exige uma abordagem direta de conteúdos curriculares de Química, como a Termodinâmica. Essas informações estão representadas no **Gráfico 2** que ilustra a distribuição dos participantes segundo a esfera administrativa de atuação.

Gráfico 2. Atuação dos professores por rede de ensino.



Fonte: Dados do autor (2025).

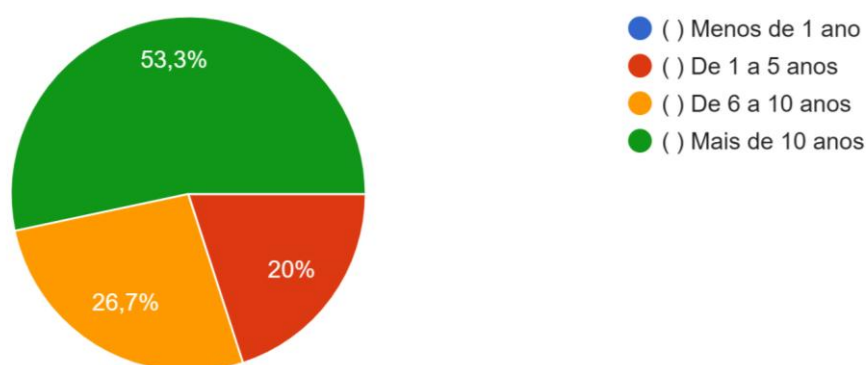
No que diz respeito ao nível de ensino, 96,7% dos participantes lecionam no Ensino Médio, que constitui o foco principal de atuação. Vale destacar que os entrevistados puderam marcar mais de uma opção, indicando que alguns docentes atuam simultaneamente em diferentes níveis de ensino. Também há docentes que atuam no Ensino Fundamental (13,3%), Técnico (6,7%), Superior (3,3%) e na Educação Profissional (3,3%), conforme mostra o **Gráfico 3**.

Gráfico 3. Atuação dos professores por nível de ensino.

Fonte: Dados do autor (2025).

Esse dado é de grande relevância para esta pesquisa, visto que o material didático proposto se destina prioritariamente ao Ensino Médio, o que garante que as avaliações realizadas são oriundas de profissionais inseridos no contexto para o qual o produto educacional foi pensado.

O **Gráfico 4** apresenta os dados relativos à experiência profissional dos participantes.

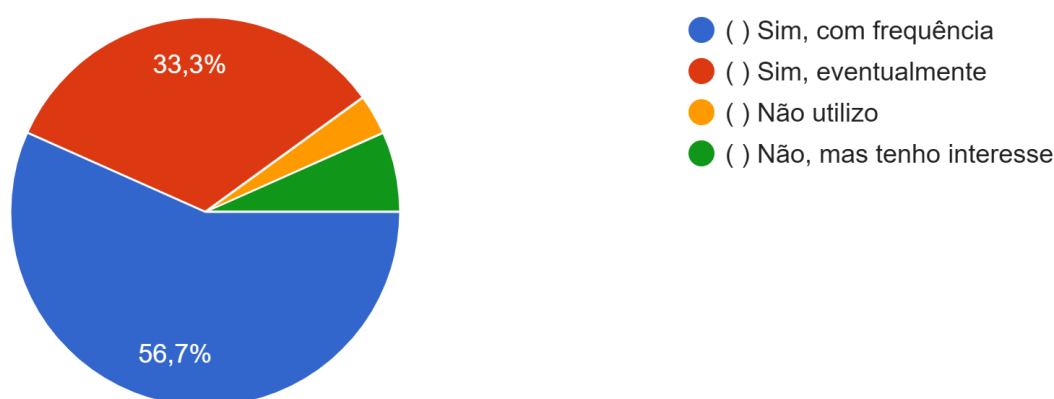
Gráfico 4. Tempo de experiência dos entrevistados.

Fonte: Dados do autor (2025).

Observa-se que a maioria dos participantes (53,3%) possui mais de 10 anos de atuação docente, enquanto 26,7% têm entre 6 e 10 anos, e 20% estão em início de carreira (1 a 5 anos de atuação). Esses resultados evidenciam um grupo heterogêneo em termos de tempo de experiência, com predominância de profissionais mais experientes, conferindo maior consistência às análises e aos *feedbacks* obtidos durante a avaliação do produto educacional.

A quinta questão buscou compreender a frequência com que os docentes utilizam a História da Ciência como recurso didático. Observou-se que 56,7% utilizam frequentemente esse tipo de abordagem, enquanto 33,3% o fazem eventualmente. Apenas 3,3% afirmaram não utilizar, e 6,7% declararam não utilizar, mas demonstraram interesse em fazê-lo. Os dados expostos no **Gráfico 5** apontam para uma receptividade positiva ao uso da História da Ciência como estratégia de ensino, o que valida a proposta de integrar conteúdos históricos no material didático proposto e evidencia que o livro paradidático vai ao encontro de uma demanda real por abordagens mais contextualizadas.

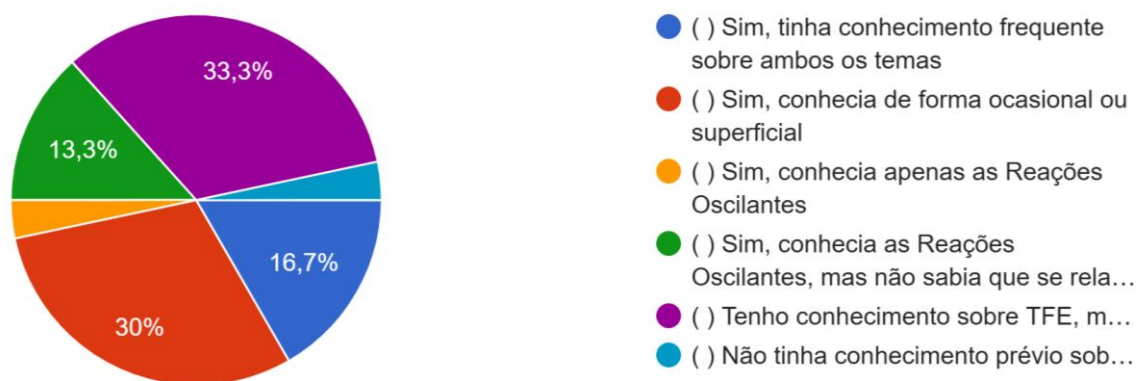
Gráfico 5. Frequência de uso da História da Ciência como recurso didático.



Fonte: Dados do autor (2025).

Por fim, a última questão deste bloco abordou o grau de familiaridade dos professores com a Termodinâmica Fora do Equilíbrio (TFE) e as Reações Oscilantes. Os resultados foram surpreendentes, considerando que a temática é pouco explorada, mesmo assim 16,7% dos docentes afirmaram ter conhecimento frequente sobre ambos os temas, enquanto 30% possuíam conhecimento superficial. Cerca de 13,3% conheciam as reações oscilantes, mas não as relacionavam com a TFE, e 3,3% tinham conhecimento apenas das reações oscilantes.

Um dado relevante é que 33,3% dos participantes afirmaram conhecer a TFE, mas nunca a abordaram em sala de aula, o que indica que, embora o tema desperte interesse, ainda existem barreiras didáticas ou curriculares que dificultam sua exploração com os estudantes. Apenas um docente (3,3%) declarou não possuir nenhum conhecimento prévio sobre os temas, reforçando o caráter inovador e, ao mesmo tempo, desafiador do conteúdo proposto para o produto educacional. Esses resultados estão expressos no **Gráfico 6**.

Gráfico 6. Familiaridade dos professores com a TFE e as reações oscilantes.

Fonte: Dados do autor (2025).

Diante dos resultados obtidos no primeiro bloco, observa-se que, embora os docentes possuam sólida formação acadêmica e ampla experiência profissional, ainda persistem lacunas significativas na formação continuada e na atualização de conteúdos que vão além da Termodinâmica Clássica. O baixo índice de familiaridade com a Termodinâmica Fora do Equilíbrio evidencia o espaço ainda restrito que esse tema ocupa tanto na formação inicial quanto nos materiais didáticos convencionais. Nesse contexto, o produto educacional proposto não apenas contribui para suprir uma lacuna no ensino de Química, como também oferece subsídios teóricos e didáticos que permitem aos professores ampliarem seus repertórios pedagógicos e potencializar a aprendizagem dos alunos por meio de temas que dialogam com fenômenos complexos e contemporâneos.

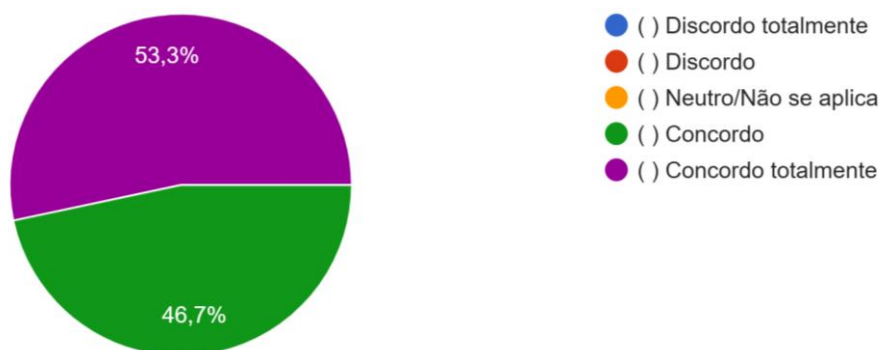
5.2 AVALIAÇÃO DO MATERIAL DIDÁTICO

O segundo bloco do questionário concentrou-se na avaliação do livro paradidático elaborado como produto educacional da presente pesquisa. Este bloco constitui o núcleo do trabalho por abordar diretamente os aspectos essenciais do material, como conteúdo, clareza, aplicabilidade, estética e potencial didático. As perguntas foram, em sua maioria, estruturadas com base em escala de Likert, o que permitiu mensurar o grau de concordância dos participantes diante de diferentes afirmações, possibilitando uma análise quantitativa e qualitativa dos dados.

A primeira questão deste bloco investigou a percepção dos professores sobre a relevância dos temas abordados. Os resultados revelaram unanimidade: 46,7% dos participantes concordaram e 53,3% concordaram totalmente que a Termodinâmica Fora do Equilíbrio (TFE)

e as Reações Oscilantes constituem tópicos pertinentes para serem discutidos no Ensino Médio, como mostra o **Gráfico 7**.

Gráfico 7. Percepção dos professores sobre a relevância da TFE e das reações oscilantes no Ensino Médio.

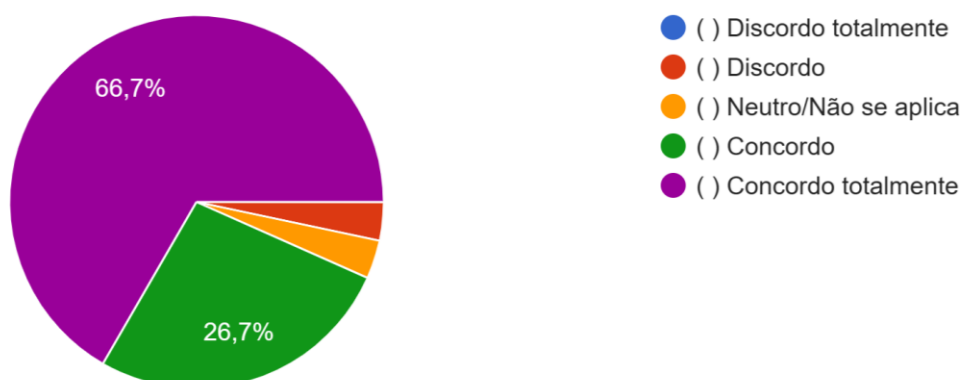


Fonte: Dados do autor (2025).

Esse dado evidencia a abertura dos docentes à inclusão de tópicos científicos atuais e instigantes, reforçando a importância da proposta do livro e justificando sua inserção como ferramenta pedagógica inovadora.

O **Gráfico 8** apresenta a percepção dos professores quanto à adequação do conteúdo ao Ensino Médio.

Gráfico 8. Percepções sobre a adequação do conteúdo ao Ensino Médio.



Fonte: Dados do autor (2025).

Os resultados indicam que a adequação do conteúdo ao Ensino Médio foi amplamente reconhecida por 93,4% dos professores, sendo 26,7% concordando e 66,7% concordando totalmente que o material atende às necessidades desse nível de ensino. Entretanto, a análise

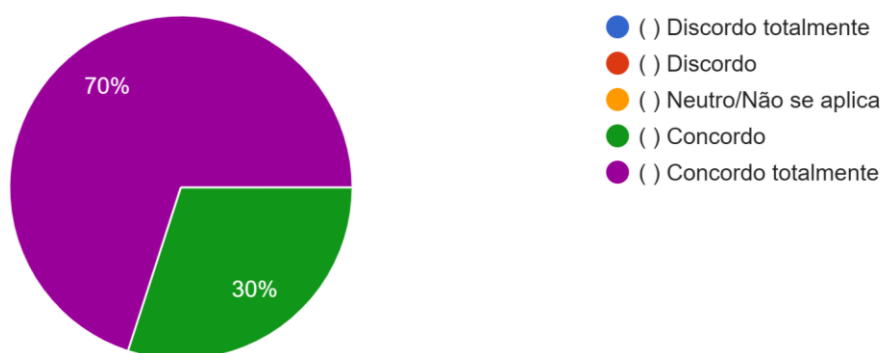
dos casos minoritários traz contribuições importantes para compreender a aplicabilidade do produto educacional.

Um dos respondentes (3,3%), professor de Física, discordou da adequação, argumentando que a linguagem do material se aproxima mais do Ensino Superior. Apesar dessa discordância, reconheceu a viabilidade do livro como ferramenta didática, ressaltando que sua utilização demanda mediação docente para adaptação ao Ensino Médio. Outro participante (3,3%), professor de Química atuante tanto no Ensino Médio quanto no Superior, adotou posição neutra, considerando que a aplicação ao Ensino Médio nem sempre se aplica integralmente. Esse respondente, contudo, destacou a clareza das informações e a linguagem acessível, sugerindo a inclusão de exemplos práticos adicionais para aproximar os conteúdos da realidade dos alunos.

Essas diferentes perspectivas evidenciam a importância de considerar a formação e a experiência dos docentes ao avaliar a aplicabilidade do material, contribuindo para aprimorar o produto educacional, aumentar sua flexibilidade pedagógica e consolidar o produto educacional proposto como um instrumento capaz de promover alfabetização científica crítica, contextualização temática e atualização pedagógica.

Com relação à linguagem empregada (questão 9 do questionário), à diagramação e à organização visual do material didático, os resultados revelaram unanimidade entre os docentes, conforme mostra o **Gráfico 9**.

Gráfico 9. Percepções sobre a linguagem, diagramação e organização visual do material.



Fonte: Dados do autor (2025).

Do total de participantes, 70% declararam concordar e 30% concordar totalmente com a afirmação, o que evidencia que a opção por uma abordagem mais informal, dialógica e

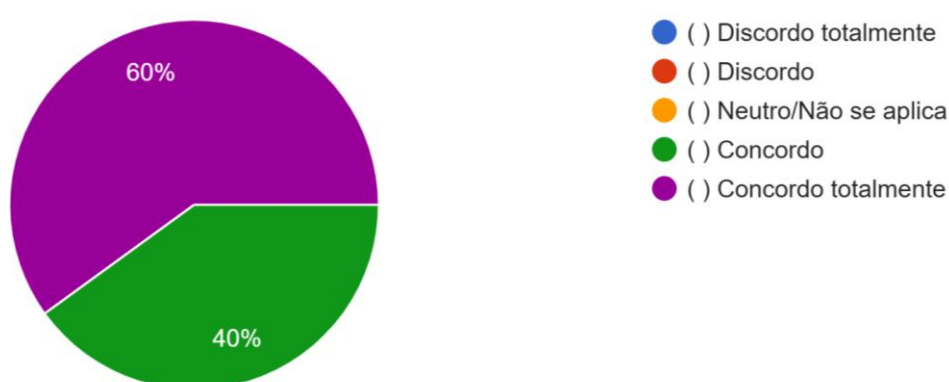
conectada à realidade dos estudantes produziu efeitos positivos, tornando o material mais próximo e aplicável ao contexto da sala de aula.

Nesse sentido, todos os respondentes reconheceram que o texto apresenta linguagem acessível, apoiada em exemplos do cotidiano e construída em tom engajador, característica que amplia sua pertinência didática.

Da mesma forma, a estética e a organização visual, referentes a questão 10 do questionário, também foram bem avaliadas. Para 100% dos professores, a diagramação facilitou a leitura e a compreensão, sendo que a maioria (70%) manifestou concordância total. Esse resultado evidencia que o cuidado com o design gráfico e com a estruturação visual do paradidático, frequentemente negligenciados em materiais pedagógicos, configurou-se como diferencial relevante. Tais aspectos, ao favorecer a fluidez da leitura, contribuíram para tornar a aprendizagem mais efetiva e significativa.

A questão seguinte buscou avaliar o potencial do material em articular o conteúdo com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o Ensino Médio. A totalidade dos respondentes (100%) avaliou positivamente que o livro paradidático pode promover discussões mais amplas e contextualizadas sobre termodinâmica (entropia, espontaneidade, estruturas dissipativas, auto-organização e bifurcação) em sala de aula, sendo que 60% concordaram totalmente e 40% concordaram, conforme ilustra o **Gráfico 10**.

Gráfico 10. Percepção dos professores sobre a adequação do material às diretrizes da BNCC.



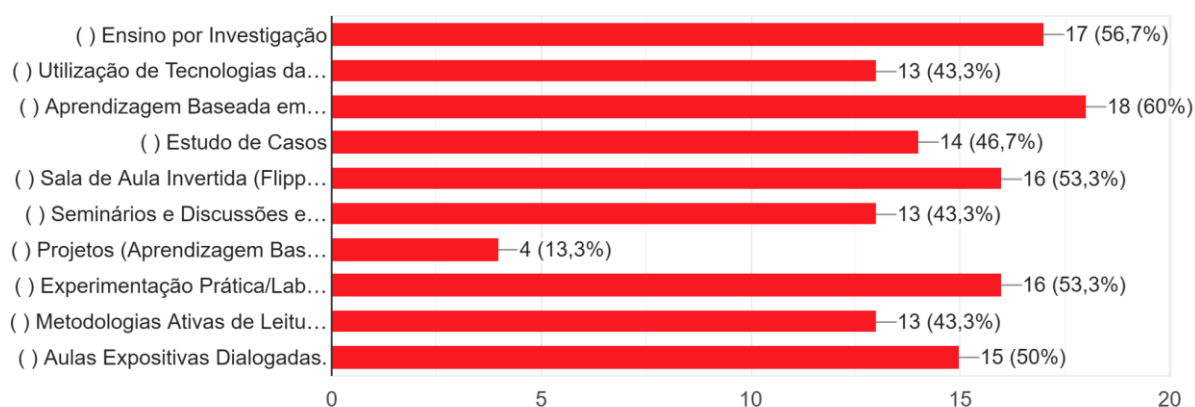
Fonte: Dados do autor (2025).

Esse resultado é particularmente relevante, pois a BNCC destaca a necessidade de um ensino de ciências que vá além da memorização, promovendo a compreensão de fenômenos complexos, a interdisciplinaridade e a contextualização (Brasil, 2018). A capacidade do produto educacional de estimular discussões sobre temas como auto-organização e bifurcação, que

conectam a química a sistemas biológicos e sociais, evidencia o alinhamento com as competências e habilidades propostas pela BNCC para a formação integral do estudante.

Em relação às metodologias de ensino-aprendizagem que os docentes consideraram adequadas para trabalhar o conteúdo do livro, destacou-se a pluralidade de abordagens (**Gráfico 11**).

Gráfico 11. Metodologias consideradas adequadas pelos docentes para aplicação do produto educacional.

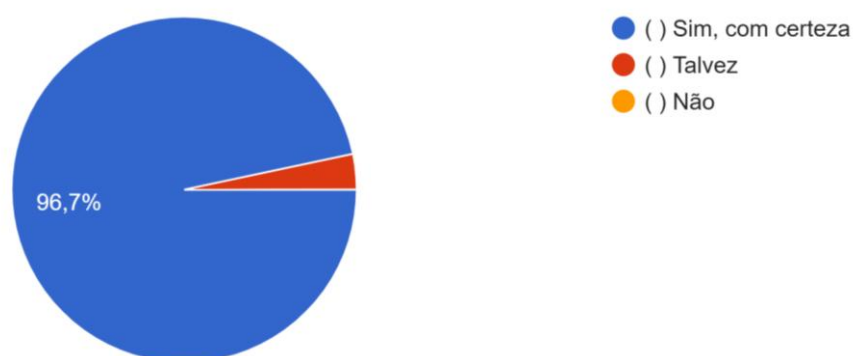


Fonte: Dados do autor (2025).

De acordo com o **Gráfico 11**, a Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) foi a mais citada (60%), seguida pelo Ensino por Investigação (56,7%), Experimentação Prática (53,3%), Sala de Aula Invertida (53,3%) e Aulas Expositivas Dialogadas (50%). Também foram destacadas metodologias como Estudo de Casos (46,7%), uso de TICs (43,3%), Seminários e Discussões em Grupo (43,3%), e Leitura e Escrita Ativa (43,3%). Esses dados indicam que o livro paradidático desperta a intenção de aplicação didática diversificada, contemplando práticas mais interativas e investigativas, alinhadas com os princípios das metodologias ativas, o que amplia ainda mais sua aplicabilidade em diferentes contextos escolares.

Por fim, a intenção de recomendação do material didático por parte dos docentes foi quase unânime: 96,7% afirmaram que recomendariam o material com certeza, enquanto apenas 3,3% responderam “talvez”, como mostra o **Gráfico 12**.

Gráfico 12. Disposição dos professores em recomendar o produto educacional.



Fonte: Dados do autor (2025).

Nenhum participante declarou que não recomendaria. Esse resultado reforça o alto grau de aceitação do produto educacional, tanto por seu conteúdo e formato quanto pela proposta pedagógica que o sustenta.

Em síntese, os dados deste segundo bloco evidenciam que o produto educacional proposto cumpre com excelência os critérios de relevância temática, clareza, organização didática e aplicabilidade em sala de aula. Ele se mostra como um recurso inovador, capaz de atender às exigências da BNCC, estimular práticas pedagógicas diversificadas e preencher lacunas no ensino da Termodinâmica no Ensino Médio voltadas para a Química. A resposta positiva por parte dos docentes participantes confirma a viabilidade e o valor educativo do material, reforçando seu potencial como contribuição significativa para o ensino de Química contemporâneo.

5.3 OPINIÃO QUALITATIVA DOS PARTICIPANTES

O terceiro bloco do questionário possibilitou que os docentes expressassem livremente suas impressões, sugestões e críticas sobre o livro paradidático. Essa etapa revelou contribuições relevantes que complementam os dados quantitativos, permitindo acesso a percepções subjetivas, ricas em nuances e capazes de evidenciar aspectos não captados pelas escalas fechadas. Para garantir a ética e o anonimato dos participantes, os depoimentos foram identificados pela letra "P" seguida de um número.

A primeira pergunta orientadora dessa etapa foi: *“Quais foram, na sua opinião, os principais pontos fortes e fracos do produto educacional?”* A análise das respostas revelou um forte reconhecimento da qualidade, relevância e aplicabilidade do e-book, evidenciado por

expressões como” material excelente” (P2), “material riquíssimo” (P7), “ótimo, bem escrito e bem diagramado” (P10), e “e-book contempla de forma satisfatória as necessidades do ensino médio” (P30). Tais elogios corroboram os dados apresentados no segundo bloco do questionário, reforçando a consistência da avaliação positiva em diferentes dimensões.

5.3.1 Pontos fortes destacados pelos docentes

Os principais pontos fortes apontados pelos participantes podem ser agrupados em seis grandes eixos:

I) Linguagem acessível e engajadora – Destacada por diversos participantes (P3, P5, P13, P15, P18, P27), a clareza na exposição de conteúdos complexos foi constantemente elogiada. O e-book foi reconhecido como um material que “desmistifica” conceitos da Termodinâmica Fora do Equilíbrio, sem perder o rigor científico (P5). Essa característica do material é fundamental para promover a alfabetização científica dos estudantes, tornando o conhecimento mais próximo e compreensível, sem perder a profundidade necessária (Chassot, 2003).

II) Integração entre teoria e cotidiano – Professores como P4 e P7 ressaltaram a capacidade do material de conectar os conceitos científicos com situações do dia a dia, algo fundamental para tornar o ensino mais compreensível e próximo à realidade dos estudantes.

III) Contextualização Histórica – A contextualização histórica foi amplamente valorizada (P13, P14, P26, P28), aproximando os estudantes do processo de construção do conhecimento. P7 destacou que "o material [é] riquíssimo na parte histórica, na abordagem relacionando situações cotidianas". P14 ressaltou que “a história associada aos conceitos torna a ciência mais real, mais humana”. Essas percepções se alinham perfeitamente com a visão de Paulo Henrique Oliveira Vidal e Paulo Alves Porto (2012, p. 12), que afirmam que "por meio da história da ciência, é possível propiciar, aos estudantes, maior compreensão acerca das disciplinas científicas". A contextualização com exemplos do dia a dia (P4, P14) e o embasamento teórico (P1) foram apontados como fatores que tornam o conteúdo não apenas interessante, mas também significativo para os alunos, transcendendo a mera memorização de fatos e fórmulas. P28 complementa essa visão ao mencionar que o e-book "traz consigo uma carga importante de teoria, porém com a contextualização da história", evitando uma "leitura cansativa ou como mais um texto didático que precisa ser lido como obrigação". Essa capacidade de humanizar a

ciência, ao apresentar sua construção temporal e social, é um diferencial importante para o engajamento dos estudantes.

IV) Estética e organização didática – A diagramação, o uso de imagens e a organização visual do material foram amplamente valorizados por diversos docentes (P4, P6, P8, P10, P22, P30). O design alinhado ao conteúdo, a disposição clara dos tópicos e a riqueza visual foram apontados como elementos que favoreceram tanto a leitura quanto a compreensão do conteúdo. Essa percepção dos professores reforça os resultados de Mayer (2009), que destaca que as pessoas aprendem melhor quando combinam palavras e imagens, em vez de apenas palavras. A integração harmoniosa entre elementos visuais e textuais, além de contribuir para a estética e a fluidez do material, revela-se um aspecto central para promover uma aprendizagem mais eficaz.

V) Profundidade e abordagem inovadora do conteúdo – Muitos participantes valorizaram a abrangência do material (P5, P22), a originalidade dos temas abordados (P17, P29), e o destaque dado a tópicos geralmente ausentes nos livros didáticos do ensino médio, como as Reações Oscilantes e os princípios da TFE.

VI) Potencial didático para uso em sala de aula – Professores como P2, P6, P14 e P21 reconheceram a aplicabilidade do e-book em suas práticas pedagógicas, destacando a utilidade do material tanto para o preparo de aulas quanto para a diversificação das metodologias em contextos reais de ensino.

5.3.2 Pontos fracos e sugestões de melhoria

Embora os elogios tenham sido predominantes, algumas observações críticas e sugestões construtivas foram apontadas, especialmente no que diz respeito à extensão do material. Professores como P4, P8, P14, P15, P22 e P28 sinalizaram que o tamanho do e-book pode representar um desafio frente à realidade do tempo disponível nas aulas de Química no Ensino Médio, o que é compreensível dentro do atual formato curricular. Outro ponto recorrente foi a ausência de exercícios práticos ou propostas aplicadas, mencionada por P5, P6, P7, P10, P13, P20 e P22.

Por fim, a última questão desta etapa — “O que você sugeriria para melhorar o material, pensando na realidade do ensino médio?” — permitiu identificar propostas construtivas

voltadas ao aprimoramento do e-book. Embora o material tenha sido amplamente reconhecido como didático e acessível, os participantes destacaram elementos que poderiam potencializar sua aplicabilidade pedagógica. Dentre as sugestões mais recorrentes, destacam-se:

- I) Exercícios com gabarito ou resoluções comentadas (P2, P5, P6, P7, P18);
- II) Propostas de experimentos de baixo custo (P10, P19);
- III) Mapas conceituais ou sínteses por capítulo (P14, P20);
- IV) Sequências didáticas compatíveis com a carga horária da rede pública (P14, P19);
- V) Aplicações das fórmulas matemáticas com exemplos contextualizados (P13, P22).

Tais sugestões não apontam para limitações no conteúdo conceitual do e-book, mas sim para a necessidade de ampliar os subsídios que favoreçam sua implementação em contextos escolares reais. Nesse sentido, as propostas revelam uma preocupação com a mediação pedagógica do professor, ou seja, com o modo como o material pode ser utilizado de forma prática, eficiente e compatível com as condições concretas do Ensino Médio, especialmente na rede pública. Recomendações como a inclusão de exercícios comentados, experimentos acessíveis, mapas conceituais e sequências didáticas mostram que os docentes não questionam a qualidade científica do conteúdo, mas desejam instrumentos que facilitem sua integração à rotina escolar.

Também surgiram contribuições pontuais, como a inclusão de animações interativas (P24), associação com temas sensíveis da sociedade (P25), e a indicação de uso do material em versões para aluno e para professor (P19), todas mostrando o desejo de ampliar o impacto e a acessibilidade do recurso educacional.

Diversos depoimentos expressaram reconhecimento explícito pela contribuição do trabalho para o ensino de Química. Professores como P1, P13, P21 e P27 indicaram que pretendem utilizar o material em suas aulas, que o consideram uma referência para outros colegas da área, e que gostariam de vê-lo amplamente divulgado. Há, portanto, um forte sentimento de pertencimento e valorização do material por parte dos próprios profissionais da educação, o que representa um retorno extremamente significativo para a proposta da pesquisa.

O terceiro bloco revelou que o e-book é amplamente reconhecido por sua clareza, profundidade, visualidade e abordagem inovadora de temas complexos. As críticas construtivas apontam caminhos para futuras versões, especialmente no que diz respeito ao tempo de leitura, sugestões práticas e adequação ao tempo didático disponível. Essa etapa da pesquisa não apenas confirma a validade do material, como também o enriquece ao incorporar a escuta sensível dos profissionais da educação — os principais mediadores do processo de aprendizagem.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo principal elaborar e validar uma proposta de livro paradidático digital sobre a História da Termodinâmica, com ênfase na abordagem da Termodinâmica Fora do Equilíbrio e das Reações Oscilantes, buscando compreender sua relevância, aplicabilidade e contribuição para o ensino de Química no Ensino Médio. Através da análise dos dados obtidos por meio de um questionário aplicado a docentes da área, foi possível identificar percepções valiosas que dialogam com os objetivos propostos.

Os dados do primeiro bloco revelaram que os participantes possuem sólida formação acadêmica e experiência significativa na docência, o que confere legitimidade às suas contribuições avaliativas. A maioria dos docentes atua diretamente no Ensino Médio e demonstra familiaridade com temas científicos contemporâneos, ainda que grande parte aponte não ter abordado em suas práticas conteúdos relacionados à Termodinâmica Fora do Equilíbrio ou Reações Oscilantes. Isso evidencia uma lacuna que reforça a pertinência do material elaborado.

No segundo bloco, considerado o núcleo da avaliação do produto educacional, os resultados apontam de forma consistente para a alta aceitação do produto educacional. A totalidade dos participantes concordou ou concordou totalmente que os temas são relevantes para o Ensino Médio, e mais de 90% avaliaram o conteúdo como adequado às necessidades dessa etapa de ensino. Destaca-se ainda que o material foi reconhecido por sua linguagem acessível, com exemplos do cotidiano, e por sua organização visual, o que contribui para a clareza e engajamento dos leitores. A análise evidenciou também a aderência do conteúdo às diretrizes da BNCC, abrindo espaço para discussões contextualizadas sobre conceitos termodinâmicos complexos, como entropia, auto-organização e bifurcação.

O terceiro bloco da pesquisa fortaleceu os indícios de que o e-book não apenas é aplicável, como também se alinha a diversas metodologias ativas de ensino-aprendizagem. Estratégias como Aprendizagem Baseada em Problemas (60%), Ensino por Investigação (56,7%) e Sala de Aula Invertida (53,3%) foram amplamente indicadas pelos participantes como adequadas para trabalhar os tópicos propostos. Isso demonstra o potencial do material em promover práticas pedagógicas inovadoras, contribuindo para a superação de abordagens tradicionais e fomentando o protagonismo estudantil. A elevada taxa de recomendação do e-book (96,7%) também valida sua relevância no contexto escolar.

Portanto, os resultados obtidos confirmam a viabilidade e a pertinência do e-book como recurso didático que alia aprofundamento teórico, acessibilidade linguística, inovação

metodológica e alinhamento curricular. A proposta não apenas amplia a compreensão sobre a Termodinâmica, mas também desafia o paradigma reducionista tradicional, propondo um olhar mais complexo e integrado sobre os sistemas naturais. Espera-se que este trabalho possa inspirar novas produções didáticas, fomentar reflexões sobre o currículo de Ciências da Natureza e, sobretudo, contribuir para a formação crítica e investigativa dos estudantes do Ensino Médio.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, A.; TEIXEIRA, O. P. B. **Análise de um episódio de ensino envolvendo o uso de um texto paradidático em aulas de Física em uma sala de educação de jovens e adultos.** In: V Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2005, Bauru, Atas. Disponível em: <http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/venpec/conteudo/artigos/3/pdf/p45.pdf>. Acesso em: 22 jul 2025.
- AURANI, Katya M. **As origens da segunda lei da termodinâmica: entropia e probabilidade de estado.** Santo André: Editora UFABC, 2015.
- BARP, E. **Contribuições da História da Ciência para o Ensino da Química: Uma Proposta para Trabalhar o Tópico Radioatividade.** História da Ciência e Ensino: construindo interfaces, v. 8, 2013.
- BARZYKINA, I. Chemistry and Mathematics of the Belousov-Zhabotinsky Reaction in a School Laboratory. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C, v. 97, n. 7, p. 1895-1902, 2020.
- BEN-NAIM, A. Entropy: Order or Information. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C, v. 88, n. 5, p. 594–596, 2011.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular: Educação Básica.** Brasília, DF: MEC, 2018.
- BRIGGS, T. S.; RAUSCHER, W. C. An Oscillating Iodine Clock. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C, v. 50, n. 7, p. 496, 1973.
- BRITO, A. A. de S. FLOGISTO”, “CALÓRICO” & “ÉTER”. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, São Paulo, n. 20, n.º 3/4, p. 1-7, 2008.
- CALLEGARIO, L. J.; HYGINO, C. B.; ALVES, V. L. O; LUNA, F. J.; LINHARES, M. P. A História da Ciência no Ensino de Química: Uma Revisão. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 7, n. 3, p. 977–991, 2015.
- CALUZI, J. J.; MARQUES, D. M. **A história da ciência no ensino de química: algumas considerações.** In: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 5, 2005, Bauru, Anais [...]. Bauru: ABRAPEC 2005. p. 2-10.
- CAPRA, F.; LUISI, P. L. **A visão sistêmica da vida: uma concepção unificada e suas implicações filosóficas, políticas, sociais e econômicas.** São Paulo: Cultrix, 2014.
- CARVALHO, A. M. P. de. O Ensino de Ciências e a Proposição de Sequências de Ensino Investigativas. In: Carvalho, A. M. P. de (Org.). **Ensino de Ciências por Investigação: condições para implementação em sala de aula.** 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.
- CARVALHO, R. F. **Além das nuvens e dos relógios: a ideia de ciência de David Bohm e de Ilya Prigogine.** 2015. Tese (Doutorado em História) - Universidade Federal de Goiás, Faculdade de História (FH), Programa de Pós-Graduação em História, Goiânia, 2015.
- CARVALHO, R. F. **Temporalidade e historicidade em Ilya Prigogine.** 2012. Dissertação (Mestrado em História) - Universidade Federal de Goiás, Faculdade de História, Goiás, 2012.

CARVALHO, R. F. Temporalidade e historicidade em Ilya Prigogine. **Revista História UEG**, Goiânia, v. 1, n. 1, p. 103–118, 2012.

CAVAGNOLI, R. Breve História da Termodinâmica (I): Máquinas Térmicas e a Revolução Industrial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 47, p. e20240367, 2025.

CHAGAS, A. P.; AIROLD, C. Lavoisier, Hess e os primórdios da termoquímica. **Química Nova**, São Paulo, v. 4, n. 3 p. 95-96, 1981.

CHASSOT, A. I. Alfabetização Científica: Questões e Desafios para a Educação. Rio Grande do Sul: Editora Unijuí, 2003.

CHAUÍ-BERLINCK, J. G.; MARTINS, R. A. **As duas primeiras leis**: uma introdução à termodinâmica. 1. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2013.

COLEMAN, B. D.; TRUESDELL, C. On the Reciprocal Relations of Onsager. **The Journal of Chemical Physics**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 28–31, 1960.

DAHMEN, S. R. A obra de Boltzman em Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 281-295, 2006.

DIAS, P. M. C. A hipótese estatística do Teorema-H. **Química Nova**, São Paulo, v. 17, n. 6, p. 1–15, 1994.

DOURADO, S. S.; MARCHIORI, M. A. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 2, p. 1–9, 2019.

EPSTEIN, I.; POJMAN, J.; STEINBOCK, O. Introduction: Self-organization in nonequilibrium chemical systems. **Chaos**, [s. l.], v. 16, n. 3, 2006.

EPSTEIN, I. R.; SHOWALTER, K. Nonlinear Chemical Dynamics: Oscillations, Patterns, and Chaos. **The Journal of Physical Chemistry**, [s. l.], v. 100, n. 31, p. 13132–13147, 1996.

FILGUEIRAS, C. A. L. A revolução Química de Lavoisier – Uma Verdadeira Revolução? **Química Nova**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 1-14, 1995.

FONTANA, R. D. B.; SANTOS, I. A. dos. Os enunciados da segunda lei da termodinâmica: Uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 1–8, 2016.

GATTI, F. G. **Filosofia da mecânica estatística e ensino de física**: redução versus emergência e a importância dos modelos. 2016. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências) - Programa de Pós-Graduação Interunidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002. 176p.

GILMAN, V. People. **Chemical & Engineering News Archive**, [s. l.], v. 81, n. 24, p. 42, 2003.

GIROLAMI, G. S. A Brief History of Thermodynamics, as illustrated by Books and People. **Journal Chemical Education**, Washington D.C., v. 65, p. 298–311, 2020.

GOMES, L. C. A ascensão e queda da teoria do calórico. **Caderno Brasileiro do Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 3, p.1030-1073, 2012.

GUIMARÃES, L. P; GUIOMAR, D. L. de C. **Lavoisier na sala de aula**: A abordagem da história da para o ensino da lei de conservação das massas. *História da Ciência e Ensino*, construindo interfaces, v. 20, 2019.

HERTZ, J. Historique en grandes enjambées de la thermodynamique de l'équilibre. **Journal de Physique IV** (Proceedings), v. 122, p. 3–20, 2004.

JESUS, C. H. de. **Show de Química**: aprendendo Química de forma lúdica experimental. 3. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018.

KAPRAL, R. Far-from equilibrium thermodynamics is at the heart of many real systems and processes. **Journal Science**, [s. l.], v. 86, n. 36, p. 42-43, 2008.

LIN, H. The Effectiveness of Teaching Chemistry through the History of Science. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C., v. 75, n. 10, p. 1326, 1998.

LOURENÇO, I. M. B.; MARCONDES, M. E. R. Um plano de ensino para mol. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 18, p. 22–25, 2003.

LUISI, P. L. **A emergência da vida**: das origens químicas à biologia sintética. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2013.

MAMPPIA, J. M. **A filosofia da natureza de Ilya Prigogine**. 2023. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

MARTINS, A. L. **Estudo e Aplicação do Referencial Bachelardiano de Obstáculos Epistemológicos no Ensino de Sistemas Químicos Oscilantes**. 2013, Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MASSONI, N. T. Ilya Prigogine: uma contribuição à filosofia da ciência. **Revista Brasileira do Ensino da Física**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 1-10, 2008.

MAYER, R. E. **Multimedia Learning**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2009.

MAZALLA Jr, W. Reações Oscilantes: Revisão e Demonstração Experimental. **Química Nova**, São Paulo, v. 1, n. 4, p. 9–15, 1978.

MINAYO, M. C. de S. Introdução. In: MINAYO, M. C. de S; ASSIS, S. G. de; SOUZA, E. R. de (Org.). **Avaliação por triangulação de métodos**: abordagem de programas sociais. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2010.

MONROY, J. I. M. **Divulgación de la máquina de vapor de James Watt mediante un taller educativo en la Biblioteca Pública La Giralda de la ciudad de Bogotá**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Departamento de Física, Universidade Nacional da Colômbia, Bogotá, 2016.

NOBELPRIZE. **Lars Onsager – Biographical**. Nobel Prize Outreach AB, 2025. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1968/onsager/biographical/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

OESPER, R. E. Josiah Willard Gibbs. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C., v. 32, n. 5, p. 267, 1955.

OLIVEIRA, R. M. de. Revolução Industrial na Inglaterra: Um Novo Cenário na Idade Moderna. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 89–116, 2017.

OLIVEIRA, J. A. de O.; MEDONÇA, P. C.C. Proposta pedagógica para o ensino explícito de argumentação: o caso da controvérsia histórica do gás oxigênio. **Revista Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 41, n. 3, p. 266-274, 2019.

OLIVA, C. R. D. *et al.* Explorando os conceitos de oxidação e redução a partir de algumas características da história da ciência. **Revista Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 42, n. 1, p. 30-36, 2020.

PÁDUA, A. B. de; PÁDUA, C. G. de; SILVA, J. L. C. **A História da termodinâmica Clássica: Uma Ciência Fundamental**. Londrina: EDUEL, 2009.

PASCOAL, A. dos S. **A evolução histórica da máquina térmica de Carnot como proposta para o Ensino da segunda lei da Termodinâmica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2016.

PASSOS, J. C. Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 3603, 2009.

PEREIRA, L. dos S. *et al.* Wilhelm Ostwald para além do antiatomismo. **Química Nova**, São Paulo, v. 44, n. 2, p. 256–266, 2021.

PIRES, R. G.; AMARAL, C. L. C.; PALANCH, W. B. de L. História da ciência em livros didáticos de química: características das pesquisas sobre a temática. **Revista Ciências & Ideias**, Campos dos Goytacazes, v. 10, n. 3, p. 178–190, 2019.

PORTO, P. A. *In: Ensino de Química em Foco*. SANTOS, W. L. P.; MALDANER, O. A. (Orgs.) Editora Unijuí: Ijuí, 2010. 159-180p.

PRIGOGINE, I. **Autobiografia**. Margem, São Paulo, n. 17, p. 221–233, 2003.

RAMÍREZ, A. C. La Máquina de Vapor y la Termodinámica. **Educación Química**, México, v. 3, n. 4, p. 222–225, 1992.

RASTOGI, R. P.; SRIVASTAVA, R. C.; SINGH, S. N. Nonequilibrium thermodynamics of electrokinetic phenomena. **Chemical Reviews**, [s. l.], v. 93, n. 6, p. 1945–1990, 1993.

REIS, M. C.; BONO, A.; BASSI, M. S. A segunda lei da termodinâmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1–7, 2012.

RODRIGUES, M. A. A leitura e a escrita de textos paradidáticos na formação do futuro professor de Física. **Ciência & educação**, Bauru, v. 21, n. 3, p. 693–709, 2015.

ROSEN, S. J. Willard Gibbs (1839-1903). A modest genius. **Journal of Chemical Education**, v. 60, n. 7, p. 593–599, 1983.

SANDLER, S. I.; WOODCOCK, L. V. Historical Observations on Laws of Thermodynamics. **Journal of Chemical & Engineering Data**, [s. l.], v. 55, n. 10, p. 4485–4490, 2010.

SANTOLIN, E. L. **Energia no Cotidiano: Uma Abordagem para o Ensino Médio Envolvendo a Termodinâmica**. 2021. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2021.

SANTOS, W. L. P.; MALDANER, O. A. **Ensino de Química em Foco**. Ijuí: Editora Unijuí, 2010.

SANTOS, Z. T. S. dos. **Ensino de entropia: um enfoque histórico e epistemológico**. 2009. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Sociais e Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Educação, Rio Grande do Norte, 2009.

SCHUBERT, F. E. Rumford's Experimental Challenge to Caloric Theory: "Big Science" 18th-Century Style with Important Results for Chemistry and Physics. **Journal of Chemical Education**, Washington D. C., v. 96, n. 9, p. 1955-1960, 2019.

SILVA, G. R.; ERROBIDART, N. C. G. A Construção Histórica Contextual da Termodinâmica para o Ensino Médio. **Insignare Scientia**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 1-10, 2024.

SOLOVEICHIK, S. The last fight for phlogiston and the death of Priestley, Samuel Soloveichik **Journal of Chemical Education**, Washington D.C., v. 39, n. 12, p. 644, 1962.

SOUZA, P. V. S.; DIAS, P. M. C.; SANTOS, F. M. P. Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 2502–2504, 2013.

SPILLANE, N. K. What's Copenhagen Got To Do With Chemistry Class? Using a Play to Teach the History and Practice of Science. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C., v. 90, n. 2, p. 219–223, 2013.

SPIRE, A. **O pensamento Prigogine**. Lisboa: Instituto Piaget, 1999.

THIRRING, H. Ludwig Boltzmann. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C., v. 29, n. 6, p. 298, 1952.

UMPIERRE, A. **Introdução à Termodinâmica do Não-Equilíbrio Clássica**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

VIDAL, P. H. O.; PORTO, P. A. A história da ciência nos livros didáticos de química do PNLEM 2007. **Ciência & Educação**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 291–308, 2012.

VIEIRA A. J. Entre o tempo e a eternidade. **Revista Galáxia**, PUC, São Paulo, n. 6, p. 291–299, 2006.

WEBER, R. **Diálogos com sábios e cientistas – a busca da unidade**. 1. ed. São Paulo: Cultrix, 1991.

WEI, J. Irreversible thermodynamics in engineering. **Industrial & Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 58, n. 10, p. 55–60, 1966.

WISNIAK, J. Conservation of Energy: Readings on the origins of the First Law of Thermodynamics Part I. **Educação Química**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 159–171, 2008.

YIN, R. Concept and Theory of Dynamic Operation of the Manufacturing Process. **Theory and Methods of Metallurgical Process Integration**, [s. l.], v. 1, p. 13–53, 2016.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Questionário Avaliativo enviado aos Professores

Questionário de Avaliação do Produto Educacional “Desvendando a História da Termodinâmica”

Este questionário faz parte da dissertação de mestrado de Humberto Gomes, sob orientação do Prof. Dr. Luciano de Azevedo, pelo Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional Ensino de Química da UFRPE. Seu objetivo é avaliar o material didático em formato de e-book intitulado “Desvendando a História da Termodinâmica”, que acompanha este formulário.

O material paradidático propõe a utilização da História da Ciência no ensino de Química, com foco na evolução da Termodinâmica – da abordagem clássica (em equilíbrio) até os processos irreversíveis e reações oscilantes descritas na Termodinâmica Fora do Equilíbrio.

Sua participação é fundamental para aprimorar este material e contribuir para a melhoria do ensino de Química.

Ao prosseguir com este questionário, você declara que leu e compreendeu as informações apresentadas, está ciente de que sua participação é voluntária e poderá se retirar a qualquer momento, sem qualquer prejuízo. As respostas serão utilizadas exclusivamente para fins acadêmicos, de forma anônima e confidencial, respeitando as diretrizes éticas da pesquisa científica.

Tempo estimado de resposta: 3 minutos

Importante: só continue se já tiver lido o material enviado.

Agradecemos imensamente sua colaboração!

BLOCO 1 – Perfil do(a) Respondente

1. Qual a sua formação acadêmica principal?

- ☐ Licenciatura em Química
- ☐ Bacharelado em Química
- ☐ Licenciatura em Ciências Biológicas
- ☐ Licenciatura em Física
- ☐ Outra (Especifique: _____)

2. Em qual(is) esfera(s) administrativa(s) de ensino você atua? (pode marcar mais de uma opção)

- ☐ Pública (Municipal)
- ☐ Pública (Estadual)
- ☐ Pública (Federal)
- ☐ Privada
- ☐ Outra (Especifique: _____)

3. Você leciona em qual nível de ensino? (pode marcar mais de uma opção)

- ☐ Ensino Fundamental
- ☐ Ensino Médio
- ☐ Ensino Técnico
- ☐ Ensino Superior

☐ Outros (especifique abaixo)

4. Há quanto tempo você atua como professor(a) de Química ou áreas afins?

☐ Menos de 1 ano

☐ De 1 a 5 anos

☐ De 6 a 10 anos

☐ Mais de 10 anos

5. Você costuma utilizar recursos didáticos que abordam a História da Ciência em suas aulas?

☐ Sim, com frequência

☐ Sim, eventualmente

☐ Não utilizo

☐ Não, mas tenho interesse

6. Antes de ler o e-book, qual era o seu nível de conhecimento sobre a Termodinâmica Fora do Equilíbrio (TFE) e/ou Reações Oscilantes?

☐ Sim, tinha conhecimento frequente sobre ambos os temas

☐ Sim, conhecia de forma ocasional ou superficial

☐ Sim, conhecia apenas as Reações Oscilantes

☐ Sim, conhecia as Reações Oscilantes, mas não sabia que se relacionavam à TFE

☐ Tenho conhecimento sobre TFE, mas nunca abordei em aula

☐ Não tinha conhecimento prévio sobre esses temas

BLOCO 2 – Avaliação do Material Didático

7. Você considera que os temas abordados no material didático (Termodinâmica Fora do Equilíbrio e Reações Oscilantes) são relevantes para serem discutidos no ensino médio?

☐ Discordo totalmente

☐ Discordo

☐ Neutro/Não se aplica

☐ Concordo

☐ Concordo totalmente

8. Na sua opinião, o conteúdo apresentado no livro está adequado às necessidades do ensino médio?

☐ Discordo totalmente

☐ Discordo

☐ Neutro/Não se aplica

☐ Concordo

☐ Concordo totalmente

9. O texto do produto proposto utiliza uma linguagem acessível, com exemplos do cotidiano e um tom engajador e interativo, compatível com alunos do ensino médio?

☐ Discordo totalmente

☐ Discordo

☐ Neutro/Não se aplica

☐ Concordo

☐ Concordo totalmente

10. A diagramação e a organização visual do produto educacional facilitam a leitura e a compreensão?

- ☐ Discordo totalmente
- ☐ Discordo
- ☐ Neutro/Não se aplica
- ☐ Concordo
- ☐ Concordo totalmente

11. Considerando as diretrizes da BNCC (Base Nacional Comum Curricular) para o Ensino Médio, você avalia que o material pode ajudar a promover discussões mais amplas e contextualizadas sobre termodinâmica (entropia, espontaneidade, estruturas dissipativas, auto-organização e bifurcação) em sala de aula?"

- ☐ Discordo totalmente
- ☐ Discordo
- ☐ Neutro/Não se aplica
- ☐ Concordo
- ☐ Concordo totalmente

12. Quais metodologias de ensino-aprendizagem você utilizaria para trabalhar os tópicos do livro paradidático em sala de aula? (marque as que considerar adequadas)

- ☐ Ensino por Investigação: Abordagem na qual os alunos exploram questões e buscam soluções ativamente.
- ☐ Utilização de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs): Uso de recursos digitais (simulações, vídeos, plataformas online, softwares, etc.).
- ☐ Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP): Resolução de problemas complexos e do mundo real para desenvolver conhecimento e habilidades.
- ☐ Estudo de Casos: Análise de situações ou exemplos específicos (reais ou hipotéticos) para aplicação de conceitos.
- ☐ Sala de Aula Invertida (Flipped Classroom): Os alunos estudam o conteúdo em casa e usam o tempo de aula para atividades práticas e discussões.
- ☐ Seminários e Discussões em Grupo: Apresentações e debates que promovem a interação e aprofundamento.
- ☐ Projetos (Aprendizagem Baseada em Projetos - ABPJ): Desenvolvimento de projetos de longa duração para aplicar conhecimentos e resolver desafios.
- ☐ Experimentação Prática/Laboratorial: Realização de experimentos para observar fenômenos e testar hipóteses.
- ☐ Metodologias Ativas de Leitura e Escrita: Estratégias que promovem a interpretação crítica e produção textual.
- ☐ Aulas Expositivas Dialogadas: Apresentação de conteúdo com interação e questionamentos aos alunos.
- ☐ Outra(s) (Especifique)

13. Você recomendaria este livro a outros(as) professores(as) de Química do Ensino Médio?

- ☐ Sim, com certeza
- ☐ Talvez
- ☐ Não

BLOCO 3 – Opinião Qualitativa

14. Quais foram, na sua opinião, os principais pontos fortes e fracos do produto educacional?

15. O que você sugeriria para melhorar o material, pensando na realidade do ensino médio?

APÊNDICE B - Respostas à questão 14 do questionário do Google Forms

14. Quais foram, na sua opinião, os principais pontos fortes e fracos do livro?
P1: Forte embasamento teórico
P2: Material muito excelente e usarei para preparar minhas aulas.
P3: O ponto forte foi a linguagem, que facilita a compreensão do que está sendo lido. Não vi um ponto fraco que possa ser destacado.
P4: Considero o material didático bem elaborado, fazendo ponte entre o cotidiano do leitor e o conhecimento científico de forma clara e objetiva. Com design extremamente coerente com a temática proposta. De ponto fraco, que talvez nem seja, é o número de páginas, porém em contrapartida a leitura é leve e empolgante.
P5: Dentre muitos pontos fortes o livro se destaca não apenas pelo conteúdo abrangente, mas principalmente pela sua linguagem excepcionalmente clara e acessível. Abordando conceitos muitas vezes complexos, o texto consegue desmistificá-los, tornando o aprendizado mais intuitivo e menos intimidante. Um ponto que poderia ser considerado, mas que não compromete a qualidade geral do livro, é a ausência de exercícios práticos com gabarito.
P6: Achei o material bastante atrativo, rico em imagens e a leitura bastante dinâmica. O material é bastante coeso e bem estruturado. O bom material para trabalhar certos tópicos da termoquímica.
P7: Achei o material riquíssimo na parte histórica, na abordagem relacionando situações cotidianas, ilustrações bem nítidas. Enfim um material bem didático e acessível aos alunos do ensino médio.
P8: Pontos fortes: Bem estruturado, aspecto visual otimizado e conteúdo bem detalhado. Pontos fracos: Material é um pouco extenso, e pode não ser acessível a carga horária disponível de acordo com a realidade.
P9: Pontos fortes: Conteúdo interessante, ótima apresentação e linguagem acessível. Pontos fracos: Não encontrei.
P10: O livro está ótimo, bem escrito e bem diagramado. Não identifico pontos fracos que possam ser criticados. Parabéns!
P11: O material está muito bom!
P12: Linguagem acessível e direcionado ao público do ensino médio.
P13: Não tenho pontos negativos a relatar. Achei o material bastante completo, bem detalhado, com ilustrações com excelente resolução e linguagem bastante acessível. Assim, gostaria de parabenizar pelo excelente trabalho de transposição didática e pelo compilado sobre termodinâmica excelente.
P14: Como pontos fortes, resalto: primeiro: a apresentação de exemplos reais, de fácil visualização no dia a dia e uso de imagens; segundo: a história associada aos conceitos tornam a ciência mais real, mais humana. E como ponto fraco é o tamanho do material, não temos tanto tempo no Ensino Médio para abordar esse conteúdo.

P15: Ponto forte é a linguagem facilidade do conteúdo, mas sem deixar de lado o aspecto científico. Ponto fraco é o texto extenso.
P16: É bem organizado. Apesar de ter muitos esquemas, poderia ter mais gráficos e tabelas.
P17: Pontos mais fortes: Energia em movimento, Máquina a vapor e as Reações Oscilantes.
P18: A linguagem acessível e a disposição das fórmulas dos conteúdos em questão.
P19: A obra tem linguagem mais para ensino superior..Com certeza é viável para os docentes mas é preciso ter uma linha de raciocínio de como usar essa unidade temática na linguagem para alunos de ensino médio.
P20: Pontos forte: Organização do material, linguagem apropriada para os estudantes. Pontos fracos: Ausência sugestões práticos no ensino da termodinâmica.
P21: A riqueza de detalhes em explicar cada conceito demonstra a qualidade do livro e a preocupação dos autores em ofertar um material riquíssimo sobre termodinâmica. Parabéns.
P22: Pontos fortes: ordem de apresentação dos conteúdos, profundidade dos conteúdos abordados, estética e organização, relevância dos conteúdos, diferença em relação a outros materiais didáticos mais utilizados. Ponto fraco: o fato dele ser extenso, levando em consideração a quantidade de aulas de química disponíveis nas escolas.
P23: Clareza das informações e linguagem de fácil entendimento
P24: Estão bem estruturados.
P25: Ponto forte e a clareza das informações. O material não apresenta ponto fraco relevante.
P26: Trazer fatos históricos organizados em ordem cronológica.
P27: A linguagem bem acessível, as imagens e a cronologia, tudo bem organizado.
P28: A princípio o livro traz consigo uma carga importante de teoria, porém com a contextualização da história. É importante destacar também a linguagem utilizada, de forma que não se apresenta como uma leitura cansativa ou como mais um texto didático que precisa ser lido como obrigação. Por ter um conteúdo vasto, traz a possibilidade de ser utilizado no Ensino Médio, embora, o principal exame de avaliação não se apresenta de forma que venha abarcar o conteúdo de forma completa.
P29: Livro com conceitos modernos e bastante ilustrado. Excelente produto educacional.
P30: O produto educacional contempla de forma satisfatória as necessidades do ensino médio. Não consigo citar pontos negativos. Acredito que a diagramação e linguagem utilizada foi extremamente importante para a facilidade da compreensão.

APÊNDICE C - Respostas à questão 15 do questionário do Google Forms

15. O que você sugeriria para melhorar o material, pensando na realidade do ensino médio?
P1: Sugestão que seja difundido em todas as instâncias do ensino.
P2: Ter mais abordagem com questões do conteúdo para ser aplicadas aos alunos do 2o ano do ensino médio.
P3: O material é bem contemplativo.
P4: Darei apenas uma sugestão, mas ressalto que achei esse material excelente. Poderia vir com sugestão de possíveis vivências considerando o número de aulas para aplicação de todo o material.
P5: Este material didático de termodinâmica é notável pela clareza da linguagem e pelas excelentes exemplificações, que simplificam o aprendizado. Embora não inclua exercícios práticos, sua qualidade didática seria ainda mais aprimorada com a adição de desafios que estimulem o raciocínio e a aplicação prática dos conceitos apresentados. Parabéns pelo trabalho!
P6: Pensando na realidade da rede pública e privada, voltada para os vestibulares que os estudantes vão encontrar no final de cada ano eu sugeria uma bateria de questões abordado o conteúdo citado no livro. Embora essa sugestão não mininui em nada a qualidade do produto educacional. O livro ficou muito bom! 🤝🤝🤝🤝🤝🤝
P7: Acredito que para enriquecer mais o material seria interessante colocar questões no formato do Enem inéditas ou não.
P8: Uma síntese dos tópicos de maneira mais direta, e menos contextualizada.
P9: O material não precisa melhorar. Ele já está satisfatório.
P10: Talvez inserir exercícios ou propostas de experimentos de baixo custo.
P11: O material está de fácil entendimento.
P12: O material está perfeito. Adorei a oportunidade de avaliar.
P13: Mesmo o produto educacional sendo sobre termodinâmica, creio Que seria relevante inserir as equações para o cálculo da variação de entalpia, transformações gasosas e Equação de Clayperon.
P14: O material é excelente! Parabéns pela produção. Acrescento duas sugestões: 1. Incluir no índice o tema dos capítulos, pois só tem os números. 2. Incluir uma sequência didática pensando nas duas aulas semanais hoje disponíveis na rede estadual de ensino, facilitando a aplicação para o professor que está na sala de aula e tem o tempo tão corrido.
P15: Texto mais curto, visando o pouco tempo do professor para preparar suas aulas.
P16: Sim.
P17: Amei o material e já penso em utilizá-lo depois de publicado, claro. Parabéns!
P18: Acredito que alguns exercícios resolvidos como exemplos, uso de imagens um pouco mais contextualizadas com situações do cotidiano dos alunos.
P19: É importante que a obra contenha um capítulo que trata de como irá aplicar o produto educacional nas escolas. O procedimento do produto dar se por várias maneiras: transposição

didática (metodologia como irá dar aula e o procedimento experimentais) com atividade experimentais. Esse material deve haver acessibilidade na versão aluno e versão professor.
P20: Em cada capítulo criar um mapa conceitual para resumir os pontos principais abordadas.
P21: Seu trabalho está ótimo. Meus parabéns. Será uma referência para os demais colegas químicos usarmos nas aulas de termodinâmica. Quando estiver em domínio público, irei compartilhar para meus alunos e demais colegas de trabalho.
P22: Deixaria um pouco menor em relação aos textos e colocaria um exemplo de aplicação em cada fórmula matemática apresentada.
P23: Mais exemplos.
P24: Uma versão digital com animações em que os alunos conseguem interagir.
P25: Uma associação com temas sensíveis da sociedade.
P26: O material traz consigo um arcabouço ideal para estudantes do ensino médio.
P27: Achei fantástico o material apresentado, tendo em vista a superficialidade que os temas são abordados nos livros do ensino médio de ciências da natureza quando de fato é abordado.
P28: A princípio, não conseguiria sugerir melhorias, acredito que não tenho bagagem suficiente para observar pontos para melhorar. Seria muito interessante ter a possibilidade de uma maior divulgação, para que outros professores pudessem conhecer o material.
P29: Acredito que o material está bastante didático, não fazemos necessário acrescentar comentário para melhoria.
P30: Sem sugestões!

APÊNDICE D - Livro Paradidático (Produto Educacional)



Desvendando a
HISTÓRIA
da
Termodinâmica:
Uma Jornada do Equilíbrio ao Caos

Este produto educacional integra a dissertação intitulada "História da Termodinâmica", desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI), pelo discente Humberto Gomes da Silva Neto, sob a orientação do professor Doutor Luciano de Azevedo Soares Neto.

Desvendando a **HISTÓRIA** da **Termodinâmica:** Uma Jornada do Equilíbrio ao Caos

S586d Silva Neto, Humberto Gomes da
Desvendando a história da termodinâmica: uma jornada do equilíbrio
ao caos / Humberto Gomes da Silva Neto, Luciano de Azevedo Soares
Neto. – 1. ed. - Recife: EDUFRPE, 2025. 71 p. : il.

Inclui bibliografia.

1. Termodinâmica – História 2. Prigogine I. (Ilya), 1917-2003
3. Termodinamica de sistemas em nao-equilibrio I. Soares Neto,
Luciano de Azevedo II. Título

CDD 536.7

Todos os direitos reservados. 2025



Sobre o autor

Humberto Gomes, também conhecido como Humberto Neto, é professor de Química formado pela Universidade Federal de Pernambuco (2007). Com especializações em Metodologia no Ensino de Química e Química Ambiental, e atualmente cursando mestrado profissional em Química pela UFRPE, ele dedica sua carreira a tornar o ensino da Química mais envolvente. Humberto já trabalhou em outras áreas, mas descobriu que sua verdadeira vocação é ensinar. Atualmente é professor na rede pública do Estado de Pernambuco, leciona em instituições privadas e participa ativamente de programas como a Olimpíada de Química. Seu trabalho é movido pelo desejo de inspirar os alunos a compreender e se encantar pela Química. Este e-book reflete seu compromisso em apoiar professores com um conteúdo claro e aprofundado sobre a História da Termodinâmica.



Sobre o autor

Luciano Azevedo de Soares Neto é bacharel em Química pela Universidade Federal de Pernambuco (1981), mestre em Físico-Química pelo Instituto de Física e Química de São Carlos - USP (1990) e doutor pelo Instituto de Química de São Carlos - USP (1996). Possui ampla atuação na administração acadêmica, tendo sido Diretor do Depto. de Química da UFRPE (1998-1999), Pró-Reitor de Administração (2000-2004), e Coordenador Geral de Programas Estratégicos da CAPES/MEC (2008-2011). Entre 2012 e 2015, atuou como Assessor Técnico para o Ensino Superior e Pesquisa na Secretaria de Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Atualmente é Professor Titular da Área de Físico-Química do Departamento de Química da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Desenvolve pesquisa em Química Quântica e Ensino de Química em temas de Termodinâmica e da Teoria Quântica.



Índice

Capítulo 1: Energia em Movimento	07
Capítulo 2: Da Máquina a Vapor à 1a Lei	15
Capítulo 3: A 2a Lei da termodinâmica	26
Capítulo 4: Boltzmann e o mistério da irreversibilidade	37
Capítulo 5: A Termodinâmica Fora do Equilíbrio	44
Capítulo 6: Ilya Prigogine	52
Capítulo 7: Estruturas Dissipativas	56
Capítulo 8: As Fascinantes Reações Oscilantes	60

Introdução

Olá!

Se você chegou até aqui, é porque quer entender como a Termodinâmica — esse nome complicado — está presente no nosso dia a dia. Neste material, quero te contar uma história que vai além das fórmulas: vamos descobrir como o ser humano aprendeu a entender o calor, o movimento e até o caos na natureza.

Sou professor de Química, apaixonado por ensinar e acredito que a ciência faz mais sentido quando a gente enxerga suas explicações no cotidiano. Sabe quando você sente o calor da panela ou vê a garrafa “suando” no calor? Isso é Termodinâmica!

Durante muito tempo, ela foi ensinada de forma limitada, focando apenas na Primeira Lei e em sistemas ideais. Mas e os sistemas vivos que estão em constante troca com o ambiente? É aí que entra a fascinante Termodinâmica fora do equilíbrio — um tema pouco explorado, mas essencial para entender desde uma célula até o planeta.

Neste e-book, vamos caminhar juntos desde o século XIX, quando se descobriu que o calor é uma forma de energia, até os estudos mais recentes que mostram como a vida existe em meio ao caos. Como disse Prigogine (1984): “a vida é sustentada pela desordem”.

Com exemplos simples e até divertidos e base sólida em autores como Chang e Overby (2002), Guedes (2006) e Santos & Mortimer (2000), espero te mostrar que a Termodinâmica está em tudo — do nosso corpo ao clima, das máquinas a vapor aos computadores.

Vamos nessa jornada?

Capítulo 1

A Energia em Movimento

1.1 O que é Termodinâmica afinal?

Quando escutamos essa palavra Termodinâmica pode parecer algo distante, só de cientista de jaleco. Mas ela está bem mais próxima do que a gente imagina. Termodinâmica é, basicamente, o estudo das transformações de energia, principalmente quando envolve calor e trabalho. Isso inclui desde uma xícara de café esfriando até uma estrela explodindo no espaço!



Café esfriando como exemplo de transformação de energia.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Aliás, você já parou pra pensar de onde vem essa palavra tão complicada? Pois é, "Termodinâmica" vem do grego: therme significa calor e dynamis, poder. Ou seja, seria algo como o "poder do calor" ou até "poder do fogo", se a gente lembrar do contexto das máquinas a vapor — que, aliás, deram o pontapé inicial nessa área da Física.

O termo foi criado por ninguém menos que William Thomson, o famoso Lord Kelvin por volta de 1854 (Cavagnoli, 2025). Mais pra frente, a gente ainda vai falar dele — o cientista que criou a escala Kelvin, usada até hoje pra medir temperaturas absolutas e muito importante nos estudos da Termodinâmica (Lloyd, 2007).

Dá até pra imaginar os engenheiros da época comentando: "precisamos entender melhor o poder do fogo!"

Capítulo 1

A Energia em Movimento

Em Física, a palavra "dinâmica" costuma estar ligada ao estudo do movimento e suas causas. Por isso, algumas pessoas até brincam dizendo que existe pouca "dinâmica" na Termodinâmica, já que muita coisa nela parece acontecer em equilíbrio ou de forma lenta. Mas a verdade é que, por trás dessa aparente calma, estão ocorrendo transformações energéticas profundas — invisíveis aos olhos, mas fundamentais pra entender o mundo.

Segundo Chang e Overby (2002), a Termodinâmica trata das relações entre diferentes formas de energia e como elas podem ser convertidas. E não se trata apenas de calor e máquinas: ela também explica como o corpo humano funciona, como o clima muda e até como os alimentos são digeridos. Ou seja, ela está em tudo!

1.2 Uma Breve Viagem Histórica

A Termodinâmica não surgiu do nada. Ela apareceu aos poucos com a Revolução Industrial. Pense nas primeiras máquinas a vapor, como a de Watt — elas funcionavam com base no aquecimento da água, que virava vapor, empurrava pistões e fazia tudo girar. Era uma forma prática (e revolucionária) de transformar calor em movimento.

Antes mesmo de James Watt, em 1759, um certo Newcomen já tinha criado uma máquina que usava vapor para acionar um pistão. Mas essa engenhoca ainda era bem rudimentar: o vapor só empurrava o pistão em um sentido, e depois ele era levantado com a ajuda de um peso. É interessante como até os modelos mais simples já apontavam para o potencial da energia térmica! (Tavares, 2010).

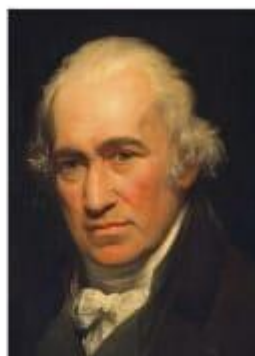


Máquina a vapor de Newcomen: Considerada a primeira máquina a vapor prática.
 Fonte: <https://pt.demotor.net/maquina-a-vapor/historia#a-maquina-a-vapor-na-industria>

Capítulo 1

A Energia em Movimento

James Watt, por sua vez, não inventou a máquina a vapor, mas a aprimorou de forma brilhante. Nascido na Escócia em 1736, Watt era engenheiro e inventou, em 1765, o condensador separado, que evitava o desperdício de calor e melhorava muito o rendimento das máquinas da época. O impacto foi tão grande que, em sua homenagem, o nome da unidade de potência no Sistema Internacional passou a ser o "watt" (Scorzato & Marandino, 2006). É por isso que até hoje falamos de watts quando ligamos um aparelho elétrico.



James Watt
(1736 – 1819)

Fonte: <https://pt.demotor.net/>



Nicolas Léonard Sadi Carnot
(1796-1832)

Fonte: <https://pt.demotor.net/>

Foi tentando melhorar essas máquinas que os cientistas começaram a estudar como o calor se comportava.

Um deles, Sadi Carnot, em 1824, queria entender qual era a máquina mais eficiente possível. Embora ele ainda achasse que o calor era uma "substância invisível" chamada calórico, suas ideias foram essenciais.

Como diz Guedes (2006), Carnot "abriu as portas para a ciência da energia".

Aliás, deixa eu te contar um pouco sobre ele: Carnot nasceu na França em 1796 e desde jovem já mostrava ser inteligente, curioso e profundamente preocupado com o futuro de seu país. Foi ele quem lançou as bases do que viria a ser a Segunda Lei da Termodinâmica.

No seu famoso livro *Reflexões sobre a potência motriz do fogo*, ele descreveu um ciclo ideal — hoje conhecido como ciclo de Carnot — que serve até hoje como modelo teórico para entender a eficiência dos motores térmicos (Vasconcelos & Martins, 2008).

Capítulo 1

A Energia em Movimento

Depois veio James Prescott Joule que, em 1845, realizou experiências simples (mas geniais!) demonstrando que o calor é uma forma de energia. Ele girava pás dentro da água e media como a temperatura subia. Resultado? A energia mecânica se transformava em calor! Foi aí que nasceu a ideia de conservação de energia — a base da Primeira Lei da Termodinâmica.

Joule nasceu na Inglaterra em 1818. Era filho de um cervejeiro e, desde novo, se interessava por ciência. E olha que curioso: ele e seu irmão foram alunos particulares do famoso químico John Dalton, o mesmo que criou o primeiro modelo atômico moderno, o modelo da bola de bilhar! (Scorzato & Marandino, 2006).

Imagine só o privilégio de aprender ciência diretamente com alguém que ajudou a fundar a teoria atômica! Mesmo sem uma formação universitária tradicional, Joule deixou sua marca para sempre: hoje usamos seu nome na unidade de energia — o joule.

Seu trabalho mostrou que energia não se perde — ela apenas muda de forma. Isso virou um dos pilares da física moderna.



James Joule (1818 a 1889)
Fonte: <https://en.vikidia.org/wiki/>



John Dalton (1766-1844)
Fonte: <https://monomousumi.com/wp-content/uploads/John-Dalton.jpeg>

Esse trio de cientistas — Watt, Carnot e Joule — foi como um time afinado, cada um trazendo uma parte crucial para a construção da Termodinâmica. Graças a eles, essa ciência evoluiu muito além das máquinas, ajudando a explicar desde o funcionamento do corpo humano até os mistérios do universo.

Capítulo 1

A Energia em Movimento

1.3 Calor, trabalho e energia: como tudo se conecta?

Vamos pensar juntos: quando você pedala uma bicicleta, você está fazendo trabalho — está transferindo energia para o sistema (no caso, a bicicleta). Se parar de pedalar, ela para. Se descer uma ladeira, ela acelera sozinha — graças à energia potencial virando energia cinética.

Se o freio esquenta, é porque parte dessa energia virou calor. Esse calor não se perde, se espalha. O que a Primeira Lei da Termodinâmica nos diz, de maneira simples, é isso: a energia não se perde nem se cria do nada, ela apenas se transforma (Chang & Overby, 2002).



Um ciclista descendo a ladeira exemplifica a Primeira Lei da Termodinâmica: a energia não se perde nem se cria, apenas se transforma. A energia potencial gravitacional se converte em energia cinética, e parte dela em calor nos freios.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Matematicamente, essa lei aparece assim:

$$\Delta U = Q - W$$

Onde:

ΔU é a variação da energia interna do sistema;

Q é o calor trocado;

W é o trabalho realizado.

Essa equação tem cara de física, mas ela aparece todo dia na nossa vida. Quando cozinhamos, quando nos exercitamos, quando o celular esquenta — é tudo energia se transformando!

Capítulo 1

A Energia em Movimento

1.4 A Virada Científica: Calor não é Substância!

Antes do século XIX, como já dissemos, muitos cientistas achavam que o calor era algo material chamado calórico. Eles imaginavam que o calórico saía dos corpos quentes e entrava nos frios.

Mas as experiências de Joule, Clausius e outros mostraram que calor não é uma substância e sim uma forma de energia em trânsito — ela só aparece quando há diferença de temperatura entre dois corpos.

Essa nova visão transformou a ciência e foi o começo de uma das áreas mais importantes da Física e da Química: a Termodinâmica Clássica.

1.5 Um Exemplo do Cotidiano: E o Café, esfriando?

Imagina que você faz um café quente e deixa ele na mesa. Com o tempo, ele esfria. O que está acontecendo ali?

O calor está “saindo” do café e indo para o ambiente ao redor, que está mais frio. O café perde energia térmica e sua temperatura cai. Esse processo só acontece porque há diferença de temperatura. Quando tudo se iguala, o processo para. Isso é a Termodinâmica em ação.

O mesmo vale para uma garrafa térmica que mantém seu chá quente por horas — ela isola o sistema, impedindo a troca de energia com o ambiente. Ou seja: controlar o calor também é controlar o tempo em que as coisas acontecem!



A garrafa térmica representa um sistema isolado, enquanto a xícara de café exemplifica um sistema aberto
 Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 1

A Energia em Movimento

1.6 Uma Nova Visão: Calor em Movimento e a Busca por Eficiência

Ao longo do século XVIII, as experiências acumuladas com máquinas a vapor transformaram não apenas o mundo do trabalho, mas também a própria forma como os cientistas compreendiam o calor.

A ideia do "calórico" — um fluido invisível que se deslocava entre os corpos — começou a ser questionada à medida que se observava o papel do movimento e da transformação de energia nas máquinas térmicas. Esse movimento de revisão conceitual, inicialmente impulsionado pela prática da engenharia, preparou terreno para uma mudança profunda na forma de pensar a energia e suas transformações.

Foi nesse contexto de transição que surgiram questionamentos fundamentais: o que é calor afinal? Por que as máquinas térmicas perdem rendimento? Haveria uma maneira de maximizar o aproveitamento da energia? Essas perguntas seriam exploradas com mais profundidade por pensadores como Sadi Carnot, cujas reflexões marcariam o início da Termodinâmica como uma ciência estruturada.



Carnot preocupado com a eficiência das máquinas térmicas.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

No próximo capítulo, conheceremos as ideias revolucionárias de Carnot sobre o funcionamento das máquinas térmicas, sua proposta de uma máquina ideal e o conceito de reversibilidade, além do impacto dessas ideias nos avanços posteriores da ciência e da engenharia.

Suas reflexões não apenas desafiaram o modelo do calórico, como também inauguraram uma nova fase na história da ciência: o estudo sistemático das transformações de energia e da busca por eficiência energética.

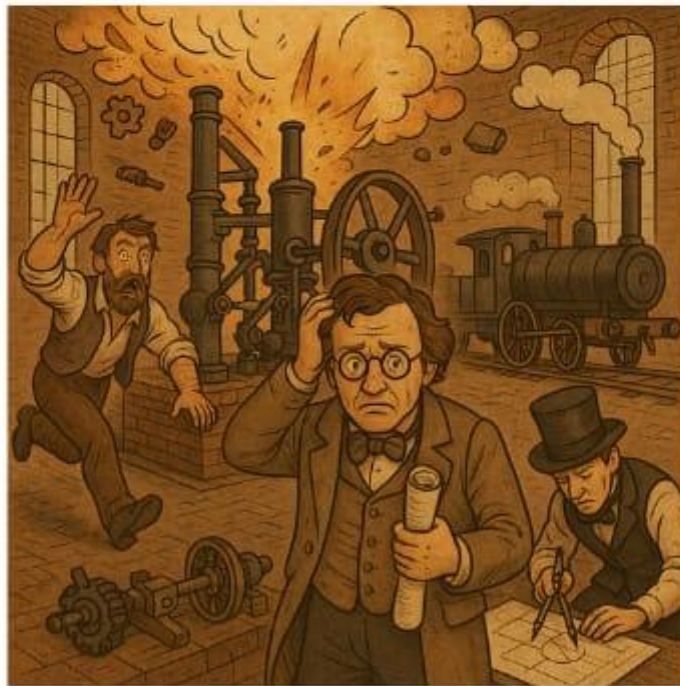
Capítulo 2

Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

2.1 O Cenário da Revolução Industrial e as Máquinas a Vapor

Olha só, pessoal, quando falamos sobre o desenvolvimento das máquinas a vapor quase sempre lembramos da Inglaterra, não é? Lá foi onde a coisa realmente “explodiu” no sentido prático e tecnológico, com a indústria precisando de força para bombear água das minas, mover trens e máquinas de fábrica.

Mas o que talvez você não saiba é que, no começo, esses motores eram pura engenharia de “chute e correção”. Engenheiros e mecânicos construíam essas máquinas sem entender direito o que estava rolando com o calor e o trabalho. A ciência por trás veio depois, quase que na marra, na busca para melhorar o que já existia.



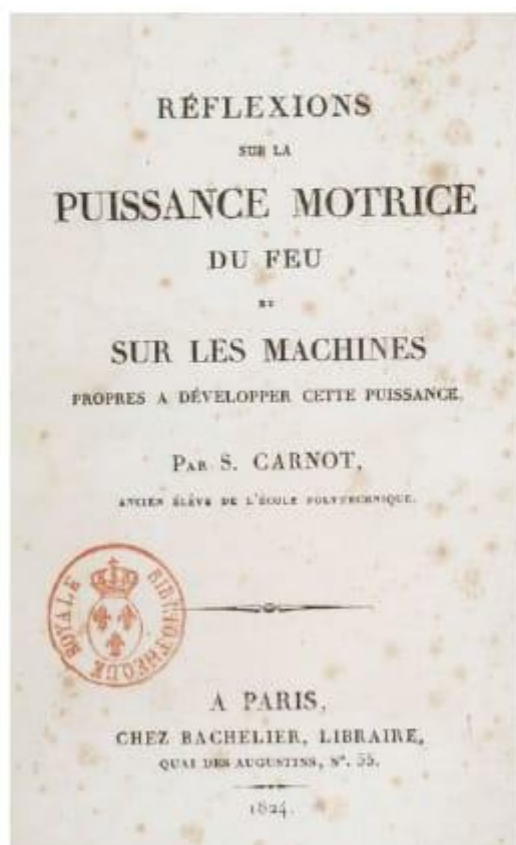
Construção de máquinas térmicas por engenheiros e mecânicos em uma época em que ainda não havia discernimento entre calor e trabalho.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Costuma-se dizer que a termodinâmica deve mais à máquina térmica do que à máquina térmica à termodinâmica", ou seja, a necessidade prática foi o que fez nascer a teoria (SANDLER; WOODCOCK, 2010).

Foi nesse cenário que surgiu o jovem engenheiro francês Sadi Carnot (1796-1832). Em 1824, Carnot publicou um livro fundamental chamado *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Reflexões sobre a Força Motriz do Fogo e sobre as Máquinas), onde ele já discutia coisas que hoje são básicas na termodinâmica: calor, potência e eficiência dos motores (OLIVEIRA, 2024). Podemos dizer que ali começou a termodinâmica moderna. É impressionante pensar que, naquela época, nem mesmo o conceito de conservação de energia era totalmente reconhecido!



Página do livro "Réflexions sur la puissance motrice du feu" de Sadi Carnot (Edição de 1824)
 Fonte: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/JVcMmDRwZZ5WYSw95fVJgCn/>

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Por isso, muitos chamam Carnot de o "pai da termodinâmica". Mas, na verdade, talvez seja mais justo dizer que ele foi o "antepassado da termodinâmica-a-tornar-se", como sugere o pesquisador Milivoje M. Kostic (2025). Isso porque, apesar da genialidade de suas ideias, foram cientistas como Clausius e Kelvin que, anos depois, desenvolveram a fundo os conceitos de temperatura, entropia e as leis da termodinâmica como conhecemos hoje.

Carnot, então, abriu o caminho com sua engenhosidade e raciocínio sobre os ciclos reversíveis das máquinas térmicas, mesmo em uma época em que a ciência ainda tentava entender o que era energia e como ela se transformava.

2.2 Por Que a Máquina a Vapor Não Evoluía na França?

Após a derrota da França na Batalha de Waterloo, em 1815, que marcou o fim do império de Napoleão Bonaparte, o país entrou em um período de instabilidade e reconstrução.

Nesse contexto de tentativa de recuperação econômica e social, o jovem engenheiro francês Sadi Carnot, formado pela renomada Escola Politécnica de Paris (École Polytechnique), ficou intrigado porque as máquinas a vapor na França não evoluíam como na Inglaterra.

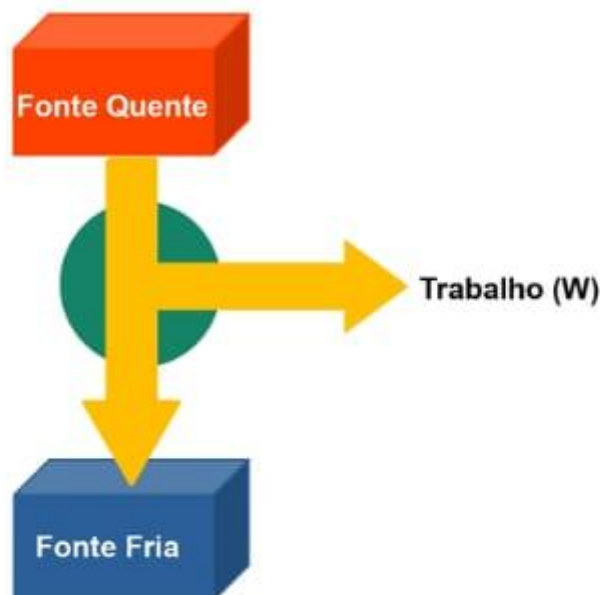
Motivado por isso, ele estudou as máquinas térmicas da época, como a máquina de Newcomen e percebeu que todas tinham basicamente os mesmos componentes:

- I) **Fonte quente:** geralmente uma caldeira que gerava vapor.
- II) **Fonte fria:** algo que resfriava a máquina, como um reservatório de água fria.
- III) **Dispositivo mecânico:** um pistão ligado a engrenagens que fazia o trabalho.
- IV) **Substância funcional:** o vapor, que era o "motor" da máquina.

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Carnot percebeu que o vapor recebia calor da fonte quente, empurrava o pistão (fazendo trabalho) e depois liberava o calor para a fonte fria. O segredo é que nunca se consegue converter todo o calor em trabalho: sempre uma parte é rejeitada para a fonte fria.

Isso está representado no esquema abaixo:



Esquema básico de uma máquina térmica: calor entra pela fonte quente (temperatura alta), parte é convertido em trabalho e o resto sai para o dissipador (temperatura baixa).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Então, para qualquer máquina térmica funcionar, ela precisa de uma diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria. Quanto maior essa diferença, melhor o desempenho.

Carnot também imaginou uma máquina ideal, funcionando de modo reversível (ou seja, podendo voltar ao estado inicial sem perdas), que operasse em um ciclo de quatro etapas, hoje chamado de Ciclo de Carnot. Nesse ciclo, um fluido (como um gás) se expande e se contrai, transformando calor em trabalho da forma mais eficiente possível.

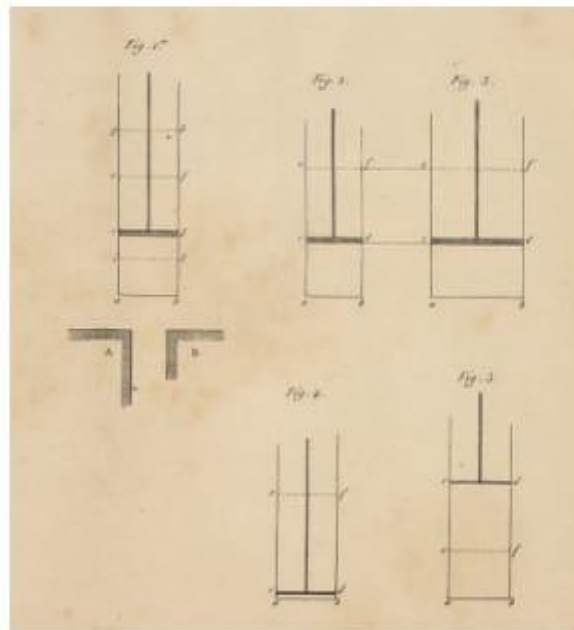
Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Ele mostrou que nenhuma máquina real pode ser mais eficiente do que essa máquina ideal, pois sempre há irreversibilidades (perdas). A eficiência máxima depende só das temperaturas da fonte quente T_Q e da fonte fria T_F e é dada pela fórmula:

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

onde as temperaturas devem estar em escala absoluta (Kelvin).

A seguir, um esboço original de Carnot da sua única obra "Réflexions sur la puissance motrice" para a operação de uma máquina térmica

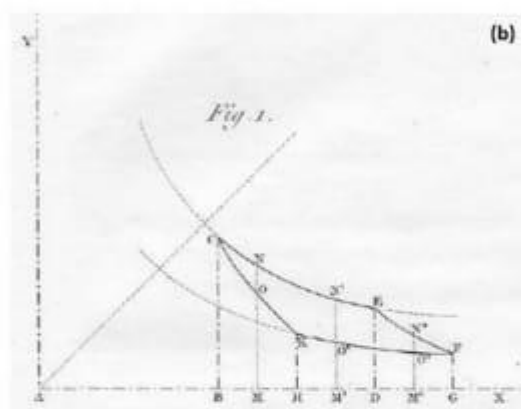


Esboço original de Carnot mostrando o funcionamento da máquina térmica.
Fonte: Firenze, Biblioteca del Museo Galileo.

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Infelizmente o livro de Carnot não teve muito reconhecimento na época. Como Sandler e Woodcock (2010) comentam, suas ideias eram pouco matemáticas, o que dificultava a compreensão por outros cientistas.

2.3 Clapeyron: O Guardião da 2ª Lei da Termodinâmica



Clapeyron teve um papel essencial no resgate da obra de Carnot. Foi ele quem deu um passo decisivo para valorizá-la, reinterpretando as ideias do jovem físico francês com uma linguagem mais matemática e acessível. E não parou por aí; Clapeyron também apresentou essas ideias de forma gráfica, utilizando o agora clássico diagrama de pressão versus volume (PV). Essa representação visual tornou o ciclo de Carnot muito mais compreensível para os cientistas da época e abriu caminho para o avanço da Termodinâmica como ciência.

Em 1843, Clapeyron formalizou a ideia de processo reversível e escreveu o que seria a primeira versão da Segunda Lei da Termodinâmica, que você já deve conhecer: o calor não pode espontaneamente passar de um corpo frio para um quente sem trabalho externo.

É curioso notar que esse avanço aconteceu antes mesmo da formulação completa da Primeira Lei, mostrando que o caminho da ciência nem sempre obedece a um padrão é linear.

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

2.4 O Médico e o Cervejeiro

Agora que já falamos sobre os fundamentos da Termodinâmica, é hora de conhecer duas figuras que ajudaram a colocar essa ciência de pé – e de uma forma bem curiosa! Afinal, quem diria que um médico e um cervejeiro estariam entre os grandes nomes por trás da famosa Primeira Lei da Termodinâmica, conhecida como a Lei da Conservação da Energia?

Essa lei nos diz algo poderoso: a energia total de um sistema isolado nunca se perde nem se cria do nada — ela apenas se transforma. Uma ideia tão simples na forma, contudo revolucionária em suas implicações!



Robert Mayer (1814–1878)

Fonte: https://geniuses.club/public/storage/197/159/046/043/360_360_607400630d727.jpg

Vamos começar com Julius Robert Mayer (1814–1878), médico alemão, foi um dos primeiros a perceber que a energia se transforma, porém não se cria nem se destrói. Observando que o corpo humano não poderia gerar energia do nada, concluiu que os alimentos consumidos se transformavam em calor e trabalho. Com base nisso, em 1842, Mayer propôs o que viria a ser uma das primeiras ideias sobre a conservação da energia — embora ainda de forma incompleta.

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Ele foi também o primeiro a calcular um valor para o chamado equivalente mecânico do calor, ou seja, a quantidade de trabalho mecânico correspondente a uma determinada quantidade de calor. No entanto, é importante destacar que Mayer não chegou a formular a Primeira Lei da Termodinâmica como a conhecemos hoje. Seu trabalho apresentava apenas uma ideia qualitativa da transformação de energia (ou "força", como ele chamava) e um valor numérico, sem expressar a lei de forma matemática e generalizada (Girolami, 2020).

Mais tarde, em 1845, ele publicou por conta própria o artigo *Movimento Orgânico em Conexão com a Nutrição*, no qual aprofundou sua compreensão da física e considerou que o trabalho e o calor são formas diferentes de energia — ou "força" — que podem ser convertidas em outras formas, mas não destruídas (Girolami, 2020).

Apesar de suas contribuições notáveis, Mayer não teve uma vida nada fácil. Você já parou para pensar em como pode ser difícil ter uma grande ideia e ninguém levar a sério? Pois foi mais ou menos isso que aconteceu com ele. Como não era um físico de formação, escrevia de maneira muito rebuscada e tinha um comportamento considerado excêntrico para os padrões da época, Mayer teve suas ideias rejeitadas por boa parte da comunidade científica.

E isso teve consequências sérias. Ele enfrentou episódios de depressão, chegou a ser internado e, para piorar, perdeu o direito de exercer a medicina. Triste, né? Apesar de tudo isso, o reconhecimento veio — não de imediato, mas ainda em vida.

Hoje, Mayer é lembrado como um dos pioneiros da termodinâmica e sua história nos ensina que a ciência nem sempre é um caminho reto, mas que vale a pena insistir quando se acredita numa ideia (Santos, 2009).

A figura ao lado representa sua obra publicada em 1851, na cidade de Heilbronn, com o título *Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme* (Observações sobre o Equivalente Mecânico do Calor).

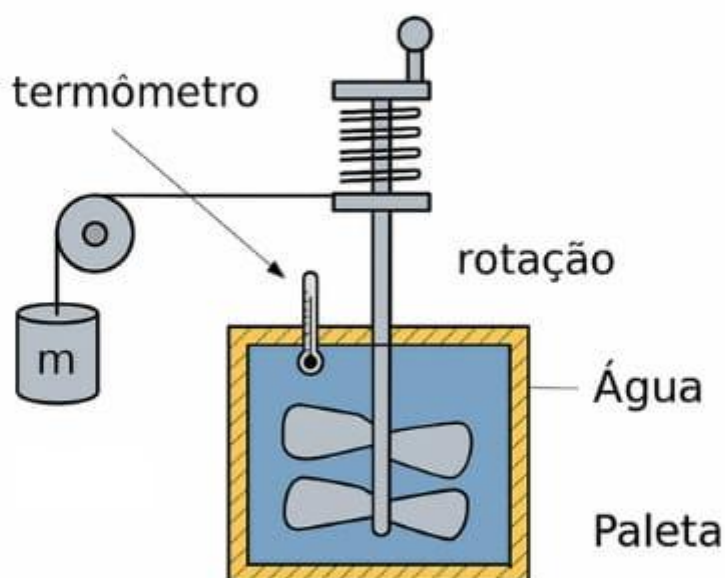


Figura – Capa de sua obra publicada em 1851.
Fonte: <https://fiscamente.blog>

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Agora, trocando de cenário, vamos para a Inglaterra. Lá encontramos James Prescott Joule (1818–1899), um físico autodidata que também gerenciava a cervejaria da família. Sim, isso mesmo — um cientista que produzia ciência e cerveja!

Joule ficou obcecado por uma pergunta: seria possível transformar energia mecânica em calor? Para responder, ele conduziu experimentos meticulosos. Um dos mais famosos envolvia um peso caindo e fazendo pás girarem dentro de um recipiente com água. Esse movimento agitava a água, e... adivinha? A temperatura aumentava — o atrito aquecia a água!



Experimento de Joule
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Com isso, ele provava, de forma prática, que o trabalho mecânico podia ser convertido em calor.

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

Em 1847, Joule apresentou sua conclusão de forma clara e direta:

$$Q = W$$

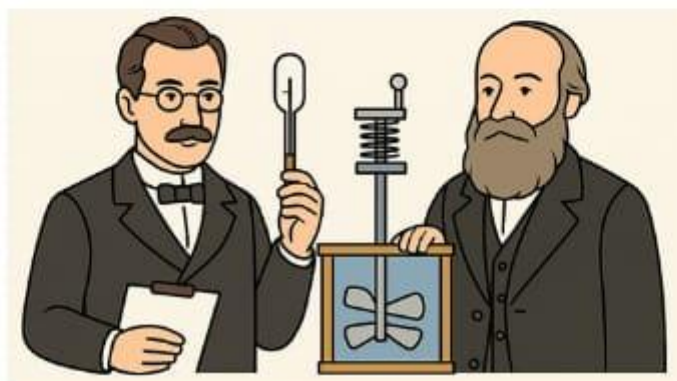
(onde Q é o calor produzido e W é o trabalho realizado).

Ou seja, ele demonstrou experimentalmente a equivalência entre calor e trabalho, algo fundamental para a formulação da Primeira Lei da Termodinâmica. E ele foi além: contribuiu para a teoria cinética dos gases, relacionando a energia térmica ao movimento das partículas — uma conexão entre o invisível (microscópico) e o visível (nosso cotidiano).

Pode parecer improvável, entretanto esta dupla — Julius Robert Mayer e James Prescott Joule — ajudou a construir um dos pilares da Termodinâmica!

Enquanto Mayer foi o primeiro a intuir que calor e energia eram formas intercambiáveis, Joule trouxe as provas experimentais que faltavam. Juntos, mesmo que sem contato direto, construíram as bases para o que hoje chamamos de Primeira Lei da Termodinâmica.

E veja que curioso: um médico, observando o corpo humano e um cervejeiro, testando com engrenagens e calorímetros, chegaram a conclusões que mudaram a ciência para sempre. Isso mostra como o conhecimento pode vir de diferentes lugares — basta curiosidade, observação e coragem para investigar!



Mayer (a esquerda) e Joule (a direita).
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 2 Da Máquina a Vapor à 1ª Lei da Termodinâmica

2.5 Helmholtz e a formalização da 1ª Lei

Por fim, não podemos deixar de falar do físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894). Helmholtz foi o cara que organizou as ideias dispersas de Mayer, Joule e outros, criando um quadro coerente e claro para a comunidade científica. Em 1847, ele publicou um livro que apresentou a Primeira Lei da Termodinâmica de forma abrangente e acessível.

Ele mostrou que todas as formas de energia — calor, luz, eletricidade, fenômenos químicos — são apenas diferentes modos da mesma coisa e que a energia total é sempre conservada.



Hermann von Helmholtz (1821-1894).
Fonte: <https://upload.wikimedia.org/>

Como podemos perceber, a Primeira Lei da Termodinâmica foi construída por muitos cientistas ao longo do tempo. Mayer, Joule, Helmholtz e outros ajudaram a formular o Princípio da Conservação da Energia, mostrando que a ciência é um trabalho coletivo marcado por contextos históricos e culturais. A ideia de que "a energia se transforma, mas não se perde" levou tempo para ser aceita — e até hoje é essencial para a ciência e a tecnologia.

Capítulo 3

A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

Vamos retomar nossa jornada pela história da Termodinâmica voltando a 1834, quando o engenheiro francês Émile Clapeyron trouxe à tona os estudos de Sadi Carnot sobre o funcionamento das máquinas térmicas. Foi graças a ele que as ideias de Carnot ganharam notório reconhecimento para entendermos os limites da eficiência dos motores a vapor. Carnot descreveu direitinho como a máquina a vapor funcionava — algo que revolucionou a época! Mas o que ele trouxe foram as primeiras pistas para entender por que as máquinas não são 100% eficientes, ou seja, por que sempre tem uma parte da energia que “se perde” ou não vira trabalho útil.

Mas as coisas não pararam por aí. No meio do século XIX, dois grandes nomes entraram em cena: Rudolf Clausius, da Alemanha, e William Thomson, o famoso Lord Kelvin, da Irlanda. Trabalhando de forma independente, eles ajudaram a moldar o que hoje conhecemos como a Segunda Lei da Termodinâmica.

3.1 Clausius e Kelvin: Reformulando as Ideias do Calor

Você lembrar que o Carnot tinha uma ideia interessante sobre calor?

Ele dizia que o calor podia passar de um lugar quente para um lugar frio e que essa movimentação gerava trabalho. Isso estava certo em parte. No entanto, ele achava que todo o calor saía de um lugar e ia direto para o outro. Foi aí que, em 1850, entrou em cena Rudolf Clausius, um físico alemão nascido em 1822, conhecido por ser um dos pais da termodinâmica moderna. Clausius publicou trabalhos fundamentais que reformularam completamente o entendimento do calor.



Rudolf Clausius (1822-1888).

Fonte: <https://www.timewisetraveller.co.uk>

Ele explicou que parte do calor se transforma em trabalho, como o Joule já tinha sugerido, e só o que sobra é que segue para o lugar mais frio (Sandler e Woodcock, 2010).

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

Vamos imaginar juntos: você coloca uma chaleira no fogo e o calor do fogo faz a água esquentar. Parte desse calor faz a água ferver e virar vapor. Esse vapor pode empurrar um pistão e fazer uma máquina funcionar, ou seja, gerar trabalho. O calor, então, não é só um "mensageiro" que vai de um lugar para outro, ele é transformado no caminho. Interessante, né?



O vapor que sai da chaleira faz com que a máquina realize trabalho.
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

No mesmo ano, quem também estava reformulando ideias sobre o calor era William Thomson mais conhecido como Lord Kelvin.

Nascido em 1824 na Irlanda, Kelvin foi um físico e engenheiro brilhante, que desde jovem já dava sinais de genialidade; aos dez anos já frequentava aulas na Universidade de Glasgow! Ele se destacou por suas contribuições à eletricidade, à engenharia e, claro, à termodinâmica. Kelvin propôs uma nova forma de pensar a temperatura, criando a escala absoluta de temperatura e também ajudou a consolidar a ideia de que o calor só flui de forma espontânea do mais quente para o mais frio.



Lord Kelvin (1824-1907).
Fonte: <https://todayinsci.com/R/Kelvin>

Kelvin teve um papel curioso nessa história. Em 1845, após concluir sua graduação, foi estagiar no laboratório de Henri Regnault, na França, e começou a trocar cartas com seu irmão sobre como o fogo pode gerar movimento. Em 1847, em uma conferência em Oxford, ele ficou fascinado com a apresentação de J. Joule, que defendia que calor e trabalho são formas intercambiáveis de energia. Aquilo mexeu com a cabeça de Kelvin, que passou a repensar as ideias de Carnot, até então baseadas na antiga noção de que o calor era uma "substância".

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

3.2 Tempo e Irreversibilidade: Os Caminhos da Segunda Lei

Vimos na seção anterior que o Lord Kelvin mostrou que, em processos naturais, o calor flui espontaneamente do corpo mais quente para o mais frio e que não é possível extrair trabalho útil apenas resfriando um sistema abaixo da temperatura ambiente, ou seja, os processos têm uma direção preferencial e não podem ser revertidos sem intervenção externa.



A irreversibilidade e a seta do tempo
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Essa ideia já aponta para a existência de uma "seta do tempo" nos fenômenos termodinâmicos: certas transformações só acontecem em um sentido, como o café esfriando na mesa.



Em 1850, Clausius publicou um trabalho decisivo em que descartou a ideia do calórico e afirmou que o calor é, na verdade, movimento das menores partes dos corpos — ou seja, energia em trânsito. Concordeu com Carnot sobre a necessidade de uma fonte quente e uma fria para produzir trabalho, porém corrigiu um ponto essencial: nem todo o calor é transferido; parte dele vira trabalho, como já dizia Joule. Foi nessa obra que Clausius, pela primeira vez, apresentou a Primeira Lei da Termodinâmica (conservação da energia) e formulou, também, a Segunda Lei: "o calor não pode, por si só, passar de um corpo frio para um mais quente."

No mesmo ano, Kelvin apresentou uma formulação equivalente: "é impossível extrair trabalho resfriando um sistema abaixo da temperatura do ambiente sem gasto de energia externa." Em 1851, Kelvin publicou seu próprio artigo, "Teoria Dinâmica do Calor", onde reafirma que o calor não é uma substância, mas sim uma forma de movimento. Ele também introduz o conceito de irreversibilidade, ou seja, nem todo calor pode ser reaproveitado. Parte dele se perde, espalha-se de forma desorganizada — e isso tem tudo a ver com o próximo conceito que revolucionaria a física: a entropia.

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

3.3 Entropia: O que é e Como Podemos pensar Nisso?

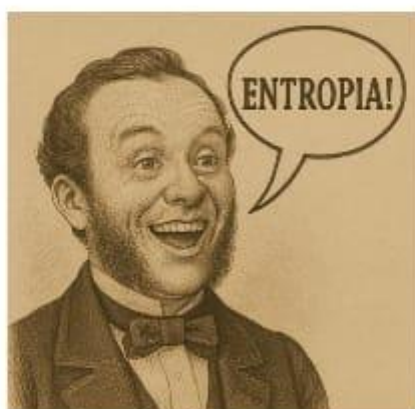
Imagina só um cientista super atento daqueles que não deixam passar nenhum detalhe. Esse era Rudolf Clausius, que lá pelo século XIX, teve uma sacada que mudaria a ciência para sempre. Enquanto estudava como o calor se comporta numa máquina térmica (tipo aquelas que transformam calor em trabalho), ele percebeu algo curioso:

"A razão entre o calor que entra e o calor que sai numa máquina era igual à razão entre a temperatura da fonte quente e da fria."

Pode parecer só uma proporção matemática, mas era muito mais do que isso. Era uma pista valiosa sobre como o calor se transforma! Com essa observação, Clausius pegou carona em uma ideia já lançada por Carnot, que já suspeitava que havia uma "propriedade especial" por trás desses processos térmicos. A diferença? Clausius deu um nome a essa propriedade e a colocou no centro da discussão:

Ele a chamou de **ENTROPIA!**

A palavra "entropia" pode parecer estranha, mas Clausius escolheu com cuidado. Ele queria um nome que lembrasse energia, já que ambas lidam com transformações. A inspiração veio do grego "ητ ποση", que significa transformação (Souza et al, 2013). E faz todo o sentido, né? Afinal, a entropia fala justamente sobre como a energia se espalha e se reorganiza no universo.



Rudolf Clausius

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

No começo, Clausius usava termos como "valor de equivalência" ou "conteúdo transformacional" para explicar a ideia. Contudo, em 1865, ele deu oficialmente o nome entropia a essa nova grandeza.

E qual foi a grande sacada? Ele percebeu que a razão entre o calor trocado e a temperatura absoluta envolvida numa transformação permanecia constante num ciclo completo. Mesmo que o sistema passasse por várias etapas e voltasse ao ponto inicial, esse valor continuava o mesmo. Ou seja, era uma propriedade do sistema, uma espécie de "marca registrada" da transformação térmica.

É aqui que entra a expressão matemática da entropia proposta por Clausius, para medir essa transformação:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Onde:

ΔS é a variação de entropia.

Q é o calor trocado.

T é a temperatura absoluta (em kelvin).

Essa fórmula vale para processos reversíveis, onde tudo acontece de forma bem controlada sem perdas.

No fim de seu trabalho, Clausius resumiu tudo com duas frases históricas, que se tornaram pilares da termodinâmica:

"A energia do universo é constante." (Primeira Lei)

"A entropia do universo tende ao máximo." (Segunda Lei)

Essas duas ideias mudaram a forma de como enxergamos o funcionamento do universo. E o impacto não parou por aí. Anos depois, o cientista Josiah Willard Gibbs usou o conceito de entropia para desenvolver leis universais válidas para qualquer processo físico, químico ou até eletroquímico.

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

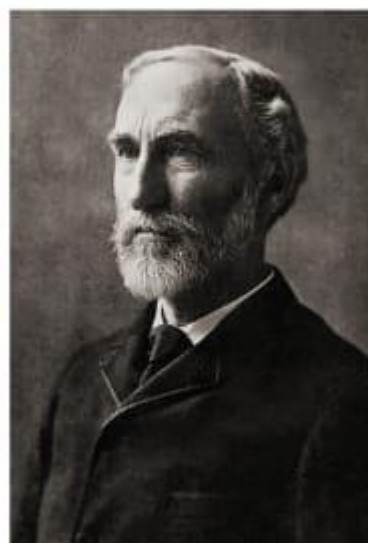
3.4 Willard Gibbs: O Mestre da Entropia e o Equilíbrio Invisível do Universo

Imagine que você está tentando entender como o universo funciona; não só em relação às estrelas ou aos átomos, mas às regras escondidas por trás de todas as transformações físicas e químicas do mundo. Bem, um cientista chamado Josiah Willard Gibbs (1839–1903) se dedicou exatamente a isso!

Mas calma, antes de entrar na história desse gênio, vale lembrar: foi Clausius, lá no século XIX, quem cunhou a palavra "entropia". Ele definiu entropia como a razão entre o calor e a temperatura absoluta — algo que parecia só mais um conceito técnico, entretanto virou a chave mestra da termodinâmica.

E aí entra em cena o nosso protagonista Willard Gibbs. Ele foi um cientista americano tão genial que até outros gênios ficaram de boca aberta com ele. Wilhelm Ostwald (aquele da famosa Lei da Diluição) chegou a dizer que Gibbs foi, "sem dúvida, o maior gênio científico que os Estados Unidos já produziram".

Mas pasme: mesmo sendo tão brilhante, Gibbs era praticamente um desconhecido nos EUA, enquanto estava vivo. Seu reconhecimento veio primeiro da Europa, França, Inglaterra, Alemanha, Noruega, dentre outros, todos viram sua genialidade antes do próprio país natal.



Josiah Willard Gibbs (1839–1903)

Fonte: <https://en.wikipedia>

Em 1873, Gibbs publicou um artigo com um título que parece difícil, mas é revolucionário: "Um Método de Representação Geométrica das Propriedades Termodinâmicas de Substâncias por Meio de Superfícies".

Uau! Complicado? Sim. Importante? MUITO! Foi aí que ele apresentou a famosa energia de Gibbs!

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

Ele mostrou que, se quisermos saber se um sistema está em equilíbrio, basta observar uma equação: $U - TS + PV$

$$U - TS + PV$$

Onde:

U é a energia interna

T é a temperatura

S é a entropia

P é a pressão

V é o volume

Se essa combinação atinge o valor mínimo... pronto! Temos equilíbrio. Simples assim (ou quase). E mais: Gibbs usou diagramas tridimensionais para mostrar como sólidos, líquidos e gases se comportam em diferentes condições. Foi um verdadeiro mapa 3D da matéria!

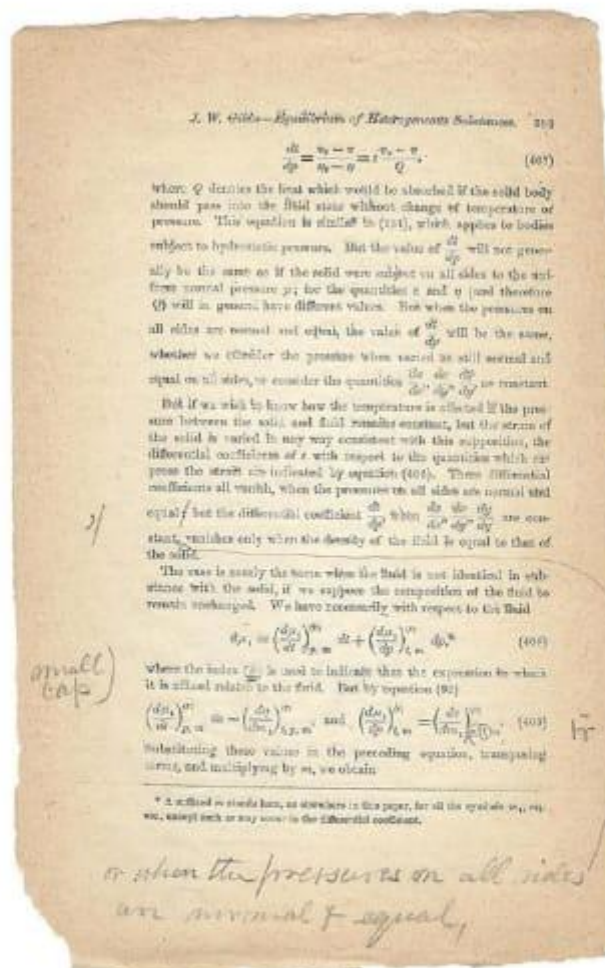
Em 1876, Gibbs resolveu lançar uma verdadeira bomba científica: a primeira parte de um artigo histórico com nada menos que 320 páginas! O título era imponente: "Sobre o Equilíbrio de Substâncias Heterogêneas". Alguns chegaram até a comparar essa obra com os famosos Princípios Matemáticos de Newton publicados lá em 1687. Sim, o negócio era sério.

Apesar da grande relevância do texto, ele foi publicado num periódico de circulação limitada chamado Transactions of the Connecticut Academy of Sciences. A natureza reservada e introspectiva de Josiah Willard Gibbs ajuda a explicar sua decisão de publicar suas descobertas em periódicos de circulação restrita — o que não diminuiu em nada o impacto de suas contribuições.

Nesse artigo, Gibbs apresentou uma ferramenta que virou clássica na Físico-Química: a regra das fases, que explica como diferentes estados da matéria — como sólido, líquido e gás — podem coexistir em equilíbrio. A obra é uma das mais importantes da termodinâmica, mas também é conhecida por ser bem difícil de entender. Por isso, estamos aqui pra traduzir essas ideias num papo claro e direto, sem perder a essência científica!

Capítulo 3 A 2a Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

A seguir, uma página das provas tipográficas da segunda parte do grande artigo de Gibbs sobre termodinâmica (1876–1878), contendo correções feitas a próprio punho.



Página das provas iniciais do artigo de Gibbs (1876–1878), com anotações feitas por ele mesmo.
Fonte: <https://girolami-group.chemistry.illinois.edu/>

Em 1875, Gibbs formulou sua teoria para acrescentar aos sistemas as interações atômico-moleculares. Ele determinou uma nova função de estado, que passou a se chamar "Energia de Gibbs" em sua homenagem.

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

Quando falamos em Energia Livre de Gibbs, é importante lembrar que estamos lidando com uma função potencial, ou seja, o que realmente conseguimos medir em laboratório é a variação dessa energia e não seu valor absoluto. E por que isso importa? Porque essa variação, representada por ΔG , é justamente o que nos revela a quantidade máxima de energia disponível para realizar trabalho útil, desde que a pressão se mantenha constante.

Esse detalhe é essencial para entendermos processos que vão desde reações em células vivas até transformações em escala industrial, sempre sob controle de temperatura e pressão.

A variação da Energia de Gibbs é expressa pela seguinte equação:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Onde:

ΔG é a variação da energia livre de Gibbs,

ΔH é a variação da entalpia,

T é a temperatura absoluta (em Kelvin),

ΔS é a variação da entropia.

Segundo Atkins e Paula (2012), a entalpia (H) é uma função de estado que representa a quantidade de calor trocado a pressão constante. Durante uma reação química, a variação da entalpia (ΔH) é simplesmente a diferença entre a entalpia dos produtos e a dos reagentes:

- Se ΔH for positivo, os produtos possuem mais entalpia que os reagentes → temos uma reação endotérmica, que absorve calor do meio.
- Se ΔH for negativo, os reagentes têm mais entalpia que os produtos → ocorre uma reação exotérmica, que libera calor para o ambiente.

Em outras palavras, entender a variação de Gibbs é como ler o “mapa energético” de uma reação: ele nos mostra se a reação é energeticamente favorável e quanta energia pode ser aproveitada para realizar trabalho — algo fundamental para a Química, a Bioquímica e a Engenharia Química.

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

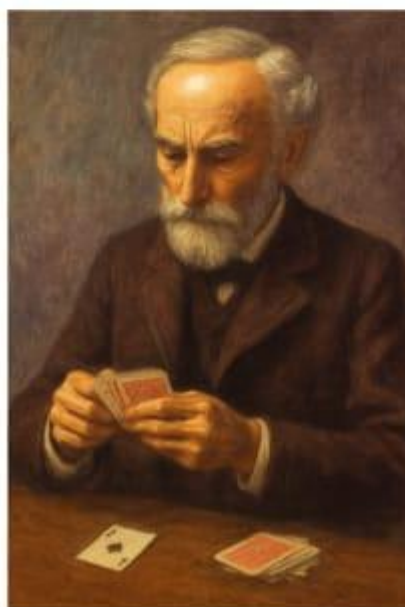
Com uma abordagem ousada e inovadora para a época, Gibbs ampliou os horizontes da termodinâmica. Na época, o conceito de entropia ainda gerava dúvidas. A Segunda Lei, formulada por Clausius, introduziu a entropia como medida da irreversibilidade dos processos naturais, explicando por que certos fenômenos, como o fluxo de calor do quente para o frio, ocorrem em uma única direção. Nessa visão, parte da energia se torna inutilizável, o que foi associado ao aumento da desordem no sistema.

Mas o que realmente significa “desordem”? A explicação ainda era vaga... até que Gibbs entrou em cena.

Ao aplicar as ferramentas da mecânica estatística, Gibbs deu um salto conceitual ao interpretar a entropia como uma medida da probabilidade de um estado microscópico. Em vez de observar apenas o comportamento macroscópico (o que conseguimos ver e medir), ele pensou: e se olhássemos todos os estados possíveis que as partículas de um sistema podem assumir?

Foi aí que surgiu o conceito de ensemble. Imagine um baralho de cartas totalmente embaralhado. Cada vez que você tira uma carta, está vendo uma configuração possível daquele sistema. Agora, imagine várias mesas jogando com esse mesmo baralho, cada uma com uma combinação diferente de cartas. Juntas, essas mesas representam um ensemble; um conjunto de todas as possíveis configurações do sistema.

No mundo da física, um *ensemble* é exatamente isso: um grupo teórico de sistemas idênticos, cada um em um estado microscópico possível, mas todos obedecendo às mesmas condições (como temperatura, volume, número de partículas, etc.). Gibbs usou esse conceito para entender o comportamento médio de um sistema, o que nos ajuda a prever como ele tende a evoluir — sempre em direção ao estado mais provável, ou seja, com maior entropia. Assim, Gibbs consolidou a interpretação da entropia como uma medida de desordem estatística.



J. Willard Gibbs

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 3 A 2ª Lei da Termodinâmica e a Entropia de Clausius

Sua abordagem conectou a termodinâmica clássica à mecânica estatística e fortaleceu a compreensão moderna da Segunda Lei da Termodinâmica.

Josiah Willard Gibbs foi um daqueles raros cientistas cuja genialidade ultrapassou os limites de seu tempo — embora, por muitos anos, seu nome tenha permanecido desconhecido e fora de círculos acadêmicos restritos. Apelidado pela Revista *Superinteressante* como “o João Ninguém mais brilhante da história” (Oppermann e Vaiano, 2006), Gibbs teve uma influência profunda e duradoura na físico-química, apesar do limitado reconhecimento que recebeu em vida, especialmente nos Estados Unidos.

Além disso, criou o cálculo vetorial — ferramenta hoje indispensável nas ciências exatas — e apresentou ideias pioneiras sobre o comportamento de partículas atômicas. Ainda assim, preferiu manter-se longe dos holofotes, levando uma vida simples e dedicada ao estudo. Sua lápide modesta no cemitério de New Haven, assim como os poucos móveis e documentos preservados na Universidade de Yale, revelam seu estilo de vida reservado. Apesar dessa discrição, sua genialidade foi amplamente reconhecida por grandes nomes da ciência. Lord Kelvin chegou a afirmar que teria atravessado o oceano apenas para conversar com ele. Cientistas como Ostwald, Planck, Ramsay, Maxwell e Boltzmann foram unânimes em destacar a importância de sua obra. (Oesper, 1955).

O editor da edição de 1906 dos *Scientific Papers*, H. A. Bumstead, ressaltou que Gibbs trabalhou de forma solitária, sem assistentes ou rivais e concentrou praticamente todas as suas ideias em um único e extenso artigo. Mesmo com poucos dados experimentais disponíveis à época, seus resultados revelaram-se corretos, de grande relevância teórica e com ampla aplicabilidade científica (Oesper, 1955).

Com o tempo, ele foi reconhecido com várias honrarias científicas em renomadas academias e sociedades. Manteve correspondência com os principais físicos-matemáticos de sua época, como Kelvin, Maxwell e Boltzmann, entre outros expoentes do cenário europeu (Johnston, 1928).

Josiah Gibbs faleceu em 28 de abril de 1903, em New Haven, vítima de uma forte gripe. Permaneceu na Universidade de Yale até o fim de seus dias. Seu legado, no entanto, é tudo menos silencioso: é uma base sólida que sustenta grande parte da ciência que ensinamos, estudamos e aplicamos até hoje.

Capítulo 4

Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

Sabe aquela sensação de que algumas coisas na vida não têm volta? Tipo quando você mistura café com leite — não dá pra separar depois, né? Pois é, esse tipo de fenômeno irreversível também existe na natureza e a termodinâmica dá conta de explicar isso. Mas tem um detalhe: a explicação só fica realmente completa quando a gente olha para o mundo microscópico. E é aí que entra o nosso protagonista deste capítulo: Ludwig Boltzmann, um gênio da física, que ajudou a entender por que certos processos simplesmente não se desenrolam ao contrário.

4.1 Quem foi Boltzmann?

Imagine um aluno brilhante, curioso, apaixonado por ciência, mas que vivia questionando tudo e todos. Esse era Boltzmann! Nasceu em 1844, na Áustria, e se destacou desde jovem nos estudos de matemática e física. Todavia, sua grande paixão era entender como a matéria se organiza, especialmente do ponto de vista estatístico, ou seja, considerando os números grandes e as possibilidades.



Ludwig Boltzmann (1844–1906)

Fonte: <https://en.wikipedia.org><https://rce.casadasciencias>

Capítulo 4 Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

Ao olhar para a história de Ludwig Boltzmann, dá pra perceber logo de cara que ele não era um cientista comum. Ele resolveu encarar a Segunda Lei da Termodinâmica de um jeito diferente; independente de Josiah Willard Gibbs, aplicando a teoria das probabilidades e as leis da mecânica clássica ao comportamento de um grande número de partículas. Pode parecer óbvio hoje, mas na época essa ideia era revolucionária.

E, como acontece com quem ousa inovar, ele bateu de frente com os gigantes da ciência. Um deles foi Wilhelm Ostwald, químico renomado que defendia outra forma de pensar, mais baseada na energia do que nas partículas. Mesmo assim, ambos conseguiam manter relações amistosas fora do campo científico.

Boltzmann era conhecido por sua gentileza e sensibilidade, além da aparência robusta e cabelos cacheados (O'Connor; Robertson, 1998). Porém, por trás desse perfil afetuoso, ele enfrentava fortes oscilações de humor, alternando entre fases de intensa euforia e episódios de depressão profunda.



Wilhelm Ostwald (1853-1932)

Fonte: <https://minio.scielo.br>

Em 1900, buscando se afastar de outro rival, Ernst Mach (1838-1916), Boltzmann transferiu-se para Leipzig. Ironia do destino, ali tornou-se colega justamente de Ostwald, seu mais ferrenho oponente científico. As discussões, embora cordiais fora da academia, intensificaram seu sofrimento emocional, culminando em uma tentativa frustrada de suicídio durante sua estadia na cidade.

Ludwig Boltzmann foi um cientista brilhante, admirado por sua inteligência, sensibilidade e paixão pela ciência. Reconhecido como excelente teórico e habilidoso experimentalista, também se destacava por sua clareza ao ensinar e abertura ao diálogo. Suas obras revelam um pensador profundo e humano, que enfrentava com honestidade suas próprias contradições. Seu legado vai além da física — é também filosófico e inspirador.

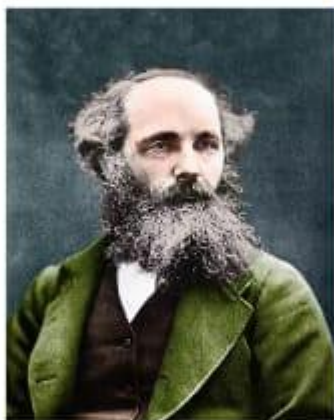
Capítulo 4 Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

4.2 Teorema H e o Mundo das Probabilidades

A termodinâmica clássica, que você já conhece bem, descreve como energia e calor se comportam em sistemas em equilíbrio. A segunda lei, por exemplo, nos diz que certos processos acontecem de maneira irreversível — como a expansão de um gás ou a fusão de gelo. Mas por que isso acontece? O que impede as moléculas de simplesmente “voltarem atrás”?

Lá no século XIX, essa pergunta incomodava muito os cientistas. E foi justamente tentando respondê-la que surgiu a mecânica estatística, uma ponte entre o mundo macroscópico (que a gente vê) e o mundo microscópico (das moléculas e átomos).

Antes mesmo de Boltzmann, James Clerk Maxwell — um dos maiores cientistas da história e considerado o pai da Física Moderna, devido às suas contribuições fundamentais para a teoria do eletromagnetismo — já havia dado o pontapé inicial na abordagem mais estatística da termodinâmica.



James Clerk Maxwell (1831-1879)
Fonte: <https://www.thoughtco.com>

Em 1860, Maxwell descreveu como as velocidades das moléculas de um gás se distribuem. A ideia era mostrar que, embora as moléculas se movimentem aleatoriamente, existe uma regularidade estatística nesse comportamento. Boltzmann, então, pegou essa ideia e foi além. Em 1872, ele desenvolveu o famoso teorema H e, de maneira bem simplificada, descreveu como as velocidades das moléculas de um gás ideal se distribuem e relaciona essa distribuição à entropia.

Pense nos alunos sentados organizadamente em suas carteiras antes do sinal tocar. Cada um no seu lugar, tudo certinho. Dá pra contar nos dedos as formas diferentes de organizar isso — é um estado de baixa entropia, poucos microestados.

Agora, toca o sinal e começa o recreio. Os alunos se espalham por todo lado: corredores, cantina, pátio, quadra. As possibilidades de onde cada um pode estar são enormes! Esse é um estado de alta entropia com muitos microestados possíveis.

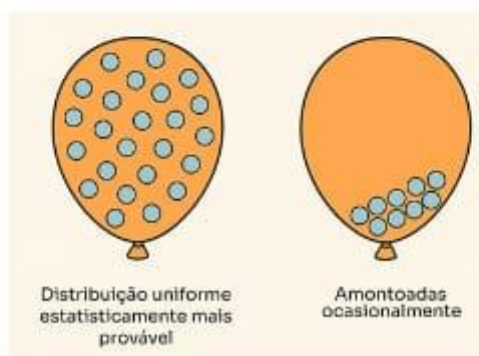
Capítulo 4 Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

A imagem a seguir apresenta uma analogia visual dividida em duas partes, contrastando dois níveis de organização que ilustram o conceito de entropia.



À esquerda: Estado de baixa entropia – organização e poucas possibilidades. À direita: Estado de alta entropia – desorganização e muitas possibilidades.
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Com as moléculas de um gás acontece algo bem parecido. Num balão, por exemplo, elas se movem livremente, colidindo e se espalhando de forma aleatória. A chance de todas as moléculas se amontoarem num cantinho do balão é tão pequena que, na prática, isso nunca acontece. A distribuição uniforme é estatisticamente muito mais provável como ilustra a imagem abaixo.



A distribuição das moléculas de um gás em um balão tende a ser uniforme (esquerda), pois esse é o estado mais provável. A chance de todas as moléculas se aglomerarem em um único canto (direita) é extremamente pequena, embora teoricamente possível.
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 4 Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

Boltzmann mostrou que a entropia está ligada ao número de microestados, ou seja, quantas maneiras diferentes as partículas podem se organizar para resultar no mesmo estado visível.

Foi em 1877 que Boltzmann deu um passo genial: ele ligou diretamente a entropia (S) ao número de microestados (ω) com a fórmula:

$$S = k \cdot \ln \omega$$

Onde k é a constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

Você sabia que a famosa equação de Boltzmann está gravada em sua lápide? Pois é! Essa fórmula resume de forma brilhante a ligação entre a entropia que observamos no mundo macroscópico e o comportamento das partículas em nível microscópico (Yin, 2016). Mas ela também traz à tona um paradoxo intrigante: embora tenha sido deduzida a partir das leis da mecânica clássica — que são reversíveis no tempo, como já vimos — a equação leva justamente à ideia de que os processos em larga escala são irreversíveis.

Como pode algo reversível gerar algo irreversível? É aí que a beleza (e a complexidade) da ciência se revela.

4.3 As Críticas e o Brilhantismo das Respostas de Boltzmann

Nem todo mundo gostou dessa ideia na época. Dois cientistas levantaram críticas importantes.

A primeira veio de Johann Josef Loschmidt, um químico e físico, que apontou o chamado paradoxo da reversibilidade. Ele dizia: "se as leis da mecânica são reversíveis, por que os processos naturais não são?".

A resposta de Boltzmann foi elegante: reverter a direção do movimento de todas as moléculas de um gás ao mesmo tempo é teoricamente possível, mas na prática, impossível, devido ao número absurdo de partículas envolvidas.



Johann J. Loschmidt (1821-1895)
Fonte: <https://pt.wikipedia>

Capítulo 4 Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

Só para saber, Loschmidt foi pioneiro ao representar claramente ligações duplas e triplas entre átomos e apresentou uma estrutura inicial para compostos aromáticos, incluindo uma representação precoce do anel da 1,3,5-triazina, contribuindo para o entendimento da estrutura do benzeno (Lewis, 2010).



Ernest Zermelo (1871-1953)
Fonte: <https://pt.wikipedia>

A segunda crítica, do matemático Ernest Zermelo, é conhecida como o paradoxo da recorrência. Ele dizia que, segundo o teorema de Poincaré, qualquer sistema físico fechado acabaria voltando a um estado bem próximo ao inicial mais cedo ou mais tarde.

E Boltzmann? Respondeu que o tempo necessário pra isso acontecer é maior do que a idade do universo!

Então, tudo certo: a irreversibilidade continua valendo como uma regra estatística extremamente confiável.

Com respostas afiadas e fundamentadas em seus princípios, Boltzmann triunfou brilhantemente sobre as críticas, consolidando a ideia de que a segunda lei da termodinâmica deve ser compreendida como uma lei estatística.

4.4 E Depois de Boltzmann?

Aprendemos com Boltzmann que a famosa desigualdade $\Delta S \geq 0$ (variação da entropia maior ou igual a zero) não significa que a entropia nunca possa diminuir, mas que, na prática, ela quase sempre aumenta — afinal, os estados mais prováveis são também os mais desordenados.

Essa discussão nos leva a um ponto crucial: a seta do tempo. Quando afirmamos que a entropia tende a aumentar ($\Delta S \geq 0$), estamos, implicitamente, dizendo que o tempo possui uma direção. É como afirmar que a história só caminha para frente mesmo que, em algumas equações físicas, o tempo nem sempre apareça de forma explícita.

Capítulo 4 Boltzmann e o mistério da irreversibilidade: um olhar estatístico

Vale lembrar que as ideias de Boltzmann não foram amplamente aceitas em sua época. Foi apenas com o advento da mecânica quântica, por meio dos trabalhos de Max Planck e Einstein, que a comunidade científica passou a reconhecer o valor da abordagem estatística.

Curiosamente, foi o próprio Boltzmann quem incentivou Planck a analisar o problema da radiação do corpo negro com um olhar estatístico. Embora Planck tenha resistido inicialmente, mais tarde seguiu o conselho — e esse passo foi decisivo para o surgimento da ideia de quantização da energia.

Décadas depois, o cientista Ilya Prigogine aprofundou essa ideia, argumentando que a irreversibilidade não é apenas um fenômeno estatístico, mas uma característica essencial dos sistemas naturais. Ele demonstrou que até moléculas individuais apresentam instabilidade, sugerindo que a flecha do tempo é uma propriedade intrínseca da matéria, mesmo em escalas microscópicas.

Com isso, a visão de Prigogine amplia e aprofunda o legado deixado por Boltzmann. Ao considerar a irreversibilidade como parte fundamental da natureza, ele reforça a importância de entender os processos de transformação não apenas em termos de equilíbrio, mas como manifestações da própria evolução da matéria e da vida.



Túmulo de Boltzmann em Viena
Fonte: <https://pt.wikipedia>.

No dia 5 de setembro de 1906, o mundo perdeu Ludwig Boltzmann, um dos maiores físicos teóricos da história. Segundo Dahmen (2006), os últimos anos de Boltzmann foram difíceis. Sua saúde física e mental estava fragilizada, em parte pelo ritmo intenso de trabalho e pelas exaustivas viagens aos Estados Unidos. Mais do que isso, ele carregava o peso de uma comunidade científica ainda dividida em relação às suas ideias. Muitos ainda resistiam à ideia de aplicar estatística à física — algo hoje considerado fundamental.

A lápide de Boltzmann traz gravada sua famosa equação da entropia, $S = k \cdot \log W$, símbolo eterno de seu legado. A morte de Boltzmann por suicídio não apagou sua obra; pelo contrário, suas ideias se tornaram pilares da física moderna, demonstrando que a ciência também é feita de coragem, persistência e humanidade.

Capítulo 5

A Termodinâmica Fora do Equilíbrio

Até aqui, falamos muito sobre Termodinâmica! Pois saiba que ela é uma das teorias mais sólidas e confiáveis da Física (Kapral, 2008). Graças às suas leis, conseguimos entender com precisão como funcionam vários sistemas ao nosso redor — de motores a painéis de pressão —, sempre partindo da ideia de que tudo está em equilíbrio.

Mas... e os sistemas vivos? Como explicar algo tão dinâmico quanto um organismo que respira, se alimenta, se move e se adapta o tempo todo? Aí a história muda.

Ao contrário dos sistemas fechados e previsíveis, os seres vivos dependem de trocas constantes de energia e matéria com o ambiente. Eles vivem em movimento e esse movimento não tem volta, ou seja, é irreversível. Por isso, para entender a vida, precisamos olhar além da termodinâmica tradicional: precisamos entender o que acontece fora do equilíbrio.

5.1 A Transição do Equilíbrio para os Processos Irreversíveis

Mas para entender os sistemas vivos — que vivem em movimento, trocando energia o tempo todo — foi preciso dar um passo além da Termodinâmica Clássica. Foi daí que surgiu a chamada Termodinâmica dos Processos Irreversíveis. Essa nova abordagem veio justamente para investigar sistemas fora do equilíbrio, usando modelos mais realistas que dão conta da complexidade da natureza (Wei, 1966).

O ponto de partida dessa transição é estudar sistemas que ainda estão perto do equilíbrio, onde dá pra usar a chamada termodinâmica linear. Nela, a gente consegue relacionar as forças que “empurram” os processos (como gradientes de temperatura ou concentração) com os fluxos que eles causam (como calor, matéria ou carga elétrica), tudo de forma proporcional (Yin, 2016).

E é aí que entra um conceito bem interessante: o balanço da entropia. Inspirado na hidrodinâmica, ele divide a variação total da entropia (dS) em duas partes:

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio

$$dS = diS + deS$$

Onde:

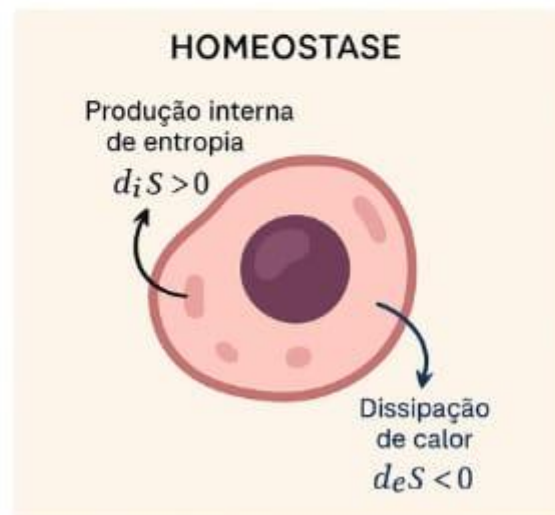
diS é a entropia gerada dentro do sistema por processos irreversíveis como atrito, reações químicas ou dissipação de energia;

deS é o fluxo de entropia trocado com o ambiente — pode ser entrada ou saída de calor, por exemplo.

A Segunda Lei da Termodinâmica nos lembra que a entropia interna sempre aumenta ($diS > 0$). Já o fluxo com o ambiente (deS), pode ser tanto positivo quanto negativo — depende se o sistema está ganhando ou perdendo calor. Mas o total (dS) nunca pode ser negativo, ou seja, o processo não anda "pra trás".

Um exemplo super claro disso é o de uma célula viva em homeostase:

- I) Ela produz entropia internamente por causa do metabolismo ($diS > 0$);
- II) Ao mesmo tempo, dissipa calor para o ambiente ($deS < 0$);
- II) Mas no final das contas, dS continua maior ou igual a zero, respeitando a Segunda Lei.



Balanco de entropia em uma célula viva.
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio

Esse equilíbrio entre produzir entropia e dissipá-la é justamente o que permite que sistemas complexos se mantenham organizados, mesmo sendo irreversíveis. E é aí que a Termodinâmica dos processos Irreversíveis começa a nos mostrar que o caos, às vezes, também pode sustentar a ordem.

5.2 Dissipação, Negentropia e a Flecha do Tempo

Agora que a gente já entendeu que nem tudo na natureza fica em equilíbrio, vamos dar mais um passo e olhar para onde as coisas realmente acontecem: os processos irreversíveis. Sabe aquele momento em que o tempo parece andar só pra frente e o calor vai se espalhando sem volta? Pois é, estamos falando disso.

Quando o sistema não está em equilíbrio, aquela história de entropia constante (o famoso $dS = 0$) não vale mais. Nesse cenário, o tempo entra em cena com força total e a gente começa a olhar para a taxa de produção de entropia – que é só um nome mais técnico para como a desordem vai aumentando ao longo do tempo. Essa taxa é representada por σ (sigma). E tem mais: se a gente multiplica essa taxa pela temperatura, temos a função de dissipação representada por Φ (fi). Ela mostra quanta energia está sendo perdida em formas que não conseguimos mais aproveitar, como o calor gerado por atrito ou por uma resistência elétrica. Ou seja, se o sistema é irreversível, a entropia aumenta lá dentro mesmo e não tem escapatória – a dissipação é parte do pacote. Pensa em um motor: ele transforma energia em trabalho útil, mas uma parte vira calor e vai embora. Aumenta a entropia e pronto – nada de voltar ao que era antes.

Mas aí vem um ponto superinteressante. O físico Erwin Schrödinger, sim, o do gato famoso, falou de um conceito chamado negentropia. Parece o contrário da entropia, né? E de certa forma, é mesmo. Ele observou que os seres vivos, como eu e você, conseguem manter a ordem dentro de si (nosso corpo funcionando direitinho) ao custo de jogar desordem (calor, resíduos, CO_2) pro ambiente. Nós importamos energia organizada (alimentos, luz solar, etc.) e exportamos bagunça.



Erwin Schrödinger (1887-1961)
Fonte: <https://universoracionalista>

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio

Quer um exemplo que tá aí na sua casa? Um freezer. Ele mantém tudo geladinho e organizadinho dentro dele, mas precisa de energia elétrica pra isso. E o que ele faz? Joga o calor pra fora! Quando falta energia, o freezer para e a ordem interna vai embora rapidinho – tudo derrete e o caos toma conta.



Parte superior: Freezer funcionando – energia elétrica mantém tudo organizado ao expulsar o calor para fora. Parte inferior: Falta de energia – o sistema entra em colapso, os alimentos derretem e o caos (alta entropia) se instala.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Esse tipo de sistema, que se mantém organizado mesmo fora do equilíbrio, é chamado de estado estacionário fora do equilíbrio. Parece complicado, mas não é: mesmo gerando entropia internamente ($diS > 0$), o sistema consegue manter sua entropia total constante ($dS/dt = 0$), desde que a energia continue entrando e saindo numa boa. Isso aparece em vários fenômenos do nosso dia a dia, como:

- Quando tem calor passando de um corpo quente pra um frio;
- Quando uma substância vai se espalhando num líquido ou gás;
- Ou quando há umidade se movimentando de um lugar pra outro.

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio



Lars Onsager (1903-1976)
Fonte: <https://pt.wikipedia.org>

O físico e químico norueguês Lars Onsager fez descobertas importantes sobre os sistemas fora do equilíbrio. Em 1931, ele formulou relações matemáticas que conectam os parâmetros entre as partes internas e externas de um sistema, conhecidas como relações recíprocas.

As relações recíprocas de Onsager são fundamentais para os princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis.

Agora, segura essa: em 1931, Lars Onsager publicou essa descoberta incrível, mas que só ganhou o devido reconhecimento depois da Segunda Guerra Mundial. Resultado? Em 1968, veio o merecido Prêmio Nobel de Química. E o mais curioso? Ele já tinha colocado isso no papel quase 40 anos antes!

Essa igualdade ficou conhecida como as relações recíprocas de Onsager, um marco fundamental na compreensão dos processos termodinâmicos fora do equilíbrio. Ela mostra que, se uma força gera um fluxo de outro tipo, o inverso também pode ocorrer com a mesma intensidade — uma simetria elegante e profunda da natureza!



Lars Onsager em sala de aula, compartilhando conhecimentos com entusiasmo e simplicidade.
Fonte: <https://observvoice.com/wp-content/uploads/2023/10/Lars-Onsager.jpg>

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio

Depois disso, vários cientistas como Meixner, Casimir, De Groot e o brilhante Ilya Prigogine pegaram essa ideia e levaram muito mais longe. Eles perceberam que entender essa irreversibilidade era chave pra explicar como funcionam sistemas reais, especialmente os biológicos e abertos (aqueles que trocam energia e matéria com o meio).

E é aqui que a gente se encontra com um dos conceitos mais profundos da física moderna: a flecha do tempo. Prigogine mostrou que a irreversibilidade não é um erro, não é uma exceção. Ela é parte da essência do universo.

Graças à irreversibilidade, os sistemas podem:

- Evoluir,
- Mudar,
- Se organizar sozinhos,
- E até surgir vida – desde que tenham acesso a energia e matéria.

E isso nos leva ao conceito da Flecha do Tempo: O tempo tem direção. Ele anda pra frente junto com o aumento da entropia. E essa "flecha" que aponta o rumo da desordem também aponta o caminho da organização, da vida e da evolução.



Seta do tempo – representação visual da passagem irreversível do tempo, destacando a direção natural dos processos físicos e o aumento da entropia.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Deixar o equilíbrio de lado não foi perder o rumo. Foi justamente descobrir um novo caminho – onde a termodinâmica se conecta com a vida, com a evolução e com o próprio tempo.

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio

5.3 Fora do Equilíbrio, porém, Presente em Quase Tudo

A essa altura, talvez você já tenha notado uma coisa curiosa: os sistemas em equilíbrio são a exceção, não a regra. A verdade é que a maior parte do que acontece ao nosso redor – e dentro da gente também – está fora do equilíbrio. E isso não é ruim. Muito pelo contrário: é justamente essa distância do equilíbrio que permite que a vida aconteça, que as coisas mudem, evoluam, se movimentem.

Na realidade, a maioria dos fenômenos naturais e tecnológicos ocorre em condições que estão longe desse estado idealizado.

Estar fora do equilíbrio significa que o sistema está em constante transformação, com fluxos contínuos de energia e matéria entrando e saindo. Pense, por exemplo, no sangue circulando pelo corpo humano, no vento soprando sobre uma paisagem ou nas reações químicas que ocorrem no interior de um motor. Esses sistemas não estão parados; eles se mantêm dinamicamente ativos, e é justamente isso que caracteriza o domínio da termodinâmica fora do equilíbrio.



Figura 5.2 — Esquema de um rio, com setas indicando o fluxo da água, e um gráfico ao lado mostrando que o volume de água em um ponto permanece constante no tempo.

Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Na termodinâmica clássica, processos são muitas vezes tratados como reversíveis, isto é, idealmente poderiam ocorrer nos dois sentidos sem perdas.

Capítulo 5 A Termodinâmica fora do Equilíbrio

Na prática, entretanto, os processos reais são irreversíveis. Isso significa que há dissipação de energia, como ocorre no atrito, na transferência de calor entre corpos com temperaturas diferentes ou em reações químicas que liberam calor. Nesse contexto, o retorno ao estado anterior nunca é completo e sempre há perda de energia útil.

Essa irreversibilidade é uma marca dos sistemas não equilibrados e está relacionada a fenômenos fundamentais como a flecha do tempo, o envelhecimento dos sistemas, o funcionamento de motores e os processos bioquímicos em células vivas.

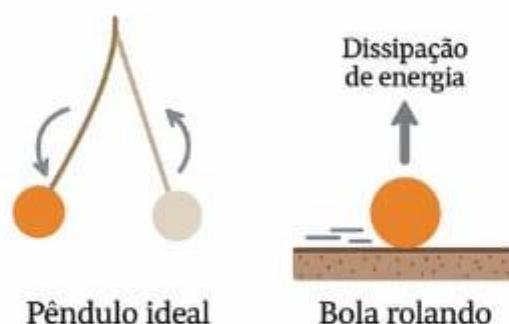


Figura — Comparação entre um pêndulo ideal (movimento reversível) e uma bola rolando sobre superfície áspera (movimento irreversível, com dissipação de energia).
Fonte: Imagem criada por IA (Gemini, 2025)

Entender essa perspectiva é aproximar-se de uma ciência mais fiel à realidade: complexa, dinâmica e em constante transformação. Nessa abordagem, o comportamento dos sistemas não é sempre previsível ou linear. Pequenas variações podem levar à grandes mudanças — e é aí que entra o conceito de caos, não como desordem completa, mas como uma forma sensível e complexa de organização típica de sistemas que operam longe do equilíbrio.

A termodinâmica fora do equilíbrio nos convida a reconhecer que a vida, o clima, os fluxos químicos e até a evolução das estrelas seguem trajetórias irreversíveis, mas estruturadas, muitas vezes descritas por padrões emergentes. É nesse cenário, entre a ordem e o caos, que os sistemas naturais encontram sua forma de existir e persistir.

Assim, ao nos afastarmos do ideal de equilíbrio estático, abrimos espaço para compreender o mundo como ele realmente é: vivo, pulsante e surpreendente — sustentado por fluxos, transformações e pela inevitável passagem do tempo.

Capítulo 6

Ilya Prigogine: O Cientista que Entendeu a Ordem no Caos

Você já se perguntou como a vida segue em frente mesmo quando tudo parece estar em completa desordem? Como é que, no meio do caos, uma célula continua funcionando, uma planta cresce ou uma ideia nova surge? Pois é, esse capítulo vai te apresentar um cientista que mudou a forma como pensamos sobre tudo isso. O nome dele é Ilya Prigogine, um pensador que ousou afirmar que a desordem também pode ser criativa e que o caos, longe de ser um problema, é muitas vezes o ponto de partida para a vida acontecer.

6.1 Um Começo em Meio ao Caos

Ilya Prigogine nasceu em 1917, em um período nada tranquilo: a Revolução Russa estava pegando fogo. Por causa disso, sua família teve que deixar o país e foi parar primeiro na Alemanha e depois na Bélgica, onde ele cresceu e estudou. Já dá pra ver que ele começou a vida no meio da turbulência, né?



Ilya Prigogine (1917-2003)

Fonte: <https://images.lecho.be/view>.

O pai dele era engenheiro químico — ou seja, a ciência estava presente em casa. Mas, ao contrário do que se espera, Prigogine não se encantou de cara por esse caminho. Na verdade, o que brilhava os olhos dele eram outras áreas: história, arqueologia... e até música! Ele tocava piano e tinha um olhar curioso pra tudo. Isso fez dele um cientista diferente: alguém que enxergava conexões entre assuntos muito distintos.

Na adolescência, um filósofo francês chamado Henri Bergson entrou no seu radar. Foi por causa da ideia de "Evolução Criativa", que defendia um tempo fluido, cheio de possibilidades e não algo fixo e mecânico, como a ciência clássica acreditava.

Capítulo 6 Ilya Prigogine: O Cientista que Entendeu a Ordem no Caos

Essa influência mexeu com Prigogine de verdade. Ele começou a questionar a ideia de que o mundo era uma engrenagem previsível, como na física de Newton. E aí nasceu uma das grandes paixões da vida dele: o tempo.

Com apenas 20 anos, ele já publicava artigos sobre temas cabeludos, como causalidade, determinismo e mecânica quântica. E adivinha? O tempo estava sempre no meio das discussões.

Depois, no doutorado, Prigogine decidiu encarar uma área que muita gente evitava: a termodinâmica dos fenômenos irreversíveis. Em vez de estudar sistemas em equilíbrio (aqueles que não mudam), ele focou nos que estão sempre mudando — como quando a gente mistura café com leite. O resultado não volta atrás, certo? Esse tipo de transformação era visto com desconfiança por muitos cientistas da época.

Mas Prigogine apostou que ali havia algo essencial para entender a vida e a complexidade do mundo. E ele estava certíssimo.

6.2 O Dia em que a Ciência Aplaudiu o Caos

Padrões que surgem do nada, redemoinhos na pia, formas que aparecem em líquidos e cristais. Essas "organizações espontâneas" sempre encantaram Prigogine. Lá nos anos 1960, trabalhando entre os Estados Unidos e a Europa, ele começou a desenvolver modelos matemáticos que explicavam como isso era possível. A resposta? Estava no comportamento de sistemas abertos, longe do equilíbrio e ele chamou esse fenômeno de estruturas dissipativas.

Mas calma! Ainda não vamos mergulhar fundo nesse conceito (isso fica para o próximo capítulo). Por enquanto, o que importa é entender o impacto dessa ideia.

O que Prigogine provou é que sistemas que trocam energia e matéria com o ambiente — como o nosso corpo, por exemplo — podem manter sua organização e até se tornar mais complexos, mesmo fora do equilíbrio. Ele mostrou que o caos não era desordem pura, mas um campo fértil para o surgimento de novas formas, padrões e vida.

Esse pensamento desafiava a física clássica, que acreditava que tudo caminhava, inevitavelmente, para o equilíbrio e a desordem (a famosa entropia). A teoria dele virou um divisor de águas.

Capítulo 6 Ilya Prigogine: O Cientista que Entendeu a Ordem no Caos

Pra entender a base do que ele propôs, imagine que temos uma variável x que representa o estado do sistema e o tempo t . A mudança ao longo do tempo pode ser descrita por:

$$f(x) = \frac{dx}{dt}$$

Parece simples, né? Mas a beleza está justamente aí. A função $f(x)$ representa as forças que mudam o sistema e o que Prigogine mostrou é que, em certas condições, o sistema encontra uma forma de se reorganizar sozinho — criando estrutura, complexidade e até comportamento ordenado, quando o esperado seria a bagunça total.

A comunidade científica demorou um pouco para aceitar essas ideias tão fora da curva. Mas o reconhecimento veio e veio em grande estilo. Em 1977, Prigogine recebeu o Prêmio Nobel de Química — um marco histórico. Não era apenas um prêmio pessoal. Era como se a ciência dissesse: "Sim, o caos também tem valor. A vida não é só ordem; ela é transformação, instabilidade, criação."



Ilya Prigogine recebendo o Prêmio Nobel de Química em 1977 das mãos do Rei Karl XVI Gustav.
Fonte: <https://www.researchgate.net/publication>

Capítulo 6 Ilya Prigogine: O Cientista que Entendeu a Ordem no Caos

O Nobel de Prigogine foi uma vitória da ousadia. Foi o momento em que a Termodinâmica se abriu para o mundo real — o mundo das florestas que crescem, dos corpos que vivem, dos rios que correm. Um mundo onde a ordem nasce da instabilidade e onde a vida se alimenta justamente do movimento.



A recepção para a qual o Rei Balduino e a Rainha Fabíola convidaram três vencedores do Prêmio Nobel belga (na época, em 1977): Albert Claude, Christian de Duve e Ilya Prigogine.
Fonte: <https://www.lecho.be/culture/general/ilya-prigogine>

Depois disso, Prigogine publicou livros ao lado de cientistas como Paul Glansdorff, fundou centros de pesquisa e expandiu sua teoria para áreas como a biologia, cosmologia e até as ciências sociais.

Em 1989, foi nomeado visconde da Bélgica, um título de honra raríssimo reservado a mentes que transformam a forma como enxergamos a realidade.

Ele faleceu em 2003, mas seu legado continua vivo toda vez que estudamos sistemas complexos, toda vez que olhamos para o caos e conseguimos enxergar nele um sopro de ordem.



Professor Ilya Prigogine em aula na Universidade Livre de Bruxelas, explicando conceitos ao quadro.
Fonte: <https://pt.wikipedia.org/>

Capítulo 7

Estruturas Dissipativas: Como a Ordem Surge do Caos

Prepare-se, porque agora a gente entra numa parte surpreendente da termodinâmica! Sabe quando tudo parece uma bagunça, mas de repente surge um padrão, uma organização inesperada? Pois, é disso que trata a teoria das estruturas dissipativas, criada por Ilya Prigogine entre as décadas de 1960 e 70. Ele mostrou que, mesmo em sistemas abertos e longe do equilíbrio, pode surgir uma ordem espontânea.

7.1 Quando o Caos se Organiza

A ideia é a seguinte: quando um sistema está trocando energia e matéria com o ambiente, ele pode passar de um estado aparentemente caótico para um padrão organizado. Prigogine chamou isso de "estrutura dissipativa".

Imagine um sistema aberto — como uma panela no fogo, que troca calor e matéria com o ambiente — e que está longe do equilíbrio, ou seja, não está "calmo" e estável. Segundo Prigogine, esses sistemas podem se organizar sozinhos, criando estruturas ordenadas no meio do que parecia ser uma bagunça. Por isso o nome "dissipativas": eles dissipam energia, produzem entropia (uma medida de desordem), mas ainda assim conseguem manter uma organização por um tempo.

Ou imagine a água com sabão, onde as moléculas de sabão se juntam espontaneamente para formar pequenas "bolinhas" chamadas micelas.



A dinâmica das micelas em água com sabão é um exemplo de estrutura dissipativa: em um fluxo constante, elas se auto-organizam e se desorganizam continuamente.

Antes, as moléculas estão todas espalhadas, bagunçadas. Quando a concentração de sabão atinge um valor crítico, elas se organizam em micelas — estruturas que só existem porque há um fluxo constante de moléculas entrando e saindo. Isso é uma estrutura dissipativa em ação!

Capítulo 7 Estruturas Dissipativas: Como a Ordem Surge do Caos

7.2 A Dança das Bifurcações

Vimos que as flutuações, a auto-organização e o caos atuam juntos para permitir que a natureza crie ordem a partir do caos — especialmente em sistemas abertos e longe do equilíbrio. Mas, quando essas flutuações crescem demais, o sistema pode atingir um ponto decisivo em que até pequenas perturbações são capazes de mudar completamente seu comportamento.

É aí que entra um conceito fascinante: a bifurcação. Ela ocorre quando o sistema atinge um ponto crítico de instabilidade e, a partir daí, pode seguir por caminhos diferentes, dependendo das flutuações que o influenciem. Esses caminhos podem levar tanto a um estado mais ordenado quanto a uma configuração ainda mais caótica.

A Figura 1 (abaixo) ilustra um esquema de bifurcação em um sistema químico não linear, mostrando como a instabilidade pode abrir portas para novas possibilidades de organização.

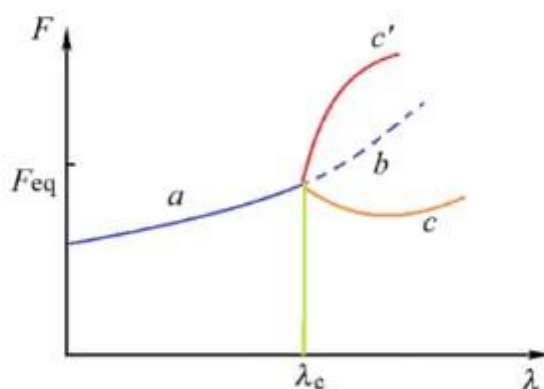


Figura 1 Diagrama esquemático de bifurcação de um sistema químico não linear.
Fonte do autor

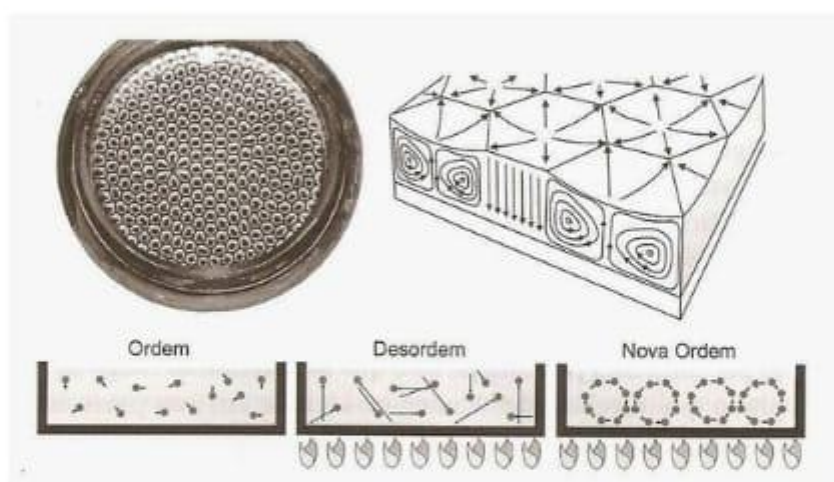
Neste gráfico, a ordenada F representa uma função de estado do sistema e a abscissa λ representa um parâmetro que servisse para acompanhar o desdobramento da reação, o tempo, por exemplo.

O ponto crítico $\lambda = \lambda_c$ é o marco da transição. Esse ponto representa o que Prigogine descobriu o que seriam as bifurcações, ou seja, dependendo das condições de energia do meio e do processo o sistema teria duas possibilidades, cujo caminho seguido seria determinado pelas flutuações da energia do sistema juntamente com a entropia. É o que acontece como veremos adiante em processos químicos oscilantes.

Capítulo 7 Estruturas Dissipativas: Como a Ordem Surge do Caos

Esse comportamento — quando um sistema pode seguir por diferentes trajetórias a partir do mesmo ponto — é o que chamamos de fenômeno de bifurcação. E o mais interessante? Ele pode ocorrer em vários níveis e contextos: de reações químicas à processos biológicos, sociais e até ecológicos.

Antes da bifurcação, o sistema costuma exibir alta simetria: tudo se comporta de forma homogênea e previsível. Mas, ao passar pelo ponto crítico, essa simetria é quebrada e é justamente essa quebra que permite o surgimento de uma nova ordem.



Células de Bénard que se formam em uma camada de óleo de silicone aquecida.

Fonte: <https://instabilidadesveladas.blogspot.com/2014/04/celulas-de-rayleigh-benard.html>

Um exemplo clássico e visualmente marcante desse tipo de comportamento é o das células de Bénard — estruturas hexagonais que surgem numa camada de líquido aquecida entre duas placas. Em vez de uma mistura caótica de moléculas, o que se observa, acima de certo ponto crítico de temperatura, é um padrão ordenado que só se forma devido à flutuações amplificadas fora do equilíbrio térmico. Esse ponto de transição é uma bifurcação a partir da qual o sistema pode evoluir para diferentes formas organizadas ou não (Luisi, 2013).

Capítulo 7 Estruturas Dissipativas: Como a Ordem Surge do Caos

7.3 A Reação que Mudou Tudo

Agora que entendemos como um sistema pode mudar de rumo por causa de pequenas perturbações, fica mais fácil compreender o próximo passo dessa jornada: o surgimento de padrões oscilatórios surpreendentes que desafiaram até os cientistas mais experientes. E é aí que entra uma das descobertas mais intrigantes da química moderna: a famosa reação de Belousov-Zhabotinsky, nomeada em homenagem aos seus dois descobridores.



Boris P. Belousov (1893–1976)
Fonte: <https://upload.wikimedia.org>



Anatol Zhabotinsky (1938–2008)
Fonte: <https://media.springernature.com>

Durante muito tempo, ela foi vista como uma anomalia. Afinal, como uma reação química poderia oscilar ou formar padrões visuais? Foi com Prigogine que entendemos que esse comportamento era, na verdade, característico de um sistema longe do equilíbrio se organizando por conta própria. A famosa "ordem no caos".

Esses exemplos nos mostram algo fundamental: os sistemas vivos, as cidades, o clima e até o universo, funcionam muitas vezes longe do equilíbrio. E é exatamente aí, nesse jogo entre energia, flutuação e instabilidade que a vida encontra espaço para emergir. Prigogine não apenas explicou isso cientificamente, mas abriu uma nova janela para pensarmos o mundo com mais complexidade e esperança.

No próximo capítulo, vamos ver mais de perto os detalhes das estruturas dissipativas: como se formam, como funcionam e por que são tão importantes para entender a vida e o universo em constante transformação.

Capítulo 8

As Fascinantes Reações Oscilantes

Chegou a hora de explorarmos um tema que virou a cabeça de muita gente na comunidade científica e que continua fascinando até hoje: as reações oscilantes.

Essas reações químicas são tudo, menos convencionais. Por muito tempo, foram recebidas com ceticismo. Afinal, como poderia uma reação química "pulsar", mudar de cor sozinha, se repetir em ciclos quase como se estivesse "viva"? Isso parecia contrariar a lógica da química clássica, acostumada com processos que vão de um ponto A a um ponto B — e pronto.

Mas as reações oscilantes não seguem esse roteiro. Elas fogem do equilíbrio, geram padrões temporais e espaciais e se comportam de maneira surpreendente, como se tivessem um ritmo próprio. Por isso, são um dos exemplos mais marcantes da termodinâmica fora do equilíbrio — aquele mundo que vimos nos capítulos anteriores, onde flutuações, auto-organização e até o caos determinístico entram em cena.

Neste capítulo, vamos entender como essas reações funcionam, qual sua história e por que elas se tornaram um marco na ciência moderna. Prepare-se para mergulhar num universo onde a química dança literalmente.

8.1 História e Primeiros Desafios das Reações Oscilantes

A história das reações oscilantes é mais antiga do que se imaginava! Embora os primeiros trabalhos publicados que ganharam mais visibilidade datem por volta de 1900, a pesquisa moderna revela precursores ainda mais remotos.

Imagine a surpresa ao descobrir que, já em 1828, Gustav T. Fechner (1801-1887) forneceu o primeiro relato sobre sistemas químicos oscilantes através de uma fascinante célula eletroquímica (Kiprijanov, 2016). Um pioneiro esquecido!



Gustav T. Fechner (1801-1887)
Fonte: <https://www.google.com/url>

Capítulo 8 As Fascinantes Reações Oscilantes

No final do século XIX e início do século XX, outros cientistas começaram a notar fenômenos que desafiavam a linearidade esperada:

1896

Raphael E. Liesegang descreveu os chamados "Anéis de Liesegang", padrões rítmicos que se formam em géis, um precursor visual de oscilações espaciais.

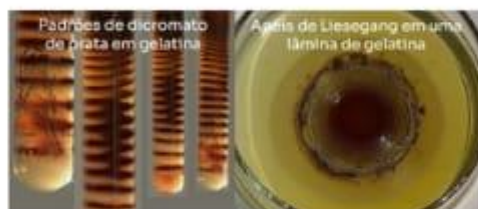


Figura: Padrões de precipitação periódica: bandas de $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (esquerda) e anéis de Liesegang (direita) formados em gelatina, ilustrando auto-organização química em sistemas fora do equilíbrio

Fonte: <https://malagabay.wordpress.com/wp-content/uploads>

1899

Wilhelm Ostwald relatou que a taxa de dissolução do cromo em ácidos apresentava oscilações periódicas, antecipando a formalização dessas ocorrências.

1903

Georg Bredig publicou observações sobre a decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio, que também apresentava comportamentos não lineares.



Figura: (a) Raphael E. Liesegang (1869–1947), (b) W. Ostwald (1853–1932) e (c) Georg Bredig.

Fonte: <https://wikipedia>

Capítulo 8 As Fascinantes Reações Oscilantes

Inicialmente, a crença dominante era que essas oscilações só poderiam ocorrer em sistemas heterogêneos (com diferentes fases, como sólido-líquido). A ideia de que poderiam acontecer em meios homogêneos (onde tudo está na mesma fase, como uma solução líquida) parecia impossível, quase uma heresia científica.



Alfred J. Lotka (1880-1949)
Fonte: <https://wikipedia>

Foi só em 1910 que Alfred J. Lotka desafiou essa visão. Com a sua perspicácia, observou e modelou oscilações em espécies intermediárias em sistemas homogêneos, resultantes da complexa cinética dessas reações (Martins, 2013). Suas propostas de modelos cinéticos foram importantes para compreender que a oscilação era inerente à própria dinâmica das reações. A ousadia de Lotka abriu caminho para a primeira confirmação experimental.

Em 1921, William C. Bray fez uma descoberta monumental: a primeira reação química oscilante homogênea documentada! Era uma reação catalítica de iodato na decomposição da água oxigenada (De Jesus, 2018). Contudo, a interpretação de Bray foi contestada por muitos de seus contemporâneos e o impacto dessa descoberta foi limitado na época.



William C. Bray (1879-1946)
Fonte: <https://wikipedia>

Ainda assim, o legado de Bray continuou. Em 1931, H. Liebhafsky, aluno de Bray, aprofundou os estudos nesse oscilador. Ele descobriu que o sistema Bray-Liebhafsky (BL) consistia em duas reações autocatalíticas acopladas e uma decomposição unimolecular, gerando oscilações sustentáveis (De Jesus, 2018). Esse sistema forneceu uma base experimental para entender como uma substância pode catalisar sua própria formação, um mecanismo chave para a oscilação.

Capítulo 8 As Fascinantes Reações Oscilantes

Apesar desses avanços, as ideias não foram imediatamente aceitas. Muitos cientistas da época questionavam as descobertas, duvidando da possibilidade dessas oscilações e das explicações dadas para elas. Esse cenário mostra como novas ideias científicas muitas vezes enfrentam ceticismo, especialmente quando parecem desafiar leis estabelecidas, como a Segunda Lei da Termodinâmica.

8.2 A Revolução Belousov-Zhabotinsky e o Reconhecimento Científico

Um marco fundamental para o estudo das reações oscilantes aconteceu no início da década de 1950 com Boris Belousov, um químico que, ao investigar os processos do ciclo do ácido cítrico, observou algo inesperado: uma solução contendo ácido cítrico, bromato de potássio e cério apresentava mudanças periódicas de cor, alternando entre o amarelo e o incolor por quase uma hora. Essa reação parecia violar a Segunda Lei da Termodinâmica, o que gerou forte resistência quando ele tentou publicar seus resultados.



Boris Pavlovich Belousov tirada em sua mesa
Fonte: <https://woosterdigital.org/BZ-history/items/show/147>

A rejeição inicial da comunidade científica não foi o fim da história. O trabalho de Belousov só ganhou o devido reconhecimento alguns anos depois, especialmente graças ao seu aluno Anatol Zhabotinsky.

Capítulo 8 As fascinantes Reações Oscilantes

Entre 1961 e 1964, Zhabotinsky focou em decifrar o complexo mecanismo da reação. Ele não só conseguiu esclarecer o esquema do primeiro ciclo oscilatório, como também aprimorou a receita original de Belousov, substituindo o ácido cítrico pelo ácido malônico. O mais notável: Zhabotinsky não enfrentou as mesmas dificuldades para publicar seus resultados preliminares em 1964! Uma possível explicação, segundo historiadores, é que ele optou por revistas biológicas, menos presas aos dogmas termodinâmicos da química e física da época.

A descoberta de Zhabotinsky, uma variação da reação de Belousov, rapidamente ganhou fama como a Reação de Oscilação Belousov-Zhabotinsky (BZ), tornando-se uma experiência de laboratório fascinante e um modelo para o estudo da auto-organização (Mazalla Jr., 1978).



Reação B-Z

Fonte: <https://prismacientifico.wordpress.com>

No passado, a falta de espaço para as oscilações na comunidade científica (que se baseava em leis determinísticas) dificultava a acessibilidade de muitos trabalhos. No entanto, a partir dos anos 60, as reações oscilantes ganharam notoriedade. Pesquisas comprovaram que a termodinâmica precisaria passar por um processo de transformação, incorporando em seu contexto a capacidade de organização da natureza em meio à desordem (Dos Santos, 2021).

Capítulo 8 As fascinantes Reações Oscilantes

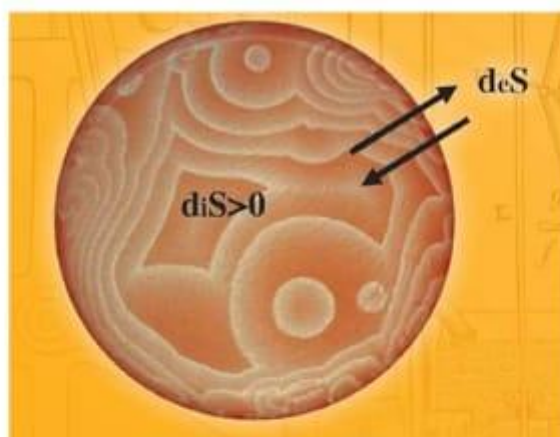


Figura 8.41 — Representação da Reação B-Z e os fluxos de entropia em um sistema aberto. A seta " $diS > 0$ " indica a produção de entropia dentro do sistema. Já a seta " d_eS " aponta para o fluxo total de entropia gerado pelo sistema mais o ambiente. Essa imagem, retirada da obra *Modern Thermodynamics*, simboliza visualmente os princípios que sustentam as ideias de Prigogine sobre ordem e dissipação.

Olhando para essa imagem, fica mais fácil entender a genialidade do modelo: em vez de a entropia ser apenas um "indicador de bagunça", ela passa a ser o motor por trás da organização. A reação B-Z, como mostra a figura, está longe do equilíbrio. Ela gera entropia internamente ($diS > 0$), mas como o sistema continua interagindo com o ambiente, ele consegue manter um estado organizado. É a desordem interna que alimenta a ordem visível — uma inversão instigante e profundamente reveladora.

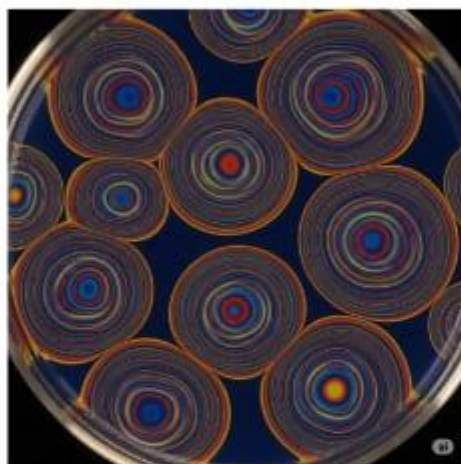
O interessante é que nada disso viola a Segunda Lei. Ao contrário, a entropia total do sistema e do ambiente ainda aumenta ($dS \geq 0$). A novidade trazida por Prigogine é que, dentro do sistema, há produção interna de entropia ($diS > 0$), mas isso não impede a organização — aliás, permite!

Esse equilíbrio entre desordem e ordem é o que torna essas reações tão fascinantes: quanto mais o sistema "dissipa" energia, mais ele pode gerar padrões organizados.

Capítulo 8 As fascinantes Reações Oscilantes

O impacto disso vai muito além do laboratório. A Reação B-Z se tornou um modelo experimental para compreender auto-organização em biologia, formação de padrões em ecossistemas, ciclos econômicos e até redes sociais. Tudo que envolve sistemas complexos, abertos e dinâmicos pode, em algum nível, se beneficiar dessa visão.

Prigogine não nos deu apenas uma nova teoria científica. Ele nos deu uma nova maneira de olhar para a vida: não como algo que resiste à entropia, mas como algo que se constrói com ela. A Reação B-Z não é apenas uma curiosidade química. É uma metáfora viva do universo em movimento.



Reação de Belousov-Zhabotinsky (B-Z). Padrões oscilantes em uma ilustração gerada por inteligência artificial. Este exemplo clássico da química fora do equilíbrio revela a auto-organização dinâmica da matéria.

Finalizamos este capítulo (e este livro!) com uma ideia que ecoa na fronteira da ciência:

"É no longe do equilíbrio que a vida se faz possível." — Ilya Prigogine

As reações oscilantes nos mostraram que a natureza não busca apenas a ordem estática, mas sim a harmonia dinâmica. A Reação B-Z não é o fim de uma história — é o começo de uma nova forma de entender a ciência: mais fluida, mais complexa, mais viva.

E você, professor, estudante ou curioso está convidado a continuar essa dança — onde cada oscilação é um passo em direção ao desconhecido e à descoberta.

Referências Bibliográficas

- CAVAGNOLI, Rafael. Breve História da Termodinâmica (I): Máquinas Térmicas e a Revolução Industrial. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 47, e20240367, 2025.
- CHANG, R.; OVERBY, J. Química. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- DE JESUS, C. H. Show de Química: aprendendo Química de forma lúdica experimental. 3. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018.
- GIROLAMI, G. S. A Brief History of Thermodynamics, As illustrated by Books and People. *Journal Chemical Education*, 2020, 65, p. 298-311.
- GUEDES, I. F. Ciência e calor: considerações sobre a história da termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, 2006.
- J O'CONNOR; EF ROBERTSON, 1998. Disponível: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Boltzmann/> acessado em 21/06/2025
- KIPRIJANOV, Konstantin S. Chaos and beauty in a beaker: The early history of the Belousov-Zhabotinsky reaction. *Ann. Phys. (Berlin)*, v. 528, n. 3-4, p. 233-237, 2016.
- KOSTIC, Milivoje M. 'Reflexões Principais' sobre 'Réflexions' de Sadi Carnot de 1824 e o Legado de 200 Anos. *Entropia*, vol. 27 (5), p. 502, 2025.
- LLOYD, J. T. Lorde Kelvin demonstrado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, p. 499-508, 2007. Disponível em: www.sbfisica.org.br
- LUISI, Pier Luigi. A emergência da vida: das origens químicas à biologia sintética. Tradução de Aurora Bernardini. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2013.
- MAZALLA JR, W. Reações Oscilantes: Revisão e Demonstração Experimental. *Química Nova*, 1978, p. 9-15.
- OESPER, R. E. (1955). Josiah Willard Gibbs. *Journal of Chemical Education*, 32(5), 267. doi:10.1021/ed032p267
- OLIVEIRA, Mário J. de. Reflexões de Sadi Carnot. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 46, e20240103, 2024.
- OPPERMAN, Álvaro. Conheça J. Willard Gibbs: o mais brilhante João-ninguém. Superinteressante. [S. l]. [ano]. Disponível em: <https://super.abril.com.br/ciencia/josiah-willard-gibbs-o-mais-brilhante-joao-ninguem/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

- PAIXÃO, C. M.; BARBOSA, J. L. James Prescott Joule e a equivalência entre trabalho e calor: experiências com o aparelho de Joule. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 3, 2009.
- PRIGOGINE, I. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*, 1984
- RAMÍREZ, A. C. La Máquina de Vapor y la Termodinámica. *Educación Química*, 1992, v. 3, p. 222-225.
- SANDLER, S. I. & WOODCOCK, T. G. *Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics*. 2010.
- SCORZATO, M. A.; MARANDINO, M. A concepção de energia nos livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, 2006.
- SOUZA, R. da S., SILVA A. P. B. da, ARAÚJO, T. S. James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: Reproduzindo as dificuldades do laboratório. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 3, 3309, 2014.
- STANLEY, H. & WOODCOCK, T. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010.
- TAVARES, L. A. A. História da energia e sua importância para o ensino de Ciências. *Dissertação (Mestrado em Educação) – PUC-SP*, 2010.
- VASCONCELOS, S. M. R.; MARTINS, L. A. M. Sadi Carnot e a teoria do calórico: uma releitura de seu trabalho de 1824. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 4, 2008.
- WEI, J. IRREVERSIBLE THERMODYNAMICS IN ENGINEERING. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1966, 58(10), p. 55-60.
- WISNIAK, Jaime. Conservação de Energia: Leituras sobre as Origens da Primeira Lei da Termodinâmica. Parte I. *Educ. quím*, Cidade do México, v. 2, pág. 159-171, 2008. Disponível em <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2008000200013&lng=es&nrm=iso>. acesso em 23 jul. 2025.
- YIN, R. Concept and Theory of Dynamic Operation of the Manufacturing Process. *Theory and Methods of Metallurgical Process Integration*, 13-53, 2016.

