

Os primeiros conceitos da termodinâmica na perspectiva de autores do século XIX

The first concepts of thermodynamics from the perspective of 19th century authors

Regina Simplício Carvalho | Universidade Federal de Viçosa

resicar@ufv.br

<https://orcid.org/0000-0002-0679-4070>

Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho | Universidade Federal de Viçosa

atadeu@ufv.br

<https://orcid.org/0000-0003-1910-8313>

Carlos Eduardo Laburú | Universidade Estadual de Londrina

laburu@uel.br

<https://orcid.org/0000-0003-1985-9213>

RESUMO Este trabalho busca uma releitura da construção dos primeiros conceitos da termodinâmica a partir de autores do século XIX. Alguns desses foram considerados por Thomas Kuhn como descobridores da conservação da energia. A escolha dos autores buscou a heterogeneidade de pontos de vista sobre o assunto pesquisado e as obras abarcaram as modalidades de ciência propostas por Ludwik Fleck. Na perspectiva fleckiana indivíduos pertencem a coletivos de pensamentos, portadores comunitários de estilo de pensamento. Um indivíduo pode atuar como veículo do tráfego intercoletivo de pensamento. O conhecimento evolui por meio de mutações nos estilos de pensamentos, quando altera a disposição para a percepção dirigida. Na formulação dos conceitos termodinâmicos constata-se a comunicação intercoletiva de ideias. Nas obras estudadas observa-se uma gradativa mudança de linguagem, com incorporação de novos termos científicos, que aos poucos foram sendo assimilados pela comunidade científica.

Palavras-chave calor – energia – trabalho – Ludwik Fleck – século XIX.

ABSTRACT *This work seeks a rereading of the construction of the first concepts of thermodynamics from authors of the 19th century. Some of these were considered by Thomas Kuhn as discoverers of the conservation of energy. The choice of authors sought the heterogeneity of points of view on the subject researched and the works covered the modalities of science proposed by Ludwik Fleck. From a Fleckian perspective, individuals belong to thought collectives, community bearers of a style of thought. An individual can act as a vehicle for the intercollective traffic of thought. Knowledge evolves through mutations in thinking styles, when the disposition for directed perception changes. In the formulation of thermodynamic concepts, intercollective communication of ideas is observed. In the works studied, a gradual change in language was observed, with the incorporation of new scientific terms, which were gradually being assimilated by the scientific community.*

Keywords: heat – energy – work – Ludwik Fleck – XIX century.

Introdução

Considerando que os conceitos, inclusive os científicos, são formados em um contexto político-social (Koselleck, 2006), desenvolvemos esta pesquisa buscando contribuir para o entendimento dos conceitos basilares da termodinâmica, consubstanciados em sua maior parte nos séculos XVIII e XIX; período que delinea o recorte histórico da presente pesquisa. Considerando também que, segundo André Cellard (2008), a análise documental adequa-se ao estudo da evolução de conceitos e de indivíduos, entre outros, procedemos uma pesquisa bibliográfica e documental, na qual investigamos os trabalhos de alguns autores dessa história, suas crenças e práticas que apoiaram a construção desses conhecimentos.

Para melhor compreender o desenvolvimento dos conceitos usamos prioritariamente como fontes livros publicados no século XIX, considerados nessa perspectiva como documentos, mesmo estando cientes de que a redação desses pode ter sido lapidada pelos editores e que os conteúdos traziam a perspectiva dos respectivos autores.

Optou-se por uma narrativa cronológica da história, mantendo-se os termos e vocábulos usados pelos autores da época e, em alguns trechos, foram evocados outros autores não contemporâneos para a discussão.

As tecnologias digitais da informação e comunicação foram facilitadoras do processo de pesquisa, possibilitando, a consulta aos acervos disponibilizados pelas bibliotecas por intermédio das plataformas digitais. O acesso aos livros se deu principalmente por meio da plataforma Google (<https://books.google.com>).

Para uma imersão na temática, entendemos ser importante o delineamento do panorama histórico da época. Dessa forma, inicialmente, contextualizaremos o referente período.

Segunda metade do século XVIII e século XIX

Os documentos pesquisados indicam que os autores residiam em sua maioria no continente europeu, e, portanto, o contexto explicitado se atará a essa região.

Nessa época, Paris reunia um grande número de cientistas,¹ mesmo após a dissolução da Academia de Ciências e a extinção das universidades pela Convenção Nacional durante a Revolução Francesa (Maar, 2011).

Existiam vários periódicos científicos, entre eles: o periódico francês *Journal des Sçavants* que circulava em Paris desde 1665, assim como o *Philosophical Transactions* da Royal Society, em Londres (Stumpf, 1996).

A pesquisa química francesa era realizada nas faculdades de medicina, faculdades de farmácia e nas escolas públicas, entre elas a expoente Escola Politécnica, fundada em 1794 e responsável pela formação de engenheiros militares. Os primeiros professores dessa escola foram Claude Louis Berthollet (1748-1822), Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816), Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813), Pierre-Simon, marquês de Laplace (1749-1847), Jean-Henri Hassenfratz

1 Segundo Ronan (1984), a palavra cientista foi criada em 1840 pela Associação Britânica para o Progresso da Ciência fundada nove anos antes. Nos Estados Unidos, associação semelhante foi criada em 1848, quando surgiram também vários periódicos científicos.

(1755-1827) entre outros. Em 1816, as academias foram reativadas, assim como os relatórios das sessões científicas, entre eles o *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*.

Na Inglaterra, a primeira fase da Revolução Industrial ocorreu da segunda metade dos anos 1700 até 1860. A transição do feudalismo para o capitalismo e a entrada de produtos e riquezas provenientes das colônias garantiram a acumulação de capital, tornando-o disponível para a promoção das mudanças (Gotardo e Favaro, 2019).

A Revolução Industrial produziu intensas transformações nos processos de produção, a energia humana foi substituída pela energia motriz (vapor, hidráulica e eólica), as fábricas substituíram as oficinas artesanais (doméstica, manufatura), resultando na consolidação das classes sociais: a burguesia (proprietária e exploradora dos meios de produção) e os trabalhadores (vendedores de sua força de trabalho) (Santos e Araujo, 2016).

A máquina movida a vapor propeliu o sistema fabril em grande escala. A existência de reservas de ferro e de carvão e a rede fluvial foram fatores que contribuíram significativamente para a industrialização da Inglaterra. O comércio com o domínio do mercado mundial somou-se à industrialização e geraram riquezas que impulsionaram o desenvolvimento do próprio comércio, da navegação e dos meios de comunicação (Santos e Araujo, 2016).

A primeira máquina a vapor foi construída por Thomas Savery (1650-1715), em 1698, para retirar água das minas de carvão, e melhorada em 1712 por Thomas Newcomen (1664-1729), introduzindo um motor que utilizava o vapor para produzir vácuo, fazendo com que a pressão atmosférica empurrasse o pistão no interior, gerando trabalho. A necessidade crescente de escavar as minas com maior profundidade em busca das matérias primas carvão, chumbo, estanho e cobre, para atender à demanda da indústria, levou James Watt (1736-1819), discípulo de Joseph Black (1728-1799), a proceder inúmeros avanços técnicos na máquina a vapor (Saslow, 2020). "Sua máquina consumia 75% menos carvão do que a do Newcomen, representando grande economia para os donos de minas" (Mosley e Lynch, 2011, p. 159).

Em 1805, foi fabricada a primeira locomotiva a vapor e, em 1860, já existiam dez mil quilômetros de estrada de ferro na Inglaterra acompanhados pelo telégrafo. Em torno dos anos 1870 os continentes se encontravam ligados por cabos telegráficos submarinos e a comunicação era intensa (Mosley e Lynch, 2011). Tais recursos implementaram uma nova dinâmica mundial intensificando as inter-relações continentais, a circulação de pessoas e dos conhecimentos e, conseqüentemente, a comunicação intercoletiva de ideias (Fleck, 1979, 2010).

Os estados alemães estiveram implicados direta ou indiretamente em guerras contra os revolucionários franceses e o exército napoleônico. No Congresso de Viena (1814-1815), após a derrota de Napoleão, o mapa da Europa foi redesenhado, e o Império Romano-Germânico foi substituído pela Confederação Germânica, formada por 39 estados, existindo até 1857 (Bentivoglio, 2010). Para Thomas Kuhn (2011, p. 122) "a Alemanha, na década de 1840, não tinha ainda atingido a eminência científica da França ou da Grã-Bretanha".

Percurso metodológico

Conforme mencionado, empreendemos uma pesquisa bibliográfica e documental, com abordagem qualitativa, recorrendo a diversas fontes. A busca foi inicialmente feita utilizando palavras-chaves no Google Acadêmico e no Portal de periódicos da Capes, com posterior leitura

exploratória e seletiva dos materiais coletados. A busca por publicações de trabalhos científicos se deu nas plataformas das bibliotecas digitais e das academias de ciências. As fontes trabalhadas com maior fôlego e consideradas como primárias, na perspectiva de Kragh (2001), por terem sido escritas e estabelecerem relações com os fatos da época pesquisada, foram os livros do século XIX apresentados no Quadro 1. Esses livros abarcam a estrutura do coletivo científico de pensamento conforme apresentado por Fleck (2010).

Quadro 1: Livros do século XIX pesquisados

| Data de publicação | Nacionalidade | Autor | Título |
|--------------------|----------------------|--------------------------------|--|
| 1824 | Francesa | Sadi Carnot | <i>Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines</i> |
| 1858 | Francesa | Gustave-Adolphe Hirn | <i>Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur</i> |
| [1859] 1866 | Britânica (escocesa) | William John Macquorn Rankine | <i>A manual of the steam engine and other prime movers</i> |
| 1867 | Alemã | Rudolf Julius Emanuel Clausius | <i>The mechanical theory of heat: With its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies</i> |
| 1872, 1885 | Francesa | Jules Moutier | <i>Éléments de thermodynamique</i> |
| 1892 | Irlandesa | Osborne Reynolds | <i>Memoir of James Prescott Joule</i> |

Fonte: organizado pelos autores.

Os quatro primeiros autores são comumente referendados na história da termodinâmica, mas a nenhum deles foi atribuída a hipótese da conservação da energia, pois a historiografia das ciências faz essa atribuição a Julius Robert von Mayer (1814-1878), Hermann von Helmholtz (1821-1894), James Prescott Joule (1818-1889) e Ludwig August Colding (1815-1888) (Melo, 2014), autores que serão também abordados no presente trabalho. Thomas Kuhn (2011) considera que são 12 os cientistas que contribuíram, incluindo os quatro anteriormente citados e mais Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), Marc Séguin (1786-1875), Karl Holtzmann (1811-1865), Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890), Karl Friedrich Mohr (1806-1879), William Robert Grove (1811-1896), Michael Faraday (1791-1867) e Justus von Liebig (1803-1873), desses oito, foram lidos Carnot e Hirn.

Jules Moutier (1872) apresenta uma abordagem didática do conteúdo e Osborne Reynolds (1892), amigo e biógrafo de Joule, apresenta sua versão historiográfica pragmática, baseada em pressupostos científicos, característica da história da ciência na última década do século XIX.

As obras estudadas podem ser classificadas como ciência dos manuais, ciência dos periódicos e ciência dos livros didáticos. As duas primeiras compõem a ciência especializada, os manuais e periódicos são elaborados pelos pesquisadores do círculo esotérico, constituído pelos especialistas (Fleck, 2010). A ciência dos periódicos aborda os problemas de uma forma mais

fragmentada e, muitas vezes, ainda inconclusiva, enquanto os manuais buscam uma “totalidade orgânica” (Oliveira, 2012, p. 126).

A ciência popular compõe grande parte do saber de cada pessoa, e aparece nas obras pela busca dos valores da “certeza, plasticidade e simplicidade que surgem do saber popular” por parte dos autores (Fleck, 2010, p. 168).

Consideramos aqui que o livro didático e o livro biográfico também foram elaborados por especialistas, que fizeram uso da transposição didática para propiciar uma iniciação científica no primeiro caso, e a divulgação científica no segundo. Fleck (2010, p. 166) considera a ciência popular como “um livro didático que cuida da introdução”, com ausência de detalhes e de polêmicas.

A maior parte dos cientistas que serão citados e autores desse período da história são europeus, um indicativo do eurocentrismo no desenvolvimento da ciência.

A leitura das fontes se deu de forma criteriosa entendendo que a compreensão dos discursos da época, do contexto e das condições de produção dessas fontes é importante para evitar anacronismos.

Personagens desta história

Desde a época dos filósofos gregos, existiam hipóteses sobre a constituição da matéria. O fogo foi considerado por Empédocles e Aristóteles como um dos quatro elementos constituintes da matéria, mas a tentativa de explicar os fenômenos da combustão e da oxidação veio com a teoria do flogisto, proposta inicialmente pelo alquimista Johann Joachim Becher (1635-1682) e aperfeiçoada por George Ernst Stahl (1660-1734) (Brito, 2008).

Joseph Black, em 1761, havia desenvolvido a ideia de quantidade de calor² e, mais tarde, determinado o calor latente nas transições de fase da água, sendo o calor latente de fusão, “a quantidade de calor necessária para fundir o gelo à pressão e temperatura constantes” (Bassalo, 1992, p. 30). Esse calor latente desaparecia ao produzir efeitos físicos diferentes do calor, como expansão, fusão e evaporação e reaparecia invertendo os efeitos físicos, compressão, congelamento e liquefação de vapores (Rankine, 1866).

Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) e seus colaboradores, incluindo madame Lavoisier, promoveram a derrocada da teoria do flogisto e propuseram a teoria do oxigênio, “unificadora dos fenômenos de oxidação, combustão, respiração e acidez” (Carvalho, 2012, p. 762). No contexto dessa nova teoria, foi apresentado o calórico como uma substância hipotética que, aparentemente, explicava bem as propriedades do calor. O calórico foi considerado um fluido invisível, insípido, inodoro e sem peso, e foi postulado que os corpos quentes contêm mais desse fluido do que os corpos frios.

Assim, ao final dos anos 1700, acreditava-se que os corpos possuíam uma quantidade de calórico, que se manifestava quando estes mudavam de estado físico ou se combinavam, e era denominado calórico³ insensível, latente ou combinado (Freire, 1844). Para alcançarem uma

2 Que nominava calor latente, conforme consta em seus manuscritos reunidos e publicados por John Robinson, em 1803 (Black, 1803).

3 A incorporação do termo calórico em 1844, por um autor de outro continente (brasileiro) (Freire, 1844), indica que, naquela altura, a teoria havia conquistado maior abrangência.

dada temperatura, corpos diferentes precisavam absorver diferentes quantidades de calórico, a depender de sua “capacidade para o calórico”. Essa quantidade de calórico que cada corpo necessitava, fora nominada calórico específico.

Assumia-se que o calórico era distribuído igualmente pelos corpos homogêneos, pois, misturando-se um quilograma de água à 0°C com um quilograma de água à 60°C, resultariam dois quilogramas de água à 30°C. Entretanto, se fossem misturados um quilograma de mercúrio à 0°C com um quilograma de água à 34°C, resultariam em uma temperatura de 33°C para o mercúrio, ou seja, a quantidade de calórico necessária para reduzir a temperatura da água em um grau faz com que a temperatura do mercúrio suba a 33°C, logo o calórico específico do mercúrio é 1/33 do da água.

Lavoisier e Laplace (1862), utilizando o calorímetro de gelo, constataram que diferentes corpos aquecidos a uma mesma temperatura, quando eram resfriados até zero, perdiam quantidades diversas de calórico, e fundiam quantidades variáveis de gelo (Hirn, 1858).

A teoria dos gases, baseada no calórico, foi desenvolvida posteriormente por Laplace e Poisson, assumindo que para volumes iguais a temperaturas diferentes a pressão era proporcional ao conteúdo calórico e que a compressão de um certo volume levava a um aumento da temperatura. Concluíram que o aumento do calor é proporcional ao aumento da temperatura e que o calor por unidade de massa de um corpo é função da pressão e da densidade (Oliveira, 2022).

No início do século XIX, John Dalton (1766-1844) determinou a lei das pressões parciais, entre outras realizações científicas, e em 1808, propôs que toda matéria é constituída por átomos e que cada elemento era constituído por um único tipo de átomo. Dalton publicou sua teoria considerando ainda que as reações químicas separavam ou uniam as partículas elementares e que era possível obter os pesos relativos dos átomos. Joseph Gay-Lussac (1778-1850) contribuiu para a aceitação do modelo de Dalton e comprovou que “todos os gases se combinavam em volumes que mantinham entre si uma relação simples” (Ronan, 1984, p. 39). Dalton e Gay-Lussac determinaram a lei de variação de volume de um gás com a temperatura (Smorodinshki, 1983).

Nicolas Léonard Sadi Carnot

Engenheiro formado na École Polytechnique em Paris, Nicolas Léonard Sadi Carnot interessou-se pelo progresso dos motores a vapor e, trabalhando na perspectiva da teoria calórica, analisou a questão do fluxo de calor e concluiu que a realização do trabalho corresponde a uma transferência de calórico. Certa quantidade de calor é transferida de um corpo mais quente para um corpo mais frio e o trabalho produzido depende dos limites da temperatura entre as fontes, como publicou em seu trabalho de 1824 (Carnot, 1824; Pires, 2011; Saslow, 2020).

Na folha de rosto de seu livro, encontra-se a expressão “*Ancien élève de l'École Polytechnique*”, traduzindo-se como “Ex-aluno da Escola Politécnica”. A inserção dessa expressão é um indicativo de que a escola era uma referência consolidada, uma garantia de seriedade do trabalho. Gay-Lussac, Dalton, e Faraday entre outros foram citados em seu trabalho.

Segundo Saslow (2020, p. 12), o conceito de calórico, “foi um princípio organizador por cerca de 70 anos”. Carvalho e Gomes (2017) o consideram um paradigma vigente em um período de ciência normal, do que discordamos. Em nossa concepção não chegou a ser um paradigma, pois sua adoção não chegou a ser unânime na ocasião. A teoria que considerava o calor como movimento de partículas também se fazia presente.

As ideias de Carnot, mesmo após o comentário analítico publicado por Benoit Paul Émile Clapeyron (1799-1864), em 1834, no *Journal de l'École Polytechnique*, permaneceram esquecidas por muito tempo. A partir de 1849, com as pesquisas de *lord Kelvin* – William Thomson (1824-1907), Rudolf Julius Emanuel *Clausius* (1822-1888) e William John Macquorn Rankine (1820-1872), a atenção foi voltada para sua obra (Moutier, 1872).

Esse negligenciamento também foi vivenciado por Ludwik Fleck (1896-1961). Em 1935, Fleck publicou sua principal obra: *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*, sem qualquer repercussão. Kuhn o trouxe no prefácio de sua obra, *A estrutura das revoluções científicas*, afirmando que se tratava de “um ensaio que antecipa muitas de minhas próprias ideias” (Kuhn, 2009, p. 11). Entretanto, Kuhn defendia o desenvolvimento científico por meio de mudanças de paradigmas, e Fleck propunha que coletivos de pensamentos tinham diferentes estilos de pensamento e a comunicação intercoletiva levava ao desenvolvimento, em um processo mais evolutivo do que revolucionário (Condé, 2012).

Segundo Fleck (2010), indivíduos pertencem a coletivos de pensamentos que são portadores comunitários de estilo de pensamento. Schafer e Schnelle (2010, p.16) definem o estilo de pensamento como “os pressupostos de pensamento sobre os quais o coletivo constrói seu edifício de saber”. Um indivíduo pode pertencer a vários coletivos de pensamento e atuar como “veículo do tráfego intercoletivo de pensamento” (Fleck, 2010, p. 162). A comunicação de um saber gera transformações, se ocorrer no interior do coletivo do pensamento levará ao fortalecimento daquele saber e, se for entre coletivos, provocará mudanças. O tráfego intercoletivo de pensamentos altera os valores do pensamento, e a evolução do conhecimento se dá por meio de mutações nos estilos de pensamentos, quando altera a disposição para a percepção dirigida (Fleck, 2010).

Quanto ao paradigma, o próprio Kuhn afirma que usou corretamente a palavra no artigo “A tensão essencial”,⁴ lido em 1959 em uma conferência na University of Utah, definida então como “a maneira pela qual uma tradição trabalhava em consenso” (Kuhn, 2006, p. 360). No caso, consenso de modelos, mas ele mesmo havia “estragado” o termo quando disse que “não precisava haver concordância quanto aos axiomas” (Kuhn, 2006, p. 359).

O conceito de paradigma enfrenta muitas dificuldades, principalmente quanto à incomensurabilidade (Condé, 2005).

A ciência normal interpreta e articula fenômenos dentro de um paradigma. Quando as anomalias vão surgindo e geram uma crise do paradigma existente, “a transição para um novo paradigma é uma revolução científica” (Kuhn, 2009, p. 122).

Julius Robert von Mayer

Era de Heilbronn (Alemanha), concluiu o curso de medicina em 1838 e se apresentou para trabalhar em um navio. Enquanto trabalhava embarcado no navio Java, navegando nas Ilhas Orientais Holandesas (atual Indonésia), procedeu à retirada de sangue das veias de alguns europeus para seus estudos fisiológicos e observou uma tonalidade diferente, brilhante (Caneva, 1993). Comumente, o sangue arterial tinha um vermelho mais intenso, entretanto o sangue

4 Esse artigo foi reimpresso em *The essencial tension: selected studies in scientific tradition and change* (Kuhn, 2006a, p. 225-239).

venoso, naquela região, tinha o mesmo aspecto. Conhecendo a teoria de Lavoisier sobre o calor animal, segundo a qual as artérias conduziam o oxigênio que era queimado nos tecidos, e o dióxido de carbono resultante da queima era transportado pelas veias, Mayer deduziu que a cor do sangue dependeria da concentração de oxigênio e de dióxido de carbono presentes e que a taxa de oxidação necessária para a manutenção da temperatura corporal nos climas quentes, seria menor comparada à taxa necessária no clima temperado da Europa. Tal dedução estimulou-o a pensar sobre a influência do calor no metabolismo humano (Martins, 1984).

O alimento absorvido era tido como a fonte de calor de um organismo. Um ser vivo, além do calor corporal, poderia produzir calor por atrito, gerando-o mecanicamente. Assim, “a soma do calor corporal com o calor produzido mecanicamente deveria corresponder ao calor gerado pela oxidação dos alimentos” ingeridos por aquele ser vivo (Martins, 1984, p. 65).

Mayer conseguiu publicar seu primeiro trabalho em 1842, na revista alemã *Annalen der Chemie und Pharmacie*, dos editores Friedrich Wohler e Justus Liebig, intitulado “*Bemerkungen über die Kraft der unbelebten Natur*”, traduzido para “Observações sobre as forças da natureza inanimada”, mas não obteve muita repercussão. Como seu primeiro trabalho referia-se à natureza inanimada, pode ter sido inspirado durante sua estadia em Paris (Weyrauch, 1893). Meyer esteve por quatro meses e meio em Paris, finalizando seus estudos em medicina, e pode ter tido acesso a variadas publicações e contato com cientistas franceses, além dos seus próprios colegas, na ocasião.

Para Fleck (1979; 2010) é impossível pensar a ciência a partir de um cientista individual, pois se trata de um fenômeno coletivo. O trabalho científico é concebido a partir de um coletivo de pensamento, portador de um estilo de pensamento. A ciência deve ser entendida como uma atividade historicamente elaborada por coletivos (Pfuetzenreiter, 2003).

O coletivo de pensamento apresenta uma estrutura interna na qual há compartilhamento de normas, práticas, concepções e tradições, assim, o “estilo de pensamento condiciona e regula a produção de conhecimento dentro do coletivo (Hoffmann et al., 2019).

O estilo de pensamento está em constante evolução, proporcionada por complicações ou problemas que determinado coletivo de pensamento não consegue solucionar naquele momento e, de certa forma, busca a interação com outro coletivo de pensamento, proporcionando o compartilhamento intercoletivo de ideias.

Cada novo conhecimento é um produto da comunidade de cientistas, que foi moldada pelas múltiplas interações dessa comunidade com outros grupos e estruturas sociais (Matos, Gonçalves e Ramos, 2005).

No trabalho de 1842, Mayer considerou que a magnitude da força permanecia constante em todos os processos físicos e químicos, o que seria o prenúncio para a lei da conservação da energia (Melo, 2014).

Para Mayer, existiam duas classes de causas geradoras de efeitos na natureza, uma que possuía as propriedades de peso e impenetrabilidade, ou seja, os tipos de matéria que gerariam efeito também de matéria, e a outra classe, as forças, imponderáveis e conversíveis. Para um corpo cair é necessário que este seja elevado a uma certa altura, assim “o levantamento do corpo é tão necessário à queda quanto o peso, e que considerar o peso uma força, contraria as características da força, a indestrutibilidade e transformabilidade, porque o peso não diminui com a queda” (Melo, 2014, p. 103).

Mayer observou experimentalmente que, ao agitar uma porção de água contida em um recipiente, a temperatura do líquido elevava-se. Considerou, então, que a força atuante nas locomotivas é o calor e que a sua transformação em movimento (efeito mecânico) deve-se à diferença entre a quantidade de calor absorvida pelos vapores e a quantidade que retorna ao ambiente pela compressão desses vapores. Ou seja, o resultado do calor absorvido é o efeito mecânico.

Sendo assim, “se a força de queda e o movimento são equivalentes ao calor, o calor também deve ser naturalmente equivalente ao movimento e à força de queda” e “devemos determinar a que altura um determinado peso precisa ser levantado acima do solo para que sua força de queda seja equivalente à elevação da temperatura de um peso igual de água de 0° a 1°C” (Mayer, 1842, p. 238).⁵ Na ocasião, ele obteve o valor de 365 metros.

Mayer considerou também que a produção de calor requer algum esforço, podendo ser oriundo de processos químicos (material) ou do trabalho mecânico, pois para ele não existia efeito sem causa e nem causa sem um efeito correspondente.

Jules Moutier (1872), também ex-aluno da École Polytechnique, relata em sua obra *Éléments de thermodynamique*, que muitos e variados experimentos conduzidos principalmente por Joule, Colding, Hirn e Favre revelaram que a estimativa proposta por Mayer para o equivalente mecânico do calor estava abaixo do valor posteriormente considerado. Para o cálculo do equivalente mecânico do calor, Mayer utilizou originalmente os valores obtidos pelas experiências de François-Étienne de La Roche (1781-1813) e Jacques Etienne Bérard (1789-1869) para o calor específico do ar, valores também utilizados por Carnot.

No Quadro 2 são apresentados valores para o equivalente mecânico do calor obtidos por outros pesquisadores:

Quadro 2: Valores para o equivalente mecânico do calor (E)

| Pesquisador | Valor de E |
|------------------|------------|
| Masson | 417,3 |
| Dulong | 419,0 |
| M. Cazin | 424,2 |
| Moll et Van Beek | 425,8 |
| M. Regnault | 436,0 |

Fonte: adaptado de Moutier (1872, p. 34).

O valor de 425 quilogrametro foi adotado pela maioria dos autores que escreveram sobre termodinâmica na época. Considerando a unidade de calor, ou caloria, como a quantidade de calor necessária para elevar em um grau centígrado a temperatura de um quilograma de água, originalmente em zero grau Celsius, e por unidade de trabalho, o quilogrametro (Moutier, 1872).

Os trabalhos posteriores de Mayer não foram aceitos para publicação em revistas científicas e foram publicados independentemente. “O movimento orgânico em conexão com o metabolismo”, foi publicado em 1845, “Contributos à dinâmica celeste, em exposição popular”, em 1848 e, “Observações sobre o equivalente mecânico do calor”, em 1851 (Melo, 2014).

5 MAYER, J. R. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, v. 42, p. 233-240, 1842. Publicado no *Philosophical Magazine*, v. 4, n. 24, p. 371-378, 1862, com tradução de G.C. Foster.

Esse entrave na publicação pode ter sido ocasionado por uma dificuldade de comunicação. A linguagem empregada por Mayer estaria mais relacionada com a área médica, o que traria uma incompatibilidade entre os diferentes estilos de pensamento, apontada por Fleck (Condé, 2005). Um estilo de pensamento “é acompanhado, eventualmente por um estilo técnico e literário do sistema do saber” (Fleck, 2010, p. 149).

Na obra de 1851, Mayer alega que a razão pela qual a relação entre calor e movimento havia sido tardiamente descoberta fora devido à dificuldade ocasionada pela terminologia física, a designação do peso por força e do calor por substância (calórico) (Melo, 2014).

James Prescott Joule

Joule não frequentou escolas, tendo sido educado em casa. Aos 16 anos começou a trabalhar em horário integral na cervejaria da família, onde teve contato com engenheiros, instrumentos e máquinas (Martins, 2022). Em 1835, estudou química com John Dalton, por um curto período, pois Dalton apresentou problemas de saúde e foi substituído por John Davies.

Ainda muito jovem, Joule publicou vários trabalhos nos *Annals of Electricity* e, no final de 1840, apresentou à Royal Society o artigo “*On the production of heat by voltaic electricity*”, cujo resumo foi lido em 17 de dezembro e publicado no *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Cinco meses depois, Joule publicou artigo similar e completo na *Philosophical Magazine* intitulado “*On the heat evolved by metallic conductors of electricity, and in the cells of a battery during electrolysis*” (Martins, 2022). Osborne Reynolds, autor da biografia de Joule, acreditava que o conteúdo abordado estava tão adiantado em relação ao conhecimento da época, que a Royal Society se recusou a publicá-lo na íntegra (Reynolds, 1892). Nessas primeiras publicações não há referência ao equivalente do calor.

Seu primeiro trabalho relacionado ao estudo do calor, foi apresentado em 1843, na reunião da British Association for the Advancement of Science, em Cork (Irlanda), também sem muita repercussão. Por meio de experiências, determinou que o calor gerado na bobina de um eletroímã era proporcional ao quadrado da corrente elétrica que a percorria. O artigo, “*On the calorific effects of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat*”, datado de 23 de julho de 1843, foi publicado na íntegra na *Philosophical Magazine*.

Nos resultados, Joule afirma que a quantidade de calor capaz de elevar a temperatura de uma libra de água em um grau Fahrenheit é igual, e pode ser convertida em uma força mecânica capaz de elevar 838 libras a uma altura perpendicular de um pé. Ele havia demonstrado que o calor poderia ser convertido em energia e a energia poderia ser convertida em calor, e que a ação elétrica e a ação química, por meio da ação elétrica, podem ser convertidos em seus equivalentes de calor. No pós-escrito, adicionado em agosto ao seu artigo de 23 de julho, Joule acrescenta que o conde Rumford estava certo ao atribuir o calor desenvolvido pela perfuração de um canhão à fricção e não a alguma mudança na capacidade do metal. Considerou que havia obtido experimentalmente uma quantidade de calor por libra de água, a partir de uma força mecânica capaz de elevar cerca de 770 libras à altura de um pé. E que estava convencido de que “os grandes agentes da natureza são indestrutíveis pelo plano do Criador e que qualquer que seja a força mecânica gasta, um equivalente exato de calor é sempre obtido” (Reynolds, 1892, p. 71).

O trabalho "*On the mechanical equivalent of heat*" foi apresentado na British Association at Cambridge, em junho de 1845 e publicado em 1850 nas *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. O artigo "*On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power*", foi publicado na *Philosophical Magazine* no mesmo ano.

Um novo trabalho de Joule, foi apresentado na reunião da British Association for the Advancement of Science em 1847, em Oxford (Inglaterra). Esse trabalho impressionou favoravelmente alguns dos presentes, entre eles William Thomson, e a partir de então, tornaram-se amigos (Martins, 1984; Saslow, 2020).

Um artigo de Joule, versando sobre este último trabalho, foi publicado em 1847 no *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences* (Figura 1) e, um ano depois, a mesma revista publicou uma carta de Mayer, que buscava estabelecer sua prioridade na descoberta das transformações da força motriz em calor e vice versa. Mayer afirmava ter sido o primeiro a calcular o equivalente mecânico do calor, deixando também transparecer sua indignação, pois não conseguira a publicação de seu artigo naquela revista à época, mas se deparava com o trabalho de Joule publicado, com a aprovação de um comitê, ao qual pertencia Pouillet, que havia recusado o seu trabalho (Martins, 1984).

PHYSIQUE. — *Expériences sur l'identité entre le calorique et la force mécanique. Détermination de l'équivalent par la chaleur dégagée pendant la friction du mercure; par M. J.-P. JOULE.*
(Commissaires, MM. Biot, Pouillet, Regnault.)

Figura 1: Título da publicação no *Comptes Rendus* de julho de 1847
Fonte: Joule (1847, p. 309).

Peter Guthrie Tait (1931-1901) e Kelvin defenderam a primazia de Joule, e John Tyndall (1820-1893) se empenhou na defesa de Mayer. O químico Justus von Liebig, inicialmente defendeu Mayer, mas depois lhe deu pouca importância.

A controvérsia contribuiu para o agravamento da depressão de Mayer, levando-o a uma tentativa de suicídio e à internação em um sanatório. Após sair do sanatório, não conseguiu mais produzir trabalhos científicos relevantes (Martins, 1984), mas obteve algum reconhecimento na última década de sua vida, quando teve seus trabalhos reunidos no livro *The mechanics of heat in collected writings* e foi convidado para proferir palestras em eventos científicos (Weyrauch, 1893).

Ainda em 1847, Joule proferiu uma palestra publicada na íntegra no jornal *Manchester Courier*, onde expôs pela primeira vez a conservação universal desse "princípio, agora chamado de energia" (Reynolds, 1892, p. 134). O seu biógrafo enfatiza que Joule não havia usado o termo energia e nem abandonado o termo calórico, mas demonstrava que reconhecia as medidas quantitativas do princípio em todas as fontes mecânicas, químicas ou vitais de calor conhecidas e ainda reconhecia que todos os fenômenos do universo consistem na conversão contínua do princípio de um de seus modos em outro sem perda ou aumento.

Em uma carta para a *Philosophical Magazine*, também de 1847, Joule afirma que o equivalente a um grau de calor por libra de água, determinado por experimentos cuidadosos feitos desde aqueles apresentados à Associação Britânica em Oxford, é de 775 libras por pé.

No artigo publicado em 1850, Joule traz em detalhes o famoso experimento da roda de pás. Na montagem experimental, conforme mostrado na Figura 2, foi usado um recipiente (B) com um eixo rotativo vertical no qual várias pás foram fixadas. O eixo (A) era movido por meio dos pesos (F, E) suspensos em roldanas (D, C). As alturas das quedas dos pesos eram medidas nas régua (G, H), esses pesos ligados ao eixo giravam as pás que aqueciam o líquido no interior do calorímetro. O termômetro não está apresentado na figura, mas era colocado no orifício da tampa do calorímetro ao lado da manivela.

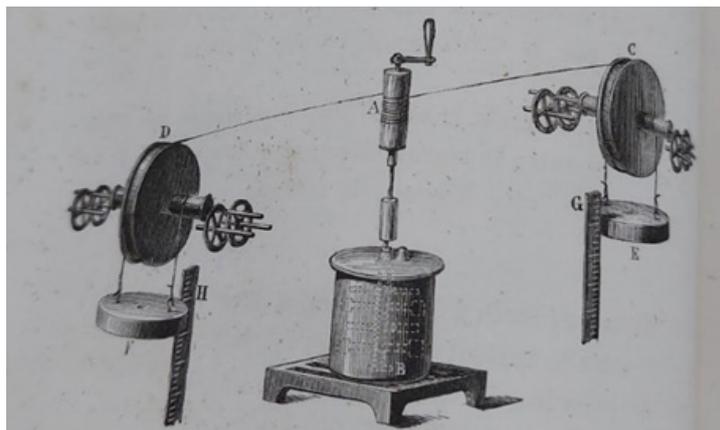


Figura 2: Desenho do aparato experimental utilizado por Joule.
Fonte: Moutier (1885, p. 84).

Joule, ao invés de usar dados já existentes na literatura, do calor específico do latão, material utilizado na confecção do calorímetro, elaborou um aparato experimental e o determinou novamente (Passos, 2009).

Colding, em uma publicação de 1864, na qual relata a história da termodinâmica, cita seu próprio trabalho de 1843, entre outros, no qual descreve a produção de calor em experimentos de atrito entre diversos metais, cujos resultados foram similares aos de Mayer (Colding, 1864).

Podemos verificar até aqui a contribuição de vários cientistas na formulação dos conceitos fundadores da termodinâmica, e Kuhn (2011) já havia tratado sobre descobertas simultâneas em seu artigo de 1959: "A conservação da energia como exemplo de descoberta simultânea" no qual atribui a 12 cientistas a descoberta da conservação da energia. Kuhn reconhece que o presente caso não é um exemplo da idealidade de uma descoberta simultânea, na qual "duas ou mais pessoas anunciariam a mesma coisa ao mesmo tempo" (Kuhn, 2011, p. 93), considera que os autores não tinham total ignorância das ideias dos outros, mas que a influência mútua seria secundária pois eles publicaram ideias diferentes.

Fleck (1979, 2010) propôs que comunicações intercoletivas de ideias levam à formulação e aperfeiçoamento das teorias, percepção que defendemos. Ideias diferenciadas são geradas como frutos dessas comunicações, levando a mudanças no estilo de pensamento.

Johannes Fehr (2012) escrevendo sobre a obra de Fleck, afirma que:

O pensamento nunca começa do zero, há sempre uma base, uma história prévia, há sempre outros lugares, outras instâncias, outros indivíduos dos quais provêm as noções utilizadas para formular o pensamento de alguém. Pensar, portanto, é uma atividade genuinamente coletiva que pressupõe troca (Fehr, 2012, p. 40).

Entre os 12 autores citados por Kuhn (2011), estão Carnot e Hirn e este último cita Carnot, Joule, Mayer, entre outros, conforme verifica-se no Quadro 3, no qual estão apresentados os autores mencionados nos livros estudados. Existe ainda a suspeita de que Joule conhecia o trabalho de Mayer, reforçando o intercâmbio de ideias (Martins, 1984).

Quadro 3: Título da obra e autores citados

| Título da obra/data | Autores citados |
|---|--|
| <i>Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines</i> (1824) | Savey, Newcomen, Smeathon, Watt, Woolf, Vivian, Gay-Lussac, Weltre, Mariotte, Dalton, Poisson, Clement, Desormes, Delarouche, Bérard, Dulong, Petit, Davy, Faraday, Biot, Betancour, Prony, Oersted, Perkins, Robinson, Hornblower, Héron de Villefosse, Niepce, Trevetick, |
| <i>Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur</i> (1858) | Regnault, Newton, Lavoisier, Laplace, Favre, Silbermann, Dulong, Petit, Joule, Clausius, Carnot, Gay-Lussac, Meyer, Seguin, Montgolfier, Du Bois Reymond, Foucaut, Leibntz, Fizeau, Saigey, Lamé, Melloni, Wilhelmy, Mariotte. |
| <i>A manual of the steam engine and other prime movers</i> [1859] (1866) | Monge, Hachette, Woolley, Edmund Hunt, Newcomen, Savery, Cawley, Bodmer, Zeuner, Bochet, Reuleaux, Henry R. Towre, Robert Briggs, Moseley, Ernst Sang, Clerk Maxwell, Amstler, Hirn, Carnot, Watt, Naught, Richard, William More, Hick, Mayer, Joule, Helmholtz, Clausius, Dulong, Petit, Favre, Silbermann, Daniel Bernoulli, Ridberg, Black, Seguin, Rumford, Regnault, Tate, Luthy, Morin, William Thomson, James Thomson, Morris Stirling, Fairbairn, Reed, Kirkaldy, Bessemer, Wills, Tait, Miller, Bochet, Poncelet, Laurence Hill, Hodgkinson, Mallet, Rennie, Telford, Herbert Latham, Poisson, James Nasmyth, Babbage, Weisbach, M. de St. Venant, Northcott. |
| <i>The mechanical theory of heat: With its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies</i> (1867) | Carnot, Clapeyron, Holtzmann, Meyer, Joule, William Thomson, Regnault, Mariotte, Gay-Lussac, Magnus, Poisson, Welter, Roche, Fairbairn, Tate, James Thomson, Rankine, Dalton, Faraday, Groshans, Pambour, Navier, Moritz, Zeuner, Sainte-Claire Deville, Troost, Rumford, Davy, Seguin, Mayer, Colding, Hirn, Kirchhoff, Helmholtz, Kopp, Grassi. |
| <i>Éléments de thermodynamique</i> (1872) | Joule, Colding, Hirn, Favre, Mayer, Helmholtz, Clausius, Mariotte, Gay-Lussac, Regnault, Lamé, Kirchhoff, Cornu, Zeuner, Thomson, Laplace, Poisson, Reech, Bourget, Duhamel, Delaroche, Bérard, Rankine, Carnot, Stirling, Ericsson. |
| <i>Memoir of James Prescott Joule</i> (1892) | Newton, Dalton, Joule, Faraday, Daniell, Grove, Clapeyron, Boyle, Marotte, Mayer, Thomson, Tate, Maxwell, Collen, Ure, Carnot, Laplace, Bibt, Eaton Hodgkinson, Bottomeley, Graham, Roget, Humphrey Davy, Stokes, Rankine, Herapath, Forbes, Herschel, Regnault, Clausius, Dulong, Seguin, Rumford, Apjhon, Bunsen, Forbes, Fairbairn, Leibnitz, Daniel Bernoulli, Biot. |

Fonte: organizado pelos autores.

Pelo número de autores citados em cada uma das obras, muitos em comum, percebe-se o estabelecimento de uma rede com o entrelaçamento de ideias e detecta-se a coletividade na construção do conhecimento da termodinâmica.

Em 1847, Helmholtz apresentou à Sociedade de Física de Berlim seu trabalho sobre conservação da força e o publicou, por conta própria, no mesmo ano (Coelho, 2012). Considerou que a *vis viva* e a força tensorial podiam ser convertidas em calor. Nominou a quantidade $\frac{mv^2}{2}$ de *vis viva*, tornando-a idêntica à quantidade de trabalho e desenvolveu uma formulação matemática da primeira lei (Pires, 2011). Definiu uma massa inicialmente em repouso, em queda de uma altura h , sob gravidade g , assim, $\frac{mv^2}{2} = mgh = mgh$ (Saslow, 2020).

Helmholtz, assim como Meyer, era médico. Durante sua graduação estabeleceu contato com Emil Heinrich Du Bois-Reymond (1818-1896) que, mais tarde, viabilizou a apresentação do seu trabalho de 1847 na Sociedade de Física de Berlim, da qual era presidente na ocasião.

Para Melo (2014), Helmholtz fora influenciado pelo filósofo alemão Immanuel Kant, pois considerava que todos os fenômenos da natureza poderiam ser explicados por duas forças fundamentais, as forças de tensão e as forças vivas.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), em 1686, ao tratar de colisões, introduziu a expressão "*vis viva*" para mv^2 . Lagrange, em 1788, em sua mecânica analítica, empregou a expressão $\frac{mv^2}{2}$ e Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843), em 1829, empregou a expressão quantidade de trabalho para $\frac{mv^2}{2}$, e assim, "por um tempo, 'trabalho' significou tanto trabalho quanto *vis viva*" (Saslow, 2020, p. 9).

Segundo Pires (2011, p. 243), "havia uma confusão sobre o uso da palavra força. O uso de '*vis viva*' era distinto do significado de 'força' como definido por Newton".

Osvaldo Pessoa Júnior (2020) oferece três definições de Newton para o conceito de força. "Força inata da matéria" (*vis insita*), atual inércia, tendência do corpo de resistir à ação de força externa, e de se manter no estado em que se encontra. A "força imprimida, uma ação exercida sobre um corpo para modificar seu estado", e a força centrípeta, "aquela pela qual os corpos são atraídos ou impulsionados, ou tendem de um modo qualquer para um ponto ou para um centro" (Cohen e Westfall, 2002, p. 280), tendo a gravidade como exemplo.

Em 1848, Thomson (Kelvin) publicou nos *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* que: "a conversão de calor (ou calórico) em efeito mecânico é provavelmente impossível, certamente ainda não descoberta" (Thomson, 2007, p. 488). A quantidade de efeito mecânico a ser obtida pela transmissão de uma dada quantidade de calor dependerá, como Carnot demonstrou, somente da diferença de temperatura dos dois corpos entre os quais o calor é transferido.

Kelvin propôs a escala absoluta de temperatura, independente das propriedades físicas de qualquer substância específica, na qual todos os graus tinham o mesmo valor; e que a quantidade unitária de calor que passa de um corpo A, à temperatura T° dessa escala, para um corpo B, à temperatura $(T - 1)^\circ$, deveria produzir o mesmo efeito mecânico, qualquer que seja o valor de T .

A unidade de calor adotada é a quantidade necessária para elevar a temperatura de um quilograma de água de 0° para 1° do termômetro de ar; e a unidade de efeito mecânico é um metro-quilograma; isto é, um quilograma elevado a um metro de altura (Thomson, 2007, p. 489).

Posteriormente, Thomson propôs o uso da palavra energia (energia mecânica) no contexto dos estudos sobre calor e cunhou também a palavra termodinâmica. A palavra energia já existia, pois havia sido utilizada por Thomas Young em 1802, mas foi Rankine quem generalizou e enfatizou o uso da energia, e que o termo poderia ser aplicado ao calor, à luz, à eletricidade, ao magnetismo e aos processos químicos (Saslow, 2020).

Thomson demonstrou que na natureza existia uma temperatura mínima cujo valor foi calculado como -273°C , posteriormente nominada zero absoluto, nessa temperatura todas as moléculas estariam em repouso. Analisando o ciclo de Carnot, considerou o calor como uma forma especial de energia, visto que não pode ser integralmente transformado em trabalho (Pires, 2011).

Somente, em 1851, Thomson adotou a “teoria dinâmica do calor, a convertibilidade mútua de calor em trabalho” (Melo, 2014, p. 44).

Em 1878, Hippolyte entregou manuscritos inéditos de Carnot, seu irmão, aos cuidados da Academia de Ciências. Os manuscritos indicavam que, já em 1832, Carnot havia reconhecido o princípio da conservação, tendo estimado o equivalente mecânico do calor e proposto experimentos para testar as hipóteses (Saslow, 2020).

Hirn, em 1858, submeteu uma dissertação ao concurso para a determinação experimental do valor real do equivalente mecânico do calor, promovido pela Sociedade de Física de Berlim e recebeu o prêmio, apesar de, conforme mencionado por Bois-Reymond, presidente da sociedade na ocasião, ter se esforçado para provar que tal equivalente não existia.

A dissertação constitui-se de 11 capítulos e 338 páginas. No capítulo 10, “Reflexões gerais sobre o equivalente recíproco das forças”, indaga sobre o que é um equivalente mecânico de calor. Ele considera que Carnot e Meyer pensaram e propuseram teorias sobre o assunto. Para Carnot, existiria um máximo para a força alcançável com a ajuda de um determinado transporte de calórico e uma queda de temperatura. A ideia de uma relação entre a produção da força motriz do movimento do material da força viva e a quantidade de calórico necessária para tal efeito é apresentada.

Para Meyer, a produção de força motriz pelo calórico ou a produção de uma diferença de temperatura por meio de um dispêndio de força motriz não pode ser de todo devida a um simples deslocamento de calórico, mas a um consumo ou produção real desse princípio (Hirn, 1858).

Entre a produção ou gasto de força motriz e o consumo ou produção de calórico existe uma relação constante completamente independente dos corpos empregados como intermediários. O consumo dessa unidade em uma máquina a vapor perfeita ou qualquer outra reproduzirá exatamente a quantidade de força motriz gasta em fricção ou choques. A relação da unidade de calórico para a quantidade de força motriz gasta ou produzida foi nominada por Mayer como o equivalente mecânico do calor. Ou seja, a teoria de Carnot atribui a produção ou o consumo da força motriz a um deslocamento de calor, enquanto na de Meyer a produção ou o gasto da força motriz do trabalho mecânico da *vis viva* é devido à produção ou desaparecimento do calórico. A ideia principal de uma equivalência entre forças já se encontra na teoria de Carnot, mas não tem exatamente o mesmo significado que a de Mayer e não pode ser formulada da mesma forma (Hirn, 1858).

Hirn (1858) ressalta que os cientistas, com base na teoria do calórico, nunca conseguiram explicar todos os fenômenos já conhecidos. A quantidade de calórico produzida é proporcional à quantidade de força motriz despendida, ou seja, ao trabalho mecânico realizado.

Para esse autor, o calórico absorvido pelos corpos, a eletricidade, a própria luz, agem como forças reais. O volume de um corpo depende do seu estado térmico atual, se esse estado muda, o volume aumenta ou diminui, a afinidade química depende diretamente e talvez apenas do estado elétrico dos elementos constituintes dos corpos. O calórico radiante que aquece um corpo lhe comunica suas próprias vibrações e são essas que então aumentam o volume aparente dos corpos. Quando um corpo se expande, o vapor, por exemplo, se expande e põe em movimento o pistão de uma máquina, há apenas uma transformação de um movimento em outro, o movimento vibratório que chamamos calórico é transformado em um movimento de translação fornecendo o trabalho ou soma de força motriz.

Hirn (1858) coloca que não é de se estranhar que o calórico desapareça, pois o movimento que o constituía se transformou num outro movimento, completamente diferente, mas equivalente. Assim o calórico pode ser representado por um equivalente mecânico, não se trata apenas de uma representação, trata-se de uma identidade. O trabalho realizado pelo pistão é a soma das forças vivas representadas por todos os movimentos vibratórios internos de vapor ou calor. A eletricidade e todos os seus efeitos podem ser representados por um equivalente mecânico e por um equivalente calorífico, porque todas as demonstrações dos imponderáveis são apenas consequências e extensões do princípio geral da conservação das forças vivas.

Assim, sendo o calórico apenas um estado vibratório da matéria, o calor vital desenvolvido no animal já não se deve a um determinado impulso dado às moléculas pelas combinações formadas pelo oxigênio absorvido. Quando o animal se move e trabalha, quando seus músculos se contraem repetidamente, segue-se que a vibração calórica é substituída por outro movimento nominado de primeira vibração nervosa que se transforma em vibração muscular e finalmente em trabalho externo (Hirn, 1858).

Em um processo reflexivo Hirn (1858) considera que, nas ciências, as palavras dizem tudo o que pode ser observado e também imaginado e, quando não têm relação com ideias representativas, são transformadas em figuras.

De fato, lançamos mão de múltiplas representações de conceitos científicos, entre elas as figuras, a fim de entendermos ou de nos fazer entender em processos de comunicação (Laburú, Barros e Silva, 2011).

William John Macquorn Rankine

O engenheiro William John Macquorn Rankine elaborou o ciclo termodinâmico utilizado como padrão em instalações de máquinas a vapor que mais se aproximava da realidade, porém com eficácia menor que o ciclo de Carnot.

Sua obra *A manual of the steam engine and other movers* (Rankine, 1866) apresenta, além da introdução, quatro partes. A primeira, com três capítulos, trata da força muscular; a segunda, com oito capítulos, da energia hídrica e eólica; a terceira, com cinco capítulos, de vapor e outros motores térmicos; e a quarta e última parte, de motores eletromagnéticos.

O manual, publicado inicialmente em 1859, teve bastante aceitação e várias outras edições foram publicadas. Para Fleck (2010, p. 177), "o papel da ciência de manuais: ela escolhe, mistura,

adapta e sintetiza o saber exotérico⁶ de coletivos alheios e o saber estritamente especializado num sistema”.

Rankine era um especialista e fez uso de várias ilustrações em seu manual, como exemplo, a Figura 3, em que é mostrada uma roda d'água, um dos modos de produzir energia a partir do fluxo de água, e de descrições que facilitaram a transformação do saber esotérico em exotérico.

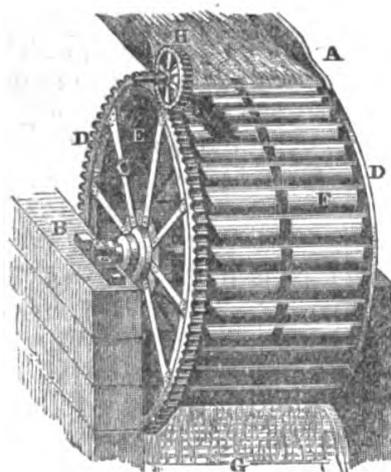


Figura 3: Roda d'água.

Fonte: Rankine (1866, p. 162).

Segundo Fleck, o saber exotérico forma no especialista:

[...] um pano de fundo que determina os traços gerais do seu estilo de pensamento, mesmo que se trate apenas de um sentimento elevado das relações interligadas de todo saber humano; ou da crença na capacidade, embora limitada, de desenvolvimento da ciência. Dessa maneira, fecha-se o círculo da dependência intracoletiva do saber: a partir do saber especializado (esotérico), surge o saber popular (exotérico). [...] O saber popular forma a opinião pública específica e a visão de mundo, surtindo dessa forma, um efeito retroativo no especialista (Fleck, 2010, p. 166).

Rankine (1866) considerava que a hipótese do calórico era o principal impedimento ao avanço do conhecimento das leis relacionais entre calor e força motriz e que a hipótese que considerava que os fenômenos de calor eram causados por vibrações e agitações moleculares era promissora e confirmada por experimentos.

Ainda segundo esse autor, a hipótese dos movimentos moleculares foi inicialmente considerada por Galileu, Francis Bacon, Robert Boyle, Daniel Bernoulli, Newton e, posteriormente, por Rumford, Humphry Davy, John Leslie, Joseph-Michel Montgolfier, Séguin, Young e Grove, e os experimentos sobre produção de calor por fricção, empreendidos por Rumford e Davy, eram a chave para a ciência da termodinâmica. Davy havia concluído que o calor era uma forma de movimento (Pádua, Pádua e Martins, 2009).

6 O exotérico a que Fleck se refere é formado por leigos adultos com formação geral; os exemplos mencionados em sua obra indicam pessoas com formação em nível superior (Oliveira, 2012).

A adoção da hipótese de movimentos moleculares térmicos e o abandono da hipótese de calórico substancial, foram impulsionados pelas várias descobertas que mostraram que a propagação de luz e calor por radiação ocorre de acordo com leis análogas às da propagação de movimentos vibratórios moleculares (Rankine, 1866).

Segundo Rankine (1866, p. 224) “a palavra calor era usada em dois sentidos” um relativo às sensações e outro relativo à capacidade de corpos de produzir essas sensações. Ele considerava que a “condição de calor” tinha várias propriedades, entre elas a transferibilidade do calor de um corpo a outro por processos de convecção, radiação e condução, e que a “condição de calor” era uma “condição de energia”, capaz de efetuar mudanças como alterações de densidade, de elasticidade, químicas, elétricas e magnéticas.

A condição do calor é passível de ser medida indiretamente por meio dos efeitos mensuráveis que produz. Encontra-se sujeita, como outras formas de energia, a uma lei de conservação segundo a qual, em qualquer sistema de corpos, nenhum calor seja gasto ou produzido por meio de mudanças que não sejam de temperatura, então a quantidade total de calor no sistema não pode ser alterada pelas ações mútuas dos corpos, mas a quantidade que um corpo perde o outro ganha. Caso ocorram mudanças que não sejam mudanças de temperatura, e se, por essas mudanças, o calor total do sistema for alterado em quantidade, essa alteração é compensada exatamente por uma mudança oposta em alguma outra forma de energia (Rankine, 1866).

Os experimentos que verificaram as relações entre energia mecânica e calor gerado por atrito de um fluido, foram, segundo Rankine (1866), determinantes, pois ao final do processo o fluido encontra-se como no estado inicial. Logo, a produção de certa quantidade de calor era devida exclusivamente à energia mecânica gasta na agitação do fluxo.

Rankine considera que ele e Clausius, por métodos diferentes, determinaram, em 1849, a equação geral da termodinâmica que expressa as relações entre calor e energia mecânica.

Primeira Lei da Termodinâmica. Calor e energia mecânica são mutuamente conversíveis; e calor requer para sua produção, e produz pelo seu desaparecimento, energia mecânica, na proporção de 772 libras-pé para cada unidade britânica de calor (Rankine, 1866, p. 299).

Essa lei seria uma aplicação de duas leis gerais de que todas as formas de energia são conversíveis e que a energia total de uma substância ou sistema não pode ser alterada pelas ações mútuas de suas partes.

Rankine (1866) propôs o termo energia potencial, no qual energia significa a capacidade de realizar trabalho; no caso é o produto do esforço pela distância. Para ele, uma quantidade de energia, como uma quantidade de trabalho, pode ser calculada multiplicando uma força pela distância ou um momento estático pelo deslocamento ou a intensidade da pressão pelo volume.

A energia real (ou atual) de um corpo em movimento é o trabalho que ele é capaz de realizar contra uma resistência antes de ser levado ao repouso, e é igual à energia que deve ser exercida sobre o corpo para tirá-lo do estado de repouso até a sua velocidade real. O valor dessa quantidade é o produto do peso do corpo na altura da qual ele deve cair para adquirir sua velocidade real. Quando uma determinada quantidade de energia é armazenada e restaurada, alternadamente, por aumento e diminuição na velocidade de uma máquina, a energia real da máquina é aumentada e diminuída alternadamente por essa quantidade. A energia real é

apenas relativa. Ao calcular a energia real de um corpo, que é a capacidade que ele possui para realizar trabalho sobre outros corpos, em razão de seu movimento, é o movimento relativo a esses outros corpos que deve ser levado em consideração (Rankine, 1866).

Segundo Saslow (2020), o termo “energia real” de Rankine foi substituído em 1862 pela “energia cinética” de Thomson e Tait, mas o termo “energia potencial” continuou sendo adotado.

Rudolf Julius Emanuel Clausius

Clausius introduziu as bases matemáticas da termodinâmica e, em 1867, reuniu seus escritos de 17 anos sobre a teoria do calor, deixando de lado, naquele momento, os movimentos moleculares. No prefácio da obra *The mechanical theory of heat: with its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies*, Clausius (1867) demonstrou a preocupação em se fazer entendido, justificando que a teoria mecânica do calor havia introduzido novas ideias e requeria um tratamento matemático especial. Dessa forma, precisou recorrer às equações diferenciais, trazendo, para tanto, uma introdução abordando exclusivamente esse tema.

Na obra, estão reunidas várias de suas memórias publicadas anteriormente em periódicos, mas há um certo capricho com a introdução, e segundo Fleck (2010, p. 172), “qualquer trabalho em periódicos contém, na introdução ou na conclusão, tal conexão com a ciência dos manuais que prova que aspira à entrada no manual e que considera a posição atual como provisória.”

Observa-se ainda outra modalidade de representação dos conceitos científicos, Clapeyron fez a representação gráfica do trabalho de Carnot e Clausius, a representação por equações diferenciais.

O fato de Clausius não ter abordado os movimentos moleculares não acarretou prejuízos, pois a termodinâmica tem uma abordagem fenomenológica e estuda um conjunto muito grande de partículas, não se atendo, portanto, às propriedades individuais dos constituintes do sistema (Pires, 2011).

Clausius mostrou que o ciclo de Carnot se aplicava a todos os ciclos reversíveis, e a reversibilidade era considerada quando um corpo que sofre a transformação é colocado em contato com outros corpos cuja temperatura difere infinitamente pouco da sua, e quando a pressão exercida pelo corpo difere infinitamente pouco da pressão externa (Moutier, 1872).

O funcionamento de uma máquina de vapor implicava a retirada de calor de uma fonte quente, sendo parte desse calor convertido em trabalho e a outra parte do calor descartada para uma fonte fria. Ele estudou máquinas reversíveis e irreversíveis concluindo que a razão entre a quantidade de calor e a temperatura era constante em processos reversíveis e aumentava nos processos irreversíveis, e nominou essa razão de entropia (Pires, 2011). Segundo Clausius,

Podemos chamar S de conteúdo transformacional do corpo, apenas como nós denominamos a magnitude U seu conteúdo térmico e ergonal. Mas como considero melhor pedir emprestado termos para importantes grandezas das línguas antigas, para que possam ser adotados inalterados em todas as línguas modernas, proponho chamar a magnitude S a entropia do corpo, da palavra grega $\tau\rho\omicron\pi\eta$, transformação. Eu intencionalmente formei a palavra entropia de modo a ser o mais semelhante possível à palavra energia; pois as duas magnitudes a serem denotadas por essas palavras são tão quase aliadas em seus significados físicos, que uma certa semelhança na designação parece ser desejável (Clausius, 1867, p. 357).

Clausius recorreu ao grego para buscar uma palavra com o significado desejado assim como Lavoisier quando designou o oxigênio (Carvalho, 2012). “As palavras e as ideias são, originalmente, equivalência fonéticas e intelectuais das vivências, que são dadas de modo concomitante” (Fleck, 2010, p. 69).

Considerou como os dois teoremas fundamentais da teoria mecânica do calor: “a energia do universo é constante” e “a entropia do universo tende ao máximo” (Clausius, 1867, p. 365).

Para Peirce (1997), um cientista oferece um tratamento respeitoso às hipóteses, que aparentemente são verdadeiras e passíveis de verificação ou de refutação pela análise dos fatos. A inferência por abdução é o processo de formação de hipótese, aquele que introduz novas ideias. Um cientista deve ter permanentemente uma postura investigativa, pois “para aprender é preciso desejar aprender”, e não se contentar com os pensamentos prévios e nem deixar se limitar pelo conservadorismo ou preconceitos. A imaginação deve acompanhar o querer aprender e, no âmbito da ciência, sonha com explicações e leis. A ciência, para esse autor, é uma “entidade histórica viva” na qual os homens são movidos pelo impulso de buscar e mergulhar na “razão das coisas”. Mas considera que “são os instintos, os sentimentos, que constituem a substância da alma. A cognição é apenas a superfície, seu *locus* de contato com o que lhe é externo” (Peirce, 1997, p. 47-48).

Hirn (1858) considera, que para pensar, é necessário, além do cérebro, outros ramos do sistema nervoso cuja sensibilidade parece retirar-se das extremidades.

Em busca de verificar a abrangência do uso de palavras impregnadas de significados e portadoras de conceitos, a frequência de alguns termos foi analisada nas obras pesquisadas e o Quadro 4 apresenta os resultados:

Quadro 4: Frequência de termos e/ou expressões nas obras analisadas

| Termos/ expressões | CARNOT 1824 | HIRN 1858 | RANKINE 1866 | CLAUSIUS 1867 | MOUTIER 1872 | REYNOLDS 1892 |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| calórico | 100 | 447 | 3 | - | 1 | 10 |
| calor | 228 | 144 | 1053 | 1555 | 279 | 251 |
| trabalho | 6 | 222 | 216 | 621 | 164 | 81 |
| força | 29 | 403 | 14 | 638 | 9 | 95 |
| <i>vis viva</i> | - | - | - | 21 | - | 5 |
| energia | 1 | 1 | 214 | 49 | 2 | 16 |
| poder/poder motriz | 128 | 6 | 277 | 7 | 2 | 28 |
| equivalente mecânico | - | 97 | 6 | 4 | 1 | 21 |
| conservação de forças | - | 4 | - | - | 8 | 21 |
| conservação de energia | - | - | 1 | - | - | - |
| lei da conservação | - | - | - | - | - | 8 |
| energia mecânica | - | - | 30 | 4 | 1 | - |
| energia atual | - | - | 12 | - | - | - |
| energia potencial | - | - | 7 | - | - | - |
| adiabático | - | - | 21 | -* | 19 | - |
| termodinâmica | - | - | 17 | - | 14 | - |
| linguagem | 1 | 12 | 1 | 3 | 1 | 4 |

Fonte: organizado pelos autores. *O termo aparece duas vezes em anotações posteriores feitas por algum leitor.

Observa-se um decréscimo no número de citações da palavra calórico, enquanto a palavra calor é citada fartamente, principalmente por Rankine e Clausius. O termo poder motriz é citado 128 vezes por Carnot, enquanto poder, no sentido de potência, é citado 277 vezes por Rankine. O equivalente mecânico é citado majoritariamente por Hirn, pois se tratava do tema da sua dissertação. Somente Rankine usa a expressão conservação de energia. O termo "lei da conservação" só aparece na obra de Osborne. Energia mecânica é mais citada por Rankine e energia atual(real) e potencial citadas exclusivamente por ele. O termo termodinâmica, cunhado por Thomson, aparece apenas nas obras de Rankine e Moutier, assim como o termo adiabático. Hirn demonstrou uma preocupação maior com a linguagem, provavelmente pelo fato dessa sua obra ter trazido mais reflexões que as demais analisadas, entretanto foi Rankine o autor que mais introduziu novos termos em sua obra.

Outros autores desenvolveram estudos sobre a termodinâmica, por exemplo: a *Theory of heat*, de Maxwell, foi publicada nos anos 1870 e Planck escreveu um livro dedicado ao princípio de conservação da energia em 1887.

O conceito de energia, englobando todas as formas possíveis de energia (mecânica e não mecânica), foi sendo desenhado ao longo do século XIX e início do século XX, culminando com Einstein, quando correlaciona massa à energia, mas, ainda assim, o conceito é tido como problemático (Melo, 2014).

O termo entalpia e demais outros termos termodinâmicos foram introduzidos a partir do século XX, conferindo juventude à ciência termodinâmica.

O conceito de calor é considerado um dos mais difíceis de ensinar (Silva, Laburú e Nardi, 2008), e vários livros didáticos ainda utilizam expressões que remetem à teoria do calórico. A nosso ver, as expressões calor latente e calor específico trazem a concepção indesejada de que um corpo tem calor.

O calor é um fenômeno de fronteira, um fluir de energia entre sistema e vizinhança, e é, portanto, processual. Sendo pertinente recordar que o calor jamais pode ser inteiramente convertido em trabalho. Assim, Wang (2017) considera que a definição de calor é de fato problemática, pois só pode ser compreendida em termos de energia e entropia, considerando simultaneamente as duas primeiras leis da termodinâmica.

Segundo Fuchs, D'Anna e Corni (2022), a experiência humana apresenta o calor como uma força da natureza e, na interação física e narrativa com fenômenos térmicos, esquemas e abstrações surgem na mente. Para desenvolver uma fluidez no uso da linguagem relativa à termodinâmica, é necessário fazer uso desses esquemas, acrescidos de metáforas e analogias.

Considerações finais

Os personagens que contribuíram para essa ciência são médicos, engenheiros e cientistas (filósofos naturais), participantes de círculos esotéricos e exotéricos que, movidos por diferentes impulsos ou necessidades, se empenharam em entender os fenômenos, otimizar as máquinas existentes e criar uma teoria condizente.

Ressalta-se que no referido século XIX os conceitos termodinâmicos estavam em construção e as obras estudadas não trazem toda a dimensão do processo, mas refletem explicitamente o coletivo científico de pensamento.

As reuniões científicas, as correspondências, as publicações nos periódicos e livros são pontos de encontro das pessoas de ciência e abrem possibilidades de comunicação intercoletiva de ideias e fatos. Esses eventos foram facilitados pelo desenvolvimento dos meios de transporte, locomotivas e navios a vapor, e de comunicação, o telégrafo.

Percebe-se nas obras analisadas que as alterações na nomenclatura científica e a transição dos conceitos são processuais e não acontecem imediatamente, nem mesmo os termos adotados por cientista renomados, tal como Thomson, são acatados imediatamente na comunidade científica.

A conceitualização do calor e o desuso do calórico percorre os caminhos da conservação da energia em substituição à conservação de forças. Hirn, em 1858, ainda tratava de conservação de forças enquanto Clausius, em 1867, já era categórico quanto à conservação da energia em seu significado, mas sem a utilização da referida expressão.

Concordamos com Rankine (1866) ao considerar que os experimentos que verificaram as relações entre calor e energia mecânica por atrito de um fluido foram determinantes, principalmente para o cálculo do equivalente mecânico do calor. Joule e Mayer foram os protagonistas desses experimentos.

Mayer vislumbrou a conservação da energia e é atualmente reconhecido pelos historiadores da ciência, inclusive por Kuhn, como um dos cientistas que contribuíram para a formulação da teoria, mas é na obra analisada de Clausius que observamos esse pensamento inequívoco.

O conceito de energia, ainda neste século, não é trivial e, conseqüentemente, o de calor também não. Assim, precisam ser trabalhados com muita cautela no ambiente educacional.

Em face da contribuição dos diversos autores, observa-se nitidamente a ciência como uma construção humana, a formação de uma rede de conhecimento com o tráfego intercoletivo de pensamentos.

Ambicionando a continuidade desta pesquisa, outras obras da referida época devem ser analisadas para desvendar essa imbricada rede de relações e conhecimentos.

Finalizamos o trabalho com a citação de Hirn (1858), que vai ao encontro da abordagem fleckiana e antecipa os pressupostos da interdisciplinaridade para o desenvolvimento da ciência e do conhecimento humano.

Em todo caso, é certo que não é mais possível ser apenas químico, ou físico, ou astrônomo, ou fisiologista, etc. isoladamente, e que quem não possui amplo conhecimento de todas essas ciências combinadas não pode mais pretender contribuir para o progresso de qualquer uma delas em particular.

Mas à medida que as suas fronteiras se aproximam e, portanto, se fundem, o seu nível comum aumenta (Hirn, 1858, p. 260).

Referências bibliográficas

- BASSALO, J.M.F. A crônica do calor: calorimetria. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 29-38, 1992.
- BENTIVOGLIO, J. Cultura política e historiografia alemã no século XIX: a Escola Histórica Prussiana e a "Historische Zeitschrift". *Revista de Teoria da História*, Goiânia, ano 1, n. 3, p. 20-58, 2010.
- BLACK, J. *Lectures on the elements of chemistry*: by John Robison. London: Edinburgh, 1803. Disponível em: <https://tile.loc.gov/storage-services/service/rbc/rbctos/2017gen31155v2/2017gen31155v2.pdf>. Acesso em: 4 set. 2023.
- BRITO, A.S. Flogisto, calórico & éter. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 20, n. 3-4, p. 51-63, 2008.
- CANEVA, K.L. *Robert Mayer and the conservation of energy*. New Jersey: Princeton University Press, 1993.
- CARNOT, S. *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*. Paris: Libraire chez Bachelier, 1824.
- CARVALHO, R.S. Lavoisier e a sistematização da nomenclatura química. *Scientiae Studia*, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 759-771, 2012.
- CARVALHO, B.C.; GOMES, L.C. Análise histórica do conceito de calor nos trabalhos de Joule e implicações para o ensino de física. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 264-290, 2017.
- CELLARD, A. A análise documental. In: POUPART, J. et al. *A pesquisa qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos*. Petrópolis: Vozes, 2008. p. 295-316.
- CLAUSIUS, R. *The mechanical theory of heat: with its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies*. London: John van Voorst, 1867.
- COELHO, R.L. Conexões filosóficas do conceito de energia. *Ensaio Filosóficos*, v. 5, p. 8-21, 2012.
- COHEN, B.; WESTFALL, R.S. (org.). *Newton: texto, antecedentes, comentários*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto; Eduerj, 2002.
- COLDING, L. On the history of the principle of the conservation of energy. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 27, p. 56-64, 1864. Disponível em: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/121147#page/70/mode/1up>. Acesso em: 17 maio 2024.
- CONDÉ, M.L.L. Paradigma versus estilo de pensamento na história da ciência. In: CONDÉ, M.L.L.; FIGUEIREDO, B.G. (org.). *Ciência, história e teoria*. Belo Horizonte: Argvmentvm, 2005. p. 123-144.
- CONDÉ, M.L.L. *Ludwik Fleck: estilos de pensamento na ciência*. Belo Horizonte: Fino Traço, 2012.
- FEHR, J. Ludwik Fleck: sua vida e obra. In: CONDÉ, M.L.L. (org.) *Ludwik Fleck: estilos de pensamento na ciência*. Belo Horizonte: Fino Traço, 2012. p. 35-50.
- FLECK, L. *Genesis and development of a scientific fact*. Chicago: University of Chicago Press, [1935] 1979.
- FLECK, L. *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*. Tradução de Georg Otte e Mariana Camilo de Oliveira. Belo Horizonte: Fabrefactum, [1935] 2010.
- FREIRE, F.G.R. *Considerações sobre o calórico*. Rio de Janeiro: Tipografia Americana de Ignácio Pereira da Costa, 1844.
- FUCHS, H.U.; D'ANNA, M.; CORNI, F. Entropy and the experience of heat. *Entropy*, v. 24, n. 646, p. 1-44, 2022.
- GOTARDO, C.A.; FAVARO, N.A.L.G. Escola pública: origens e funções no período da revolução industrial inglesa. *Horizontes: Revista de Educação*, Grande Dourados, v. 7, n. 13, p. 37-54, 2019.
- HIRN, G.A. *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*. Colmar: Imprimeur de la Prefecture, 1858.
- HOFFMANN, Y.T.; COSTA, D.A.; NAKAMURA, L.R.; DELIZOICOV NETO, D. Circulação inter e intracoletiva em grupos de pesquisa de história da educação matemática. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 25, n.4, p. 1067-1080, 2019.

- JOULE, J.-P. Expériences sur l'identité entre le calorique et la force mécanique. Détermination de l'équivalent par la chaleur dégagée pendant la friction du mercure. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, v. 25, p. 309, 1847. Disponível em: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/21132#page/9/mode/1up>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- KOSELLECK, R. *Futuro passado: contribuição à semântica dos tempos históricos*. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2006.
- KRAGH, H. *Introdução a historiografia da ciência*. Tradução de Carlos Grifo Babo. Porto: Porto Editora, [1987] 2001.
- KUHN, T.S. *O caminho desde a estrutura: ensaios filosóficos (1970-1993): com uma entrevista autobiográfica*. Tradução de Cesar Mortari. São Paulo: Editora Unesp, [2000] 2006.
- KUHN, T.S. *The essential tension: selected studies in scientific tradition and change*. Chicago: University of Chicago Press, 2006a.
- KUHN, T.S. *A estrutura das revoluções científicas*. Tradução de Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva, [1962] 2009.
- KUHN, T.S. *A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica*. Tradução de Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Editora Unesp, [1977] 2011.
- LABURÚ, C.E.; BARROS, M.A.; SILVA, O.H.M. Multimodos e múltiplas representações, aprendizagem significativa e subjetividade: três referenciais conciliáveis da educação científica. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 17, n. 2, p. 469-487, 2011.
- LAVOISIER, A.L., LAPLACE, P.S. Mémoire sur la chaleur. In: LAVOISIER, A.L. *Les œuvres de Lavoisier*. Paris: Imprimerie Impériale, [1780] 1862. p. 283-333. Disponível em: http://www.lavoisier.cnrs.fr/ice/ice_page_detail.php?lang=fr&type=text&bdd=lavosier&table=Lavoisier&bookId=38&typeofbookDes=Memoires&pageOrder=51&facsimile=off&search=no. Acesso em: 18 maio 2024.
- MAAR, J.H. *História da química: segunda parte: de Lavoisier ao Sistema Periódico*. Florianópolis: Papa-Livro, 2011.
- MARTINS, R.A. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Campinas, v. 6, p. 63-95, 1984.
- MARTINS, R.A. Joule's 1840 manuscript on the production of heat by voltaic electricity. *Notes and Records*, London, v. 76, p. 117-153, 2022.
- MATOS, E.; GONÇALVES, J.R.; RAMOS, F.R.S. A epistemologia de Ludwick Fleck: subsídios para a prática interdisciplinar em saúde. *Texto e Contexto Enfermagem*, Florianópolis, v.14, n.3, p. 383-390, 2005.
- MAYER, R. Bemerkungen über die Kraft der unbelebten Natur. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, v. 42, p. 233-240, 1842.
- MAYER, R. Die Mechanik der Wärme. In: WEYRAUCH, J.J. (Hrg.). *Gesammelten Schriften von Robert Mayer*. Stuttgart: Verlag der J.G. Cotta'sche Buchhandlung, 1893.
- MELO, M.T.R.H. *Energia e medicina: Mayer e Helmholtz*. Tese (Doutorado em Filosofia das Ciências) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.
- MOSLEY, M.; LYNCH, J. *Uma história da ciência: experiência, poder e paixão*. Rio de Janeiro: Zahar, 2011.
- MOUTIER, J. *Éléments de thermodynamique*. Paris: Gauthier-Villars; Imprimeur-Libraire de l'École Polytechnique, [1872], 1885.
- OLIVEIRA, B.J. Os circuitos de Fleck e a questão da popularização da ciência. In: CONDÉ, M.L.L. (org.) *Ludwik Fleck: estilos de pensamento na ciência*. Belo Horizonte: Fino Traço, 2012. p. 121-144.
- OLIVEIRA, M.J. Structure of the analytical theories of heat. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 44, e20220008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0008>.
- PÁDUA, A.B.; PÁDUA, C.G.; MARTINS, R.S. A natureza do calor: passados dois séculos, será que a teoria do calórico ainda é de alguma forma uma ideia atraente ou, até mesmo, útil? *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 30, n. 1, p. 3-18, 2009.

- 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, 3603, 2009.
- PEIRCE, C.S. *Escritos filosóficos*. Zamora: El Colegio de Michoacán, 1997.
- PESSOA JÚNIOR, O. Os conceitos de 'força' em Newton. In: PESSOA JÚNIOR, O. *Filosofia da física clássica*. São Paulo: EdUSP, 2020. p. 80-87. Disponível em: <https://opessoa.fflch.usp.br/sites/opessoa.fflch.usp.br/files/FiFi-17-Cap02.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2023.
- PFUETZENREITER, M.R. Epistemologia de Ludwik Fleck como referencial para a pesquisa nas ciências aplicadas. *Episteme*, Porto Alegre, v. 8, n. 16, p. 111-135, 2003.
- PIRES, A.S.T. *A evolução das ideias da física*. São Paulo: Livraria da Física, 2011.
- RANKINE, W.J.M. *A manual of the steam engine and other prime movers*. London: Charles Griffin, [1859] 1866.
- REYNOLDS, O. *Memoir of James Prescott Joule*. Manchester: Manchester Literary and Philosophical Society, 1892.
- RONAN, C.A. *História ilustrada da ciência: a ciência nos séculos XIX e XX*. v. 4. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1984.
- SANTOS, L.S.; ARAUJO, R.B. *A Revolução Industrial*. 2016. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/11120518032013Historia_economica_geral_e_do_brasil_aula_3.pdf. Acesso em: 17 maio 2024.
- SASLOW, W.M. A history of thermodynamics: the missing manual. *Entropy*, v. 22, n. 77, p. 1-48, 2020.
- SCHAFFER, L.; SCHNELLE, T. Introdução: fundamentação da perspectiva sociológica de Ludwick Fleck na teoria da ciência. In: FLECK, L. *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*. Tradução de Georg Otte e Mariana Camilo de Oliveira. Belo Horizonte: Fabrefactum, 2010. p. 1-36.
- SILVA, O.H.M.; LABURÚ, C.E., NARDI, R. Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 25, n. 3, p. 383-396, 2008.
- SMORODINSKI, Y. *Física al alcance de todos: la temperatura*. Moscou: MIR Editorial, 1983.
- STUMPF, I.R.C. Passado e futuro das revistas científicas. *Ciência da Informação*, Brasília, v. 25, n. 3, p. 637-641, 1996.
- THOMSON, W. A escala termométrica absoluta baseada na teoria da potência motriz de Carnot e calculada a partir das observações de Regnault. [1848]. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 487-490, 2007.
- WANG, L.S. The second law: from Carnot to Thomson-Clausius, to the theory of exergy, and to the entropy-growth potential principle. *Entropy*, v. 57, p. 1-19, 2017.
- WEYRAUCH, J.J. (Hrg.). *Gesammelten Schriften von Robert Mayer*. Stuttgart: Verlag der J.G. Cotta'sche Buchhandlung, 1893.

Recebido em 18/05/2024

Aceito em 05/08/2024