



ANÁLISE HISTÓRICA DO CONCEITO DE CALOR NOS TRABALHOS DE JOULE E IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO DE FÍSICA

Historical analysis of the concept of Heat in Joule's papers and possible implications for Physical Education

Bianca Cintra de Carvalho [biancacintra1992@gmail.com]
*Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática
Universidade Estadual de Maringá
Av. Colombo, 5.790, Jd. Universitário, Maringá, Paraná, Brasil*

Luciano Carvalhais Gomes [lcgomes2@uem.br]
*Departamento de Física – Centro de Ciências Exatas
Universidade Estadual de Maringá
Av. Colombo, 5.790, Jd. Universitário, Maringá, Paraná, Brasil*

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo realizar uma análise dos textos originais de Joule, escritos em meados do século XIX, buscando compreender como ocorreram as modificações no conceito de calor ao longo de sua obra. Para embasar nossa análise teórica, foi feita uma revisão bibliográfica com a leitura de textos sobre a utilização da história da ciência, além do estudo das concepções alternativas sobre calor. Guiados por essa revisão bibliográfica, utilizou-se como metodologia a Análise Textual Discursiva para examinar quais fatores influenciaram Joule na mudança de concepção a respeito da natureza do calor. Joule inicialmente aceitava a teoria do calórico e, instigado por aspectos internos à sua pesquisa e por trabalhos de outros pesquisadores como Rumford, Davy e Herapath, passa a compreender o calor como um estado de movimento das partículas. Acredita-se que este trabalho tem potencial para servir como subsídio para o ensino de Física, visto que o estudo dos trabalhos de Joule pode contribuir para que haja uma ressignificação do conceito de calor para os estudantes.

Palavras-Chave: Ensino de Física; História da Ciência; Calor; Joule.

Abstract

This paper aimed to carry out an analysis of Joule's original texts, written in the middle of the XIX century, trying to understand how the changes in heat concept occurred throughout his work. To support the theoretical analysis, a literature review was made with texts about the Science history and the study of alternative conceptions about heat. Guided by this literature review, the Discursive Textual Analysis was used as the methodology to examine which factors influenced Joule in changing his conception of the nature of heat. Joule initially accept the caloric theory and, instigated by internal aspects of his research and work by other researchers such as: Rumford, Davy and Herapath, he begins to understand the heat as a state of motion of the particles. We believe this work has the potential to serve as a subsidy for the teaching of Physics, where the study of Joule's work can contribute so that there is a reframing of the heat concept for the students.

Keywords: Physics Education; History of Science; Heat; Joule.

INTRODUÇÃO

O ensino das Ciências (Física, Química, Biologia e Matemática) ainda se apresenta, na atualidade, pautado no conteudismo, com aulas expositivas, superficiais, baseadas na memorização e dependência

excessiva dos livros didáticos, mostrando-se descontextualizado e desarticulado com as necessidades atuais do cidadão (Teixeira, 2003; Brockington, 2005; Fernandes & Megid Neto, 2012; Gehlen & Delizoicov, 2012; Massoni & Moreira, 2012). De fato, não podemos continuar ingênuos sobre o processo de ensino-aprendizagem, acreditando que basta saber o conteúdo que leciona e ter jogo de cintura, para manter a atenção dos alunos, para garantir a aprendizagem destes, pois, segundo o ensino tradicional, se o aluno prestar atenção na aula, aprenderá o conteúdo (Carvalho, 2009; Augusto & Amaral, 2014). É necessário compreender que o ensino é mais do que apenas trabalhar com conceitos e ideias científicas. De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM):

“É preciso rediscutir qual Física ensinar para possibilitar uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada. Sabemos todos que, para tanto, não existem soluções simples ou únicas, nem receitas prontas que garantam o sucesso. Essa é a questão a ser enfrentada pelos educadores de cada escola, de cada realidade social, procurando corresponder aos desejos e esperanças de todos os participantes do processo educativo, reunidos através de uma proposta pedagógica clara. É sempre possível, no entanto, sinalizar aqueles aspectos que conduzem o desenvolvimento do ensino na direção desejada” (Brasil, 2000, p. 23).

Nessa perspectiva, o Construtivismo visa ultrapassar essa concepção de disciplina vinculada à memorização de nomenclaturas e a listas intermináveis de fórmulas, buscando tornar o aluno sujeito ativo do processo de ensino aprendizagem, partindo do pressuposto de que o conhecimento é uma construção, constituída pela interação do indivíduo com o meio físico e social (Becker, 1993; Fernandes & Megid Neto, 2012; Rosa & Rosa, 2012).

Sabendo disso, o papel do professor é provocar no aluno um desequilíbrio, ou em outras palavras, “fazer desafios”, propondo questões interessantes e desafiadoras, questionando ativamente o pensamento dos alunos, criando na sala de aula tarefas e condições em que o pensamento do estudante possa se revelar, de modo a extrair suas compreensões, transpondo, pois, o modelo no qual o aluno é uma *tabula rasa*, a ser preenchido pelo professor. Assim, as concepções alternativas dos alunos propiciam uma base, sobre a qual é possível construir uma compreensão mais formal do conceito, sendo um ponto de partida para ensino do conhecimento científico (Lima, 1980; Bransford, Brown & Cocking, 2007; Germano & Feitosa, 2013; Zômpero & Laburú, 2012).

Deste modo, devemos utilizar diversas ferramentas para tornar possível o ensino-aprendizado. Entre algumas das sugestões apresentadas para amenizar esse problema está a utilização da História da Ciência em sala de aula (Castro & Carvalho, 1992). A utilização da história da ciência de forma adequada é um mecanismo importante nessa compreensão, pois possibilita tornar o aluno um agente mais ativo e consciente da natureza da ciência, propiciando uma compreensão mais integral da mesma (Carvalho, 1989; Matthews, 1995; Martins, 2006; Castro, 2009; Carvalho & Sasseron, 2010). Por consequência, aumentam as chances de um maior e mais eficaz desenvolvimento do pensamento crítico, tornando possível um entendimento mais integral e significativo dos conceitos estudados (Matthews, 1995).

Dessa forma, a utilização da história da ciência no ensino de Física contribui tanto no processo de ensino-aprendizagem, para compreensão do conteúdo científico, como para propiciar uma visão adequada da natureza da ciência (Martins, 2006; Oliveira & Silva, 2012; Reis & Reis, 2016), visto que, “[...] por meio dessa abordagem, o aluno pode se tornar mais crítico, sobretudo, acerca de aspectos epistemológicos da ciência [...]” (Raicik & Peduzzi, 2015, p. 139).

A história da ciência tem sido considerada como um mecanismo importante no ensino de ciências (Carvalho, 1989; Matthews, 1995; Martins, 2006; Castro, 2009; Carvalho & Sasseron, 2010; Raicik & Peduzzi, 2015, 2016; Reis & Reis, 2016; Ortiz & Silva, 2016), pois “[...] nos apresenta uma visão a respeito da natureza da pesquisa e do desenvolvimento que não costumamos encontrar no estudo didático dos resultados científicos [...]” (Martins, 2006, p. xxi) visto que, os livros científicos didáticos utilizados no Ensino Médio enfatizam apenas os resultados obtidos pela ciência, ou seja, as teorias e conceitos aceitos, mas comumente não apresentam outros aspectos da ciência, como o desenvolvimento das teorias, o verdadeiro trabalho dos pesquisadores, as ideias científicas aceitas no passado e as relações entre ciência, filosofia e religião (Martins, 2006).

Além disso, os textos históricos auxiliam o professor na compreensão da estrutura e desenvolvimento dos conteúdos que leciona, o que o capacita a compreender com mais profundidade as dificuldades e resistências dos alunos, uma vez que os mesmos precisam passar por um processo semelhante ao processo

ocorrido no desenvolvimento histórico da ciência (Matthews, 1995; Barros & Carvalho, 1998; Gardelli, 2004; Batista, Drummond & Freitas, 2015; Bravo & Pesa, 2015). Dessa forma, o estudo de casos da História da Física pode nos fornecer valiosas pistas para compreensão das concepções alternativas dos estudantes, frente suas semelhanças com as teorias que a Ciência já aceitou como válidas (Bravo & Pesa, 2015).

Assim sendo, o aspecto essencial é que o professor conheça quais foram os percalços e as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento científico, assim como a complexidade dos conceitos que são ensinados, pois isto possibilitará que se compreenda quais as resistências e dificuldades dos alunos. Dessa forma, as concepções dos estudantes passam a ser encaradas como “legítimas” e não mais aceitas como absurdas, fazendo com que sejam levadas em consideração ao longo do processo de ensino-aprendizagem (Castro, 2009; Batista, Drummond & Freitas, 2015).

De fato, o conhecimento da história da ciência torna-se um importante aliado, visto que o estudante, ao examinar exemplos da história, pode compreender o processo de construção da ciência e perceber que algumas pessoas já acreditaram e defenderam ideias semelhantes à dele, mas que essas ideias foram ao longo do tempo substituídas por outras explicações mais adequadas e coerentes para a compreensão do fenômeno. Portanto, o conhecimento da história da ciência faz-se necessário, tanto para o docente quanto para o educando, visto que esta auxiliará para uma transformação conceitual (Martins, 2006).

A partir dessas reflexões, surgiram indagações sobre como utilizar adequadamente a história da ciência, de modo a levar em conta as concepções alternativas dos educandos e contribuir para melhor compreensão de determinados conteúdos. De acordo com Carvalho (1989), o professor deve levar em conta, de um lado, o processo histórico da construção de um conceito e, de outro, uma teoria que explique como este é construído pelo aluno. Desse modo, o educador, ao conhecer a história da Ciência, torna-se capaz de melhor compreender o raciocínio utilizado por seu aluno em sala de aula, pois o mesmo é muito semelhante às ideias já consideradas como corretas pela Ciência um dia. Assim:

“[...] está errado o aluno pensar como um grande físico de outrora? Não. Porém, o nosso jovem vive no final do século XX e não no século XIV, e a obrigação da escola é ajudar esse jovem a construir a sua visão de mundo compatível com os conhecimentos adquiridos pela sociedade nestes últimos seis séculos [...]” (Carvalho, 1989, p. 4).

Nesse contexto, compreendendo os problemas enfrentados em sala de aula para distinguir os conceitos de calor e temperatura (Köhnlein & Peduzzi, 2002; Silva, Laború & Nardi, 2008) e os obstáculos enfrentados pela comunidade científica para o estabelecimento do conceito de energia (Cardwell, 1989), nosso objetivo é fazer uma análise dos textos originais de Joule buscando compreender como ocorreram as modificações no conceito de calor ao longo de sua obra.

Desta forma, acreditamos que esse trabalho será útil como material de apoio, fornecendo subsídios para os professores, tanto para uma possível aplicação didático-pedagógica em sala de aula, em atividades que almejam discutir a natureza da ciência, propiciando uma visão mais adequada da mesma, quanto em atividades que buscam ensinar o conceito de calor com uma abordagem histórica.

METODOLOGIA

A partir do nosso problema de investigação e as características que este estudo assume, nossa investigação insere-se no campo de pesquisa de cunho qualitativo, pois nosso objetivo é buscar compreender de forma significativa a questão formulada.

Para examinarmos como ocorreram as modificações no conceito de calor ao longo dos trabalhos de Joule, inicialmente realizamos uma pré-análise, para selecionar o *corpus* e utilizamos das técnicas da Análise Textual Discursiva para análise dos artigos de Joule. Neste tópico apresentamos os procedimentos metodológicos adotados.

Pré-análise

Em um primeiro momento, fizemos uma revisão bibliográfica sobre o tema, analisando os artigos originais de Joule, reunidos na coletânea intitulada “*The scientific papers of James Prescott Joule*”¹, publicada

¹ Todos os artigos de Joule utilizados neste trabalho foram encontrados nesta coletânea. Este arquivo encontra-se disponível em: <http://www.archive.org/details/scientificpapers01joule>. Deste modo, o ano e as páginas indicadas ao longo deste trabalho referem-se a esta fonte.

pela “*The Physical Society of London*”, em Londres. A coletânea está dividida em dois volumes: o primeiro volume, de 1884, possui 97 artigos escritos por Joule de 1838 até 1878 e o segundo, publicado em 1887, contém 13 artigos, no qual apresenta os trabalhos publicados por Joule em conjunto com outros homens da ciência, de 1845 a 1862.

Selecionamos a palavra-chave “calor” e, por meio do sistema de busca presente nos arquivos, pesquisamos os artigos que a continham. Encontramos 54 artigos com a palavra-chave “calor” no primeiro volume e 11 artigos no segundo arquivo. Após uma leitura flutuante², percebemos que em alguns destes artigos o termo “calor” estava presente em um contexto fora do interesse da pesquisa. Dessa forma, para selecionar os artigos para a análise, limitamos nossa pesquisa aos artigos escritos de 1838 até 1852, partindo do pressuposto de que até essa data Joule já havia escrito seu trabalho mais importante, sobre o equivalente mecânico do calor e, de acordo com Queirós (2012), suas contribuições para o desenvolvimento do conceito de energia já haviam sido concluídas. Buscamos examinar “[...] *um conjunto capaz de produzir resultados válidos e representativos em relação aos fenômenos investigados [...]*” (Moraes & Galiazzi, 2011, p. 17). Foram selecionados 29 artigos para a amostra final, apresentados no quadro 1³.

Quadro 1 – Artigos selecionados para análise final.

Amostra final				
Ordem	Título	Páginas	Mês	Ano
1	<i>On Electro-Magnetic Forces</i>	27-39	Agosto	1840
2	<i>On the Production of Heat by Voltaic Electricity</i>	59-60	Dezembro	1840
3	<i>On a New Class of Magnetic Forces</i>	46-53	Fevereiro	1841
4	<i>On the Heat Evolved by Metallic Conductors of Electricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis</i>	60-81	Agosto	1841
5	<i>On the Electric Origin of the Heat of Combustion</i>	81-102	Novembro	1841
6	<i>On Voltaic Apparatus</i>	53-59	Março	1842
7	<i>On the Electrical Origin of Chemical Heat</i>	102-107	Junho	1842
8	<i>On the Heat Evolved during the Electrolysis of Water</i>	109-123	Janeiro	1843
9	<i>On the Calorific Effects of Magneto-Electricity, and on the Mechanical Value of Heat</i>	123-159	Agosto	1843
10	<i>On the Changes of Temperature produced by the Rarefaction and Condensation of Air</i>	171-189	Junho	1844
11	<i>On Specific Heat</i>	189-192	Setembro	1844
12	<i>On the Mechanical Equivalent of Heat</i>	202	Junho	1845
13	<i>On the Existence of an Equivalent Relation between Heat and the Ordinary Forms of Mechanical Power</i>	202-205	Agosto	1845
14	<i>On a New Method for Ascertaining the Specific Heat of Bodies</i>	192-200	Dezembro	1845
15	<i>On the Heat Disengaged in Chemical Combination</i>	205-235	Fevereiro	1846
16	<i>On Matter, Living Force, and Heat</i>	265-276	Maio	1847
17	<i>On the Mechanical Equivalent of Heat, as determined from the Heat evolved by the Agitation of Liquids</i>	276-277	Junho	1847

² Utilizamos alguns pressupostos da Análise de Conteúdo, proposta por Bardin, para fundamentar nossa escolha dos materiais. A leitura flutuante consiste em “[...] estabelecer contato com os documentos a analisar e em conhecer o texto deixando-se invadir por impressões e orientações. Esta fase é chamada de leitura ‘flutuante’, por analogia com a atitude do psicanalista. Pouco a pouco, a leitura vai-se tornando mais precisa, em função de hipóteses emergentes, da projeção de teorias adaptadas sobre o material e da possível aplicação de técnicas utilizadas sobre materiais análogos” (Bardin, 2011, p. 126).

³ No quadro 1, apresentamos as datas em que os artigos foram escritos originalmente ou publicados na *Philosophical Transactions*, ou na *Proceedings of the Real Society* e demais revistas da época. Os artigos de 1 a 26 podem ser encontrados no volume 1, de 1884 e os artigos 27, 28 e 29 pertencem ao volume 2, de 1887, da coletânea intitulada “*The scientific papers of James Prescott Joule*”, publicada pela “*The Physical Society of London*”. A paginação encontrada no quadro refere-se as coletâneas.

18	<i>On the Mechanical Equivalent of Heat, as determined by the Heat evolved by the Friction of Fluids</i>	277-281	Junho	1847
19	<i>Note on the Employment of Electrical Currents for Ascertaining the Specific Heat of Bodies</i>	201	Julho	1847
20	<i>On the Theoretical Velocity of Sound</i>	282-283	Julho	1847
21	<i>On Shooting-Stars</i>	286-288	Julho	1847
22	<i>On the Mechanical Equivalent of Heat, and on the Constitution of Elastic Fluids</i>	288-290	Agosto	1848
23	<i>Some Remarks on Heat and the Constitution of Elastic Fluids</i>	290-297	Outubro	1848
24	<i>On the Mechanical Equivalent of Heat</i>	298-328	Junho	1850
25	<i>On the Air-Engine</i>	331-356	Junho	1851
26	<i>On the Economical Production of Mechanical Effect from Chemical Forces</i>	363-368	Abril	1852
27	<i>Experiments and Observations on the Mechanical Power of Electro-Magnetism, Steam and Horse</i>	1-11	-	1846
28	<i>On Atomic Volume and Specific Gravity</i>	11-215	-	1845
29	<i>On the Thermal Effects Experienced by Air in Rushing through Small Apertures</i>	216-230	-	1852

Técnicas da Análise Textual Discursiva

Como metodologia para análise dos artigos de Joule optamos pela Análise Textual Discursiva (ATD), proposta por Moraes e Galiuzzi (2011). A ATD é uma ferramenta de análise qualitativa, tendo por objetivo a produção de novas compreensões a respeito dos fenômenos e discursos, partindo de uma análise criteriosa e rigorosa das informações. Essa abordagem se insere no conjunto de análises textuais, transitando entre a Análise de Conteúdo e a Análise de Discurso (Moraes, 2003; Moraes & Galiuzzi, 2006; 2011).

De acordo com Moraes (2003) e Moraes e Galiuzzi (2011), a ATD consiste em “[...] *um processo auto organizado de construção de compreensão em que novos entendimentos emergem de uma sequência recursiva [...]*” (Moraes, 2003, p. 192). De fato, não podemos considerar a análise textual como constituída de um movimento linear e continuado. Esta compõe-se de um movimento espiral, no qual, “[...] *a cada avanço, se exigem retornos reflexivos e de aperfeiçoamento do já feito, movimento reiterativo capaz de possibilitar cada vez maior clareza e validade dos produtos*” (Moraes & Galiuzzi, 2011, p. 71). Esse processo pode ser dividido em três momentos: desmontagem dos textos do *corpus*⁴ (processo de unitarização), estabelecimento de relações entre as unidades de análise (categorização) e o captar do novo emergente (comunicação da nova compreensão por meio de metatextos).

O primeiro momento do ciclo de análise é, portanto, a desconstrução e unitarização dos textos, buscando examinar minuciosamente o *corpus* e fragmentá-lo em unidades de análise, referentes aos fenômenos em estudo (Moraes, 2003; Moraes & Galiuzzi, 2011). Essas *unidades de análise* podem ser categorias definidas ‘a priori’ ou categorias emergentes, sendo que “[...] *estas unidades por si mesmas podem gerar outros conjuntos de unidades oriundas da interlocução empírica, da interlocução teórica e das interpretações feitas pelo pesquisador [...]*” (Moraes & Galiuzzi, 2006, p. 118).

No nosso caso, o *corpus* são os 29 artigos selecionados de acordo com a pré-análise realizada e as unidades empíricas foram extraídas dos artigos originais de Joule, sendo transcrições literais do material e as unidades teóricas correspondem a outras concepções de calor existentes no século XVIII, visando embasar as unidades empíricas. Conscientes de que não somos especialistas em história da ciência, estamos cientes que existirão possíveis erros em nossa descrição e análise histórica. Visando amenizá-los, buscamos, para construir nossas unidades teóricas, “[...] *familiarizar-se tanto com a bibliografia secundária (ou seja, aquilo que outros historiadores da ciência já fizeram antes) como com a bibliografia primária (ou seja, as obras científicas e filosóficas antigas do período estudado)*” (Martins, 2001, p. 116). Utilizamos as fontes secundárias

⁴ Corpus representa a matéria-prima da Análise Textual Discursiva (ATD), sendo constituída basicamente de produções textuais. Esses textos “[...] *podem tanto ser produzidos especialmente para a pesquisa quanto podem ser documentos já existentes previamente [...]*” (Moraes & Galiuzzi, 2011, p. 17).

sugeridas por Martins (1984) e por Gomes (2012), como sendo confiáveis e consolidadas sobre essa temática, sendo que durante as leituras realizadas, selecionamos mais algumas fontes primárias e outras fontes secundárias, que abordavam os trabalhos originais de Joule. Dentre esses materiais, buscamos selecionar os mais relevantes como apoio teórico para a análise dos artigos.

Devemos considerar que:

“[...] a unitarização é um processo que produz desordem a partir de um conjunto de textos ordenados. Torna caótico o que era ordenado. Nesse espaço uma nova ordem pode constituir-se à custa da desordem. O estabelecimento de novas relações entre os elementos unitários de base possibilita a construção de uma nova ordem, representando uma nova compreensão em relação aos fenômenos investigados” (Moraes & Galiazzi, 2011, p. 21).

Nesse processo, é importante partir do pressuposto de que não é possível realizar uma leitura única e objetiva, pois esta sempre ocorre a partir de uma perspectiva teórica (consciente ou não), sendo toda leitura uma interpretação (Moraes, 2003). Sabendo disso, o trabalho do pesquisador é elaborar sentidos, ou seja, *“[...] construir compreensões a partir de um conjunto de textos, analisando-os e expressando a partir dessa investigação alguns dos sentidos e significados que possibilitam ler [...]”* (Moraes & Galiazzi, 2011, p. 14). Sendo assim, o objetivo da análise é a emergência e a comunicação desses sentidos e significados.

Apresentamos no Quadro 2 alguns exemplos das unidades empíricas escolhidas. Para identificar as unidades empíricas, essas receberam um código de acordo com o seu artigo de origem e um título. Assim, U3.2 representa a 2ª unidade empírica extraída do artigo 3⁵.

Quadro 2 – Seleção das unidades empíricas e teóricas

<p><u>Unidade empírica (UE):</u> U4.6 – Transferência de calor “[...] o calor assim adquirido pela água [durante o experimento] [...]” (Joule, 1884, p. 67, grifo nosso, tradução nossa). <u>Unidade teórica correspondente (UT):</u> “[...] o mundo que habitamos está cercado por todos os lados de um fluido muito sutil, que penetra, ao que parece, sem exceção, todos os corpos que o compõem; que esse fluido, que chamarei fluido ígneo, matéria do fogo, calor e luz, tende a atingir o equilíbrio em todos os corpos, mas não penetra todos com igual facilidade [...]” (Lavoisier, 1777, p. 420, grifo nosso, tradução nossa).</p>	<p><u>Unidade empírica (UE):</u> U9.2 – Dúvida em relação a natureza do Calor “[...] todas [pesquisas realizadas anteriormente por ele] se referiram apenas a uma parte particular do circuito, deixando em dúvida essa questão sobre se o calor observado foi gerado ou foi somente transferido das bobinas [...]” (Joule, 1884, p. 123, grifo nosso, tradução nossa). <u>Unidade teórica correspondente (UT):</u> De acordo com Roller (1950), Fox (1971), Carmo (2000) e Medeiros (2009), um dos pressupostos básicos da teoria do calórico é de que o calor <i>não pode ser criado nem destruído</i>, sendo, portanto, conservado.</p>
<p><u>Unidade empírica (UE):</u> U10.10 – Calor como <i>movimento</i> “[...] o calor é considerado como um estado de movimento entre as partículas constituintes dos corpos [...]” (Joule, 1884, p. 186, grifo nosso, tradução nossa). <u>Unidade teórica correspondente (UT):</u> O calórico é uma substância material, sendo considerado um fluido elástico. De acordo com a teoria do calórico, os corpúsculos da matéria ordinária deveriam permanecer estáticos. O calor de um corpo estava associado à quantidade de calórico presente no corpo (Medeiros, 2009).</p>	<p><u>Unidade empírica (UE):</u> U24.1 – Princípio da Conservação “A quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água em um grau Fahrenheit de escala é igual, e podem ser convertidos em uma força mecânica capaz de levantar 838 libras para a altura perpendicular de um pé” (Joule, 1884, p. 301, tradução nossa). <u>Unidade teórica correspondente (UT):</u> A formulação do princípio de conservação da energia, principalmente o cálculo do equivalente mecânico do calor, segundo Roller (1950), Fox (1971) e Medeiros (2009) e, deram o golpe final na teoria do calórico.</p>

⁵ De acordo com o Quadro 1.

A unitarização encaminha o texto para a categorização. A categorização é um processo que busca comparar as unidades definidas durante o processo inicial da análise, reunindo os elementos semelhantes. As categorias são então constituídas dos conjuntos de elementos de significação próximos, o que leva a construção de diversos níveis de categorização (Moraes, 2003; Moraes & Galiuzzi, 2011). Corresponde, portanto, “[...] a uma organização, ordenamento e agrupamento de conjuntos de análise, sempre no sentido de conseguir expressar novas compreensões dos fenômenos investigados [...]” (Moraes & Galiuzzi, 2011, p. 74).

Existem três metodologias que podem ser utilizadas para obter as categorias: o método dedutivo, o método indutivo e o intuitivo. No método dedutivo as categorias são provenientes das teorias que servem de fundamento para a pesquisa, ou seja, são definidas *a priori*. No método indutivo, o pesquisador constrói as categorias de acordo com as análises que faz no *corpus*, resultando nas chamadas categorias emergentes. O método intuitivo, por sua vez, mistura os dois métodos anteriores, onde a indução auxilia no aperfeiçoamento da dedução. Assim, as categorias são originadas em momentos de inspiração, *insights*, e são possibilitadas pelo envolvimento intenso do pesquisador com o fenômeno investigado (Moraes, 2003; Moraes & Galiuzzi, 2011). Nesse trabalho, optamos pelo método dedutivo, definindo as categorias *a priori*, buscando encontrar nos trabalhos de Joule, unidades de significado que correspondam a essas categorias, visto que nosso objetivo é compreender em qual momento ele se encaixa em cada categoria e perceber, principalmente, o momento de transição entre estas. As categorias escolhidas a priori foram: **concepção de calor como substância; transição entre a concepção substancialista e a de calor como movimento e; concepção de calor como movimento.**

As categorias estabelecem os elementos de organização para os metatextos. Assim, a partir da categorização, serão produzidas “[...] as descrições e interpretações que comporão o exercício de expressar as novas compreensões possibilitadas pela análise” (Moraes & Galiuzzi, 2011, p. 23). A construção de metatextos expressam os significados e as compreensões originadas da análise, sendo toda a análise textual voltada à sua produção. Consiste em uma expressão, através da linguagem, das principais ideias que emergiram das análises e uma apresentação dos argumentos que foram construídos pelo pesquisador durante sua investigação, buscando comunicar aos demais as novas compreensões atingidas, sendo, portanto, construções e representações pessoais do pesquisador (Moraes & Galiuzzi, 2011). De fato, a qualidade dos textos produzidos depende não só de sua validade e confiabilidade, mas do pesquisador assumir-se como autor dos argumentos elaborados (Moraes, 2003). Assim, a ATD “[...] pode ser compreendida como um processo auto organizado de construção de novos significados em relação a determinados objetos de estudo, a partir de materiais textuais referentes a esses fenômenos [...]” (Moraes, 2003, p. 209).

Buscando compreender como ocorreram as modificações no conceito de calor para Joule, realizamos na sequência a análise dos seus artigos, utilizando como metodologia a Análise Textual Discursiva.

ANÁLISE DOS ARTIGOS DE JOULE A PARTIR DA ANÁLISE TEXTUAL DISCURSIVA

O objetivo da Análise Textual Discursiva é a produção de metatextos, com base no *corpus* do trabalho e nos produtos da análise (Moraes & Galiuzzi, 2011). Deste modo, “[...] uma vez construídas as categorias, estabelecem-se pontes entre elas, investigam-se possíveis sequências em que poderiam ser organizadas, sempre no sentido de expressar com maior clareza as novas intuições e compreensões atingidas [...]” (Moraes & Galiuzzi, 2011, p. 33).

A seguir apresentamos os três metatextos construídos a partir das análises dos artigos de Joule, organizados nas categorias: concepção substancialista do calor; período de transição entre as concepções de calor e; concepção de calor como movimento.

Concepção substancialista do calor

Durante grande parte do século XVIII, a teoria do calórico permaneceu hegemônica⁶ (Medeiros, 2009). De acordo com essa teoria, o calórico era considerado um fluido elástico, que não poderia ser criado

⁶ Apesar das variações existentes entre as concepções de calórico de Herman Boerhaave (1668-1738), Pieter van Musschenbroek (1692-1761), Joseph Black (1728-1799), William Cleghorn (1718-1754), William Irvine (1743-1787) e Adair Crawford (1748-1795), em 1760 a teoria do calórico já está bem consolidada, sendo possível definir os pressupostos básicos do calórico, de acordo com Carmo (2000), Medeiros (2009) e Gomes (2012): a) O calórico é uma substância material, sendo considerado um fluido elástico; b) não pode ser criado nem destruído, sendo, portanto, conservado; c) considera-se seu peso desprezível; d) suas partículas repelem-se fortemente.

nem destruído, havendo sempre uma conservação da sua quantidade. Segundo Queirós, Nardi e Delizoicov (2014), os fenômenos térmicos deveriam ser explicados conforme à presença e ação desse “fluido sutil”. Ao contrário da ideia simplista apresentada pelos livros didáticos, a teoria do calórico era capaz de explicar a maioria dos fenômenos relacionados ao aquecimento dos corpos, como a dilatação térmica, a mudança de fase e o calor radiante⁷ (Carmo, 2000; Medeiros, 2009; Gomes, 2012).

Ao analisar os primeiros trabalhos de Joule, percebemos que ele não se preocupava quanto à natureza do calor, ou seja, para ele não era um problema a ser pesquisado. Seu objetivo era a melhoria da eficiência dos motores elétricos (Valente, 1999; Queirós, Nardi & Delizoicov, 2014). Entretanto, ao descrever as análises dos experimentos até então realizados, ele utiliza termos da teoria do calórico que demonstram que ele conhecia e aceitava a teoria. Por exemplo, ao afirmar no artigo “*On the Heat Evolved during the Electrolysis of Water*”:

“[...] Por esse meio, o **calor torna-se ‘latente’** e uma reação na intensidade da bateria aparece sem a liberação de calor livre [...]” (Joule, 1884, p. 116, grifo nosso, tradução nossa).

“[...] Uma grande **transferência de calor latente**, [...], terá lugar a partir da bateria para a célula eletrolítica [...]” (Joule, 1884, p. 120, grifo nosso, tradução nossa).

Nessas citações, Joule utiliza o conceito de *calor latente* para explicar para onde foi o calor, visto que este não provocou um aumento na temperatura dos experimentos realizados, mas sim uma “separação” dos elementos da água no primeiro caso⁸. Dessa forma, utiliza pressupostos da teoria do calórico, a qual define *calor latente* como sendo o calórico que se encontra combinado as partículas da matéria comum, utilizado durante a mudança de fase e o *calórico livre* como sendo aquele percebido por nós por meio dos sentidos (Marcet, 1817; Gomes, 2012). Em outros artigos, Joule refere-se diretamente ao calórico:

“[...] Nós organizamos o aparato voltaico, e qualquer célula para eletrólise que incluirmos no circuito, o **calórico** de todo o circuito é exatamente representado pelo conjunto das transformações químicas [...]” (Joule, 1884, p. 119, grifo nosso, tradução nossa).

“A segunda correção [...] foi para o calor específico dos líquidos e recipientes que os contêm [...]. Seu **calórico** [do recipiente] era a décima segunda parte do contido em duas libras de água [...]” (Joule, 1884, p. 66, grifo nosso, tradução nossa).

“[...] Seria curioso verificar se a mesma **quantidade de calórico** seria desenvolvida pela condensação mecânica de oito grãos de gás oxigênio” (Joule, 1884, p. 118, grifo nosso, tradução nossa).

Além disso, expressões como calor “cedido”, “absorvido”, “recebido”, “adquirido”, “perdido”, “liberado” e “transferência” remetem a teoria substancialista do calor, que consideram o mesmo como um fluido sutil, que deveria ser conservado, não sendo possível criá-lo ou destruí-lo, de tal forma que a transferência de calor entre dois corpos era compreendida como sendo um fluxo dessa “substância” entre eles (Medeiros, 2009), ideias apresentadas de forma corriqueira nos trabalhos dos adeptos da teoria substancial do calor, como Black (1803 apud Roller, 1950) e Marcet (1817), – termos encontrados nos primeiros trabalhos de Joule quando o mesmo analisa os experimentos realizados:

“[...] Assim que o ligeiro **calor adquirido** durante o experimento anterior foi igualmente difundido através do dispositivo, o termômetro colocado no ácido

Contudo são atraídas pelas partículas da matéria ordinária, com diferentes intensidades, de acordo com a substância e o estado de agregação que se encontra; e) o calórico pode ser *sensível*, propagando-se através do corpo por meio das partes vazias e, devido a atração entre suas partículas e a matéria ordinária, permanecendo como uma “capa” em torno das partículas da matéria ordinária; f) o calórico pode ser *latente*, combinando-se com as partículas da matéria ordinária de modo análogo ao que acontece nas combinações químicas, devido as partículas atrativas.

⁷ Calor radiante, segundo Medeiros (2009, p. 12), “[...] foi um conceito introduzido justamente pelos caloristas para que pudesse dar conta das dificuldades de explicar como o calor poderia propagar-se no vácuo. Na ausência da matéria comum as partículas do calórico se auto-repeliem, e o fluido do calor era então liberado e viajava através do vácuo [...]”.

⁸ Segundo Marcet (1817, p. 134, tradução nossa), *calor latente* é, de acordo com a teoria do calórico, “[...] a porção do calórico insensível que é empregue na mudança de estado dos corpos; isto é, na conversão de sólidos em líquidos, ou líquidos em vapor. Quando um corpo altera o seu estado de sólido para líquido, ou de líquido para vapor, a sua expansão ocasiona um aumento súbito e considerável da capacidade de calor, em consequência, ele absorve imediatamente uma quantidade de calórico, o qual se torna fixada no corpo que é transformado; e, como é perfeitamente escondido dos nossos sentidos, obteve o nome de calor latente”.

sulfúrico diluído ficou em 51,95°, e a temperatura do ar sendo 52,4° [...]” (Joule, 1884, p. 71, grifo nosso, tradução nossa).

*“[...] Depois de um curto intervalo de tempo que o índice [do aparelho] havia cessado de vibrar, começou a avançar gradualmente em consequência da expansão da barra pelo **calor**, o qual foi **irradiado** a partir da bobina [...]” (Joule, 1884, p. 49, grifo nosso, tradução nossa).*

*“[...] **O calor, contudo, liberado** no caso de eletrólise [...]” (Joule, 1884, p.109, grifo nosso, tradução nossa).*

*“[...] **as quantidades de calor liberadas ou absorvidas** durante a condensação ou rarefação do ar atmosférico [...]” (Joule, 1884, p. 171, grifo nosso, tradução nossa).*

De fato, a utilização dos termos quantidade de calor, calor específico e calor irradiado, entre outros vocábulos, apontam para a existência de concepções teóricas caloristas arraigadas. Concepções talvez desenvolvidas devido aos estudos realizados com Dalton, já que este, de acordo com Cardwell (1989), era adepto da teoria substancialista do calor.

Em seus primeiros trabalhos Joule não estava preocupado com a natureza do calor, seu objetivo era a melhoria da eficiência dos motores elétricos (Joule 1884; Queirós, Nardi & Delizoicov, 2014). Talvez por isso não deixe claro suas convicções e não esteja preocupado com os termos empregados nos artigos. Ao longo de suas pesquisas, não demora a perceber que o desempenho dos motores elétricos deveria envolver um estudo da produção de calor nos circuitos elétricos – o qual começa a se questionar se o calor estaria sendo criado ou apenas transferido nos circuitos.

Período de transição entre as concepções de calor

No final do século XVIII, as dúvidas lançadas a respeito da natureza substancialista do calor com os trabalhos de Rumford e a pesquisa de Humphry Davy não foram suficientes para que a comunidade científica aceitasse a teoria dinâmica do calor (Martins, 1984; Cardwell, 1989). A compreensão da conservação da energia e, principalmente, o cálculo do equivalente mecânico do calor, realizado por Mayer e Joule, é considerado um dos principais fatores que levaram a uma mudança gradual na concepção de calor adotada, substituindo a ideia de conservação do calórico (Brown, 1949; Roller, 1950; Fox, 1971; Brush, 1988; Medeiros, 2009). Entretanto, o que leva Joule a compreender a existência de uma relação *constante* entre trabalho e calor?

Joule busca, em seus primeiros trabalhos, realizar melhorias nos motores magneto-elétricos. Acreditava que esses motores seriam capazes de substituir as máquinas a vapor, desde que aprimorassem seu rendimento, o qual era obtido pela relação entre o trabalho desenvolvido e a quantidade de combustível consumido – no caso do motor à vapor, o carvão era o combustível comumente utilizado e nos motores eletromagnéticos, utilizava-se zinco. Nessa investigação, Joule percebe que há uma produção de calor associada ao funcionamento do motor eletromagnético, de modo que para compreender o desempenho dos motores elétricos é necessário analisar o aparecimento de calor nestes (Joule, 1884; Cardwell, 1989; Gomes, 2012; Queirós, 2012). Partindo desse pressuposto, apresenta no artigo “*On the Production of Heat by Voltaic Electricity*”:

*“[...] à investigação da causa dos diferentes graus de facilidade com que vários tipos de metal, de tamanhos diferentes, são **aquecidos** pela passagem de eletricidade voltaica [...]” (Joule, 1884, p. 59, grifo nosso, tradução nossa).*

*“[...] A conclusão de que ele se baseia em resultados de seus experimentos é, que os **efeitos caloríficos** de iguais quantidades de eletricidade transmitidas são proporcionais à resistência oposta à sua passagem, seja qual for o comprimento, a espessura, a forma ou tipo de metal que fecha o circuito [...]” (Joule, 1884, p. 59-60, grifo nosso, tradução nossa).*

Afirma, portanto, que o calor gerado ao atravessar pelo fio uma corrente elétrica é diretamente proporcional à resistência do fio e ao quadrado da corrente aplicada – primeiro estudo qualitativo do que nós conhecemos atualmente por “efeito Joule”. Finaliza o artigo indicando que esse aquecimento do circuito era inevitável e estava diretamente relacionado a um desperdício de zinco na bateria (Joule, 1884; Cardwell, 1989; Gomes, 2012; Queirós, 2012).

Dando sequência, no trabalho “*On a New Class of Magnetic Forces*”, Joule apresenta uma relação entre o rendimento dos motores elétricos e das máquinas a vapor:

“Com meu aparato cada libra de zinco consumida na bateria de Grove⁹ produzia uma força mecânica (incluindo o atrito) igual a levantar um peso de 331.400 libras à altura de um pé, quando os ímãs giratórios foram movidos à velocidade de 8 pés por segundo” (Joule, 1884, p. 47-48, tradução nossa).

De acordo com Kuhn (2011b), ao investigar “quanto peso cada uma dessas máquinas seria capaz erguer, a uma mesma distância, com um determinado gasto de carvão ou zinco?”, Joule põe em questão os processos de equivalência, que posteriormente o levaram a obtenção de uma relação direta entre calor e trabalho.

Buscando construir motores eletromagnéticos mais eficientes, Joule procura analisar porque uma barra de ferro aumenta seu comprimento quando sujeita à influência magnética. Analisa dois possíveis modelos de átomos de ferro para explicar o magnetismo. O primeiro deles é o modelo sugerido por Ampère, no qual existiam “atmosfera” de eletricidade ao redor do átomo de ferro, que orbitam em um eixo perpendicular ao ímã, sendo os fenômenos do magnetismo devido a atração e a repulsão das correntes de eletricidade. Entretanto, Joule argumenta que, apesar dessa teoria fornecer subsídios para diversos fenômenos magnéticos, não é capaz de explicar os ímãs permanentes, pois seria necessário supor a existência de um movimento por tempo indefinido para manter a barra magnetizada. Adota, portanto, uma teoria modificada de Aepinus, considerando que, além da atmosfera de eletricidade, ao redor do átomo existe também uma atmosfera de magnetismo e que o espaço entre os átomos é preenchido com “éter calorífico” em um estado de vibração (Joule, 1884; Cardwell, 1989). De acordo com ele:

“[...] Essa vibração é chamada de calor, e seu aumento certamente em violência e extensão ocorre com o aumento da temperatura da barra” (Joule, 1884, p. 53, grifo nosso, tradução nossa).

Dessa forma, esclarece o problema do aumento do comprimento da barra argumentando que todo o magnetismo se acumula em um dos lados da barra, tornando-a saturada (Joule, 1884). Poderíamos ser levados a crer que Joule nesse momento já acreditava em uma teoria dinâmica do calor. Entretanto, conforme aponta Cardwell (1989, p. 294, tradução nossa), “[...] *ele não era o único a conservar a ideia de fluidos sutis e etéreos como substrato universal da luz, calor, eletricidade e magnetismo* [...]”. Assim, apesar de questionar a natureza da eletricidade e conseqüentemente a natureza do calor, percebe-se ao longo dos textos que ainda não estava totalmente afastado das concepções substancialistas.

No artigo “*On the Heat Evolved by Metallic Conductors of Electricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis*”, procura melhor investigar a relação entre calor e eletricidade (Cardwell, 1989; Queirós, 2012):

“[...] Há poucos fatos na ciência mais interessantes que aqueles que estabelecem uma conexão entre o calor e a eletricidade. Realmente, o valor deles não pode ser estimado corretamente, até que obtenhamos um completo conhecimento dos principais agentes sobre os quais eles lançam tanta luz [...]” (Joule, 1884, p. 60, grifo nosso, tradução nossa).

“É bem conhecido que a facilidade com que um fio metálico é aquecido pela corrente voltaica é inversamente proporcional à sua condução de potência, e acredita-se geralmente que essa proporção é exata. No entanto, gostaria de conhecer o fato para minha própria satisfação e, especialmente, como era de extrema importância saber se a resistência à condução é a única causa dos efeitos do aquecimento [...]” (Joule, 1884, p. 60, grifo nosso, tradução nossa).

A questão que surge: “será a resistência a passagem da corrente a única causa dos efeitos de aquecimento?” A partir dos trabalhos experimentais e das indagações teóricas, evidencia que Joule começa a se questionar sobre a natureza do calor e sua origem. Realiza diversos experimentos no qual busca examinar os efeitos caloríficos nos diferentes circuitos, examinando os parâmetros dos quais estes efeitos dependem e não se preocupando com as quantidades absolutas de calor (Joule, 1884; Valente, 1999; Gomes,

⁹ A bateria de Grove foi desenvolvida em 1844, por William Robert Grove. Esta era formada por um cátodo de platina imerso em ácido nítrico e um ânodo de zinco imerso em ácido sulfúrico, separadas por uma placa de barro poroso. A corrente gerada era mais elevada que a produzida na pilha de Daniell e com quase o dobro de tensão (Ribeiro, 2010).

2012). Ao investigar a oxidação do zinco, percebe que a bateria aquece menos quando há corrente elétrica do que quando a mesma quantidade de zinco oxida sem gerar corrente. Segundo ele, uma parte do calor desenvolvido na bateria parecia ser transportada pela corrente para aos fios. Contudo, ao verificar a corrente elétrica que foi produzida pela rotação de uma bobina de fio de cobre entre os polos de um ímã, sem ter nenhuma ligação com uma bateria, foi possível observar o aparecimento de calor nos fios. Consequentemente, Joule começa a compreender que **o calor era gerado durante a passagem de corrente elétrica, e não apenas transportado de um lugar para outro**, conforme os caloristas alegavam (Gomes, 2012). Partindo dos pressupostos da teoria do calórico, sua conclusão manifesta que não é possível que haja uma *conservação do calórico*, pois o calor poderia ser *criado*, de acordo com sua observação experimental. Isso coloca-o em dúvida sobre a natureza do calor. Essa incerteza é encontrada em vários artigos, nos quais Joule utiliza diversas vezes as expressões “calor produzido”, “desenvolvido”, “gerado”:

“[...] o **calor produzido** pela combustão do zinco em oxigênio é também em consequência da resistência à condutividade elétrica” (Joule, 1884, p. 60, grifo nosso, tradução nossa).

“[...] [todos os resultados obtidos] conspiram para confirmar o fato que quando uma determinada quantidade de eletricidade voltaica passa por um condutor metálico por um determinado tempo, a **quantidade de calor produzida** por este é sempre proporcional à resistência que ele apresenta, qualquer que seja o comprimento, espessura, forma ou tipo deste condutor metálico” (Joule, 1884, p. 64, grifo nosso, tradução nossa).

“[...] quando uma corrente de eletricidade voltaica é propagada ao longo um condutor metálico, **o calor desenvolvido num determinado tempo é proporcional à resistência do condutor** multiplicada pelo quadrado da intensidade elétrica” (Joule, 1841, p. 65, grifo nosso, tradução nossa).

“[...] o **calor que é gerado** em um dado tempo em qualquer par, por uma verdadeira ação voltaica, é proporcional a resistência à condução do referido par, multiplicado pelo quadrado da intensidade da corrente” (Joule, 1884, p. 72, grifo nosso, tradução nossa).

Em 1843, Joule publica o artigo “*On the Calorific Effects of Magneto-Electricity, and on the Mechanical Value of Heat*”, no qual investiga a convertibilidade entre calor e trabalho e realiza alguns experimentos quantitativos para encontrar o valor mecânico do calor (Valente, 1999; Gomes, 2012). Inicialmente questiona:

“[...] quando consideramos o calor não como uma substância, mas como um estado de vibração, parece não haver nenhuma razão para que ele não deva ser induzido por uma ação de caráter simplesmente mecânico tal como, por exemplo, se apresenta na revolução de uma bobina de fio perante os polos de um ímã permanente [...]” (Joule, 1884, p. 123, tradução nossa).

“[...] todas [as experiências realizadas até então] se referiram apenas a uma parte particular do circuito, deixando em dúvida essa questão sobre se **o calor observado foi gerado ou foi somente transferido das bobinas na qual a magneto-eletricidade era induzida** [...]” (Joule, 1884, p. 123, grifo nosso, tradução nossa).

Joule demonstra, portanto, estar interessado em investigar a natureza do calor, buscando evidências experimentais para compreender se o calor estava sendo *gerado*, o que seria um argumento contra a teoria do calórico, ou se o calor estava sendo *transferido* de alguma parte do circuito que ele não havia especulado, sendo esta a suposição dos caloristas. Ao estudar o calor que surge nos fenômenos eletromagnéticos, determina que o calor é produzido nas situações experimentais:

“[...] o calor **produzido** por uma barra de ferro girando entre dois polos de um ímã é proporcional ao quadrado da força induzida¹⁰ [...]” (Joule, 1884, p. 136, grifo nosso, tradução nossa).

¹⁰ Joule refere-se a força que é induzida pela bobina de uma máquina magneto-elétrica, devido a rotação do eletroímã.

*“[...] o calor **desenvolvido** pela bobina da máquina magneto-elétrica é proporcional (caeteris paribus) ao quadrado da corrente” (Joule, 1884, p. 137, grifo nosso, tradução nossa).*

Assim, ao analisar seus resultados, conclui que o calor gerado na bobina de uma máquina magneto-elétrica é proporcional ao quadrado da corrente elétrica que a atravessa e argumenta que o calor produzido na bobina e o calor desenvolvido nos dispositivos voltaicos são regidos pelos mesmos princípios (Joule, 1884; Martins, 1984; Gomes, 2012). De fato, acredita que:

“[...] o eletromagnetismo é um agente capaz de, por meios mecânicos simples, destruir ou gerar calor [...]” (Joule, 1884, p. 146, tradução nossa).

“[...] o aumento ou a diminuição dos efeitos químicos que acontecem na bateria durante um determinado tempo é proporcional ao efeito magneto-elétrico e o calor produzido sempre é proporcional ao quadrado da corrente; então o calor devido a uma determinada ação química é sujeita a um aumento ou uma diminuição diretamente proporcional à intensidade da magneto-eletricidade auxiliando ou se opondo à corrente voltaica” (Joule, 1884, p. 145-146, tradução nossa).

Joule defende que até mesmo nos processos químicos o calor gerado era devido a eletricidade, em virtude da passagem de corrente elétrica. Apesar dessas considerações, ele não explica como é produzido uma “resistência” à corrente. A relação entre calor e eletricidade ainda era inexplicável: uma operação “invisível” da resistência à condução da eletricidade desenvolvia uma certa quantidade de calor (Joule, 1884; Queirós, 2012). Esse conjunto de pesquisas e experimentos acerca da resistência elétrica leva-o a compreender que é possível haver uma convertibilidade entre as várias “forças”:

*“Tendo provado que **o calor é gerado por uma máquina magneto-elétrica** e que por meio da força magnética indutiva nós podemos diminuir ou aumentar à vontade o calor devido às transformações químicas, isto se tornou um objeto de grande interesse ao indagar se **existe uma relação constante entre isto e a força mecânica ganha ou perdida** [...]” (Joule, 1884, p. 149, grifo nosso, tradução nossa).*

Busca então determinar uma relação *constante* entre força mecânica e calor. Realiza um conjunto de experiências, contudo, os valores obtidos apresentavam discrepâncias, o que não corroborava com sua ideia de valor constante. Apesar disso, Joule acredita que estes erros estão relacionados a problemas experimentais (Joule, 1884; Martins, 1984). Entretanto, adota como valor a média dos resultados obtidos nas treze experiências realizadas:

“A quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água em um grau na escala Fahrenheit é igual a, e pode ser convertido em uma força mecânica capaz de elevar 838 libras a uma altura perpendicular de um pé” (Joule, 1884, p. 156, tradução nossa).

Retoma seu problema inicial da eficiência do motor elétrico, justificando que este nunca substituirá a máquina a vapor, visto que é praticamente impossível converter mais da metade do calor gerado no circuito em potência mecânica útil (Joule, 1884). Ao discutir sobre a natureza do calor, Joule relaciona seus trabalhos ao de Rumford, sobre a fricção dos canhões:

“[...] Seremos obrigados a admitir que o conde Rumford estava certo em atribuir o calor desenvolvido na fricção do canhão ao atrito, e não (em qualquer grau considerável) a qualquer alteração da capacidade do metal [...]” (Joule, 1884, p. 157, tradução nossa).

Conde Rumford havia realizado experimentos para compreender a produção de calor durante a perfuração dos canhões. Inicialmente adepto da teoria substancialista, acreditava a princípio que o calor estava sendo transferido das lascas metálicas resultantes da fricção (Roller, 1950; Fox, 1971; Gomes, 2012). Se o calórico fosse liberado no experimento, conforme defendiam os caloristas, em um determinado momento todo o calórico seria esgotado. Entretanto, Rumford percebe que o atrito entre a broca e o tubo de canhão poderia gerar calor inesgotavelmente (Roller, 1950; Passos, 2009; Gomes, 2012). Dessa forma, a partir de seus estudos, ele conclui que um corpo não pode ser capaz de fornecer ilimitadamente uma substância material. Portanto, o calor deveria ser proveniente do *movimento* das partículas dos materiais que se atritavam (Thompson *apud* Roller, 1950; Medeiros, 2009). Esse conhecimento e compreensão dos trabalhos de

Rumford é um importante passo para Joule desenvolver sua teoria a respeito do calor, ao considerar o calor como uma forma de movimento.

Buscando comprovar as ideias de Rumford e obter o valor do equivalente mecânico, realiza um experimento de fricção pela passagem de água em tubos estreitos para verificar a produção de calor (Joule, 1884; Queirós, 2012). Na sequência, justifica sua busca pela relação constante e sua rejeição à teoria do calórico:

*“[...] Eu não perderei tempo repetindo e estendendo estas experiências, estando satisfeito com o fato de que os agentes principais da natureza serem, pela ordem do Criador, indestrutíveis; e que **onde quer que a força mecânica seja gasta, um exato equivalente de calor sempre será obtido**” (Joule, 1884, p. 157-158, grifo nosso, tradução nossa).*

Sendo assim, Joule considerava que os agentes principais da natureza não poderiam ser criados nem destruídos, o que contrariava a teoria do calórico, na qual a força mecânica poderia ser gasta ou perdida, defendendo uma destrutibilidade das forças mecânicas. Ao analisar a origem do calor animal, a partir da fricção do sangue nas veias e artérias, compreende que é necessário modificar sua teoria que relaciona a eletricidade ao calor, visto que não era possível considerar a eletricidade produzida por afinidade química como o “operador fundamental da natureza”, visto que ao analisar a geração de calor por atrito, percebe-se que a afinidade química não interfere (Queirós, 2012). Apresenta uma nova teoria:

“[...] eu antes tinha me esforçado para provar que quando dois átomos se combinam, o calor desenvolvido é exatamente o que teria sido desenvolvido pela corrente elétrica, devido à ação química que ocorre e é, por conseguinte, proporcional à intensidade da força química causada pela combinação dos átomos. Agora me atrevo a explicitar a situação, que não é exatamente a atração de afinidade, mas sim, a força mecânica despendida pelos átomos caindo em relação uns aos outros que determina a intensidade da corrente e, conseqüentemente, a quantidade de calor desenvolvido; de modo que temos uma hipótese simples pela qual podemos explicar por que o calor é desenvolvido tão livremente na combinação de gases, e por que, na realidade, podemos explicar o “calor latente” como uma força mecânica preparada para a ação como uma mola de relógio quando acaba [...]” (Joule, 1884, p. 158-159, tradução nossa).

Essa tentativa serviu apenas para complicar ainda mais sua teoria sobre o calor desenvolvido, ao apresentar uma conexão indireta entre eletricidade e afinidade química. Entretanto, Joule mostra-se convencido de que uma correta compreensão da natureza do calor possibilitaria uma unificação das explicações de inúmeros fenômenos que envolvem os agentes da natureza (Queirós, 2012). Em 1844, escreve uma nota na qual discute os problemas da teoria substancialista do calor, apresentando uma discussão dos fenômenos a partir de suas hipóteses:

*“Existem diversos fenômenos que não podem ser explicados pela teoria que reconhece calor como uma substância; e existem vários que, embora, por vezes, apresentados como objeções à teoria triunfante, tendem, quando devidamente considerados, apenas confirmá-la. O calor de fluidez, muito naturalmente pode ser considerado como o momento ou força mecânica necessária para superar a agregação das partículas no estado sólido. O calor de vaporização pode ser considerado em parte como a força mecânica necessária para superar a condição de agregação dos átomos no estado líquido e, em parte, como o requisito para superar a pressão atmosférica. Mais uma vez, o calor de combinação é apenas a manifestação, sob outra forma, da força mecânica com o qual se combinam átomos. Por outro lado, os fenômenos de eletrólise pela bateria voltaica nos dão uma prova positiva de que a força mecânica da corrente é necessária para obter a decomposição de um eletrólito no equivalente do calor devido à recombinação dos elementos. Assim, **parece que a eletricidade é um grande agente para a conversão de calor e as outras formas de força mecânica umas nas outras**” (Joule, 1844, p. 121-122, grifo nosso, tradução nossa).*

Para Joule, o elemento unificador era a eletricidade, capaz de converter calor em força mecânica. Utiliza das ideias de Faraday, defendendo que cada átomo possui uma quantidade absoluta de eletricidade e esclarece sua nova explicação para o calor:

“[...] Partindo da descoberta de Faraday, de que cada átomo está associado com a mesma quantidade absoluta de eletricidade, presumo que estas atmosferas de eletricidade giram com enorme rapidez em torno de seus respectivos átomos; e que a dinâmica da atmosfera constitui um “calórico”, enquanto a velocidade de suas circunferências exteriores determina a temperatura [...]” (Joule, 1884, p. 122, tradução nossa).

Desse modo, Joule modifica seu modelo de átomo no qual as atmosferas de eletricidade orbitam a matéria, compreendendo calor como consequência do movimento das atmosferas de eletricidade. Segue buscando determinar um valor exato para o equivalente mecânico do calor, desenvolvendo experiências “mais simples”, a fim de obter valores mais precisos, desprezando a ideia de que é possível haver desaparecimento do efeito mecânico (Valente, 1999; Gomes, 2012; Queirós, 2012).

Dessa forma, publica, em 1845, o artigo *“On the Changes of Temperature produced by the Rarefaction and Condensation of Air”*. Neste trabalho, utiliza os dados experimentais de Dalton, o qual verificou que quando o ar é comprimido à metade de seu volume inicial, são produzidos 50° de calor aproximadamente, enquanto que na rarefação deste mesmo volume, são absorvidos 50° (Joule, 1884). Joule procura investigar as mudanças que ocorrem na temperatura dos gases durante a compressão e a dilatação, chegando à conclusão de que o trabalho utilizado na compressão de um gás é totalmente convertido em calor (Cardwell, 1989; Joule, 1884). Examinando os resultados obtidos, estabelece que quando o ar se expande sem aplicação de uma força mecânica, não ocorre uma mudança na temperatura.

Os valores obtidos para o equivalente mecânico neste artigo foram: 823, 795, 820, 814 e 760 libras levantadas à altura de um pé. No final do artigo, argumenta a favor da teoria dinâmica do calor:

*“Estes resultados [experimentos realizados sobre a rarefação e a condensação do ar] são inexplicáveis se o calor for uma substância [...]. O calor é considerado como um **estado de movimento entre as partículas constituintes dos corpos**” (Joule, 1884, p. 186, grifo nosso, tradução nossa).*

Essa mudança de concepção a respeito da natureza do calor deve-se ao estudo de seus antecessores, realizado durante os anos de 1843 e 1844. Ao longo de seus artigos, Joule utiliza pressupostos da teoria de Ampère, Faraday, Black, Rumford, Davy, entre outros, utilizando-os a favor da sua compreensão da natureza do calor, de modo a completar seus argumentos e confirmar suas hipóteses (Cardwell, 1989; Queirós, 2012). Isso é evidenciado no seguinte trecho do artigo, no qual argumenta que experimentos descritos neste artigo constituem:

*“[...] um poderoso argumento **em favor da teoria dinâmica do calor**, que se originou com Bacon, Newton e Boyle, e em um período posterior, foi tão bem apoiada pelas experiências de Rumford, Davy e Forbes [...]” (Joule, 1884, p. 187, grifo nosso, tradução nossa).*

Examinando os trabalhos de Clayperon e Carnot, os quais defendem que a força mecânica da máquina a vapor surge durante a passagem de calor de um corpo quente para um frio, não havendo nenhuma perda de calor durante esse processo de transferência, Joule argumenta que esta teoria se opõe aos princípios filosóficos porque considera uma possível destruição da *vis viva* no aparelho (Joule, 1884; Cardwell, 1989). De acordo com ele:

*“**Acreditando que o poder de destruir pertence somente ao Criador, concordo inteiramente com Roget e Faraday na opinião de que qualquer teoria que, quando realizada, exige a aniquilação da força, é necessariamente errônea.** Porém, os princípios que eu tenho desenvolvido neste artigo estão isentos desta dificuldade. Deles nós podemos deduzir que **o vapor, enquanto expande no cilindro, perde calor em quantidade exatamente proporcional à força mecânica comunicada por meio do pistão; e que, na condensação do vapor, o calor assim convertido em potência não pode retornar de novo.** Supondo nenhuma perda de calor através de radiação, etc., a teoria aqui desenvolvida demanda que o calor emitido para fora no condensador seja menor do que o comunicado pela caldeira do forno, na proporção exata para o equivalente mecânico de potência desenvolvido” (Joule, 1884, p. 189, grifo nosso, tradução nossa).*

Até o presente momento, todos os seus trabalhos apresentam uma incerteza com relação a natureza do calor, pois o levavam a crer que não era possível o calor ser uma substância, aproximando-o da teoria

dinâmica. As experiências que demonstraram que o calor era produzido pela passagem da corrente conduziram Joule a reflexões sobre a origem deste, propiciando uma gradual mudança de concepção. O processo de aperfeiçoamento dos trabalhos experimentais e o estudo dos trabalhos já realizados pelos demais pesquisadores propiciaram um desenvolvimento da pesquisa sobre o equivalente mecânico do calor, reforçando sua teoria dinâmica do calor (Queirós, 2012).

Teoria dinâmica do calor

Convencido de que há uma relação constante entre calor e força mecânica, Joule apresenta em 1845 uma nova determinação para o equivalente mecânico, descrevendo sua experiência mais conhecida, a de agitação da água por meio de pás (Gomes, 2012). Seu relatório foi recebido com indiferença pelos membros da *Royal Society*, entretanto, a formulação deste experimento representava um avanço teórico em sua pesquisa (Queirós, 2012).

Mesmo com esse novo aparato, ainda não obtém um valor exato devido a influência do ambiente, que afetava consideravelmente as medidas da temperatura, visto que as variações eram decimais (Sibum & Morel, 1998; Queirós, 2012). Entretanto, mostra-se convicto que a existência dessa relação já está provada, após os valores obtidos nos experimentos com as máquinas magneto-elétricas; o deduzido a partir da rarefação do ar; e determinado a partir de experimentos sobre o movimento da água através de tubos estreitos. De acordo com Joule (1884, p. 204, tradução nossa), é possível concluir que:

“[...] a existência de uma relação equivalente entre o calor e as formas habituais de força mecânica está provada; e assumimos 817 libras, como a média dos resultados das três classes distintas de experiências, sobre o equivalente, até que experiências mais precisas sejam realizadas”.

*“Quaisquer dos senhores leitores que são tão afortunados por residirem na paisagem romântica do País de Gales ou da Escócia podem, não duvido, confirmar minhas experiências testando a temperatura da água no topo e no fundo de uma cachoeira. Se minhas visões estão corretas, **uma queda de 817 pés deverá, com certeza, gerar um grau de calor**, e a temperatura do rio de Niágara será elevada aproximadamente um quinto de um grau por sua queda de 160 pés”* (Joule, 1884, p. 204, grifo nosso, tradução nossa).

Apesar disso, os adeptos da teoria do calórico não levaram em consideração o argumento de Joule de que o calor havia sido gerado nos experimentos em uma quantidade exatamente proporcional as "perdas" da força mecânica. Mantinham a posição de que o calor estava sendo apenas transferido para o sistema, sem, contudo, serem capazes de identificar a fonte. Argumentavam que as diferenças nos valores obtidos para o equivalente estavam relacionadas as diferenças nas fontes que transferiam o calor (Queirós, 2012).

Buscando prosseguir suas pesquisas, adota o método da agitação das pás, devido a sua simplicidade teórica para determinar a relação entre calor e movimento, além de estar menos sujeito às objeções do que os outros métodos já utilizados e ser passível de reprodução utilizando outros materiais, além da água (Cardwell, 1989; Gomes, 2012). É interessante observar que a essa altura, já estava claro em sua mente a ideia de conversão e conservação:

“[...] é óbvio que a vis viva das partículas de uma libra de água (digamos) a 51° é igual à vis viva possuída por uma libra de água a 50° mais a vis viva que seria adquirida por um peso de 817 libras depois de cair através da altura perpendicular de um pé” (Joule, 1845, p. 204, tradução nossa).

Essa constatação não é trivial dentro de seu contexto. Sua crença no princípio de convertibilidade das forças possibilita o estudo do princípio de conservação da energia, impulsionando-o a aperfeiçoar seu procedimento experimental (Queirós, 2012).

Em 1847, no artigo *“On Matter, Living Force, and Heat”*, Joule descreve de forma mais ampla e coerente o princípio geral da conservação da energia, de suma importância para a compreensão da convertibilidade das forças. Até o presente momento, boa parte de seus artigos se referiam a problemas específicos, apesar de seu interesse em generalizar suas ideias (Gomes, 2012; Queirós, 2012). Nesse trabalho, encontramos seu embasamento teórico, no qual avança em sua compreensão sobre a natureza do calor. Joule (1884, p. 265, tradução nossa) inicia investigando as propriedades que caracterizam uma substância:

“Em nossa noção de matéria duas ideias são geralmente incluídas, nomeadamente os de impenetrabilidade e extensão. Pela extensão da matéria entende-se o espaço que ela ocupa; por sua impenetrabilidade queremos dizer que dois corpos não podem existir ao mesmo tempo e no mesmo local [...]. Se concebermos a impenetrabilidade e extensão temos a ideia da matéria e da matéria somente”.

Essa compreensão favorecerá a argumentação de Joule contra a natureza substancialista do calor. Mas, antes de avançar nesse aspecto, apresenta outras propriedades da matéria. De acordo com ele:

*“Além da força da gravidade, há uma outra propriedade muito notável apresentada em igual grau por todo o tipo de matéria – a perseverança em qualquer condição, seja de repouso ou de movimento na qual pode ser colocada. Essa faculdade recebeu o nome de inércia, significando passividade, ou a incapacidade de qualquer coisa mudar seu próprio estado. É em consequência dessa propriedade que **um corpo em repouso não pode ser colocado em movimento sem a aplicação de certa quantidade de força nele, e também que, uma vez que o corpo foi colocado em movimento ele nunca irá parar por si mesmo, mas continuará a se mover para frente, em linha reta, com uma velocidade uniforme, até atuar outra força, a qual, se aplicada contrária à direção do movimento irá retardá-lo, se na mesma direção irá acelerá-lo, e se lateralmente causará o movimento em uma direção curva.** No caso em que a força é aplicada na direção contrária, mas em grau igual ao que o colocou em movimento, ele será inteiramente privado de qualquer movimento, pode ter decorrido qualquer tempo desde o primeiro impulso, e qualquer que seja a distância que o corpo possa ter viajado” (Joule, 1884, p. 266, grifo nosso, tradução nossa).*

As considerações feitas sobre a *inércia* estão corretas de acordo com a mecânica newtoniana, se desprezarmos o atrito (Gomes, 2012). De fato, é necessário aplicar uma força de igual intensidade para que o corpo entre em repouso. Entretanto, na continuação do artigo, Joule mostra-se interessado em analisar a *vis viva*:

*“A partir destes fatos, é evidente que a força empregada para colocar um corpo em movimento é carregada pelo próprio corpo, e existe com ele e nele, ao longo de todo o percurso de seu movimento. **Esta força possuída pelos corpos em movimento é denominada pelos filósofos mecânicos de vis viva ou força viva.** O termo pode ser considerado por alguns inadequado, já que não há vida, propriamente falando, mas é útil, a fim de distinguir a força motriz da que é estacionária em sua natureza, tal como a força da gravidade. Quando, portanto, nas partes subsequentes desta conferência eu empregar o termo força viva, vocês entenderão que eu simplesmente quero dizer a força dos corpos em movimento. A força viva dos corpos é regulada pelo seu peso e pela velocidade de seu movimento. Vocês facilmente entenderão que, se um corpo de certo peso possui certa quantidade de força viva, duas vezes mais força viva será possuída por um corpo com o dobro do peso, desde que ambos os corpos se movam com a mesma velocidade [...]” (Joule, 1884, p. 266-267, grifo nosso, tradução nossa).*

Percebe-se um avanço na compreensão da conservação da *“vis viva”*, ao afirmar que a *“força”* aplicada sobre um corpo para iniciar o movimento não deixa de existir, é transformada em *“força viva”*, permanecendo com o corpo durante o movimento (Gomes, 2012). Joule compreende a *“força viva”* como uma relação entre seu *“peso”*¹¹ e sua velocidade, de modo que a força exercida sobre um corpo é proporcional ao quadrado de sua velocidade (Joule, 1884).

Segundo ele, existem algumas formas de um corpo ser dotado de *“força viva”*: pode ser transferida entre os corpos durante uma colisão perfeitamente elástica, ou ainda, pode ser produzida por meio da ação gravitacional, ao soltar uma bola de certa altura, por exemplo, esta adquire uma *“força viva”* proporcional a seu peso e à altura que caiu, assim como quando uma mola é comprimida, a ela é comunicado uma certa quantidade de *“força viva”*. Após essas considerações, argumenta sobre a conservação da *“vis viva”*:

*“Vocês logo perceberão que a força viva que estamos falando é uma das qualidades mais importantes com que a matéria pode ser dotada, e, como tal, **seria um***

¹¹ Joule compreendia a diferença entre quantidade de matéria e peso. Entretanto, como está foi uma palestra proferida publicamente, Gomes (2012) acredita que o mesmo utilizou o termo *“peso”* para facilitar a compreensão dos ouvintes.

absurdo supor que ela pode ser destruída, ou mesmo diminuída, sem produzir o equivalente de atração ao longo de uma determinada distância da qual temos falado. Vocês, portanto, serão surpreendidos ao saber que até muito recentemente, a opinião universal tem sido de que a força viva pode ser absolutamente e irrevogavelmente destruída por opção de qualquer um. Deste modo, quando um peso cai para o chão, foi geralmente suposto que sua força viva foi absolutamente aniquilada, e que o trabalho que pode ter sido gasto para elevá-lo até a altura que caiu foi completamente jogado fora e perdido, sem a produção de qualquer efeito permanente. **Nós poderíamos argumentar, a priori, que tal destruição absoluta da força viva não pode eventualmente ocorrer, porque é manifestamente absurdo supor que os poderes com que Deus dotou a matéria possam ser destruídos ou criados pela ação do homem;** mas não ficamos apenas com este argumento isolado, claro como deve ser a mente sem preconceitos. **A experiência comum de cada um ensina que a força viva não é destruída pelo atrito ou colisão dos corpos [...]** (Joule, 1884, p. 268, grifo nosso, tradução nossa).

Joule faz uma crítica direta aos defensores da teoria do calórico, pois esses não eram capazes de explicar o desaparecimento da força mecânica em operações nas quais havia aquecimento, defendendo, portanto, que a mesma poderia ser gasta ou perdida. Sua crença em Deus, criador onipotente, influencia sua visão sobre os agentes da natureza, sendo as operações básicas da natureza indestrutíveis. Assim, para justificar que a força mecânica não desaparece, Joule demonstra que as forças da natureza se transformam umas nas outras, o que resulta em uma conversão entre “força viva”, calor e atração pelo espaço (Queirós, 2012). Dessa forma:

*[...] Experiências permitiram-nos responder a estas perguntas de forma satisfatória, pois tem mostrado que, **onde quer que a força viva seja aparentemente destruída, um equivalente é produzido, que no decorrer do tempo pode ser reconvertido em força viva. Este equivalente é o calor [...]*** (Joule, 1884, p. 269, grifo nosso, tradução nossa).

De acordo com seus resultados experimentais, ao invés de ser destruída ou absorvida, a “força viva” é frequentemente convertida em calor por meio do atrito (Joule, 1884). Compreende, portanto, que:

*[...] **onde quer que a força viva seja aparentemente destruída, seja por percussão, atrito, ou qualquer outro meio similar, um exato equivalente de calor é devolvido.** O inverso desta proposição também é verdadeiro, ou seja, que o calor não pode ser diminuído ou absorvido sem a produção de força viva, ou seu equivalente de atração através do espaço. Assim, por exemplo, na máquina a vapor, verifica-se que a força adquirida é às custas do calor do fogo, – isto é, que o calor provocado pela combustão do carvão é maior, pois uma parte deste não foi absorvida na produção e manutenção da força viva da máquina. É certo, todavia, salientar que isso ainda não tem sido demonstrado pela experiência [...]* (Joule, 1884, p. 270).

Joule busca estabelecer uma relação entre calor, “força viva” e atração pelo espaço. Segundo ele, essas conclusões puderam ser extraídas de seu trabalho com a máquina eletromagnética, na qual o calor absorvido pela bateria é igual à força despendida pela máquina. Utilizando-se de sua crença na conservação dos fenômenos da natureza, determina:

*[...] **Todos três, portanto – a saber, calor, força viva e atração pelo espaço (ao qual também poderia adicionar luz, que era consistente com o escopo da presente palestra) – são mutuamente conversíveis um no outro.** Nessas conversões nada se perde. A mesma quantidade de calor será sempre convertida na mesma quantidade de força viva. Podemos, portanto, expressar a equivalência em linguagem clara, aplicável em todos os momentos e em todas as circunstâncias. Assim, a atração de 817 libras pelo espaço de um pé é equivalente a, e convertível em, à força viva possuída por um corpo com o mesmo peso de 817 libras quando se desloca com a velocidade de oito pés por segundo, e essa força viva é novamente convertida em quantidade de calor que pode aumentar a temperatura de uma libra de água de um grau Fahrenheit [...]* (Joule, 1884, p. 270-271, grifo nosso, tradução nossa).

De fato, defende que todos os fenômenos da natureza, sejam eles químicos, mecânicos ou vitais, podem ser considerados como uma contínua conversão mútua da atração pelo espaço, da “força viva” e do calor, de modo a manter uma ordem no universo, onde nada é perturbado ou perdido (Joule, 1884). Ao refletir sobre a natureza do calor, retoma os conceitos de *impenetrabilidade* e *extensão*, propriedades das substâncias, para argumentar contra a teoria do calórico:

*“Algumas palavras podem ser ditas, em conclusão, no que diz respeito à verdadeira natureza do calor. A opinião mais comum, até há pouco, tem sido de que é uma substância que possui, como todos os outros elementos, impenetrabilidade e extensão. Temos, no entanto, demonstrado que **o calor pode ser convertido em força viva e em atração através do espaço**. É perfeitamente claro, portanto, que a menos que a matéria possa ser convertida em atração através do espaço, o que é demasiado absurdo essa ideia para se divertir por um momento, a **hipótese de calor sendo uma substância deve cair ao chão** [...]” (Joule, 1884, p. 273, grifo nosso, tradução nossa).*

Nesse momento, percebemos uma nova compreensão da natureza do calor. Convencido de que o calor não é substância, conclui que:

*“[...] **Calor deve consistir numa força viva ou atração através do espaço**. No primeiro caso, podemos conceber as partículas constituintes do corpo a ser aquecido, no todo ou em parte, num estado de movimento. Neste último podemos supor as partículas sendo separadas pelo processo de aquecimento, de modo a exercer atração em um espaço maior [...]” (Joule, 1884, p. 273-274, grifo nosso, tradução nossa).*

*“[...] **As partículas constituintes, ou átomos dos corpos, são supostas de estar em movimento**, sem produzir um movimento bruto de toda a massa. Estas partículas, ou átomos, sendo pequenas demais para serem vistas até mesmo com a ajuda de microscópios mais poderosos, não é de admirar que não podemos observar o seu movimento. Há, portanto, razão para supor que as partículas de todos os corpos, seus átomos constituintes, estão em um estado de movimento quase demasiado rápido para concebermos que os fenômenos não podem ser explicados de outra maneira [...]” (Joule, 1884, p. 274, grifo nosso, tradução nossa).*

A ideia de calor como movimento das atmosferas de eletricidade ao redor do átomo, defendida anteriormente por Joule não foi mencionada nesse trabalho, nem posteriormente. Cardwell (1989) acredita que isso se deve ao estudo realizado dos trabalhos dos defensores da teoria dinâmica, em especial a pesquisa de Herapath. Segundo ele, essas pesquisas convenceram Joule de que era mais adequado considerar o calor como movimento dos próprios átomos. De acordo com Herapath, o calor deveria ser considerado uma rápida vibração ou uma oscilação dos próprios átomos em torno de um ponto fixo e não devido ao calórico.

Compreendendo calor dessa forma, Joule define calor sensível e calor latente a partir da teoria dinâmica: o calor sensível consiste na “força viva” das partículas, provocando um aumento, conseqüentemente, no estado de movimento das partículas e o calor latente é produzido por meio separação das partículas, acarretando em uma mudança no estado físico da matéria. Portanto:

“[...] Podemos conceber, então, que a comunicação de calor para um corpo consiste, na verdade, na comunicação de impulso, ou força viva, para as suas partículas [...]” (Joule, 1884, p. 274, tradução nossa).

A partir da teoria dinâmica, Joule busca descrever os fenômenos a partir dessa concepção. Encontramos uma explicação para a condução bem próxima do que é atualmente aceito pela comunidade científica:

“[...] Um aumento da velocidade de revolução das partículas vai constituir um aumento de temperatura, que podem ser distribuídas entre os corpos vizinhos por aquilo que é chamado de condução - isto é, na presente hipótese, pela comunicação do aumento do movimento das partículas de um corpo para os dos outros” (Joule, 1884, p. 274, tradução nossa).

Encerra um artigo com uma ilustração prática de seu trabalho, explicando o processo de mudança de fase:

*“[...] um bloco de gelo arrefeceu-se até zero; ao aplicar calor a ele, este irá gradualmente chegar até 32°, que é o número convencionalmente empregado para representar a temperatura na qual o gelo começa a derreter. Se, quando o gelo chegar a esta temperatura, você continuar a aplicar calor nele, ele será derretido; mas sua temperatura não aumentará além de 32° até ser totalmente convertido em água. A explicação destes fatos está clara em nossas hipóteses. **Até o gelo chegar à temperatura de 32° a aplicação de calor aumenta a velocidade de rotação das partículas constituintes¹²; mas, no instante em que chega a esse ponto, a velocidade produz um certo aumento na força centrífuga das partículas que as obriga a separar-se uma das outras.** [...] Contudo, logo que a separação foi efetuada, e foi produzida água fluida, uma nova aplicação de calor causará um novo aumento na velocidade das partículas, o que constitui um aumento da temperatura, na qual o termômetro subirá imediatamente acima de 32° [...]” (Joule, 1884, p. 275, tradução nossa).*

Dando sequência aos seus trabalhos, Joule busca novos meios para determinar o valor do equivalente mecânico do calor, utilizando a agitação dos líquidos e a fricção dos fluidos, além de investigar a constituição dos fluidos elásticos. Encontramos nesses trabalhos unidades que reforçam sua concepção de calor. Alguns exemplos:

*“[...] seus experimentos [de Joule] sobre o atrito de fluidos, confirmam seu ponto de vista e as experiências de Davy e Rumford sobre o atrito dos sólidos, fornecem outra prova decisiva de que **o calor é simplesmente um efeito mecânico, não uma substância**; [...] seus experimentos, mostram que os efeitos térmicos da condensação e rarefação do ar são equivalentes a força mecânica gasta em um caso e ganha em outro, provando que **o calor de fluidos elásticos consiste simplesmente na vis viva de suas partículas**” (Joule, 1884, p. 289, grifo nosso, tradução nossa).*

*“[...] o calor e a energia mecânica são conversíveis um no outro; e tornou-se evidente, portanto, que **o calor é ou a vis viva das partículas ponderáveis, ou um estado de atração ou repulsão capaz de gerar vis viva**” (Joule, 1884, p. 291, grifo nosso, tradução nossa).*

Em 1850, Joule escreve o trabalho “*On the Mechanical Equivalent of Heat*”, no qual busca melhor descrever o aparato das pás, já apresentado no artigo “*On the Existence of an Equivalent Relation between Heat and the ordinary Forms of Mechanical Power*”. Enuncia duas proposições, que segundo ele, já foram demonstradas experimentalmente:

“1° Que a quantidade de calor produzida pela fricção dos corpos, no estado sólido ou líquido, é sempre proporcional à quantidade de força despendida. E,

2° A quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água (pesadas no vácuo entre 55° e 60°) em 1°F necessita para sua evolução o gasto de uma força mecânica representada pela queda de 772 libras pelo espaço de um pé” (Joule, 1884, p. 328, tradução nossa).

Os trabalhos de Joule, principalmente sua determinação do equivalente mecânico do calor, propiciaram uma compreensão da conservação da energia e, possibilitaram uma mudança na concepção de calor adotada pela comunidade científica (Gomes, 2012).

¹² Joule, neste artigo, se aproxima da definição moderna de temperatura, visto que para ele, “[...] as partículas constituintes, ou os átomos do corpos, devem estar em movimento, sem produzir um movimento bruto de toda a massa. Essas partículas, ou átomos, sendo muito pequeno para ser visto, mesmo com a ajuda do microscópio mais poderoso, não é de admirar que não possamos observar seu movimento. Por conseguinte, há motivos para supor que as partículas de todos os corpos, seus átomos constituintes, estão em um estado de movimento demasiadamente rápido [...]” (Joule, 1884, p. 274, tradução nossa). Ele acredita que essas partículas (os átomos do corpo) estão rotacionando e essa rotação aumenta conforme aumenta-se a temperatura do corpo. Contudo, quando essas partículas atingem uma determinada velocidade, estas sofrem segregação devido ao aumento na força centrífuga das partículas, o que ocasiona a mudança de estado físico do objeto, segundo a explicação fornecida por Joule.

Síntese e inferência

Após a análise dos 29 artigos, verificamos que o desenvolvimento do conceito de calor para Joule foi um processo gradual, consequente de seus trabalhos experimentais e dos estudos realizados durante o século XIX.

A princípio, Joule não se preocupava quanto à natureza do calor. Seu objetivo era melhorar a eficiência dos motores elétricos. Ao realizar as análises dos experimentos, utiliza termos referentes à teoria do calórico, paradigma vigente em seu período, demonstrando que ele conhecia e aceitava essa teoria. De acordo com Kuhn, Joule está inserido dentro de um período de ciência normal, no qual “[...] a teoria do calórico era dotada de um apreciável potencial explicativo, não facilmente refutável [...]” (Medeiros, 2009, p. 7). Durante a ciência normal, busca-se “[...] forçar a natureza a encaixar-se dentro dos limites preestabelecidos e relativamente inflexíveis fornecidos pelo paradigma [...]” (Kuhn, 2011a, p. 44). Nessa perspectiva, a pesquisa científica durante esse momento visa uma articulação dos fenômenos e teorias já fornecidos pelo paradigma.

Entretanto, ao longo de suas pesquisas, Joule logo percebe que a melhoria do desempenho dos motores elétricos envolveria um estudo da produção de calor nos circuitos elétricos. Os artigos de 1840 a 1845 marcam esse período de transição entre as concepções de calor. Frente aos resultados obtidos nestes trabalhos, começa a investigar sobre a natureza do calor e sua origem, examinando se o calor era *gerado* durante a passagem de corrente elétrica, o que seria uma evidência contra a teoria do calórico, ou apenas *transportado* de um lugar para outro do circuito, de alguma parte do experimento que ele não havia investigado, sendo esta a suposição dos caloristas. Desta forma, segundo a perspectiva kuhniana, “[...] a descoberta¹³ começa com a consciência da anomalia, isto é, com o reconhecimento de que, de alguma maneira, a natureza violou as expectativas paradigmáticas que governam a ciência normal [...]” (Kuhn, 2011a, p. 78). Esse processo de consciência pode ser percebido durante as análises dos artigos de Joule.

Estes trabalhos sobre o calor desenvolvido durante a passagem de corrente elétrica o levaram a reflexões sobre a origem deste, propiciando uma gradual mudança de concepção quanto a natureza do calor. Essa mudança é evidenciada em seu trabalho de 1847, “*On Matter, Living Force, and Heat*”, no qual Joule apresenta sua concepção de calor com base na conversão entre calor e “força viva”. Suas pesquisas o conduziram a crer que o calor deveria ser um efeito mecânico, não uma *substância* (Joule, 1884). Em seus artigos de 1847 a 1850, Joule busca determinar uma relação constante entre calor e “força viva” – o equivalente mecânico do calor, fortalecendo sua teoria dinâmica do calor (Queirós, 2012).

O estudo das pesquisas desenvolvidas pelos demais estudiosos da época como Rumford, Black, Ampère, Faraday, Davy e Herapath, realizado entre 1843 e 1844, também favoreceu essa mudança de concepção nos trabalhos de Joule, de modo a completar seus argumentos e confirmar suas hipóteses (Cardwell, 1989; Queirós, 2012).

Assim sendo, após inúmeras pesquisas, experiências e análises, Joule chega à conclusão de que o calor não deveria ser uma substância, defendendo a teoria dinâmica do calor e o princípio da conservação da energia, no qual busca, ao longo de seus trabalhos, uma relação constante entre a força mecânica e o calor.

Vale ressaltar que, segundo Fox (1971, p. 104, tradução nossa):

“Na década de 1800-1810, a teoria do calórico foi provavelmente mais amplamente aceita do que em qualquer outro momento de sua história. O questionamento da materialidade do calor, que tinha sido realizado na virada do século, não só por Rumford, mas também, [...], por Humphry Davy e Thomas Young, teve muito pouco efeito, e a visão de que [calor] é quase universalmente considerado o efeito de um fluido foi a que a maioria dos homens de ciência considerou aceitável em 1800, em 1810, ou mesmo em 1815, tanto quanto tinha sido em 1797, quando apareceu na terceira edição da Encyclopaedia Britannica, pouco antes de Rumford, Davy, e Young apresentarem suas críticas [...].”

Dessa forma, nesse período a comunidade ainda aceitava a teoria do calórico como paradigma vigente, de modo que o trabalho de Joule não propiciou, sozinho, a ruptura deste. Contudo, apesar de não

¹³ Deve-se tomar cuidado com esse termo descoberta, pois o mesmo pode sugerir uma ideia simplista de ciência. Para Kuhn (2011a), descobrir algo remete ao reconhecimento tanto da existência desse algo, como de sua natureza.

haver uma resposta satisfatória quanto às principais causas que levaram ao abandono da teoria do calórico, há uma unanimidade quanto a alguns fatores que a abalaram. De acordo com Gomes (2012, p. 123-124):

[...] os pesquisadores concordam que o advento da conservação da energia, substituindo a conservação do calórico, deu o golpe final. Principalmente o cálculo do equivalente mecânico do calor realizado por Mayer e Joule [...]. O conceito de energia finalmente havia se firmado como elemento de ligação entre a mecânica e a termodinâmica [...].

O princípio da conservação da energia foi estabelecido por volta da metade do século XIX. De acordo com Kuhn (2011b, p. 91), entre os anos de 1830 e 1850, diversos pesquisadores “[...] compreenderam sozinhos partes essenciais do conceito de energia e de sua conservação [...]”, entre eles: Julius Robert von Mayer (1814-1878, Alemanha); James Prescott Joule (1818-1889, Inglaterra); Ludwig August Colding (1815-1888, Dinamarca); Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894, Alemanha); Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832, França); Marc Séguin (1786-1875, França); Karl Holtzmann (1811-1865, Alemanha); Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890, França); Karl Friedrich Mohr (1806-1879, Alemanha); William Robert Grove (1811-1896, Inglaterra); Michael Faraday (1791-1867, Inglaterra) e Justus von Liebig (1803-1873, Alemanha).

Entretanto, “[...] por que, entre 1830 e 1850, os conceitos e experimentos necessários a uma completa enunciação da conservação da energia estavam tão próximos da consciência científica?” (Kuhn, 2011b, p. 95). De acordo com Kuhn (2011b), existem diversos fatores significativos e específicos do período, que desencadearam a descoberta “simultânea”¹⁴ do princípio da conservação da energia, entre eles: a disponibilidade dos processos de conversão, o interesse pelas máquinas, e o movimento da *Naturphilosophie*¹⁵. Assim, o primeiro fator “[...] retrata uma época marcada pela descoberta de vários processos de conversão entre as diferentes formas de energia [...]” (Queirós, Camargo & Nardi, 2009, p. 3), visto que a invenção da pilha de Alessandro Volta, em 1800, propicia, de forma direta e indireta, uma série de descobertas referentes aos processos de conversão (Passos, 2009; Kuhn, 2011b). O segundo fator, de acordo com Kuhn, é um produto secundário da revolução industrial, sendo importante na determinação quantitativa da conservação da energia (Queirós, Camargo & Nardi, 2009; Kuhn, 2011b). O terceiro fator é, para Kuhn, o responsável pela consolidação do princípio da conservação de energia (Gomes, 2012). O movimento da *Naturphilosophie* empenhava-se em obter um princípio unificador para os fenômenos naturais, de modo que “[...] muitos dos descobridores da conservação da energia estavam consideravelmente predispostos a perceber uma única e indestrutível força na raiz de todos os fenômenos naturais [...]” (Gomes, 2012, p. 57).

Desse modo, o princípio da conservação da energia teve como ponto de partida determinar uma “[...] equivalência quantitativa uniforme entre cada um dos pares de poderes [...]” (Gomes, 2012, p. 59), sendo esta uma “[...] relação numérica entre o trabalho feito sobre um corpo e o calor produzido [...]” (Gomes, 2012, p. 59), atualmente conhecido como “equivalente mecânico do calor”. De acordo com Passos (2009, p. 2):

[...] a necessidade de se determinar com precisão o custo da energia produzida fez com que a determinação de fatores de conversão, como o equivalente mecânico do calor, passasse a ser uma exigência dos novos tempos em que a máquina a vapor passou a ter um importante papel na economia [...].

Assim, uma vez estabelecido esse ponto de partida, a ideia foi facilmente aplicada as demais conversões energéticas. Por conseguinte, podemos considerar que os trabalhos de Joule contribuíram para uma mudança no paradigma (Martins, 1984; Kuhn, 2011b)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A História da Ciência é considerada por diversos autores como uma importante ferramenta no ensino de Física, pois contribui para a elaboração de estratégias didáticas que favorecem o processo de ensino-aprendizagem, fornecendo subsídios para a compreensão do conteúdo científico e contribuem para a

¹⁴ Apesar de usar o termo “descoberta simultânea”, o próprio Kuhn argumenta que este não é apropriado, pois “[...] no caso ideal de uma descoberta simultânea, duas ou mais pessoas anunciariam a mesma coisa, ao mesmo tempo, e em total ignorância dos trabalhos uns dos outros, mas nada disso se assemelha nem de longe ao ocorrido durante o desenvolvimento da conservação da energia [...]” (Kuhn, 2011b, p. 93).

¹⁵ Segundo Oliveira (2006, p. 110-111): “[...] A palavra *Naturphilosophie* é proveniente do romantismo alemão [...]. Os historiadores preferem a utilização do termo original de forma que possa designar uma maneira específica de especulação no plano cultural onde ele conheceu um desenvolvimento rápido e fecundo. O período de seu surgimento é o final do século XVIII e nas décadas de 30 e 40 do século XIX este tipo de pensamento era bastante forte nas universidades alemãs”.

formação de uma visão adequada da natureza da ciência (Carvalho, 1989; Matthews, 1995; Martins, 2006; Castro, 2009; Carvalho & Sasseron, 2010; Oliveira & Silva, 2012). Segundo Hülsendeger (2007, p. 236), “[...] o trabalho com a História da Ciência pode se tornar uma ferramenta importante para auxiliar o aluno não só na compreensão dos fenômenos estudados na Física, mas principalmente uma forma de possibilitar o entendimento de que todo o conhecimento está interligado [...]”.

Várias pesquisas na área de ensino de ciências têm mostrado os problemas enfrentados para distinguir calor e temperatura. Comumente, são utilizados como sinônimos. Segundo Silva, Laburú e Nardi (2008), o calor é, possivelmente, um dos conceitos mais difíceis tanto de aprender como também de ensinar, pois grande parte dos alunos ao descrever e explicar os diversos fenômenos utilizam suas representações, ou seja, empregam o calor como sendo algo que está contido nos corpos (sistema), de modo que, quanto maior sua quantidade, mais quente o corpo se encontra (Diaz, 1987; Köhnlein & Peduzzi, 2002). Deste modo, existe ainda a tendência de considerar o calor como substância, uma espécie de fluido, propriedade dos corpos quentes, e o frio, pelo contrário, como sendo a ausência de calor (Köhnlein & Peduzzi, 2002).

A compreensão da história da ciência auxilia nesse processo de ensino-aprendizagem, visto que, muitas vezes, as resistências dos alunos se aproximam das dos próprios cientistas, sendo concepções semelhantes às que foram aceitas em outros períodos pela comunidade científica (Piaget, 1970; Martins, 2006; Bravo & Pesa, 2015).

Nesse sentido, acreditamos que o conhecimento dos trabalhos de Joule é de grande valia, pois permite ao professor compreender quais as dificuldades históricas existentes no estabelecimento da teoria dinâmica do calor, tornando-o capaz de elaborar estratégias para o ensino desse conceito físico, visto que as concepções alternativas dos alunos acerca da teoria do calor se assemelham à teoria que foi amplamente aceita no século XVIII, de que o calor era uma substância.

Como evidenciado em nossa análise, inicialmente Joule aceitava a teoria do calórico e por meio da percepção de que o calor estava sendo gerado por processos dinâmicos nos circuitos com máquinas eletromagnéticas, quando uma corrente elétrica percorria o fio, começa a questionar-se sobre a natureza do calor. Após a realização de inúmeros experimentos e o estudo dos trabalhos de pesquisadores como Rumford, Davy e Herapath, Joule chega à conclusão de que o calor não deveria ser uma substância, defendendo a teoria dinâmica do calor e chegando ao princípio da conservação da energia, ao buscar uma relação constante entre a força mecânica e o calor.

O estudo do desenvolvimento do calor em Joule possibilita aos professores elaborar estratégias didáticas que propiciem a compreensão do conceito científico. Para isso, o professor não necessariamente deve utilizar os textos originais de Joule, visto que esses possuem um nível de experimentação muito elaborado e uma linguagem de difícil compreensão. No caso de utilizar os artigos originais de Joule, seria interessante selecionar alguns trechos que abordem seu trabalho, mas evitando entrar nos detalhes experimentais por ele utilizados, enfatizando a problemática do porquê acreditava que o calor deveria ser movimento e como iniciou sua busca do equivalente entre força mecânica e calor.

Outra sugestão, partindo do pressuposto de que um dos fatores que ocasionaram uma mudança em sua concepção é a análise de que o calor está sendo gerado por processos dinâmicos nos circuitos, é elaborar uma sequência didática visando o ensino do conceito de calor, realizando o experimento sobre o efeito Joule e propondo indagações sobre o calor desenvolvido no circuito, possibilitando ao aluno tornar-se um agente mais ativo e consciente da natureza da ciência. Por fim, um estudo dos trabalhos de Rumford é uma boa alternativa para trabalhar com textos históricos em sala de aula, visto que o entendimento de seu trabalho é considerado um dos fatores que levaram Joule à compreensão da natureza do calor¹⁶.

Além disso, é possível utilizar os trabalhos de Joule para discutir em sala de aula a natureza da ciência, visto que sua pesquisa se encontra inserida em um momento de crise do paradigma vigente, no qual seus trabalhos contribuem para a modificação da visão da natureza do calor. De acordo com Martins (2006), os estudos adequados de alguns episódios históricos propiciam ao aluno compreender que a ciência não é

¹⁶ Uma aplicação didática construtivista dos trabalhos de Rumford pode ser encontrada no trabalho da Anna Maria Pessoa de Carvalho e Lúcia Helena Sasseron: “Abordagens histórico-filosóficas em sala de aula: questões e propostas” (2010). Nas referências é possível encontrar dissertações e teses que abordem o trabalho de Joule, servindo de material histórico em português. Entretanto, a maioria desses trabalhos não sugerem práticas utilizando a História da Ciência para o ensino do conceito de calor. Outras sugestões de trabalhos que apresentam atividades para o ensino da Termodinâmica são: Hülsendeger, Margarete J. V. C. “A história da ciência no ensino da termodinâmica: um outro olhar sobre o ensino de física” (2007). Mortimer, Eduardo Fleury; Amaral, Luiz Otávio F. “Quanto mais quente melhor: calor e temperatura no ensino de termoquímica” (1998).

algo linear e não “brota” pronta na cabeça de alguns gênios, pelo contrário, é resultado de um processo coletivo e progressivo para construção do conhecimento.

Apesar das sugestões fornecidas para o ensino da Termodinâmica, em especial do conceito de calor, estamos conscientes de que a grande maioria dos professores não apresenta interesse ou competência suficiente em história da ciência (mesmo aqueles que possuem uma formação adequada) e, conseqüentemente, apresentam uma visão distorcida do trabalho científico para seus estudantes, levando-os a crer que é possível obter uma teoria unicamente a partir de uma observação experimental, ou ainda, que é possível “provar” uma teoria, apesar disso ser filosoficamente impossível (Martins, 2006; Raicik & Peduzzi, 2015). Ademais, devemos levar em consideração que, segundo os resultados do projeto ROSE (The Relevance of Science Education)¹⁷ aplicados no Brasil, “os alunos, em geral, pouco se interessam pela história da Ciência e dos cientistas [...]” (Tolentino Neto, 2008, p. 104), cabendo ao professor elaborar estratégias que os motivem a aprender tanto a Ciência quanto a História da Ciência.

Esperamos com este trabalho ter fornecido novos elementos para a discussão sobre a importância de inserir a história da ciência. Acreditamos que esse trabalho será útil como material de apoio para uma possível aplicação didático-pedagógica em sala de aula pelos professores. Entretanto, deixamos para o leitor essa árdua tarefa, visto que nossas sugestões são apenas o início de uma nova pesquisa prática sobre como elaborar uma estratégia didática que possibilite a compreensão da natureza do calor, sabendo que a utilização da história da ciência não é tarefa fácil.

REFERÊNCIAS

Augusto, T. G. S., & Amaral, I. A. (2014). Concepções de professoras das séries iniciais, em formação em serviço, sobre a prática pedagógica em Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 19(1), 163-176. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/101/72>

Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70.

Barros, M. A., & Carvalho, A. M. de. (1998). A história da ciência iluminando o ensino de física. *Revista Ciência & Educação*, 5(1), 83-94. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v5n1/a08v5n1.pdf>

Batista, G. L. F., Drummond, J. M. H. F., & Freitas, D. B. (2015). Fontes primárias no ensino de física: considerações e exemplos de propostas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 32(3), 663-702. Recuperado de <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2015v32n3p663/30633>

Becker, F. (1993). O que é construtivismo? In Alves, M. L., Duran, M. C. G., Borja, A. de, Toledo, C. de, & Mattos, M. G. (Eds.). *Idéias: Construtivismo em revista* (pp. 87-93). São Paulo: FDE.

Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (Eds.). (2007). *Como as pessoas aprendem: cérebro, mente, experiência e escola*. São Paulo: Editora Senac São Paulo.

Brasil. (2000). Ministério da Educação. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília: MEC/SEB. Recuperado de <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>

Bravo, S., & Pesa, M. (2015). El fenómeno de la difracción en la historia de la óptica y en los libros de texto: reflexiones sobre sus dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20(2), 76-102. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/44/23>

Brockington, G. (2005). *A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio*. (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo), São Paulo. Recuperado de <http://www.inf.unioeste.br/~reginaldo/FisicaModerna/emerson/A%20Realidade%20escondida%20a%20dualidade%20onda-part%20EDculapara%20estudantes%20do%20Ensino%20M%20E9dio.pdf>

Brown, S. C. (1949). Count Rumford and the caloric theory of heat. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 93, 316-325. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/3143157?seq=1#page_scan_tab_contents

Brush, S. G. (1988). *The history of Modern Science: a guide to the second revolution, 1800-1950*. Ames: Iowa University Press.

¹⁷ O projeto ROSE visa fornecer informações com relação a postura dos educandos (na faixa dos 15 anos) com relação à ciência.

- Cardwell, D. S. L. (1989). *James Joule: a biography*. Manchester: Manchester University Press.
- Carmo, L. A. C. (2000). *Perspectivas Históricas e Experimentais no Desenvolvimento da Equivalência Calor-Energia*. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco), Recife.
- Carvalho, A. M. P. de. (1989). *Física: proposta para um ensino construtivista*. São Paulo: EPU.
- Carvalho, A. M. P. de. (2009). Critérios estruturantes para o ensino de Ciências. In Carvalho, A. M. P. de (Ed.), *Ensino de Ciências: unindo a pesquisa e a prática* (pp. 1-17). São Paulo: Cengage Learning.
- Carvalho, A. M. P. de, & Sasseron, L. H. (2010). Abordagens histórico-filosóficas em sala de aula: questões e propostas. In Carvalho, A. M. P. de (Ed.), *Ensino de Física* (pp. 107-139). São Paulo: Cengage Learning.
- Castro, R. S. de. (2009). Uma e outras histórias. In Carvalho, A. M. P. de (Ed.), *Ensino de Ciências: unindo a pesquisa e a prática* (pp. 101-117). São Paulo: Cengage Learning.
- Castro, R. S. de, & Carvalho, A. M. P. de. (1992). História da Ciência: investigando como usá-la num curso de segundo grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 9(3), 225-237. DOI:10.5007/%25x
- Diaz, V. J. (1987). Algunos aspectos a considerar en la didactica del calor. *Enseñanza de las ciencias*, 5(3), 235-238. Recuperado de <http://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/download/51006/92927>
- Fernandes, R. C. A., & Megid Neto, J. (2012). Modelos educacionais em 30 pesquisas sobre práticas pedagógicas no ensino de Ciências nos anos iniciais da escolarização. *Investigações em Ensino de Ciências*, 17(3), 641-662. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/175/119>
- Fox, R. (1971). *The caloric theory of gases: from Lavoisier to Regnault*. Oxford: Oxford University Press.
- Gardelli, D. (2004). *Concepções de Interação Física: Subsídios para uma Abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio*. (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo), São Paulo. Recuperado de <http://www.ghtc.usp.br/server/Teses/Daniel-Gardelli.pdf>
- Gehlen, S. T., & Delizoicov, D. (2012). A dimensão epistemológica da noção de problema na obra de Vygotsky: implicações no ensino de Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 17(1), 59-79. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/207/141>
- Germano, M. G., & Feitosa, S. S. (2013). Ciência e senso comum: concepções de professores universitários de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 18(3), 723-735. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/122/86>
- Gomes, L. C. (2012). *Representação social dos autores dos livros didáticos de física sobre o conceito de calor*. (Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá), Maringá. Recuperado de http://www.pcm.uem.br/uploads/luciano-carvalhais-gomes--02052012_1434851045.pdf
- Hülsendeger, M. J. V. C. (2007). A história da ciência no ensino da termodinâmica: um outro olhar sobre o ensino de física. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 9(2), 222-237. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/epec/v9n2/1983-2117-epec-9-02-00222.pdf>
- Joule, J. P. (1884). *The scientific papers of James Prescott Joule*. London: The Physical Society of London. Recuperado de <https://archive.org/details/scientificpapers01jou>
- Joule, J. P. (1887). *Joint Scientific Papers*. Londres: The Physical Society of London. Recuperado de <https://archive.org/details/scientificpapers01jou>
- Köhnlein, J. F. K., & Peduzzi, S. S. (2002). Um estudo a respeito das concepções alternativas sobre calor e temperatura. *Revista Brasileira de Investigação em Educação em Ciências*, 2(3), 25-35. Recuperado de <https://seer.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/2336/1736>
- Kuhn, T. S. (2011a). *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva.

- Kuhn, T. S. (2011b). A conservação da energia como exemplo de descoberta simultânea. In Kuhn, T. S., *A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica* (pp. 89-126). São Paulo: Editora Unesp.
- Lavoisier, A. L. (1777). De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables, et de la formation des fluides élastiques aëriiformes. In Académie Royale des Sciences (Ed.), *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (pp. 420-433). Paris: Académie Royale des Sciences.
- Libâneo, J. C. (1994). *Didática*. São Paulo: Cortez.
- Lima, L. O. (1980). *Piaget para principiantes*. São Paulo: Summus.
- Marcet, J. H. (1817). *Conversations on chemistry: in which the elements of that science are familiarly explained and illustrated by experiments*. Londres: Longman.
- Martins, R. A. (1984). Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 6, 63-95. Recuperado de <http://www.ghtc.usp.br/server/PDF/ram-18.PDF>
- Martins, R. A. (2001). Como não escrever sobre História da Física - um manifesto historiográfico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(1), 113-129. Recuperado de http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v23_113.pdf
- Martins, R. A. (2006). Introdução. A história das ciências e seus usos na educação. In Silva, C. C. (Ed.), *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino* (pp. xxi-xxxiv). São Paulo: Livraria da Física.
- Massoni, N. T., & Moreira, M. A. (2012). Ensino de Física em uma escola pública: um estudo de caso etnográfico com um viés epistemológico. *Investigações em Ensino de Ciências*, 17(1), 147-181. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/211/145>
- Matthews, M. R. (1995). História, Filosofia e Ensino de Ciências: a Tendência Atual de Reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 12(3), 164-214. Recuperado de <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7084>
- Medeiros, A. (2009). Entrevista com o Conde Rumford: da teoria do calórico ao calor como uma forma de movimento. *Física na escola*, 10(1), 04-16. Recuperado de <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol10/Num1/a02.pdf>
- Moraes, R. (2003). Uma tempestade de luz: a compreensão possibilitada pela análise textual discursiva. *Ciência & Educação*, 9(2), 191-211. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v9n2/04.pdf>
- Moraes, R., & Galiazzi, M. C. (2006). Análise Textual Discursiva: processo reconstrutivo de múltiplas faces. *Ciência & Educação*, 12(1), 117-128. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v12n1/08.pdf>
- Moraes, R., & Galiazzi, M. C. (2011). *Análise Textual Discursiva* (2a ed.). Ijuí: Editora Unijuí.
- Mortimer, E. F., & Amaral, L. O. F. (1998). Quanto mais quente melhor: calor e temperatura no ensino de termoquímica. *Revista Química Nova na Escola*, 7, 30-34. Recuperado de <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc07/aluno.pdf>
- Oliveira, A. R. E. (2006). *A evolução do conceito físico de trabalho no contexto das máquinas*. (Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro. Recuperado de <https://pt.scribd.com/document/179117943/A-EVOLUCAO-DO-CONCEITO-FISICO-DE-TRABALHO-NO-CONTEXTO-DAS-MAQUINAS>
- Oliveira, R. A., & Silva, A. P. B. (2012). História da ciência e Ensino de Física: uma análise meta-historiográfica. In Peduzzi, L. O. Q., Martins, A. F. P., & Ferreira, J. M. H. (Eds.), *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino* (pp. 41-64). Natal: EDUFRN. Recuperado de <http://ppgect.ufsc.br/files/2012/11/Temas-de-Historia-e-Filosofia-da-Ciencia-no-Ensino1.pdf>

- Ortiz, E., & Silva, M. R. (2016). O uso de abordagens da História da Ciência no ensino de Biologia: uma proposta para trabalhar a participação da cientista Rosalind Franklin na construção do modelo da dupla hélice do DNA. *Investigações em Ensino de Ciências*, 21(1), 106-123. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/237/178>
- Passos, J. C. (2009). Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(3), 1-8. Recuperado de <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/313603.pdf>
- Piaget, J. (1970). *Genetic Epistemology*. New York: Columbia University Press.
- Queirós, W. P. (2012). *A articulação das culturas humanística e científica por meio do estudo histórico-sociocultural dos trabalhos de James Prescott Joule: contribuições para a formação de professores universitários em uma perspectiva transformadora*. (Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista), Bauru. Recuperado de http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/102029/queiros_wp_dr_bauru.pdf?sequence=1
- Queirós, W. P. de, Nardi, R., & Delizoicov, D. (2014). A produção técnico-científica de James Prescott Joule: uma leitura a partir da epistemologia de Ludwik Fleck. *Investigações em Ensino de Ciências*, 19(1), 99-116. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/98/69>
- Queirós, W. P. de, Camargo, E. P. de, & Nardi, R. (2009). Uma reflexão histórico-filosófica sobre o ensino do conceito de energia para alunos videntes e com deficiência visual. In Atas do Inter-American Conference on Physics Education, Medelin (pp. 1-10). Medelin, Colombia. Recuperado de <http://www2.fc.unesp.br/encine/2009-10-uma+reflexao+historico+filosofica+sobre+o+ensino+do+conceito+de+energia+para+alunos+videntes+e+com+deficiencia+visual.php>
- Rafael, F. J. (2007). *Elaboração e aplicação de uma estratégia de ensino sobre os conceitos de calor e temperatura*. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte), Natal. Recuperado de <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/16037>
- Raicik, A. C., & Peduzzi, L. O. Q. (2015). Potencialidades e limitações de um módulo de ensino: uma discussão histórico-filosófica dos estudos de Gray e Du Fay. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20(2), 138-160. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/47/26>
- Raicik, A. C., & Peduzzi, L. O. Q. (2016). Um resgate histórico e filosófico dos estudos de Stephen Gray. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 16(1), 109-128. Recuperado de <https://seer.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/2543/1944>
- Reis, U. V., & Reis, J. C. O. (2016). Os conceitos de espaço e de tempo como protagonistas no ensino de Física: um relato sobre uma sequência didática com abordagem histórico-filosófica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(3), 744-778. Recuperado de <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2016v33n3p744/33011>
- Ribeiro, J. F. R. (2010). *Deposição e caracterização de filmes finos para baterias de lítio em estado sólido*. (Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho), Portugal. Recuperado de <http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/galeria/temas/pdf/43010.pdf>
- Roller, D. (1950). *The early development of the concepts of temperature and heat: the rise and decline of caloric theory*. Cambridge: Harvard University Press.
- Rosa C. W. da, & Rosa, A. B. da. (2012). O ensino de ciências (Física) no Brasil: da história às novas orientações educacionais. *Revista Ibero-americana de Educação*, 58(2), 1-24. Recuperado de <rieoei.org/deloslectores/4689Werner.pdf>
- Sibum, H. O., & Morel, G. (1998). Les gestes de la mesure: Joule, les pratiques de la brasserie et la science. *Annales Histoire, Sciences Sociale*, 53(4/5), 745-774. Recuperado de http://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1998_num_53_4_279696

- Silva, O. H. M. da, Laburú, C. E., & Nardi, R. (2008). Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25(3), 383-396. Recuperado em <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2008v25n3p383/8458>
- Teixeira, P. M. M. (2003). A educação científica sob a perspectiva da Pedagogia Histórico-Crítica e do Movimento C.T.S. no Ensino de Ciências. *Revista Ciência & Educação*, 9(2), 177-190. Recuperado em <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v9n2/03.pdf>
- Tolentino Neto, L. C. B. (2008). *Os interesses e posturas de jovens alunos frente às ciências: resultados do projeto ROSE aplicado no Brasil*. (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo), São Paulo. Recuperado de <http://roseproject.no/network/countries/brazil/bra-caldeira-tolentino-neto.pdf>
- Valente, M. J. P. (1999). *Uma leitura pedagógica da construção histórica do conceito de energia: contributo para uma didáctica crítica*. (Tese de Doutorado, Universidade Nova de Lisboa), Lisboa. Recuperado de <https://run.unl.pt/handle/10362/332>
- Zômpero, A. F., & Laburú, C. E. (2012). Implementação de atividades investigativas na disciplina de Ciências em escola pública: uma experiência didática. *Investigações em Ensino de Ciências*, 17(3), 675-684. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/181/121>

Recebido em: 19.05.2017

Aceito em: 01.09.2017