



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

RAFAELLE DA SILVA SOUZA

**O EXPERIMENTO DE JOULE E O ENSINO DE TERMODINÂMICA
BASEADO NA HISTÓRIA DA CIÊNCIA: UMA PROPOSTA DIDÁTICA**

CAMPINA GRANDE-PB
2012

RAFAELLE DA SILVA SOUZA

**O EXPERIMENTO DE JOULE E O ENSINO DE TERMODINÂMICA
BASEADO NA HISTÓRIA DA CIÊNCIA: UMA PROPOSTA DIDÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Licenciatura Plena em Física da
Universidade Estadual da Paraíba
em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Licenciada em
Física.

Orientadora: Prof. Dr^a. Ana Paula Bispo da Silva

CAMPINA GRANDE-PB

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL – UEPB

S729e Souza, Rafaelle da Silva.
O experimento de Joule e o ensino de termodinâmica baseado na história da ciência [manuscrito]: uma proposta didática / Rafaelle da Silva Souza. – 2012.

59 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2012.

“Orientação: Profa. Dra. Ana Paula Bispo da Silva, Departamento de Física”.

1. Termodinâmica. 2. Equivalente mecânico do calor. 3. História da Ciência. I. Título.

21. ed. CDD 536.7

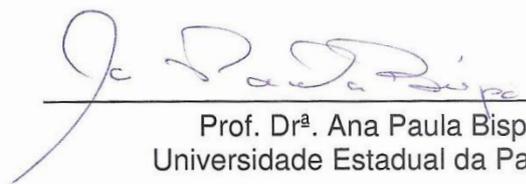
RAFAELLE DA SILVA SOUZA

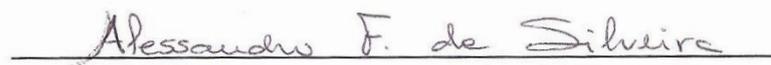
**O EXPERIMENTO DE JOULE E O ENSINO DE TERMODINÂMICA
BASEADO NA HISTÓRIA DA CIÊNCIA: UMA PROPOSTA DIDÁTICA**

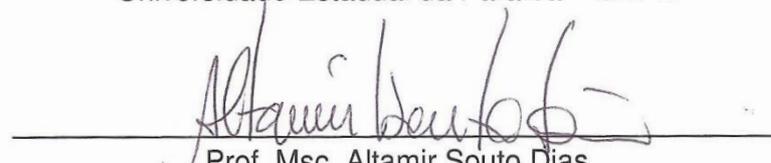
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Licenciatura Plena em Física da
Universidade Estadual da Paraíba
em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Licenciada em
Física.

Aprovada em 30 de novembro de 2012

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr^a. Ana Paula Bispo da Silva
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB


Prof. Dr. Alessandro Frederico da Silveira
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB


Prof. Msc. Altamir Souto Dias
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB

DEDICATÓRIA

Ao Pai, que me permitiu chegar até aqui.

E ainda me dá forças pra voar mais alto.

AGRADECIMENTOS

É difícil agradecer a todos que colaboraram com o término desse trabalho e no decorrer de toda minha jornada, mas a algumas pessoas não poderia deixar de agradecer:

Primeiramente, Àquele que está acima de tudo, que com sua infinita misericórdia, graça e bondade, me permitiu realizar sonhos e chegar a lugares altos. Não sou merecedora de Teu amor.

Aos meus pais, responsáveis por minha educação que me mostraram o caminho. Por seu amor, dedicação, e pelo incondicional apoio para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Meus irmãos, Rayane e Rivaldo que direta ou indiretamente me apoiaram durante essa trajetória, amo muito vocês!

À prof.^a Dr.^a Ana Paula Bispo da Silva, obrigada pela oportunidade que me destes durante todo este tempo, pelo conhecimento compartilhado, pela orientação durante os trabalhos, por apontar diversas vezes o caminho, pela humildade como pessoa e educadora. Obrigada por acreditar em mim!

Aos integrantes do Grupo de História da Ciência e Ensino (GHCEN – UEPB), pelas ricas discussões, pelas críticas e pelo apoio, por terem contribuído para a minha evolução.

Ao Téc. do laboratório de Física, Thiago Araújo por realizar um brilhante trabalho, por sua enorme paciência e por não ter se negado a me ajudar.

À prof.^a Dr.^a Thaís Cyrino de Mello Forato por nos permitir utilizar sua tese e por contribuí com valiosas sugestões, pela amizade e principalmente pelo estímulo à buscar fazer o melhor.

Ao Prof. Dr. Alessandro Frederico da Silveira, por contribuir durante minha trajetória no decorrer da graduação, na qual vivenciei excelentes experiências que despertaram meu interesse pela docência.

A Rudyney, por está sempre disponível, pela ajuda, carinho, amizade, e por estares sempre ao meu lado.

Ao Programa Institucional de Iniciação à Docência (PIBID), e as pessoas que o compõem e o tornam possível, por despertarem em mim o desejo de buscar aprofundamento na área da docência.

Aos companheiros de curso, pela amizade, cooperação e até pelas discussões. Bruna, Francidézio, Felipe, Gilson, Juliana, Karla, Leide (você é pessoa muito especial, descobri em você uma amizade sincera), Sebastião, Tarsus, Tássio, Thiago e Wanderson. Apesar das diferenças, andamos juntos, chegamos ao esperado, e podemos dizer: valeu a pena!

À banca examinadora por ter aceitado o convite e pela disponibilidade.

À Universidade Estadual da Paraíba, à coordenação (Seu João, não seria o mesmo sem você) e aos professores do Departamento de Física, que contribuíram para minha formação acadêmica, pelo grande aprendizado que me proporcionaram ao longo desses cinco anos.

A todos que participaram direta e indiretamente, contribuindo para o meu caminhar. Meu sincero OBRIGADO e que Deus os abençoe!

“O dia está na minha frente esperando para ser o que eu quiser. E aqui estou eu, o escultor que pode dar forma a este dia”.

(Albert Einstein)

“Ouve tu, filho meu, e sê sábio e dirige no caminho do teu coração”.

(Provérbios 23:19)

RESUMO

Muitos foram os estudiosos que buscaram entender a natureza e as propriedades do Calor, com diferentes hipóteses, que se alteraram ao longo do tempo. James Prescott Joule, com suas experiências térmicas, conseguiu contribuir para esses estudos, cuja formulação e determinação do equivalente calor mecânico tiveram mais influência sobre o desenvolvimento e especialmente a aceitação do princípio da conservação da energia. Suas contribuições foram de tal importância que permanecem nas pautas de discussões desde então, caracterizando um alto grau de importância para o estudo de ciências naturais. Este trabalho se concentra em um episódio histórico envolvendo a história da termodinâmica, mais especificamente o desenvolvimento da equivalência entre trabalho mecânico e calor e tem por objetivo construir uma proposta didática envolvendo experimentos históricos e contextualização, a partir da busca do equivalente mecânico do calor por Joule. A proposta inclui o estudo do texto original de Joule, seus pressupostos teóricos e metodológicos, e a construção de um equipamento similar ao que ele utilizou em 1850, uma vez que a tentativa de replicação do experimento de Joule mostrou-se inviável. O estudo de experimentos históricos tende a contribuir para a compreensão da prática experimental dos estudiosos, ajudando-nos a reconstruir as dimensões tácitas de práticas do passado e com isso, podemos alcançar as diretrizes apresentadas nos Parâmetros Curriculares Nacionais, que objetivam formar cidadãos contemporâneos capazes de participar ativamente na sociedade e no mundo em que vivem, desenvolvendo nos estudantes um pensamento crítico e reflexivo, promovendo o desenvolvimento de competências relacionadas ao processo de ensino e aprendizagem.

PALAVRAS-CHAVE: História da Ciência, Experimentos históricos, Equivalente mecânico do calor.

ABSTRACT

During the 18th and 19th centuries, many researchers studied the nature of heat and its transformation. Among these, the experiments of James Prescott Joule are of great importance and considered one of the main examples on the relation between heat and mechanical work. In this work, we propose a lesson plan including Joule's experiment on the mechanical equivalent of heat, followed by reading his original treatise on this subject, then finally considering secondary sources, such as videos and other readings on the nature of heat. In this lesson, we intended to achieve the national standards in science teaching, which establish the need of having students become critical thinkers capable of discussing science topics and their influence on their lives. Consistent with HPS in science teaching, we argue that the use of historical episodes like this can contribute to the discussion on the development of science and its nature and can also familiarize students with the life and work of scientists.

Keywords: history of science, historical experiments, mechanical equivalent of heat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Perspectiva do aparato que Joule deu a seu trabalho.....	18
Figura 1 – (b) Eixo do aparelho de atrito na vertical	18
Figura 1 – (c) Eixo do aparelho de atrito na horizontal	18
Figura 1 – (d) Vaso de cobre	18
Figura 2 – (a) Perspectiva da montagem do experimento	27
Figura 2 – (b) Eixo de atrito com 5 pás	27
Figura 3 – (a) Eixo de atrito com 5 pás	28
Figura 3 – (b) Eixo de atrito com apenas 2 pás	28
Figura 4 – Perspectiva da reprodução do aparato	29
Figura 5 – (a) Perspectiva na vertical do calorímetro.....	30
Figura 5 – (b) Eixo do aparelho de atrito na horizontal	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 CONTEXTUALIZANDO HISTORICAMENTE O EXPERIMENTO.....	15
2.2 EXPERIMENTO DO EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR	17
2.2.1 Descrição do aparato de Joule	18
2.2.2 Determinando o Equivalente Mecânico do Calor	19
2.2.3 Reprodução do experimento por Otto Sibus.....	22
3. METODOLOGIA	25
4. RESULTADOS	27
4.1 CONSTRUÇÃO DO EXPERIMENTO SIMILAR AO QUE FOI CONSTRUÍDO POR JOULE	27
4.2 PROPOSTA DIDÁTICA	32
4.2.1 Apresentação	32
4.2.2 Introdução e Justificativas	32
4.2.3 Objetivos	32
4.2.4 Público Alvo.....	33
4.2.5 Número de aulas.....	33
4.2.6 Quadro sintético das aulas/atividades.....	33
4.2.7 Descrição das Aulas	34
4.2.8 Referencias	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS	40
APÊNDICES	42
APÊNDICE A – Tradução do Artigo Original de Joule (1850).....	42
APÊNDICE B – Distribuição de momentos pedagógicos	49
APÊNDICE C – Material Didático	50

1. INTRODUÇÃO

Um número crescente de pesquisas tem defendido que a inserção de conteúdos sobre as ciências na educação científica propicia um diálogo entre os saberes e pode contribuir para o desenvolvimento das competências necessárias ao cidadão do século XXI (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS; 2011). E com isso essas ideias são alcançadas a partir das diretrizes apresentadas nos Parâmetros Curriculares Nacionais, que objetivam formar cidadãos contemporâneos capazes de participar ativamente na sociedade e no mundo em que vivem (BRASIL, 2000), desenvolvendo nos estudantes um pensamento crítico e criativo, promovendo o desenvolvimento de competências relacionadas ao processo de ensino e aprendizagem.

Episódios históricos bem explorados, tanto no contexto da fundamentação da teoria em si, quanto aos aspectos relevantes para seu estabelecimento, o que envolve o contexto em que a mesma foi desenvolvida, apresentam pontos em que é permitida uma conciliação entre os interesses de professores e historiadores quanto a uma melhor compreensão da natureza da ciência. Neste sentido, consideramos que o estudo de experimentos históricos tende a contribuir para a compreensão da prática experimental dos estudiosos, ajudando-nos a reconstruir as dimensões tácitas (implícita) de práticas do passado, na medida em que se entende o contexto histórico.

Experimentos históricos, quando apresentados dentro de seu contexto, podem apresentar contribuição na discussão do método científico, na análise da visão empirista-indutivista predominantes nas ciências naturais (GIL PEREZ *et al.*, 2001) e ainda estimular o professor/aluno na realização de experimentos de baixo custo (HEERING e OSEWOLD, 2007; HÖTTECKE, 2000).

Ainda, episódios históricos que envolvem o estabelecimento de teorias, contribuem para uma visão interdisciplinar das ciências e também para mostrar questões éticas e sociais envolvidas. Através da análise histórica desses episódios é possível mostrar que a divisão em ramos das ciências naturais (como, por exemplo, a física dividida em termodinâmica, mecânica, estática, etc.; a biologia dividida em botânica, fisiologia, etc.) é apenas uma questão prática, pois as ciências naturais são um conjunto mais amplo, e estão ligadas com a matemática de uma forma mais complexa do que a simples utilização de equações.

Em conjunto com o estudo do episódio histórico, deve haver uma preparação para que se possa apresentar este material de forma a garantir que as habilidades e competências necessárias aos alunos. Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais, uma formação

autêntica precisa considerar a noção de competências sob dois enfoques: i. como referência dos saberes escolares; e ii. como relação didática.

Os saberes ensinados são simplificados para possibilitar seu ensino. Ao que parece, a transposição direta não seria suficiente. Devem-se assumir também as práticas como referências e formas de articular teoria e prática, pois, além das pesquisas científicas, fundamentais ou aplicadas, também as práticas domésticas, industriais, ideológicas, políticas e tecnológicas, bem como suas funções sociais, devem servir às escolhas didáticas. Busca-se proporcionar aos alunos a aquisição de elementos de compreensão e/ou manuseio de aparatos tecnológicos, de máquinas e dos processos de produção industrial e outras atividades profissionais. Deve-se tratar a tecnologia como atividade humana em seus aspectos prático e social, com vistas à solução de problemas concretos. Mas isso não significa desconsiderar a base científica envolvida no processo de compreensão e construção dos produtos tecnológicos (Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias, 2006).

A formação por competências deve ter por objetivo possibilitar ao sujeito opinar na sociedade em que vive. A concepção da noção de competências como problema de referência dos saberes escolares dá sentido aos conteúdos escolares e vai além. A noção de competências deve ser entendida como uma possibilidade de colocar a relação didática em perspectiva. Devem-se evitar oferecer aos alunos conteúdos específicos fragmentados ou, em muitos casos, técnicas de resolução de exercícios, já que o retorno será isso mesmo: conteúdos reprodutivos, na melhor das hipóteses, de pouca utilidade fora dos bancos escolares. Esse estudo deve levar em consideração aspectos da transposição didática, de forma a não distorcer o episódio histórico e ainda levar em consideração as concepções prévias dos alunos (BATISTA, 2007).

Uma distorção do episódio histórico pode caracterizar uma pseudo-história e levar o aluno a uma ideia errada sobre o fazer científico e o papel da ciência na sociedade (ALCCHIN, 2006). Enquanto que a não consideração das concepções prévias dos alunos pode levar a uma aprendizagem mecânica em que o aluno acaba não compreendendo a evolução de conceitos e teorias. Atentando-se para esses problemas, a associação entre História e Filosofia da Ciência e a compreensão da natureza da ciência podem contribuir para a formação cidadã de professores e alunos.

É imprescindível que haja uma pesquisa aprofundada que possibilite uma análise da contribuição de episódios históricos para o ensino, bem como uma produção de material em História e Filosofia da Ciência (no caso, um estudo contextualizado do episódio histórico) que

apresente as características necessárias para que professor e aluno tenham uma melhor compreensão da natureza da ciência (FORATO; PIETROCOLA; MARTINS; 2011).

Concentramo-nos em um episódio envolvendo a história da termodinâmica, mais especificamente o desenvolvimento da equivalência entre trabalho mecânico e calor, tendo por objetivo construir uma proposta didática numa perspectiva contextualizada de ensino envolvendo experimentos históricos.

Temos como principal objetivo promover a discussão e reflexão de alguns aspectos selecionados da Natureza da Ciência utilizando a História da Ciência, tendo como plano de fundo um episódio histórico. Quanto à natureza da ciência, os aspectos destacados nos textos são principalmente (PUMFREY, 1991):

a) a observação inicial não é possível sem ideias pré-existentes – este aspecto pode ser destacado a partir das várias interpretações que estavam sendo dadas para a relação entre trabalho mecânico e calor. Joule partia da hipótese de que havia uma relação entre as duas grandezas. Somente por este motivo é que planejou um experimento em que as duas grandezas podiam ser medidas e relacionadas.

b) o treino é um componente essencial para se compreender a ciência – para chegar a uma conclusão Joule realizou vários experimentos. Depois de suas conclusões, o experimento foi refeito por outros estudiosos, que procuravam reproduzir os resultados de Joule e assim validar as suas hipóteses.

c) desacordo é sempre possível. A discordância sobre a primazia da relação entre equivalente mecânico e calor de Joule e Mayer oferece várias oportunidades para se discutir aspectos extracientíficos na ciência. A adoção de um destes pesquisadores como o mais “correto” envolve questões como amizades e inimizades nas sociedades científicas, além de questões filosóficas, já que, apesar de terem encontrado resultados semelhantes, as hipóteses de Mayer e Joule eram diferentes na sua essência (MARTINS, 1984).

O material é voltado para alunos do ensino médio. Prevemos que tenha como público alvo turmas de alunos do 2º ano do ensino médio, uma vez que a base de contextualização será a termodinâmica, ao qual se inclui conceitos como calor, trabalho e energia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTEXTUALIZANDO HISTORICAMENTE O EXPERIMENTO

Muitos foram os estudiosos que buscaram entender a natureza e as propriedades do Calor. As ideias que se tinha variavam muito, alterando-se e diferenciando-se ao longo do tempo. Galileu, por exemplo, estudou os fenômenos térmicos e inventou o termômetro a gás. Durante os séculos XVII e XVIII, pesquisadores como Fahrenheit, Reaumur e Celsius desenvolveram vários tipos de termômetros de líquido. Na metade do século XVIII, Black esclareceu a diferença entre temperatura e quantidade de calor, introduziu a calorimetria e foi levado à ideia do calor específico e calor latente. Para Newton e Boyle, o calor estava relacionado aos movimentos de partículas dos corpos.

Em grande parte destes estudos, o calor ainda era considerado um fluido imponderável, o calórico, um suposto fluxo que agia dos corpos mais quentes para os mais frios. Essa teoria não explicava como o calor poderia ser produzido através de trabalho mecânico, notado por Rumford. Em 1789, Rumford se encontrava em Monique, trabalhando com perfurações de canhões em oficinas militares e observou que na usinagem de um cano de canhão, este se aquecia a um ponto, que a água podia chegar a um estado de ebulição mesmo sem a presença de fogo, o que despertava o seu interesse para tentar entender o efeito observado. Rumford passou a realizar sucessivos experimentos que em sua maioria foram desconsiderados pelos defensores do calórico (SHAMOS, 1987).

No curso do desenvolvimento das teorias de calor (1780 - 1840), Kelvin declarou, “Eu a princípio pensei que (o trabalho de Joule de 1847), não tinha validade, porque era diferente da teoria de Carnot”. Para Lavoisier, o calórico era uma substância simples pertencente a todos os reinos da natureza, que podem ser considerados como os elementos dos corpos. Humphry Davy observou experimentos ligados à fricção, obtendo resultados que confirmavam a teoria de Rumford, gerando discussões a respeito da causa dos fenômenos de calor. Estes experimentos enfraqueceram a teoria calórica. O ponto mais importante no desenvolvimento da teoria do calor é a ideia de conservação, que foi criada no decorrer de 1800 (HEERING, 1992).

Somente em meados do século XIX, houve a aceitação da teoria mecânica do calor, devido a novas experiências. Uma delas foi a de Julius Robert Mayer, que considerou calor e trabalho equivalentes e que poderiam ser convertidos um no outro. Rejeitando a teoria do calórico, para ele, o calor consistia em algo gerado a partir de alguma coisa. Dessa maneira o

calor produzido mecanicamente é proporcional ao trabalho empregado em qualquer tipo de processo na natureza. Mayer fundamentou suas ideias para publicação em um artigo, que a primeira instância não foi aceito por ser considerado vago e conter muitos erros sobre conceitos básicos: queda livre, adição vetorial de forças, etc.

Não desistindo, refaz o artigo, aprimorando seus conhecimentos, e desta vez, foi aceito em 1842 pela revista *Annalen der Chemie und Pharmacie*. Nele propõe um novo conceito de “força” e como poderia se aplicar a física, que representa hoje, energia de uma forma geral, admitindo o princípio de causas e efeitos. Mayer não tenta explicar o calor como uma forma de movimento, mas adota uma concepção muito mais geral: ele admite que o calor, o movimento (energia cinética) e a força de queda (energia potencial) são diferentes formas de uma mesma coisa, mas que essa coisa – a “força”, em abstrato – não é propriamente nenhuma dessas três coisas. Esta é uma concepção muito semelhante ao nosso conceito moderno de energia (MARTINS, 1984, p.67). Mayer publicou um dos primeiros trabalhos que levou a formulação da conservação da energia.

Nesse período os trabalhos de James Prescott Joule (1818-1889) já haviam sido publicados (1843), e tratavam o calor a partir de fenômenos eletromagnéticos. Passados dois anos, Joule publicou um artigo que tratava das variações de temperatura produzidas na compressão e dilatação dos gases, e no mesmo ano, publicou sua primeira descrição da experiência de agitação de água através de pás, obtendo êxito somente em 1847, publicando um novo artigo.

Um ano depois, Mayer publicou uma carta de indignação por não ter conseguido publicar seus artigos e requer o direito de pioneiro nas descobertas das transformações mútuas de poder mecânico em calor e por ter calculado o equivalente mecânico do calor. Por desconhecer os trabalhos de Joule, enfatizou que em seus trabalhos havia estudos a respeito dos poderes magnéticos, elétricos, químicos, etc.

A controvérsia entre Joule e Mayer pelo direito de ser considerado o primeiro a obter o equivalente mecânico do calor, resulta na internação de Mayer num asilo para alienados mentais e em sua morte em 1878. No entanto foram os trabalhos de Joule, com suas experiências térmicas, que contribuíram para esses estudos, cuja formulação e determinação do equivalente mecânico do calor tiveram mais influência sobre o desenvolvimento e especialmente a aceitação do princípio da conservação da energia (MARTINS, 1984).

Joule estava familiarizado com as formas de “forças naturais” que hoje chamamos de energia, a conversibilidade de diferentes formas de energia e com técnicas de determinar a potência de um motor. Ele foi capaz de apresentar diversos trabalhos em que descreveu várias

experiências para determinar o valor do equivalente mecânico do calor. Esse resgate histórico possibilita entender que o desenvolvimento da teoria do Calor, não pode ser atribuído a um único pesquisador, mas a vários, sob diferentes perspectivas.

2.2 EXPERIMENTO DO EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR

O artigo utilizado neste trabalho foi o publicado em 1850 nos Proceedings. Para atender nossos objetivos estudamos e traduzimos o artigo original de Joule (ver APÊNDICE A – Tradução do Artigo Original de Joule).

Além da descrição do equipamento e de como foram feitas as medidas, o artigo de Joule apresenta uma pequena introdução do estágio em que se encontravam os estudos sobre o calor. Menciona inicialmente o experimento de Rumford e suas concepções para o calor, e ainda destaca a importância que deveria ter sido dada aos seus trabalhos, já que através deles é possível estimar a quantidade de força mecânica necessária para produzir certa quantidade de calor.

A partir dessas considerações Joule faz um levantamento das concepções que se tinha do calor. Ressalta que para Davy a causa imediata para os fenômenos de calor é o movimento, em 1834 Dulong defende que o efeito calorífico é, sob certas condições, proporcional à força gasta, Faraday relaciona eletricidade, magnetismo e luz e reforça a ideia de que corpos imponderáveis são apenas os expoentes das diferentes formas de calor, o que também era semelhante às ideias de Grove e Mayer.

Os experimentos de Joule são iniciados em 1840, quando comunica a Royal Society suas descobertas a respeito do calor através da eletricidade voltaica. Em 1843, mostra que o calor desenvolvido pela eletricidade magnética é proporcional à força absorvida e que a força do motor eletromagnético é derivada da força de afinidade química na bateria. Em 1844 relaciona quantitativamente força e calor que se confirmam com as experiências de Seguin sobre a dilatação do vapor.

Joule também destaca que no decorrer das pesquisas científicas, passou-se a negar calor como substância, citando Mayer como o primeiro a desenvolver experiências que chegassem a essa conclusão. Em 1842 através do atrito da água consegue elevar a temperatura de 12°C para 13°C, mesmo sem expor detalhes. Em 1843, Joule argumentou que o calor é desenvolvido pela passagem da água através de tubos estreitos, e que cada grau de calor por quilo da água é necessário para sua evolução. De 1845 a 1847 dedica-se em determinar a

relação equivalente entre força e calor, através da agitação da água. Em busca de precisão refaz a experiência no presente artigo de 1850.

2.2.1 Descrição do aparato de Joule

Os termômetros utilizados tiveram seus tubos calibrados e graduados, dois deles foram feitos em Manchester e o terceiro em Paris, e estes quando comparados apresentavam um alto grau de precisão. Basicamente seu aparato consiste em uma roda de pás de bronze com oito braços rotativos trabalhando entre quatro palhetas fixas, dispostos de modo a impedir a condução de calor. Contém um vaso de cobre em que o aparelho gira firmemente, com dois orifícios na tampa, que são estaladas as palhetas, um para a inserção do eixo e o outro para inserção do termômetro, de modo que eles não se chocassem, os pesos de chumbo pesavam 29 libras ($29 \times 0,453 = 13,14$ kg) em alguns casos e em outros 10 libras ($10 \times 0,453 = 4,53$ kg), que eram suspensos por cordas ligadas a um fio que se encontra em uma alavanca de madeira anexada à barra de ferro perpendicular. Através de duas polias, conectando-os ao cilindro central, ainda continha um suporte de madeira, no qual era posto o aparato, evitando possíveis efeitos do calor. A seguir temos a Figura 1 que ilustra a perspectiva do aparato que Joule teria confeccionado para realização de seus experimentos (HEERING,1992):

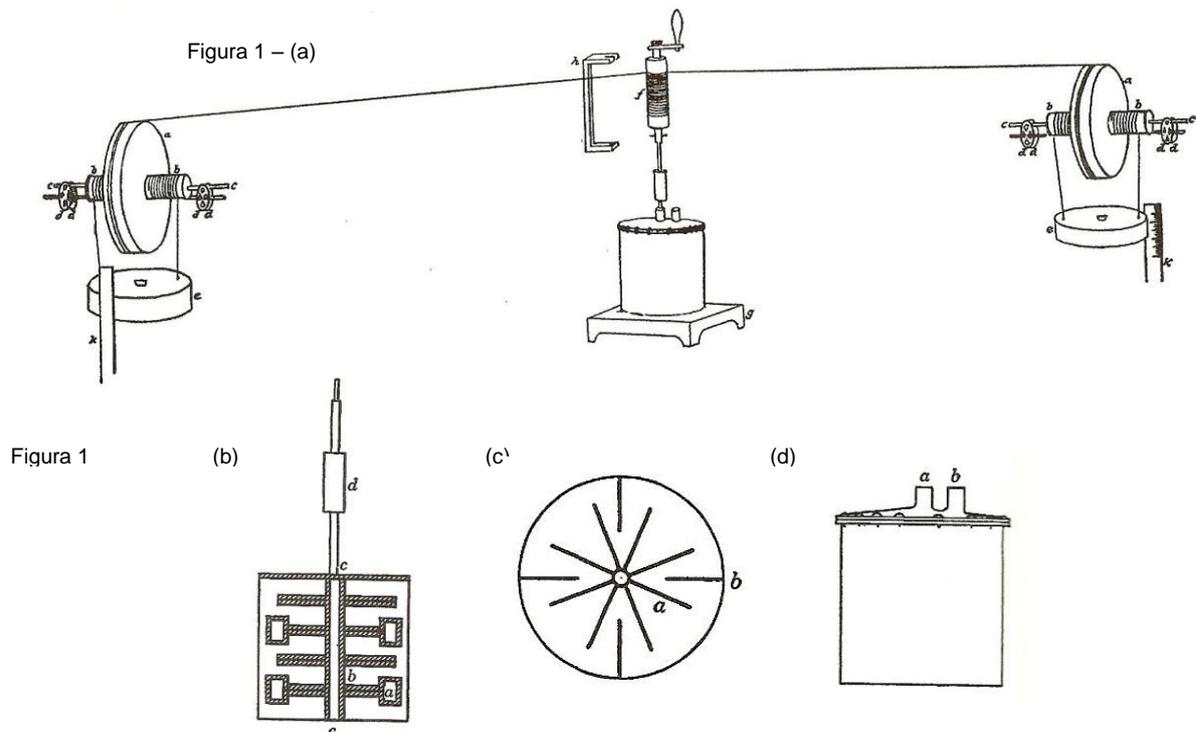


Figura 1 – (a) Perspectiva do aparato de Joule, (b) eixo do aparelho de atrito na vertical, (c) eixo do aparelho de atrito na horizontal, (d) vaso de cobre.

O método de experimentação consistia em medir inicialmente a temperatura, depois soltava-se o rolo permitindo que o fio desenrolasse até que os pesos atingissem o chão, era uma queda de 63 centímetros e se repetia o processo 20 vezes, em seguida verificava-se a temperatura, sempre no início, no meio e no final de cada seção. Levava-se em consideração a posição do aparelho, a quantidade da água contida no recipiente, o tempo gasto, o método da observação do termômetro, a posição do experimentador (JOULE, 1843; 1850).

2.2.2 Determinando o Equivalente Mecânico do Calor

No experimento de Joule, ele fez com que a Energia gravitacional¹ da queda de pesos se transformassem em calor que aumentava a temperatura de uma certa quantidade de água. Então descobriu que

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

O que em sua época a unidade de energia era o $N.m$ que depois foi denominado *Joule*. Podemos dizer ainda que

$$1 \text{ g de água} + 1 \text{ cal} = 1^\circ\text{C}$$

Ou seja, 1 grama de água com um termômetro conectado, ao adicionar a energia correspondente a 1 caloria, a temperatura da água subirá 1°C . Analisando seu experimento o calor é produzido a partir do movimento das pás, com a fricção das moléculas de água, que acrescenta a essas moléculas energia cinética. Este atrito das moléculas de água é medido indiretamente através da temperatura da água.

Então, na medida em que os pesos, de massas totais M , caíam a uma altura H o eixo de atrito era acionado resultando no aquecimento da água, de massa M_{H_2O} . Joule realizou cerca de 20 repetições, e buscou entender o efeito da radiação e da condução do calor, na perda ou elevação da temperatura do aparelho de atrito. Todos os seus resultados foram apresentados em forma de tabelas. Se analisarmos cuidadosamente a tabela 1 do artigo (Joule, 1843). Percebemos que consta os dados da elevação da temperatura, assim como da fricção:

¹ É importante lembrar que o termo “energia gravitacional” só foi utilizado muito posteriormente. Joule ainda considerava diferentes tipos de “forças” ou “trabalhos”.

Dados do Experimento	Média da Temperatura do ar	Diferença entre a média da coluna 4 e 5 e a coluna 2	Temperatura Inicial do aparato	Temperatura Final do aparato	Ganho de Radiação e Fricção
Radiação	57,992125	0,322950	57,662950	57,675925	0,012975
Fricção	57,992125	0,305075	57,399375	57,974625	0,575250
1	2	3	4	5	6

Tabela 1 – Dados de elevação da temperatura do aparelho de atrito

A partir dos dados da tabela no qual o efeito da radiação foi observada, pode-se entender que o efeito da temperatura do ar sobre o aparelho foi para cada grau de diferença entre a temperatura média do ar e do aparelho, $0,04654^\circ$. Temos a média da Radiação = $0,322950$, a média da Fricção = $0,305075$, o ganho da Radiação ($23,01 / 40$) = $0,575250^\circ$ e o ganho da Fricção ($0,519 / 40$) = $0,012975^\circ$. Segue-se que $0,000832^\circ$ deve ser adicionado à diferença entre $0,575250^\circ$ e $0,012975^\circ$, e o resultado, $0,563107^\circ$, será o efeito do aquecimento centesimal do atrito. Mas, para isso, uma quantidade pequena de correção deve ser adicionada na determinação da média das temperaturas dos aparelhos no início e término de cada experimento de atrito. A temperatura média do aparelho nos experimentos de atrito deve, portanto, ser estimada $0,002184^\circ$ maior, que irá diminuir o efeito do aquecimento da atmosfera por $0,000102^\circ$. Isto, somado a $0,563107^\circ$, dá $0,563209^\circ$ como o aumento real médio de temperatura devido ao atrito da água.

Com o objetivo de verificar a quantidade absoluta do calor desenvolvido, foi necessário encontrar a capacidade de calor (a) do vaso de cobre e (b) da roda de pás de bronze. O primeiro foi facilmente deduzido a partir do calor específico do cobre de acordo com M. Regnault. Assim, a capacidade do cobre $25.541 \text{ grãos}^2 \times 0,09515 =$ capacidade de $2430,2$ grãos de água. Uma série de sete experimentos com a roda de pás de bronze, apresentou $1,783$ grãos de água como a sua capacidade, depois de fazer todas as correções necessárias para o calor provocado pelo contato da água com a superfície do metal. Análise de uma parte do vaso mostrou a consistência de um metal muito puro contendo 3.933 grãos de zinco a 14.968 grãos de cobre. Portanto,

$$\begin{aligned} \text{Cap. } 14968 \text{ grs. cobre} \times 0,09515 &= \text{cap. } 1424,2 \text{ grs. água} \\ \text{Cap. } 3933 \text{ grs. zinco} \times 0,09555 &= \text{cap. } 375,8 \text{ grs. água} \end{aligned}$$

$$\text{Total cap. girar o latão} = \text{cap. } 1800 \text{ grs. água}$$

² A unidade de medida grão equivale a $64,79891 \text{ mg}$;

A capacidade de uma tampa de latão, que foi colocada com a finalidade de impedir o contato do ar com a água, tanto quanto possível, era igual à de 10,3 grãos da água. A capacidade do termômetro não tinha de ser estimada, porque era sempre levado à temperatura esperada antes da imersão. A capacidade total do aparelho foi a seguinte:

<i>Água</i>	93229,7
<i>Cobre</i>	2430,2
<i>Latão</i>	1810,3
	<hr style="width: 10%; margin: 0 auto;"/>
<i>Total</i>	97470,2

Assim a quantidade total de calor desenvolvida foi 0,563209° em 97470,2 grãos de água, ou, em outras palavras, o 1 ° F em 7.842299 libras³ de água.

A estimativa da força aplicada para gerar este calor pode ser feita da seguinte forma: os pesos somaram 406152 grãos, sendo nestas circunstâncias, o peso necessário para ser adicionado a um dos pesos de chumbo, a fim de mantê-las em movimento uniforme foi de 2955 grãos. O mesmo resultado, na direção oposta, foi obtido pela adição de 3055 grãos ao outro peso de chumbo. Deduzindo 168 grãos, o atrito do rolamento, a partir de 3005 grãos, média dos números acima, temos 2837 grãos como a quantidade de atrito nos experimentos, que, subtraídos os pesos de chumbo, 403315 grãos como a real pressão aplicada.

A velocidade com que os pesos de chumbo foram ao chão, foi 2,42 polegada por segundo, é equivalente a uma altitude de 0,0076 polegadas. Isso, multiplicado por 20, o número de vezes que os pesos foram em cada experimento, produz 0,152 polegadas, que, subtraído de 1260,248, obtém-se 1260,096 como a altura média corrigida a partir do qual o peso caiu.

Esta queda, acompanhada pela pressão acima referida, representa uma força equivalente a 6050,186 libras através do espaço de um pé, e 0,8464 x 20 = 16,928 pé-libras. Adicionado a ele, para que a força desenvolvida pela elasticidade da cadeia após os pesos tocarem o solo, dá 6067,144 pé-libras como a força média corrigida.

Portanto $\frac{6067,114}{7,842299} = 773,64$ pé-libras⁴, será a força que, de acordo com os experimentos acima do atrito da água, é equivalente a 1° Fahr em uma libra de água.

³ A unidade de medida libra equivale a 450 gramas;

⁴ Um pé é unidade de comprimento equivalente a 30 cm;

Na sequência, Joule apresenta cinco séries de experimentos com suas respectivas tabelas de dados, detalhando os cálculos e correções necessárias na obtenção do equivalente mecânico do calor. As experiências foram feitas com atrito da água, mercúrio e ferro fundido, utilizando diferentes aparatos. Não vamos nos deter na explicação de cada série de experimento, o que não prejudica a compreensão da conclusão final.

Joule considerou que 772,692, o equivalente obtido da fricção da água, é o mais correto, seja pela quantidade de experimentos realizados, e a grande capacidade do aparato para o calor. E chegou a seguinte conclusão:

1° Que a quantidade de calor produzida pela fricção de corpos, seja sólido ou líquido, é sempre proporcional à quantidade de força dispendida.

2° Que a quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água (pesada no vácuo e inicialmente à temperatura entre 55°C e 60°C) de 1°Fahr., requer para seu aumento o gasto de uma força mecânica representada pela queda de 772 lbs., através do espaço de um pé.

2.2.3 Reprodução do experimento por Otto Sibum

Um historiador da ciência que buscou reconstruir o experimento de Joule foi Heinz Otto Sibum, a partir de 1990, baseado no artigo: Sobre o Equivalente Calor Mecânico, publicado na *Philosophical Transactions* em 1850, procurando seguir rigorosamente as poucas instruções adquiridas. O artigo de Joule apresenta, de longe, a descrição da construção do experimento, bem como tabelas numéricas dos dados obtidos em suas séries de experimentação que indicam a existência dessa constante da natureza. O que gerou controvérsias sobre a existência de um número perfeito e tão fiel diante as técnicas de medição usadas no século XIX, assim, Sibum foca seu artigo nas práticas de medição de Joule em seu contexto cultural, e a maneira pela qual se chegou à publicação de 1850.

Na primeira parte do artigo, Sibum traz um relato de suas próprias experiências ao trabalhar com réplicas do experimento original, em seguida, traz uma abordagem histórica das práticas do passado, destacando a importância da confiabilidade das medições.

Reproduzir um experimento histórico, não depende apenas do uso de materiais da época, mas também da capacidade de interação do pesquisador com dados históricos, o que proporciona a historiadores da ciência o uso de variadas metodologias para estudar as práticas antigas. A reprodução de réplicas envolve o desempenho do trabalho experimental, a

exploração de fontes primárias e o aspecto histórico em que essas experiências foram desenvolvidas.

Devido à falta de informação suficiente quanto à descrição do aparelho, uma primeira dificuldade enfrentada foi em relação aos termômetros usados por Joule, que não poderiam ser reconstruídos, tendo de serem substituídos por dois termômetros de Beckmann que poderia garantir a “uniformidade da temperatura”, quanto à turbina de agitação da água diferia de forma crucial da original. Mesmo com tentativas de construir uma boa cópia, os registros existentes, limitavam-se a gravações de números. Não existe indicação de habilidade literária de Joule, tampouco, informações sobre as máquinas e os possíveis problemas de desempenho. Suas anotações são compostas de muitos cálculos detalhados sobre o calor específico dos metais utilizados. Foi preciso uma incansável busca por fontes primárias, que serviu de base para uma nova réplica, que se tornou mais criteriosa, mesmo sabendo que não poderia repetir a sequência mecânica tal como consta nas anotações e nos documentos de Joule.

Em 01 de março de 1992, Sibum começou uma nova série de experimentos utilizando-se de um espaço diferente, pois, de acordo com bases históricas, o ambiente de trabalho de Joule era uma adega espaçosa, que tinha a vantagem de possuir uma uniformidade de temperatura muito superior à de qualquer outro laboratório, ou seja, o imenso calor de radiação durante os testes poderia ser parcialmente compensado por uma espaçosa sala de um nível de temperatura mais baixa, mas, mesmo durante condições meteorológicas aparentemente constantes, após 70 min de duração da série experimental a variação foi de 0,5 graus Celsius, o que não proporcionava credibilidade.

O modelo da turbina adotado diferia muito da que Joule esboçou em 1850, houve também problema com a resistência das cordas para sustentação das massas e seus respectivos pesos. Em seu primeiro teste, ficou claro que não poderia repetir a sequência mecânica tal como consta no texto, sendo todas essas questões fontes de possíveis erros. Contudo, em dez experimentos, foi possível obter um valor para o equivalente calor de 746,89 ftlbs/BTU, depois com novos testes, obteve um valor de 772, 692 ftlbs.

O resultado obtido por Joule está em conformidade com os padrões de hoje, apresentando um desvio padrão de 2,1%, não havendo dúvida para quanto à existência de uma relação equivalente entre força e calor.

O resultado mostra que medições precisas não têm necessariamente de ser em conformidade com o valor atualmente aceito. O historiador da ciência Heinz Otto Sibum,

afirma: “meus resultados mostram a falta de compreensão, a fim de acostumar-me com as técnicas envolvidas no trabalho de Joule” (SIBUM, 1995).

3. METODOLOGIA

Neste trabalho buscamos construir uma proposta didática numa perspectiva contextualizada de ensino envolvendo experimentos históricos, tendo como episódio histórico a busca do equivalente mecânico do calor por Joule.

Para isso, este trabalho possuiu três fases distintas.

A primeira consistiu de uma metodologia baseada na historiografia da ciência, com a busca e análise bibliográfica de fontes primárias e secundárias que permitam compreender a construção do experimento histórico e seus aspectos metodológicos e epistemológicos.

A segunda fase consistiu no trabalho experimental, com a construção e teste do experimento principal, estabelecendo os principais objetivos e problemas da montagem.

A terceira fase consistiu na elaboração da proposta didática em que o experimento histórico será apresentado, juntamente com o estudo do episódio histórico, tendo com base parâmetros que buscam superar ou contornar os obstáculos para implementação da História e Filosofia da Ciência no ensino (FORATO, 2009, vol. 1, p. 188-196; FORATO, *et al.*, 2012 b).

Em síntese, apresentamos os parâmetros para auxiliar a construção de outros cursos, sequências didáticas, textos, inserir na formação de professores e formular novas questões de pesquisas:

1. Estabelecer os propósitos pedagógicos para os usos da HFSC no ensino;
2. Explicitar a concepção de ciência adotada e os aspectos epistemológicos pretendidos;
3. Selecionar o tema e os conteúdos históricos apropriados;
4. Selecionar os aspectos a enfatizar e a omitir em cada conteúdo da história da ciência;
5. Confrontar os aspectos omitidos com os aspectos da NDC objetivados;
6. Definir o nível de detalhamento do contexto não científico a ser tratado;
7. Mediar as simplificações e omissões, pois enfatizar a influencia de aspectos não científicos pode promover interpretações relativistas extremas;
8. Avaliar quando é possível superar ou contornar a ausência de pré-requisitos nos conhecimentos matemáticos, físicos, históricos, epistemológicos;
9. Combinar um grupo de estratégias e recursos didáticos distintos pode compensar a falta de conhecimento em certos conteúdos físicos e matemáticos;
10. Definir o nível de profundidade e formulação discursiva dos conteúdos epistemológicos;
11. Ponderar sobre o uso de fontes primárias na escola básica;

12. Abordar diacronicamente os conteúdos da história da ciência de difícil compreensão atualmente: interessante estabelecer relação entre resultados relevantes para a construção da ciência com conteúdos descartados ou atualmente considerados “esquisitos”;
13. Abordar diacronicamente diferentes concepções de ciência e o pensamento dos filósofos, filósofos naturais e cientistas de distintos períodos e civilizações: Apresentar vários pensadores contemporâneos trabalhando com os mesmos pressupostos metodológicos pode auxiliar a crítica ao preconceito e a anacronismos;
14. Apresentar exemplos de teorias superadas em diferentes contextos culturais permite criticar ideias ingênuas sobre história e epistemologia da ciência, como a possível concepção de que a ciência atual pode resolver todos os problemas;
15. Defender uma nova ideia conflitante com aquelas predominantes no repertório cultural dos estudantes requer o uso de estratégias capazes de criar desconforto, conflitos que permitam o questionamento de ideias preestabelecidas;
16. Compensar a falta de preparo do professor para lidar com saberes da HFC na sala de aula inclui prepará-lo para identificar e problematizar manifestações anacrônicas. Materiais didáticos poderiam incluir orientações e advertências sobre ideias inesperadas e possíveis modos para se lidar com elas;
17. Permitir aos estudantes vivenciarem aspectos dos debates entre teorias rivais favorece a compreensão de aspectos da NDC;
18. Escolher temas que despertem a curiosidade da faixa etária pretendida. A escolha não pode considerar apenas critérios técnicos e objetivos, mas envolver os estudantes é fundamental;
19. Ponderar sobre a quantidade e profundidade dos textos;
20. Ter em mente as diferentes funções sociais do conhecimento acadêmico e dos saberes escolares da escola básica;
21. A linha do tempo com filmes comerciais pode auxiliar no dilema extensão x profundidade;
22. Questionar cada mensagem objetivada sobre NDC em diferentes atividades didáticas e distintos episódios históricos.

4. RESULTADOS

4.1 CONSTRUÇÃO DO EXPERIMENTO SIMILAR AO QUE FOI CONSTRUÍDO POR JOULE

Inicialmente, queríamos reproduzir fielmente o experimento, da mesma forma que Joule teria feito (Figura 1). Começamos a montagem do experimento⁵, e percebemos que não seria possível a reprodução do experimento igual ao original devido à limitação de fontes primárias que nos fornecessem as informações necessárias para tal montagem. Outra dificuldade que nos deparamos foram alguns questionamentos que antecederiam qualquer que fosse a montagem que decidíssemos fazer. Que tipo de material Joule teria utilizado?; Que tipo de peso?; A que situação ambiente se encontrava Joule, no período em que determinou o equivalente? Tais questionamentos nos levaram a procurar meios alternativos para se construir o experimento, não mais igual, e sim, similar, assim, a reprodução desse experimento diferia um pouco da perspectiva do aparato que Joule teria criado, no entanto, estávamos criando respeitando os mesmos princípios básicos, ou seja, a Energia se transforma em calor que aumentava a temperatura de uma certa quantidade de água.

Depois de várias tentativas de montagem e busca por uma melhor construção do aparato, o que parecia simples, tornou-se algo que nos levava a discutir, se realmente os resultados de Joule eram confiáveis, pois durante a montagem sempre apareciam detalhes que refutavam nossas considerações, mesmo assim, persistimos até chegar a um protótipo “adequado” para nossos objetivos. Inicialmente não obtivemos os resultados esperados, mas, diante das dificuldades já era algo positivo, na medida em que passávamos a compreender as implicações de um trabalho experimental.

Selecionamos um calorímetro convencional, não de cobre como o de Joule, mas, de plástico isolado internamente por isopor. Ao invés de pesos, fizemos um sistema no qual o fornecedor de energia mecânica seria um motor comum de pequenas proporções, ligado a uma bateria. Através de duas roldanas, uma partindo do motor e outra conectada ao eixo de atrito, ambas associadas por uma correia, seria possível transformar energia elétrica em energia mecânica.

Inserimos ainda um sensor de precisão para captar os sinais de temperatura, substituindo assim o termômetro, já que estaríamos lidando com pequenos valores de

⁵ As atividades experimentais foram realizadas no laboratório de Física da Universidade Estadual da Paraíba com o apoio e dedicação do Técnico Thiago Araújo.

alteração da temperatura. Os sinais capacitados eram enviados para um software da CidepeLabUSB, o qual controla os dados obtidos que podem ser enviados para o programa do Excel e geramos os gráficos apresentados.

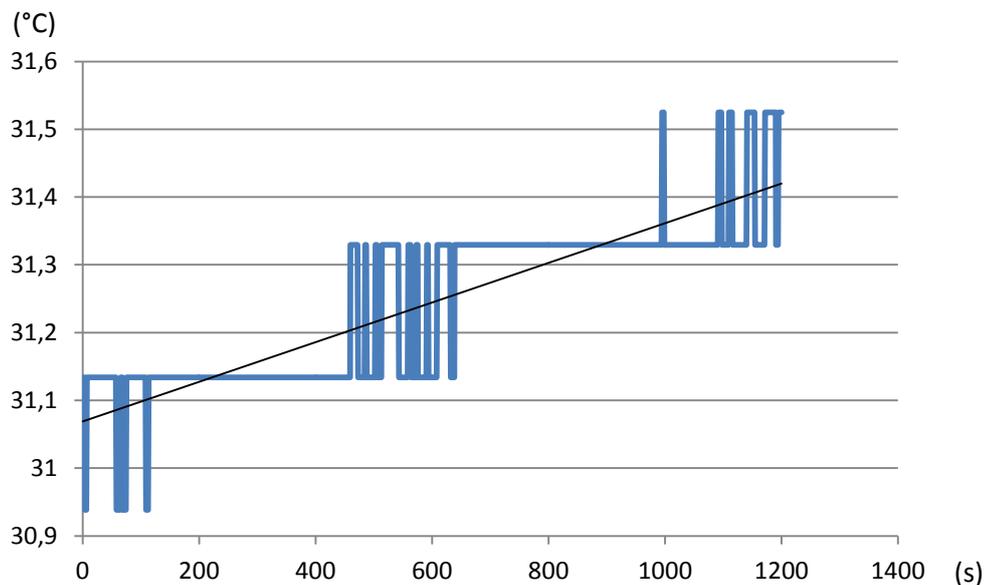
A figura 2a apresenta uma perspectiva dos resultados dessa montagem. Para o eixo de atrito, inicialmente utilizamos materiais simples, como palito de picolé e canudo (fig. 2b) com 5 pás e colocamos 200 ml de água.



Figura 2 – (a) perspectiva da montagem do experimento (b) eixo de atrito com 5 pás.

Depois de vários testes foi possível obter uma alteração de $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inicialmente a água encontrava-se a $31,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e devido ao atrito das pás com a água pôde-se atingir em média a $31,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que consideramos muito bom, mas não preciso. Foram necessários 20 minutos de teste para obterem-se os dados que são expostos:

Gráfico 1 – Temperatura x Tempo



A quantidade da água também se tornou um fator importante para nossas observações, pois, quanto maior sua quantidade, também seria necessária uma maior energia mecânica. Diante essas dificuldades tivemos que rever a montagem do aparato. Além disso, o calor específico da água é muito alto, necessitando um tempo maior para ocorrer a variação da temperatura. Com a bateria não tivemos velocidade o suficiente, então pegamos uma fonte e fizemos as alterações necessárias, para que obtivéssemos mais energia para girar o eixo de atrito. Mesmo assim, não foi detectado um aumento significativo na temperatura. Durante a execução dos testes, sentimos a necessidade de substituir o eixo de atrito por um de maior capacidade, então resolvemos voltar para oficina e fazer novas alterações nas pás.

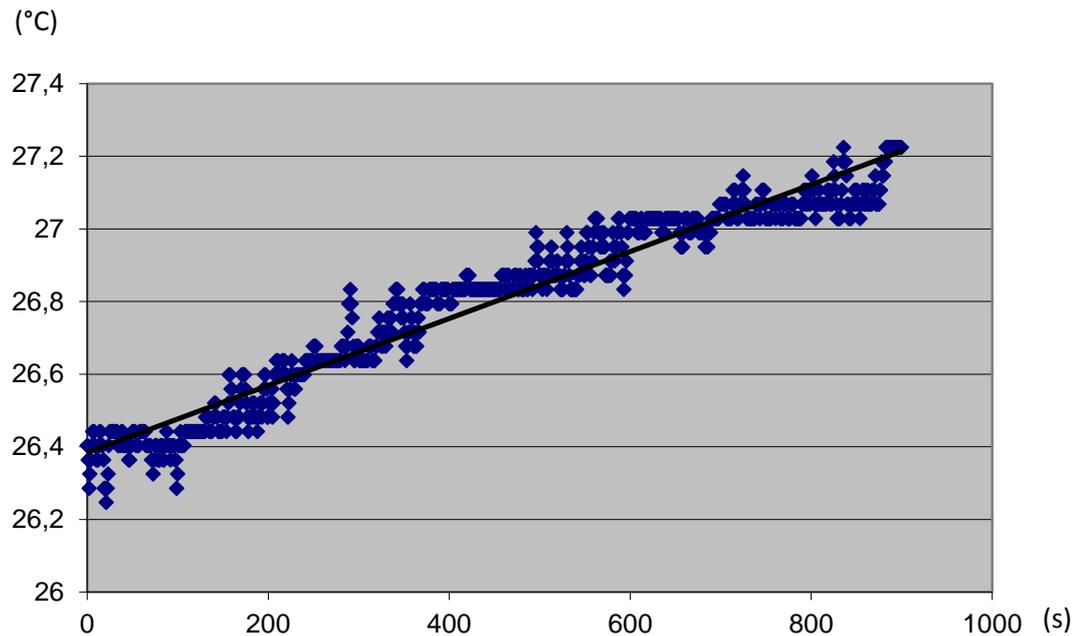
Fizemos desta vez, de metal, agora com 8 pás (fig. 3a), porém, devido ao material escolhido tornou-se também mais pesada, que resultou em um efeito não esperado, pois a mesma, ao agitar a água, fazia com que a escoasse pela lateral do calorímetro, não ocorrendo o atrito das pás com a água, para que se possa identificar a alteração da temperatura inicial. Então, substituímos o eixo de atrito, outro também de metal, só que dessa vez com apenas 2 pás, praticamente alinhadas horizontalmente (fig. 3b).



Figura 3 – (a) eixo de atrito com 5 pás; (b) eixo de atrito com apenas 2 pás.

Com as alterações feitas voltamos aos testes, dessa vez obtemos melhores resultados. Colocamos no calorímetro 300 ml, e em 15 minutos a água passou de $26,4^{\circ}\text{C}$ para $27,2^{\circ}\text{C}$, ou seja, teve um aumento de $0,8^{\circ}\text{C}$, assim, podemos considerar que tivemos melhores resultados. A seguir o gráfico 2 que ilustra os dados obtidos nesse teste:

Gráfico 2 – Temperatura x Tempo



Notamos a necessidade de fazer novas alterações para que fossem realizados novos testes, pois o motor que estávamos utilizando não apresentava as especificações necessárias para os futuros cálculos que iríamos fazer, a fim de determinar o valor numérico do equivalente. Em virtude disso, nosso aparato passou por algumas alterações, a seguir a Figura 4 ilustra a perspectiva do aparato experimental:



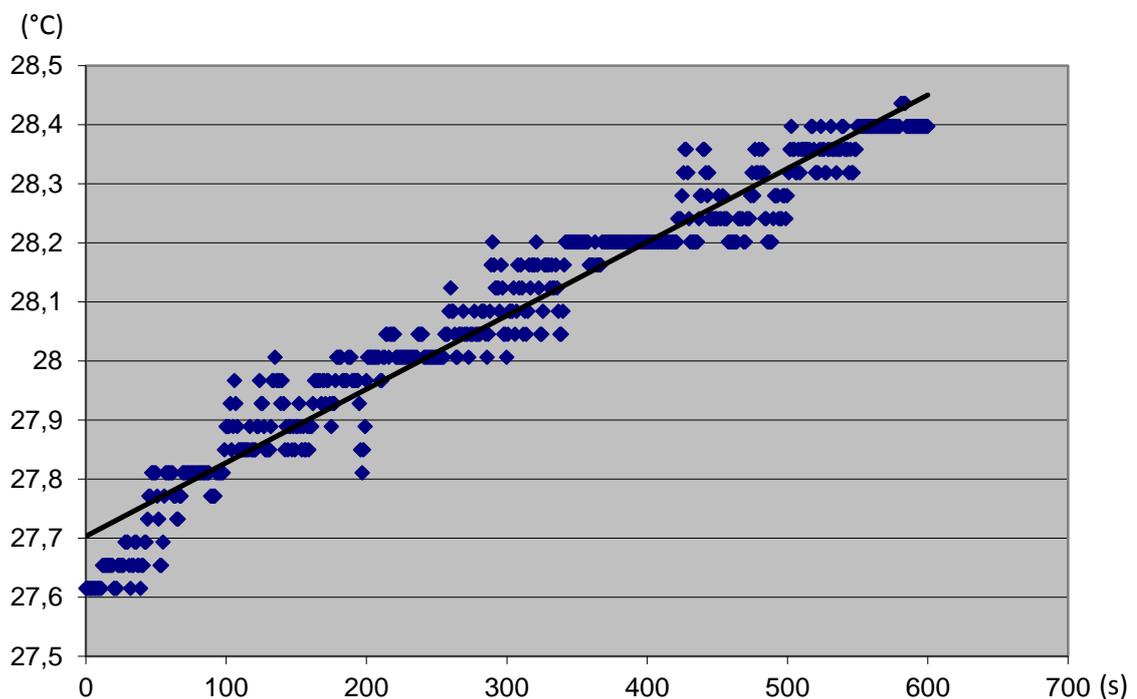
Figura 4 – Perspectiva da reprodução do aparato



Figura 5 – (a) Perspectiva na vertical do calorímetro, (b) eixo do aparelho de atrito na horizontal.

Realizamos novos testes e obtivemos novamente um aumento maior no valor da temperatura, num intervalo de tempo menor, evidenciando que nossos testes estavam corretos. Dessa vez, a partir do atrito das moléculas da água a elevação foi de aproximadamente $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 3 – Temperatura x Tempo



Observando esse gráfico podemos notar que a água estava inicialmente com $27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ passando após 700s para $28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que significa que houve um aumento na temperatura da água de $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.2 PROPOSTA DIDÁTICA

4.2.1 Apresentação

O despertar para ciência é um dos mais libertários momentos para crianças, jovens e adultos. É quando passamos a ter um melhor entendimento do funcionamento de diversos fenômenos presentes na nossa vida e que muitas vezes nem nos damos conta. A Física enquanto ciência presente no cotidiano de todos, muitas vezes é despercebida, mesmo estando presente em todas as nossas ações, cabendo aos professores, na medida do possível, propiciar que os alunos vivenciem a sua aplicabilidade e compreendam sua importância.

Visa-se oferecer uma proposta de discussão acerca da **Termodinâmica**, mais especificamente, **calor e trabalho mecânico**, trabalhando através da história da ciência, observando os diversos obstáculos epistemológicos envolvidos na compreensão desses conceitos. Espera-se que através deste, seja possível ressaltar a importância dos conceitos para o ensino da termodinâmica, a fim de tentar fazer o aluno olhar o mundo à sua volta com outros olhos, conhecendo um pouco sobre história da ciência e percebendo que a física não é só aplicação de fórmulas, e sim uma ciência útil e importante para nossa vida diária.

4.2.2 Introdução e Justificativas

A escolha da termodinâmica como tema deste trabalho deve-se tanto a falta de interesse quanto à dificuldade dos alunos em aprender seus respectivos conceitos, que podem ser relacionados ao cotidiano e vão além das fórmulas. O assunto também possui um caráter mais amplo em termos de conteúdo, pois permite abordar o conceito de conservação de energia sob um ponto de vista diferente da mecânica a que se encontra restrito em livros ou manuais didáticos.

Preparamos um trabalho voltado para discutir com os estudantes conceitos como: calor, trabalho e energia, em que associamos o contexto histórico através de exemplos de diversos estudiosos sobre esse tema, juntamente com o caráter experimental, que permitam uma melhor compreensão.

4.2.3 Objetivos

O objetivo principal é promover a discussão e reflexão de alguns aspectos selecionados da Natureza da Ciência utilizando a História da Ciência, tendo como plano de fundo um episódio histórico.

Dentre os objetivos específicos, pretende-se levar o aluno a:

- ✓ Refletir e discutir acerca das práticas do passado, compreendendo a natureza da ciência;
- ✓ Compreender a prática experimental dos estudiosos, contribuindo para uma visão interdisciplinar das ciências e também para mostrando questões éticas e sociais envolvidas;
- ✓ Compreender que os pensadores não construíam deduções incontestáveis, mas sim hipóteses para explicar os fenômenos naturais;
- ✓ Perceber através da análise histórica que a divisão em ramos das ciências naturais é apenas uma questão prática, e estão ligadas com a matemática de uma forma mais complexa do que a simples utilização de equações.
- ✓ Desenvolver um pensamento crítico e criativo.

4.2.4 Público Alvo

O material é voltado para alunos do ensino médio. Prevemos que tenha como público alvo turmas de alunos do 2º ano, uma vez que a base de contextualização será a termodinâmica, ao qual se inclui conceitos como calor, trabalho e energia.

4.2.5 Número de aulas

São propostas seis aulas com três momentos distintos a serem realizados.

4.2.6 Quadro sintético das aulas/atividades

Atividade	Momentos	Tempo
<u>Aula 1</u> Ideias da Termodinâmica	Discutir ideias iniciais; Apresentar texto: Calor e Trabalho Mecânico	1 aula
	Relacionar entre calor e energia	1 aula
	Biografia de Joule	
<u>Aula 2</u> Experimento de Joule	Resgatar das discussões realizadas na aula anterior;	1 aula
	Apresenta as implicações do trabalho de Joule e os conceitos envolvidos, a partir da Descrição do aparato;	

	Discutir a Reprodução do Experimento de Joule;	1 aula
	Apresentar vídeos relacionados com o experimento ⁶	
	Consequências da discussão das ideias do calor para ciência;	
	Exercícios propostos	
<u>Aula 3</u> Leis da Termodinâmica e Sistematização	Resgatar das discussões realizadas na aula anterior;	1 aula
	Discutir dos Exercícios propostos	1 aula
	Abordar das leis da Termodinâmica	
	Debater acerca das concepções atuais do calor	
Número total de aulas		6 aulas

O planejamento pedagógico da Sequência didática para a intervenção é novamente apresentado no Apêndice B – Distribuição de momentos pedagógicos, sendo este mais detalhado.

4.2.7 Descrição das Aulas

Aula 1: Ideias da Termodinâmica

Objetivo: Compreender que por trás de cada descoberta e cada conceito físico, existe o trabalho de vários pesquisadores, os quais eram pessoas comuns que enfrentaram diversas dificuldades e despenderam de muito tempo para atingirem seus objetivos. Destacamos que desacordo é sempre possível entre pesquisadores e que o treino é um componente essencial para se compreender a ciência.

Conteúdo físico: Calor e Trabalho Mecânico

Recursos instrucionais: Texto do Apêndice C – Material Didático

Momentos:

- O professor iniciará a aula com uma pequena introdução, em termos gerais, do que seria a termodinâmica, visando trabalhar as concepções alternativas dos alunos. Nessa aula entrega aos alunos um material de apoio para que os mesmos possam acompanhar as discussões;
- Continuando a aula, lança-se o seguinte questionamento:

⁶ Disponível em:

Ideias da Termodinâmica (<http://www.youtube.com/watch?v=c9FMItxJxXA&feature=plcp>)

Documentário da replica do experimento (<http://www.youtube.com/watch?v=J78sJiOtnXI>) por Cibelle Celestino Silva.

Nesses vídeos apresentamos o funcionamento do experimento, de modo que o aluno visualize maiores detalhes.

Você já imaginou o que há em comum entre calor, energia e trabalho?

O professor discute com os alunos a relação entre calor, energia e trabalho, pedindo para os alunos relatarem suas próprias opiniões a respeito do texto que está sendo trabalhado;

- Um segundo questionamento lançado:

E para você, calor é energia?

Nesse momento a intenção é discutir as implicações históricas geradas ao longo do tempo. Então, há para os alunos a possibilidade de uma compreensão da natureza da ciência;

- Ainda nessa aula o professor apresentará a seção:

Um pouco sobre Joule;

Nessa discussão, o objetivo será colocar em cheque a concepção que os alunos possuem de que a Física é para os gênios. O professor deverá utilizar-se das informações trazidas sobre a vida dos cientistas para frisar que eles eram pessoas comuns, que possuíam problemas, alguns eram de origem humilde e que trabalhavam; assim como qualquer pessoa e que suas descobertas foram frutos de trabalhos conjuntos. Assim, os alunos perceberão que possuem capacidade de compreender os conceitos físicos e até de aperfeiçoá-los.

Aula 2: Experimento de Joule

Objetivo: Compreender e identificar possibilidades e limitações na construção de um experimento histórico e perceber que a natureza, assim, como a atividade experimental não fornece dados que permitam uma única interpretação, bem como que uma observação não é possível sem uma teoria pré-existente;

Conteúdo físico: Experimento de Joule e as Leis da termodinâmica

Recursos instrucionais: Texto do anexo e vídeo

Momentos:

- O professor inicia a aula resgatando a partir de um breve diálogo as discussões realizadas na aula anterior;
- Em continuidade a discussão, lança-se o seguinte questionamento:

Que tal, então, observarmos com mais detalhes as implicações do trabalho de Joule e os conceitos envolvidos na Primeira Lei da Termodinâmica? Como o “calor, o trabalho e a energia” aparecem nesse contexto?

Tal questão tem a intenção de resgatar os resultados das investigações de Joule que culminaram na sua grande experiência sobre o equivalente mecânico do calor. Nesse

momento explora-se também a ideia de conservação da energia, assunto que é um dos pilares da física, e a conversão entre as diversas formas de energia;

- Ainda nessa aula o professor apresentará a seção:

Descrição do aparato

Exploram-se nessa discussão os métodos de experimentação utilizados por Joule e os tipos de materiais disponíveis na época. Além de discutir acerca dos conceitos físicos relacionados na experimentação.

- Um segundo questionamento da aula será:

Você acha que atualmente seria possível a reconstrução do experimento feito por Joule?

A partir da qual serão apresentadas duas situações distintas de tentativas de reprodução do Experimento de Joule. Nesse momento explora-se a prática experimental dos estudiosos e conseqüentemente as dificuldades encontradas nos mesmos, apresenta-se um vídeo, com o intuito de possibilitar a visualização do experimento com maiores detalhes, o que conseqüentemente pode auxiliar nas discussões.

- Continuando, apresenta-se mais um questionamento:

Diante as experiências citadas qual a relação de energia identificada?

Agora, se discute a relação de calor e energia a partir da reprodução apresentada.

- Finalizando a aula o professor lança um último questionamento:

E você acha que as conseqüências das ideias do calor energia param por ai?

O professor também relaciona as conseqüências da discussão das ideias do calor para ciência que acabou tendo participação em outro processo que desencadeou uma verdadeira revolução na história da ciência, como revolução industrial, catástrofe ultravioleta, as ideias da quantização da energia e da natureza dual da matéria, tudo isso de modo sucinto para que não sobrecarregue seus alunos de informações.

- Ao término da aula o professor solicita aos alunos como atividade de casa, que respondam os exercícios que constam no final da apostila.

Aula 3: Leis da Termodinâmica e Sistematização

Objetivo: Compreender a importância das teorias para construção do conhecimento científico. Revisar os principais aspectos sobre a natureza da ciência tratados ao longo da proposta;

Conteúdo físico: Leis da Termodinâmica

Recursos instrucionais: Texto do anexo.

Momentos:

- O professor inicia a aula resgatando a partir de um breve diálogo as discussões realizadas na aula anterior;
- Em seguida, conversa com alunos sobre os exercícios propostos na última aula.
- ✓ Na primeira questão, discute sobre a teoria do calórico e a teoria atual, enfatizando os pontos comuns e pontos contraditórios entre as duas, destacados pelos alunos ao responderem a questão;
- ✓ Na segunda, discute a relação do experimento de Joule com o desenvolvimento do conceito de calor;
- ✓ Na terceira e última questão, discute a transformação de energia identificadas na reprodução do experimento e o conceito de conservação da energia;

A correção dos exercícios pode ser usada pelo professor para iniciar a síntese do conteúdo abordado no decorrer da proposta, buscando enfatizar os aspectos em que os alunos mostraram dificuldade.

- Após esse resgate dos exercícios propostos o professor segue a aula abordando as leis da Termodinâmica, enfatizando a evolução das ideias da Termodinâmica ao longo do tempo e a sua ligação com as atividades experimentais, apresentando as questões teóricas relacionadas, como por exemplo, temperatura e calor;
- Finalizando essa proposta didática, propõem-se um debate, através do qual, o professor questionará os alunos mediante as discussões feitas ao longo do texto. Nesse momento, os alunos poderão expor suas próprias concepções sobre calor, e o professor poderá esclarecer alguma dúvida remanescente.

4.2.8 Referencias

SOUZA, R. S.; SILVA, A. P. B. Experimentos históricos no Ensino de Física: Joule e o equivalente mecânico do calor. 13º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia. USP, São Paulo. 2012.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a construção do experimento similar ao que Joule desenvolveu, foi possível constatar a importância de fontes primárias para estes estudos históricos e que conseqüentemente proporcionam o entendimento dos aspectos históricos em que essas experiências foram desenvolvidas. Com esses estudos comprovamos a veracidade de tais experimentos e obtemos subsídios para a replicação corretamente dos mesmos, além de compreender como os pensadores desenvolvem ao longo da História da Ciência seus estudos e fundamentam suas ideias.

No decorrer do nosso trabalho e das experiências laboratoriais houve a necessidade de pesquisas voltadas para o tipo de material a ser utilizado, o que apontou a importância de leituras de fontes primárias, como já relatado. Através desses estudos houve flexibilidade de materiais para a adaptação do experimento, respeitando as ideias fundamentais, o que se identifica no tópico acima.

As discussões geradas mediante as análises dos gráficos apresentados, podem apontar o sucesso na reprodução do aparato. Constata-se que através do atrito entre as moléculas da água, há uma elevação quanto a sua temperatura inicial, que implica, sob certos aspectos, na coerência com os estudos desenvolvidos por Joule.

Na elaboração da proposta didática, foi necessário associar outros saberes além dos presentes na pesquisa historiográfica e laboratorial. Para isso, tivemos em mente a necessidade de produzir um material em que a História e a Filosofia da Ciência não fosse apenas ilustrativa, mas que proporcionasse uma compreensão dos conceitos físicos, incorporando também discussões a respeito de aspectos de natureza da ciência. Para a montagem das aulas consideramos os momentos pedagógicos e a importância de ter sempre como ponto de partida as concepções iniciais dos alunos sobre o tema a ser tratado (DELIZOICOV, ANGOTTI, 2003).

Pode-se também, entender a dinamicidade do fazer ciência. Ao estudar os trabalhos de Joule, entendemos os pressupostos e conseqüentemente seus objetivos na determinação do equivalente no qual, o calor é produzido a partir do movimento das pás com a fricção entre as moléculas de água, que acrescenta a essas moléculas Energia cinética, este atrito das moléculas de água é medido indiretamente através da temperatura da água.

Com esse estudo percebemos ainda que para reprodução de um experimento histórico, não bastam leituras de fontes primárias, devendo ser consideradas as diversas implicações

dentro do contexto no qual foi construído, para obter um funcionamento adequado, por isso, conseguimos reproduzi-lo com materiais equivalentes.

Procuramos entender as implicações educacionais da reprodução deste experimento no contexto educacional, elaborando uma sequência didática voltada para o ensino médio, realizando conseqüentemente um estudo do conteúdo de transformação de energia e calor. A sequência elaborada só poderá ser avaliada a partir da sua implementação, o que consiste nas perspectivas futuras deste trabalho.

Parte deste trabalho foi apresentado no 13º Simpósio Nacional de História da Ciência e da Técnica e como resultado de projeto de Iniciação Científica (PIBIC – UEPB).

REFERÊNCIAS

ALLCHIN, D. Why respect for history – and historical error – matters. **Science & Education**, v.15, n.1, p. 91-111, 2006.

BATISTA, I. L.; Reconstruções histórico-filosóficas e a pesquisa em educação científica e matemática. *In*: NARDI, R. (Org.) **A pesquisa em ensino de ciências no Brasil: alguns recortes**. São Paulo: Escrituras Editora, 2007, p. 257-272.

BRASIL, Ministério da Educação e Cultura, República Federativa do Brasil. **Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio**. Brasília: MEC, 2000.

Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias / Secretaria de Educação Básica. – Brasília : Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2006. 135 p. (**Orientações curriculares para o ensino médio** ; volume 2).

DELIZOICOV D. ; ANGOTTI, J. A.; **Uma metodologia para o ensino de física**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2003. v. 184 p.

GIL-PÉREZ, D.; et. al. **Para uma imagem não deformada do trabalho científico**. *Ciência & Educação*, v.7, n.2, p.125-153, 2001.

HEERING, P.; OSEWOLD, D. (eds.). **Constructing scientific understanding through contextual**. Berlin: Frank&Timme, 2007, 340. p. 119-148.

HÖTTECKE, D.; How and what can we learn from replicating historical experiments? A case study. **Science&Education**, Netherlands, v. 9, p. 343-362, 2000.

JOULE, J. P.; On the mechanical equivalent of heat. **Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London**, v. 5, p.839, 1843.

JOULE, J. P.; On the mechanical equivalent of heat. **Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London**, v. 140, p.61 - 82, 1850.

FORATO, T. C. M.; **A Natureza da Ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da Luz**. Tese de Doutorado. São Paulo: FEUSP, v. 1, p. 188-196, 2009.

FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A.; **Historiografia e Natureza da Ciência na sala de aula. Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 28, n. 1: p. 27-59, abr. 2011.

FORATO, T. C. M.; MARTINS, R. A; PIETROCOLA, M.; **History and Nature of Science in High School: Building Up Parameters to Guide Educational Materials and Strategies.** Science & Education: 21 (5): 657-682, 2012 b.

MARTINS, R. A.; **Mayer e a conservação da energia**, Cadernos de História e Filosofia da Ciência (6): 63-95, 1984.

PUMFREY, S.; History of science in the National Science Curriculum: a critical review of resources and their aims. **The British Journal for the History of Science**, v. 24, n. 1, 61-78, 1991.

SHAMOS, M. H.; Great experiments in physics: **The Mechanical of Heat**. Reprint. Originally published: New York: Holt, Rinehart and Winston, 1959. First published in 1987, pag. 166 – 183.

SIBUM, H. O.; **Reworking the Mechanical Value of Heat: Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England.** Stud. Hist. Phil. Sci. Vol. 26, NO. 1. DD. 73-106, 1995.

HEERING, P.; **On J. P. Joule's determination of the mechanical equivalent of heat.** The History and Philosophy of Science in Science Education, Second International HPS&ST Proceedings. Vol. 1, 495 – 504, 1992.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tradução do Artigo Original de Joule (1850)

Rafaelle da Silva Souza
Ana Paula Bispo da Silva

James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor

James Prescott Joule nasceu em Manchester em 1818 e morreu em Sale em 1889. Descendente de proprietários rurais (cervejeiros), recebeu toda sua educação elementar em casa, juntamente com seu irmão mais velho. Após o casamento em 1847, residiu em diferentes domicílios na região de Manchester, sem exercer qualquer profissão ou atuar na cervejaria da família. Começou a se dedicar às investigações de fenômenos muito cedo, realizando seus experimentos em laboratórios que instalava em suas residências ou na cervejaria. Os trabalhos que realizou no período entre 1837 e 1847 são o maior destaque na sua carreira (Rosenfeld, 2007). Estão incluídas, inicialmente, as investigações sobre eletroímãs e motores eletromagnéticos. Posteriormente, passou a estudar os efeitos térmicos envolvidos com o eletromagnetismo.

Joule encontrou uma relação para a produção de calor por uma corrente voltaica através das medidas de temperatura da água em contato com uma porção espiralada de um circuito. Utilizando termômetros sensíveis e fazendo uso de suas habilidades, Joule encontrou as variações de temperatura em relação às variações da intensidade da corrente e da resistência. Apesar do estudo sistemático que realizou sobre efeitos térmicos e passagem de corrente, que culminaram no seu trabalho final de janeiro de 1843, Joule não conseguiu determinar a natureza do calor (Joule, 1843a). Os experimentos não permitiam concluir se o calor poderia ou não ser uma substância (Rosenfeld, 2007). Somente com o experimento que realizou posteriormente, em que isolou um motor eletromagnético num recipiente com água (Joule, 1843b), pôde chegar à conclusão de que o calor produzido somente poderia ser de origem dinâmica.

Sua linha de pensamento o levou a considerar as relações entre calor e trabalho mecânico, mas seu conhecimento superficial de matemática tornava suas observações limitadas, o que também ocorria com suas atividades experimentais, que buscavam uma relação simples entre as variáveis envolvidas. Os resultados de suas investigações foram escritos em uma série de artigos que culminaram na sua grande memória sobre equivalente mecânico do calor, publicada em 1850. Em todos os artigos, Joule descreve minuciosamente os equipamentos utilizados, o modo como as medidas foram obtidas e apresenta várias tabelas com os resultados. Em 1850, foi eleito membro da Royal Society, desfrutando de posição acadêmica de autoridade (Rosenfeld, 2007).

Dentre os vários trabalhos, disponíveis em Joule (1887), escolhemos para apresentar aquele que é mais lembrado quando se trata da determinação do equivalente mecânico do calor, ou seja, o que trata da obtenção do equivalente pela fricção da água usando um conjunto de roldanas e pesos. Nele, Joule considera as mudanças de temperatura que ocorrem quando a água é movimentada em direções contrárias (fricção entre fluidos) por um conjunto de pás colocadas dentro de um calorímetro. A movimentação das pás é feita através de pesos ligados ao seu mecanismo de movimentação, e que estão pendurados nos extremos de um conjunto de polias. A hipótese é que a queda dos pesos produzirá trabalho mecânico no interior do calorímetro, movimentando as pás e modificando a temperatura. O experimento

precisou ser repetido várias vezes para que fosse possível encontrar um resultado, já que o calor específico da água é muito grande e eram necessárias várias descidas dos pesos para um aumento significativo da temperatura. Foi publicado na *Philosophical Transactions* da Royal Society em 1850.

O experimento representa também o ápice dos trabalhos de Joule envolvendo efeitos térmicos. Como o próprio autor apresenta no início do artigo⁷, a natureza do calor era objeto de diferentes opiniões e teve vários personagens e experimentos envolvidos. Entre esses personagens, está Jules Mayer, que se envolveu numa controvérsia com Joule sobre a primazia na determinação do equivalente calórico (Martins, 1984).

No entanto foram os trabalhos de James Prescott Joule, com suas experiências térmicas, que mais contribuíram para esses estudos. Sua formulação e determinação do equivalente mecânico do calor tiveram mais influência sobre o desenvolvimento e também para a aceitação do princípio da conservação da energia (Martins, 1984). Suas contribuições foram de tal importância que permanecem discutíveis até então, caracterizando um alto grau de importância para o estudo de ciências naturais, para conhecer os fenômenos e buscar explicações.

SOBRE O EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR

“Calor é uma agitação muito rápida das partes insensíveis do objeto, que produz em nós aquela sensação a partir da qual denominamos o objeto quente; então o que em nossa sensação é *calor*, no objeto nada mais é que *movimento*”. Locke

“A *força* de um corpo se movendo é proporcional ao quadrado da sua velocidade, ou ao peso com o qual ele se oporia contra a gravidade”. Leibnitz

De acordo com a promessa que fiz a Royal Society, há alguns anos, agora tenho a honra de presentear-los com os resultados dos experimentos que fiz, a fim de determinar o equivalente mecânico do calor com exatidão. Vou começar com um breve esboço da evolução da doutrina mecânica, esforçando-se para me restringir, por razões de concisão, às notícias de pesquisas que estão diretamente relacionados com o tema. Logo, não vou ser capaz de analisar o trabalho valioso do Sr. Forbes e outros ilustres homens, cujas pesquisas sobre o calor radiante e outros assuntos não estão inseridos no âmbito deste trabalho

Por um longo tempo foi considerada favorita a hipótese que o calor consiste de “uma força ou potência pertencente aos corpos”⁸, mas foi reservado a Conde Rumford fazer os primeiros experimentos a favor daquela visão. Aquele justamente reconhecido filósofo natural demonstrou através de seus experimentos engenhosos que a grande quantidade de calor formada na escavação da cavidade cilíndrica do canhão não poderia ser associada a uma mudança da capacidade calorífica do metal; e portanto, ele concluiu que o movimento do escavador era comunicado às partículas do metal, e assim produzindo o fenômeno do calor: - “Parece-me”, ele comenta, “extremamente difícil, se não quase impossível, ter uma idéia qualquer diferente de qualquer coisa, capaz de ser excitado e comunicado, da maneira como o calor foi excitada e comunicado nestes experimentos, exceto que seja pelo movimento”⁹.

Uma das partes mais importantes do artigo do Conde Rumford, embora pouca atenção tem sido dada até agora, é aquela em que ele faz uma estimativa da quantidade da força mecânica necessária para produzir uma certa quantidade de calor. Referindo-se ao seu terceiro

⁷ Mantivemos as notas de rodapé que o autor, que são precedidas por [J].

⁸ [J] Crawford sobre Calor Animal, p.15.

⁹[J] “An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction” *Phil. Trans.* Abridged, vol xviii. p. 286.

experimento, ele observa que “a quantidade total de água gelada que, com o calor gerado pelo atrito, e acumulado em 2h 30m, pode ter sido aquecido a 180°, ou fez ferver =26,58 lbs¹⁰.” Na página seguinte, ele afirma que “o equipamento usado no experimento pode ser facilmente carregado pela força de um cavalo (embora, para tornar o trabalho mais leve, dois cavalos foram realmente empregados em fazê-lo).” Ora, a potência de um cavalo é estimado por Watt em 33.000 mil pés-libras por minuto¹¹, e por isso se continua por duas horas e meia, será equivalente a 4.950,000 pé-libras¹², o que, de acordo com a experiência Conde Rumford, será equivalente a 26.58 lbs de água aquecida a 180°. Daí, o calor necessário para elevar uma libra de água de 1° será equivalente à força representada por 1034 pé-libras. Este resultado não muito diferente do que deduzi em minha própria experiência apresentada nesse artigo, ou seja, 772 pé-libras; e deve ser observado que o excesso do equivalente do Conde Rumford, é apenas, como poderia ter sido antecipada a partir da circunstância, que ele próprio menciona, que “nenhuma estimativa foi feita do calor acumulado na madeira da caixa, nem daquele que se dispersou durante o experimento.”

Ao final do último século, Sir Humphry Davy apresentou um trabalho a Dr. Beddoes’ West Country Contributions, intitulado, “Researches on heat, light and respiration”¹³, na qual deu ampla confirmação da visão do Conde Rumford. Através da fricção de dois pedaços de gelo entre si no vácuo produzido por uma bomba de vácuo, uma parte deles foi fundida, ainda que a temperatura do outro tenha sido mantida abaixo do ponto de congelamento. Este experimento foi ainda mais decisivo a favor da doutrina da imaterialidade do calor, na medida em que a capacidade do gelo para o calor é muito menor que a da água. Foi portanto com razão que Davy inferiu que “a causa imediata do calor é movimento, e as leis da sua comunicação são precisamente as mesmas leis de comunicação do movimento”¹⁴.

As pesquisas de Dulong sobre calor específico de fluidos elásticos foram recompensadas pela descoberta espetacular do fato que “volumes iguais de todos os fluidos elásticos, a mesma temperatura, e sob a mesma pressão, sendo comprimidos ou dilatados repentinamente para a mesma fração de seus volumes, liberam ou absorvem a mesma *quantidade absoluta de calor*”¹⁵. Esta lei é de extrema importância no desenvolvimento da teoria do calor, na medida em que prova que o efeito calorífico é, sob certas condições, proporcional à força dispendida.

Em 1834 Dr. Faraday demonstrou a “Identidade das forças química e elétrica”. Esta lei, juntamente com outras descobertas simultâneas daquele grande homem, mostrando as relações que existem entre magnetismo, eletricidade e luz, permitiu-o avançar a ideia que os chamados corpos imponderáveis são meramente os expoentes de diferentes formas da Força. Sr. Grove e Sr. Mayer também advogaram poderosamente a favor desta visão.

Minhas próprias experiências em relação ao assunto foram iniciadas em 1840, ano em que comuniquei à Royal Society minha descoberta da lei do calor desenvolvido pela eletricidade voltaica, uma lei a partir da qual as deduções foram estabelecidas imediatamente: 1° que o calor desenvolvido por qualquer par voltaico é proporcional, *caeteris paribus*¹⁶, à sua intensidade ou força eletromotriz, e 2°, que o calor desenvolvido pela combustão de um corpo é proporcional à intensidade de sua afinidade para com o oxigênio. Eu, assim, consegui estabelecer relações entre calor e afinidade química. Em 1843, mostrei que o calor

¹⁰ A unidade “lbs” (libras) está sendo utilizada para medir a quantidade de água, ou seja, massa. Neste caso 1 lb=450gramas. [J] “An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction” *Phil. Trans.* Abridged, vol xviii. p. 283.

¹¹ A unidade 1 pé-libra por minuto é unidade de potência e equivale a 0,023 W.

¹² A unidade 1pé-libra é unidade de trabalho/energia e equivale a 1,356 J.

¹³ “Pesquisas sobre calor, luz e respiração”

¹⁴ [J] *Elements of chemical philosophy*, p. 94.

¹⁵ [J] *Mémoires de l’Académie des Sciences*, t. x. p. 188.

¹⁶ Expressão latina para “as demais variáveis sendo constantes”.

desenvolvido por eletricidade-magnética é proporcional à força absorvida; e que a força do motor eletromagnético é derivada da força química de afinidade na bateria, uma força que de outra forma seria desenvolvida na forma de calor: a partir destes fatos, considere justificável anunciar "que a quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água em um grau na escala Fahrenheit, é igual, e pode ser convertida em, uma força mecânica capaz de levantar 838 lbs. perpendicular à altura de um pé¹⁷".

Em um trabalho subsequente, lido perante a Royal Society em 1844, esforcei-me para mostrar que o calor absorvido e desenvolvido pela rarefação e condensação do ar é proporcional a força desenvolvida e absorvida naquelas operações¹⁸. A relação quantitativa entre força e calor deduzida destes experimentos, é quase idêntica àquela derivada dos experimentos eletromagnéticos já mencionados, e é confirmada pelos experimentos do Sr. Seguin sobre a dilatação do vapor.

A partir da explicação dada pelo Conde Rumford o calor resultante da fricção de sólidos, pode-se antecipar, como uma coisa natural, que a evolução de calor também seria detectada na fricção de corpos líquidos e gasosos. Além disso, houve muitos fatos, como, por exemplo, o aquecimento do mar depois de alguns dias de tempestade, que tinha sido comumente atribuída ao atrito do fluido. No entanto, o mundo científico, preocupado com a hipótese de que o calor é uma substância, e seguindo as deduções defendidas por Pictet de experiências não suficientemente delicadas, quase por unanimidade negou a possibilidade de geração de calor desta forma. A primeira menção, que conheço, de experimentos em que a evolução de calor a partir do atrito de fluido é afirmada, foi em 1842 por Sr. Mayer¹⁹, que afirma ter elevado a temperatura da água de 12 °C a 13 °C, por agitação, sem contudo, indicar a quantidade de força empregada, ou as precauções tomadas para assegurar um resultado correto. Em 1843, anunciei o fato de que "o calor é liberado pela passagem da água através de tubos estreitos"²⁰, e que cada grau de calor por lb. de água requer para sua evolução, uma força mecânica representada por 770 pé-libras. Posteriormente, em 1845²¹ e 1847²², empreguei uma turbina para produzir atrito no fluido, e obtive os equivalentes de 781.5, 782.1 e 787.6, respectivamente, da agitação da água, óleo e mercúrio. Resultados coincidindo tão proximamente um com o outro, e com aqueles anteriormente obtidos a partir de experimentos com fluidos elásticos, e a máquina electromagnética, não deixam dúvidas em minha mente quanto a existência de uma relação equivalente entre força e calor; mas ainda é de grande importância obter essa relação com precisão ainda maior. É o que apresento no presente trabalho.

Descrição do Aparato - Os termômetros empregados tinham os tubos calibrados e graduados de acordo com o método indicado primeiramente por Sr. Regnault. Dois deles, que irei designar por A e B, foram construídos pelo Sr. Dancer de Manchester; o terceiro, designado por C, foi feito pelo Sr. Fastré em Paris. A graduação desses instrumentos era tão correta que, quando comparadas em conjunto suas indicações coincidiam para cerca de 1/100 de um grau Fahr. Também possuía um outro instrumento exato feito pelo Sr. Dancer, em escala que abrangia tanto o congelamento quanto os pontos de ebulição. O último ponto neste termômetro padrão foi obtido, de maneira habitual, por imersão do bulbo e haste no vapor resultante de uma considerável quantidade de água pura em rápida ebulição. Durante o teste do barômetro situou-se em 29.94

¹⁷ Um pé é unidade de comprimento equivalente a 30 cm.

¹⁸ [J] Ibid. vol xxvi. PP. 375.379.

¹⁹ [J] Annalen of Woehler and Liebig, May 1842.

²⁰ [J] Phil. Mag. vol. xxiii, p. 442.

²¹ [J] Phil. Mag., vol xxvii, p. 205.

²² [J] Ibid. vol. Xxxi, p. 173 e Comptes Rendus, tome xxv, p. 309.

polegadas²³, e a temperatura do ar foi de 50°; para o ponto observado era necessário uma pequena correção de redução de 0.760 metros e 0°C., a pressão utilizada na França, acredito que no Continente em geral, para determinar o ponto de ebulição, e que tem sido empregada por mim em pesquisas termométricas acuradas têm sido construídas nessa base²⁴. Os valores das escalas dos termômetros A e B foram apurados ao mergulhá-los, juntamente com o padrão, em grandes volumes de água mantida constante em várias temperaturas. O valor da escala do termômetro C foi determinado por comparação com A. Assim, encontrou-se que o número de divisões correspondente a 1° Fahr. nos termômetros A, B e C, foram 12.951, 9.829 e 11.647, respectivamente. E uma vez que a prática constante, me permitiu ler a olho nu 1/20 de uma divisão, segue-se 1/200 de um grau Fahr. foi uma temperatura considerável.

Placa VII. fig. 1 representa um plano na vertical, e fig. 2, na horizontal, do aparato empregado para produzir a fricção da água, consistindo uma turbina de latão formada por oito conjuntos de braços rotativos, *a, a, & c*, que trabalha entre quatro conjuntos de palhetas fixas, *b, b, & c*, fixada numa folha de bronze. O eixo da roda de pás de bronze trabalhou livremente, sem tremer, por seus rolamentos *c, c*, e em *d* foi dividido em duas partes por um bloco de madeira, de modo a impedir a condução de calor nessa direção.

Fig. 3 representa a base em que o aparato de cobre rotativo foi firmemente montado: ele tinha uma tampa de cobre, o suporte do qual, equipados com uma haste muito fina saturado com chumbo, pode ser parafusado perfeitamente estanques ao suporte do vaso de cobre. Na tampa havia dois pescoços, *a, b*, o primeiro para o eixo que gira sem tocar e o segundo para a inserção do termômetro.

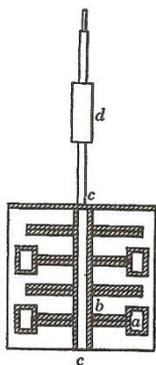


Figura 1

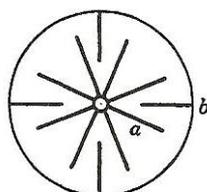


Figura 2

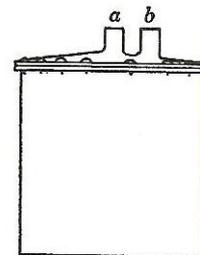


Figura 3

[Além do experimento para fricção da água, Joule detalha mais dois equipamentos, utilizados para a fricção de mercúrio e de ferro fundido, com materiais e alguns detalhes diferentes.]

Fig. 9 é uma visão em perspectiva da máquina utilizada para definir o aparato de fricção que acabamos de descrever, em movimento. *a a* são polias de madeira, 1 pé de diâmetro e 2 polegadas de espessura, tendo rolos de madeira *bb, bb*, 2 polegadas de diâmetro e eixos de aço *cc, cc*, um quarto de uma polegada de diâmetro. As polias foram feitas perfeitamente e iguais uma a outra. Seus eixos foram apoiados por rodas de fricção de bronze

²³ A unidade 1 polegada equivale a 2,5 cm.

²⁴ [J] Uma pressão barométrica de 30 polegadas de mercúrio a 60° é geralmente muito empregada neste país, e felizmente concorda quase exatamente com o padrão continental. No "Report of the Committee appointed by the Royal Society to consider the Best method of adjusting the Fixed Points of Thermometers", Philosophical Transactions, Abridged, xiv, p. 258, a pressão barométrica de 29.8 é recomendada, mas a temperatura não é dada – uma omissão surpreendente em um trabalho tão exato em outros aspectos.

ddd, dddd, os eixos de aço de que foram furados e fixados em placas de madeira firmemente pregadas nas paredes da sala²⁵.

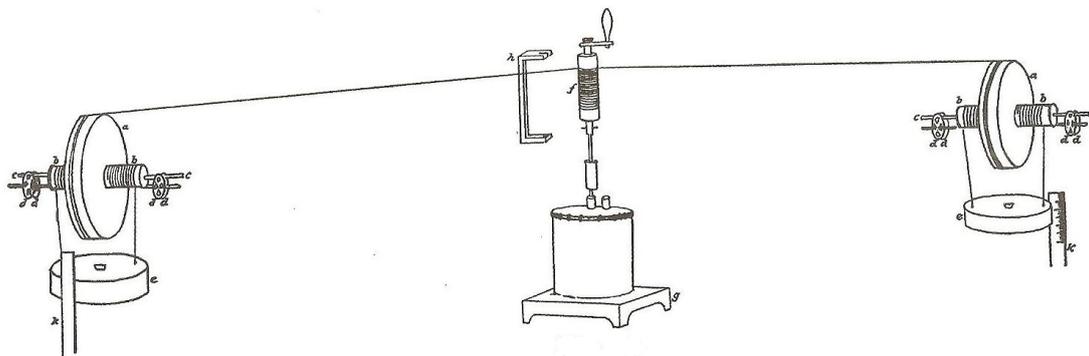


Figura 9

Os pesos de chumbo, *e, e*, que em alguns dos experimentos que se seguiu pesava cerca de 29 lbs., e em outros cerca de 10 lbs. a peça, foram suspensos por cordas dos rolos *bb, bb*, e o fio ligado às polias *a a*, conectando-os com a rolo central *f*, que, por meio de um pino, poderia com facilidade ser anexado, ou removido do eixo do aparato de fricção.

A base de madeira *g*, sobre a qual o aparato de fricção estava, foi perfurada por uma série de fendas transversais, de modo que apenas alguns cortes nos pontos da madeira entraram em contato com o metal, enquanto que o ar tinha livre acesso a quase todas as partes do mesmo. Desta forma, a condução de calor à substância foi evitada. Uma grande tela de madeira (não representada na figura) impedia totalmente os efeitos do calor radiante proveniente da pessoa do experimentador.

O método de experimentação foi muito simples, como segue: - A temperatura do aparato de fricção foi obtida e os pesos foram elevados e fixos com ajuda do padrão *h*, o rolo estava preso ao eixo. Foi obtido o peso preciso dos pesos acima do “zero” da escala, determinada pelas régua de madeira *k, k*, e o rolo foi liberado e deixado rolar até os pesos atingirem o chão do laboratório, o que correspondeu a uma queda de quase 63 polegadas. O rolo foi então removido do padrão, os pesos erguidos novamente, e a fricção [líquido-líquido] refeita. Após a repetição deste procedimento por 20 vezes, o experimento foi concluído com outra observação da temperatura do aparato. A temperatura média do laboratório foi determinada com medições feitas no início, meio e no término de cada experimento.

Previamente, ou imediatamente após cada experimento, eu testei os efeitos da radiação e condução do calor da e para a atmosfera, seja no aumento ou diminuição da temperatura do aparato de fricção. Nestes testes, a posição do aparato, a quantidade de água contida nele, o tempo em utilização, o método de observar os termômetros, a posição do experimentador, durante um pequeno intervalo de tempo, com exceção de quando o aparato estava em repouso, permaneceram iguais em todos os experimentos em que o efeito de fricção era observado.

[Na sequência, Joule apresenta cinco séries de experimentos com suas respectivas tabelas de dados, detalhando os cálculos e correções necessárias na obtenção do equivalente mecânico do calor. As experiências foram feitas com atrito da água, mercúrio e ferro fundido, utilizando diferentes aparatos. Não vamos nos deter na explicação de cada série de experimento, o que não prejudica a compreensão da conclusão final.]

²⁵ [J] A sala estava localizada num espaçoso porão, que tinha a vantagem de possuir uma uniformidade de temperatura superior àquela de qualquer outro laboratório que eu pudesse usar.

A Tabela seguinte contém um resumo dos equivalentes obtidos a partir dos experimentos detalhados anteriormente. Na quarta coluna eu apresento os resultados com as correções necessárias para considerá-los no vácuo.

TABELA IX				
No. da série	Material empregado	Equivalente no ar	Equivalente no vácuo	média
1	Água	773,640	772,692	772,692
2	Mercúrio	773,762	772,814	774,083
3	Mercúrio	776,303	775,352	
4	Ferro fundido	776,997	776,045	774,987
5	Ferro fundido	774,880	773,930	

É altamente provável que o equivalente do ferro fundido tenha sido aumentado um pouco pela abrasão das partículas durante a ficção do metal, a qual não poderia ocorrer sem a absorção de certa quantidade de força superando a atração da coesão. Mas desde que a quantidade removida na abrasão não foi consideravelmente suficiente para ser pesada após a finalização dos experimentos, o erro desta fonte não pode ser relevante. Considero que 772,692, o equivalente obtido da fricção da água, é o mais correto, seja pela quantidade de experimentos realizados, e a grande capacidade do aparato para o calor. E uma vez que, mesmo na fricção de fluidos, foi impossível evitar inteiramente a vibração e produção de um pequeno som, é provável que o resultado acima é um pouco maior do que o devido. Entretanto, concluiria, considerando os experimentos descritos neste trabalho:

1º Que a quantidade de calor produzida pela fricção de corpos, seja sólido ou líquido, é sempre proporcional à quantidade de força dispendida. E,

2º Que a quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água (pesada no vácuo e inicialmente à temperatura entre 55° e 60°) de 1ºFahr., requer para seu aumento o gasto de uma força mecânica representada pela queda de 772 lbs., através do espaço de um pé.

Fonte:

JOULE, James Prescott. On the mechanical equivalent of heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 140, p. 61-82, 1850.

MAGIE, William Francis. *A source book in physics*. New York: McGraw-Hill, 1935, pp. 203-211.

Referências

JOULE, James Prescott. On the mechanical equivalent of heat. *Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London*, v. 5, p.839, 1843a.

JOULE, James Prescott. On the calorific effects of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat. *Philosophical Magazine*, v. xxiii, p. 123-159, 1843b

JOULE, James Prescott. *Joint Scientific Papers of James Joule*. The Physical Society of London. Londres: Taylor and France, 1887.

MARTINS, Roberto de Andrade. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (6): 63-95, 1984.

ROSENFELD, Leon. James Joule. Vol. 2, pp. 1246-1248. In: GILLISPIE, C. C. (org.) *Dicionário de biografias científicas*. Trad. Carlos Almeida Pereira [et al.]. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007. 3v.

APÊNDICE B – Distribuição de momentos pedagógicos

Atividade	Momentos	Tempo
<u>Aula 1</u> Ideias da Termodinâmica	Discutir ideias iniciais; Apresentar texto: Calor e Trabalho Mecânico	1 aula
	Relação entre calor e energia	1 aula
	Biografia de Joule	
<p>Apresentaremos o trabalho de vários pesquisadores, seus objetivos e dificuldades. Destacando que desacordo é sempre possível entre pesquisadores e que o treino é um componente essencial para se compreender a ciência. O professor iniciará a aula com uma pequena introdução, em termos gerais, do que seria a termodinâmica, visando trabalhar as concepções alternativas dos alunos. Nessa aula entrega aos alunos um material de apoio para que os mesmos possam acompanhar as discussões.</p> <p>Nessa discussão, o objetivo será colocar em cheque a concepção que os alunos possuem de que a Física é para os gênios, o professor deverá utilizar-se das informações trazidas sobre a vida dos cientistas para frisar que eles eram pessoas comuns, que possuíam problemas, alguns eram de origem humilde e que trabalhavam; assim como qualquer pessoa e que suas descobertas foram frutos de trabalhos conjuntos. Assim, os alunos perceberão que possuem capacidade de compreender os conceitos físicos e até de aperfeiçoá-los.</p>		
<u>Aula 2</u> Experimento de Joule	Resgate das discussões realizadas na aula anterior; Apresenta as implicações do trabalho de Joule e os conceitos envolvidos, a partir da Descrição do aparato;	1 aula
	Reprodução do Experimento de Joule; Apresentação de vídeos	
	Consequências da discussão das ideias do calor para ciência;	1 aula
	Exercícios propostos	
	<p>Apresentaremos as possibilidades e limitações na construção de um experimento histórico e perceber que a natureza, assim, como a atividade experimental não fornece dados que permitam uma única interpretação, bem como que uma observação não é possível sem uma teoria pré-existente, resgatando os resultados das investigações de Joule. Nesse momento explora-se também a ideia de conservação da energia.</p> <p>O professor também relaciona as consequências da discussão das ideias do calor para ciência que acabou tendo participação em outro processo que desencadeou uma verdadeira revolução na história da ciência, como revolução industrial, catástrofe ultravioleta, as ideias da quantização da energia e da natureza dual da matéria, tudo isso de modo sucinto para que não sobrecarregue seus alunos de informações.</p>	
<u>Aula 3</u> Leis da Termodinâmica e Sistematização	Resgate das discussões realizadas na aula anterior; Discussão dos Exercícios propostos	1 aula
	Abordagem das leis da Termodinâmica	1 aula
	Debate acerca das concepções atuais do calor	
<p>Destacando a importância das teorias para construção do conhecimento científico. Poderá ser feita uma síntese do conteúdo abordado no decorrer da proposta, buscando enfatizar os aspectos em que os alunos mostraram dificuldade.</p> <p>Após esse resgate dos exercícios propostos o professor segue a aula abordando as leis da Termodinâmica, enfatizando a evolução das ideias da Termodinâmica ao longo do tempo e a sua ligação com as atividades experimentais. Nesse momento, os alunos poderão expor suas próprias concepções sobre calor, e o professor poderá esclarecer alguma dúvida remanescente.</p>		
Número total de aulas		6 aulas

APÊNDICE C – Material Didático

IDEIAS DA TERMODINÂMICA

CALOR E TRABALHO MECÂNICO

Em termos globais, a Termodinâmica é a parte da Física que estuda um sistema físico do ponto de vista macroscópico, tratando de mudanças que ocorrem no mesmo, como por exemplo, mudanças resultantes da troca de calor. A palavra Termodinâmica é derivada das palavras gregas *thermé* (calor) e *dynamis* (força).

Apesar da Termodinâmica ter sido desenvolvida, principalmente, a partir de meados século XVIII, desde muito antes, fruto da própria observação da natureza pelo homem, havia noções de temperatura e calor. No entanto, tais noções estavam muito afastadas dos conceitos como adotamos atualmente.

Associada à noção de calor, temos a observação de outros “elementos” como o fogo e sua utilização pelo homem para seu próprio aquecimento. O aquecimento próprio, além de ser alcançado através da utilização do fogo, também podia ser alcançado com o trabalho e o esforço físico. Parecia haver, portanto, no subconsciente humano, um sentimento de analogia entre calor e trabalho; sentimento que só seria confirmado no século XIX com o estabelecimento do equivalente mecânico do calor.

Você já imaginou o que há em comum entre calor, energia e trabalho?

Essa pergunta foi alvo de muitas discussões que se deram ao longo dos séculos XVII e XVIII. Muitos foram os estudiosos que buscaram entender a natureza e as propriedades do Calor, as ideias que se tinha variavam muito, alterando e diferenciando ao longo do tempo. Galileu Galilei (1564 – 1642), por exemplo, que estudou os fenômenos térmicos e inventou o termômetro a gás, tinha como visão, o “calor” estaria associado ao movimento de partículas. Não haveria calor, apenas uma sensação mental ligada ao movimento de partículas. A concepção de calor de Descartes, por sua vez, estava ligada ao fato de que tudo no mundo real resultava da interação de dois princípios: “extensão” (a matéria) e “movimento”.

Como nenhuma das teorias fornecia uma explicação suficientemente consistente sobre a natureza do calor, ainda no século XVII, tínhamos duas teorias sobre a natureza do calor. Numa delas, o calor seria tal qual um fluido indestrutível, invisível e imponderável, o calórico, que passava dos corpos quentes para os corpos frios. Na teoria concorrente, a “Teoria do Movimento Molecular”, o calor estaria ligado às vibrações dos átomos ou moléculas que compunham o material. Como não havia, a essa época, uma teoria atômica da matéria, a ideia do movimento molecular perdeu força em relação à teoria do calórico, que recebeu destaque no século XVIII, inclusive com alguns experimentos. Pensadores como, Fahrenheit, Reaumur e Celsius desenvolveram vários tipos de termômetros de líquido.

O termômetro, que atualmente é empregado pelos médicos, foi criado em 1864, pelo operário alemão Johann Heinrich Geissler (1824-1879), na cidade de Bonn.

Na metade do século XVIII, Joseph Black (1728-1799), esclareceu a diferença entre temperatura e quantidade de calor, introduziu a calorimetria e foi levado à ideia do calor específico e calor latente. Para Isaac Newton (1642-1727) e Boyle, o calor estava relacionado aos movimentos de partículas dos corpos. Dito de outra forma, dois corpos colocados em contato trocam calor e alteram suas temperaturas, da mesma forma que dois corpos têm suas velocidades alteradas após colidirem-se.

Em grande parte destes estudos, o calor ainda era considerado um fluido imponderável, o calórico, um suposto fluxo que agia dos corpos mais quentes para os mais frios. Essa teoria não explicava como o calor poderia ser produzido através de trabalho mecânico. As explicações dadas por essa teoria aos fenômenos conhecidos manifestam certas fragilidades, além dos aspectos metafísicos. Entretanto, a falta de teoria atômica consistente impedia a refutação da teoria do calórico, que só pôde ser derrubada no século XIX.

E para você, calor é energia?

Em 1789, Rumford se encontrava em Monique, trabalhando com perfurações de canhões em oficinas militares. Ele observou que a perfuração do ferro para a fabricação dos canhões aquecia tanto a broca quanto o próprio ferro. Para evitar a fusão, o metal precisava ser resfriado com água. Este se aquecia a um ponto, que a água podia chegar há um estado de ebulição mesmo sem a presença de fogo, o que despertava o seu interesse para tentar entender o efeito observado. Segundo Rumford, esse resultado só poderia ser explicado com a hipótese de o calor não ser fluido, mas uma forma de movimento, ou em outras palavras, uma forma de energia. O calor seria produzido pela agitação das partículas do metal, mediante o atrito com a broca. A partir da explicação dada por Rumford o calor resultante da fricção de sólidos, pode-se antecipar, como uma coisa natural, que a evolução de calor também seria detectada na fricção de corpos líquidos e gasosos. Rumford passou a realizar sucessivos experimentos que em sua maioria foram desconsiderados pelos defensores do calórico.

No curso do desenvolvimento das teorias de calor (1780 - 1840), Lavoisier considerou que o calórico era uma substância simples pertencente a todos os reinos da natureza, que podem ser considerados como os elementos dos corpos. Humphry Davy observou experimentos ligados à fricção, obtendo resultados que confirmavam a teoria de Rumford, gerando discussões a respeito da causa dos fenômenos de calor. Estes experimentos enfraqueceram a teoria calórica. O ponto mais importante no desenvolvimento da teoria do calor é a ideia de conservação, que foi criada no decorrer de 1800.

Somente em meados do século XIX, houve a aceitação da teoria mecânica do calor, devido a novas experiências. Uma delas foi a de Julius Robert Mayer (1814-1878), que considerou calor e trabalho equivalentes e que poderiam ser convertidos um no outro. Rejeitando a teoria do calórico, para ele, o calor consistia em algo gerado a partir de alguma coisa. Dessa maneira o calor produzido mecanicamente é proporcional ao trabalho empregado em qualquer tipo de processo na natureza. Mayer fundamentou suas ideias, para publicação de um artigo, que a primeira instância não foi aceito por ser considerado vago e conter muitos erros sobre conceitos básicos: queda livre, adição vetorial de forças, etc.

Não desistindo, refaz o artigo, aprimorando seus conhecimentos, e desta vez, foi aceito em 1842 pela revista *Annalen der Chemie und Pharmacie*. Nele propõe um novo conceito de “força” e como poderia se aplicar a física, que representa hoje, energia de uma forma geral, admitindo o princípio de causas e efeitos. Mayer não tenta explicar o calor como uma forma de movimento, mas adota uma concepção muito mais geral: ele admite que o calor, o movimento (energia cinética) e a força de queda (energia potencial) são diferentes formas de uma mesma coisa, mas que essa coisa – a “força”, em abstrato – não é propriamente nenhuma dessas três coisas. Esta é uma concepção muito semelhante ao nosso conceito moderno de energia (MARTINS, 1984, p.67). Mayer publicou um dos primeiros trabalhos que levou a formulação da conservação da energia.

A descrença, em princípio, nos trabalhos de Rumford e Mayer, mostra quão lento e dificultoso pode ser o processo de superação de um modelo científico. O trabalho de Rumford, por exemplo, foi ignorado pelos cinquenta anos seguintes à sua apresentação.

Nesse período os trabalhos de James Prescott Joule (1818-1889) já haviam sido publicados (1843), e tratavam o calor a partir de fenômenos eletromagnéticos. Passados dois anos, Joule publicou um artigo que tratava das variações de temperatura produzidas na compressão e dilatação dos gases, e no mesmo ano, publicou sua primeira descrição da experiência de agitação de água através de pás, obtendo êxito somente em 1847, publicando um novo artigo.

Um ano depois, Mayer publicou uma carta de indignação por não ter conseguido publicar seus artigos e requer o direito de pioneiro nas descobertas das transformações mútuas de poder mecânico em calor e por ter calculado o equivalente mecânico do calor. Por desconhecer os trabalhos de Joule, enfatizou que em seus trabalhos havia estudos a respeito dos poderes magnéticos, elétricos, químicos, etc.

A controvérsia entre Joule e Mayer pelo direito de ser considerado o primeiro a obter o equivalente mecânico do calor, resulta na internação de Mayer num asilo para alienados mentais e em sua morte em 1878. No entanto foi os trabalhos de Joule, com suas experiências térmicas, que contribuirão para esses estudos, cuja formulação e determinação do equivalente mecânico do calor tiveram mais influência sobre o desenvolvimento e especialmente a aceitação do princípio da conservação da energia.

Uma ideia importante nos trabalhos de Joule vem justamente do que vimos sobre Mayer, a transformação de uma forma de energia em outra. Um exemplo disso pode ser visto quando um copo cai de uma mesa. No topo da mesa, o copo tem certa energia potencial, enquanto cai, essa energia é convertida em energia cinética. Ao atingir o chão, parece que a energia se perde. Entretanto o que ocorre é a transformação da energia mecânica em aquecimento do copo e do chão e em energia sonora. A energia total do processo permanece constante, temos apenas uma transformação em cada instante.

Joule estava familiarizado com as formas de “forças naturais” que hoje chamamos de energia, a conversibilidade de diferentes formas de energia e com técnicas de determinar a potência de um motor. Ele foi capaz de apresentar diversos trabalhos em que descreveu várias experiências para determinar o valor do equivalente mecânico do calor.

Uma sólida base matemática para o princípio da conservação da energia, inclusive no que diz respeito ao conceito de calor como uma forma de energia, tem sua formulação atribuída a Hermann Helmholtz (1821-1894) e Josiah Willard Gibbs (1839-1909). Por terem sido elaborados por acadêmicos, esses trabalhos acabaram recebendo considerável crédito ainda na metade do século XIX, quando foram publicados. Nesse contexto, o princípio da conservação da energia tornou-se conhecido como “Primeira Lei da Termodinâmica”, e as ciências do calor também passaram a ter uma base matemática.

Um pouco sobre Joule:

Considerado um dos fundadores da termodinâmica, James Prescott Joule (1818-1889) era descendente de proprietários rurais da região de Derbyshire; o avô fundou uma cervejaria em Salford e enriqueceu. James foi o segundo dos cinco filhos de Benjamin e Alice P. Joule. Recebeu uma educação elementar em casa, junto com o irmão mais velho. Entre 1834-1837 teve aulas particulares de matemática, filosofia natural e química com John Dalton, que tinha quase setenta anos de idade.

James nunca participou da administração ou exerceu qualquer profissão relacionada à cervejaria. Casou-se com Amelia Grimes, de Liverpool, em 1847, mas ela veio a falecer em 1854. James viveu o resto da sua vida com os dois filhos, passando a residir em diferentes domicílios em Manchester. Tinha um temperamento tímido e sensível, e uma saúde bastante delicada. Seus experimentos pioneiros foram realizados em laboratórios que ele instalava por conta própria em suas residências (ou na cervejaria). Devido à dificuldades financeiras, passou a receber subsídio de organizações científicas para realizar suas últimas investigações.

A carreira científica de Joule apresenta duas fases bem diferentes. Durante 1837-1847, ele demonstrou uma atividade criadora que o levou a reconhecer a lei geral da conservação de energia e a estabelecer a natureza dinâmica do calor, depois foi reconhecido pela Royal Society (1850), desfrutando de uma posição de grande autoridade na comunidade científica.

Nos quase 30 anos seguintes, Joule conduziu diversas pesquisas experimentais, mas que não se comparavam às conquistas de sua juventude. Sua base em matemática não era suficiente para que acompanhasse o rápido desenvolvimento de uma nova ciência – a termodinâmica. Nesse sentido, o seu destino foi similar ao de seu rival alemão Robert Mayer, a liderança havia passado para uma nova geração de físicos.

Joule começou sua pesquisa independente aos dezenove anos de idade, mas logo transformou um trabalho diletante em uma investigação científica séria, introduzindo uma análise quantitativa da eficiência dos projetos que experimentava. Com isso, conseguiu determinar com precisão o equivalente mecânico do calor.

Em 1843, Joule passou a ter uma concepção clara da equivalência entre cada tipo de produção de calor e da correspondente transformação química ou resistência à passagem de corrente (Joule derivou a lei quantitativa da produção de calor por uma corrente voltaica – sua proporcionalidade com o quadrado da intensidade da corrente e com a resistência).

O valor para o equivalente mecânico do calor encontrado por Joule através do experimento utilizando água equivale a 4,16 J/cal. Atualmente o fator de equivalência exato é 4,18 J/cal.

As últimas séries experimentais relacionadas ao equivalente mecânico do calor consistiram em medições diretas do calor produzido ou absorvido por processos mecânicos: expansão e compressão do ar (1845) e fricção causada por rodas de pás na água e em outros líquidos (1847). Em 1867, Joule foi persuadido a realizar duas determinações de equivalência, de alta precisão, para o comitê da Associação Britânica para Padrões de Resistência Elétrica. O primeiro experimento, baseado no efeito térmico das correntes, mostrou um resultado com discrepância de 2% em relação à determinação original do calorímetro de pás metálicas, com isso, Joule foi requisitado a realizar um novo experimento. Dedicou-se a isso de 1875 a 1878, conduzindo experimentos extremamente minuciosos que confirmaram o resultado anterior. Isso demonstrou a necessidade de se melhorar o padrão da resistência. Esta acabou sendo a última contribuição de Joule para a ciência da qual foi pioneiro.

Que tal, então, observarmos com mais detalhes as implicações do trabalho de Joule e os conceitos envolvidos na Primeira Lei da Termodinâmica? Como o “calor, o trabalho e a energia” aparecem nesse contexto?

A linha de pensamento de Joule o levou a considerar as relações entre calor e trabalho mecânico, mas seu conhecimento superficial de matemática tornava suas observações limitadas, o que também ocorria com suas atividades experimentais, que buscavam uma relação simples entre as variáveis envolvidas. Os resultados de suas investigações foram escritos em uma série de artigos que culminaram na sua grande memória sobre equivalente mecânico do calor, publicada em 1850. Em todos os artigos, Joule descreve minuciosamente os equipamentos utilizados, o modo como às medidas foram obtidas e apresenta várias tabelas com os resultados. Em 1850, foi eleito membro da Royal Society, desfrutando de posição acadêmica de autoridade.

No artigo de 1850, Joule apresenta os resultados de seus experimentos, com o intuito de determinar o equivalente mecânico do calor com exatidão. Menciona inicialmente o experimento de Rumford e suas concepções para o calor, ainda destaca a importância que deveria ter sido dada aos seus trabalhos, já que o mesmo pode estimar a quantidade de força mecânica necessária para produzir certa quantidade de calor.

A partir dessas considerações Joule faz um levantamento das concepções que se tinha do calor. Ressalta que para Davy a causa imediata para os fenômenos de calor é o movimento. Em 1834, Dulong defende que o efeito calorífico é, sob certas condições, proporcional à força gasta. Faraday relaciona eletricidade, magnetismo e luz e reforça a ideia de que corpos imponderáveis são apenas os expoentes das diferentes formas de calor, o que também era semelhante às ideias de Grove e Mayer.

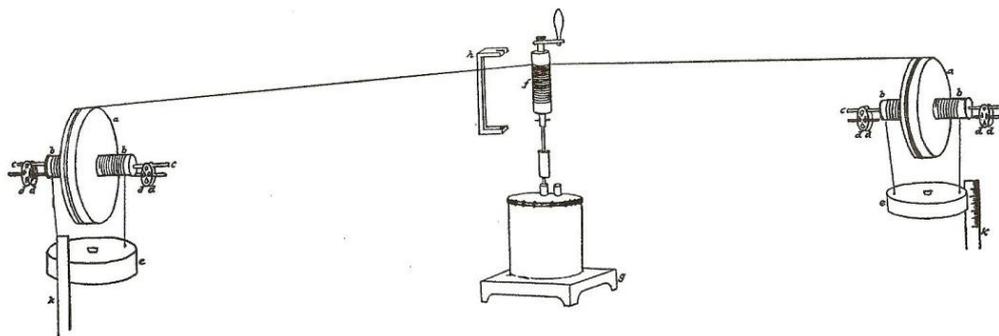
Joule destaca que no decorrer das pesquisas científicas, passou-se a negar calor como substância, citando Mayer como o primeiro a desenvolver experiências que levassem a essa conclusão, em 1842 através do atrito da água consegue elevar a temperatura de 12°C para 13°C, sem expor detalhes. De 1845 a 1847 dedica-se em determinar a relação equivalente entre força e calor, através da agitação da água. Em busca de precisão refaz a experiência no presente artigo de 1850.

Descrição do aparato

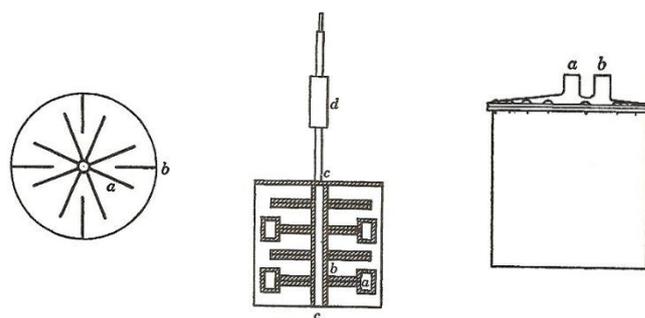
Os termômetros utilizados tiveram seus tubos calibrados e graduados, dois deles foram feitos em Manchester e o terceiro em Paris, e estes quando comparados apresentavam um alto grau de precisão. Basicamente seu aparato consiste em uma roda de pás de bronze com oito braços rotativos trabalhando entre quatro palhetas fixas, dispostos de modo a impedir a condução de calor. Contém um vaso de cobre onde são estaladas as palhetas, na tampa há dois orifícios, um para o eixo e o outro para inserção do termômetro, de modo que eles não se chocassem, os pesos de chumbo pesavam 29 libras ($29 \times 0,453 = 13,14$ kg) em alguns casos e em outros 10 libras ($10 \times 0,453 = 4,53$ kg), que eram suspensos por cordas ligadas a um fio que se encontra em uma alavanca de madeira anexada à barra de ferro perpendicular, através de duas polias, conectando-os ao cilindro central, ainda continha um suporte de madeira, no qual era posto o aparato, evitando possíveis efeitos do calor.

O método de experimentação consistia em medir inicialmente a temperatura, depois soltava-se o rolo permitindo que o fio desenrolasse até que os pesos atingissem o chão, era uma queda de 63 centímetros e se repetia o processo 20 vezes, em seguida verificava-se a temperatura, sempre no início, no meio e no final de cada seção. Levava-se em consideração a posição do aparelho, a quantidade da água contida no recipiente, o tempo gasto, o método da observação do termômetro, a posição do experimentador (JOULE, 1843; 1850).

Perspectiva do Aparato (Figura 1)



Figuras (2) eixo do aparelho de atrito na vertical, (3) eixo do aparelho de atrito na horizontal, (4) é um vaso de cobre em que o aparelho girando firmemente equipado com dois buracos na tampa, um para a inserção do eixo, e o outro para a inserção de um termômetro (respectivamente):



Muitos pesquisadores já relacionavam o calor com outras formas de energia (conversão de energia cinética em calor através da fricção e liberação de energia em reações químicas), mas não existia ainda uma formulação matemática para a termodinâmica. Essa necessidade estava posta para a época, pois o determinismo newtoniano instituído por Joseph Louis Lagrange (1736-1813) e Pierre Simon (1794-1827), o Marquês de Laplace, era predominante na comunidade científica. Uma ciência, sendo apenas experimental, sem formulação matemática, tinha sua aceitação dificultada. Os estudos feitos por Mayer, Joule e Helmholtz, ligados à ideia da conservação de energia, previam que a quantidade de calor recebida pelo corpo de menor temperatura deveria ser menor que aquela cedida pelo corpo de maior temperatura. A diferença entre as duas temperaturas seria equivalente à quantidade de trabalho produzida.

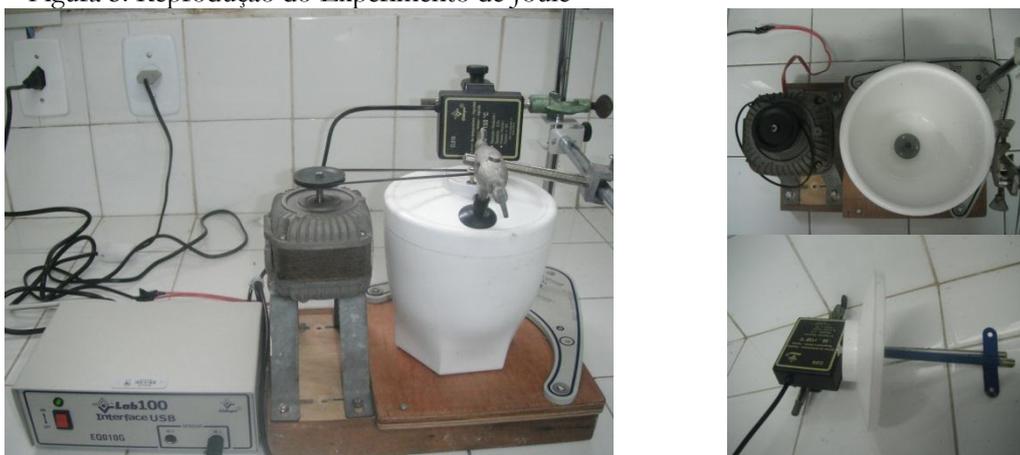
Você acha que atualmente seria possível a reconstrução do experimento feito por Joule?

Um historiador da ciência que buscou reconstruir o experimento de Joule foi Heinz Otto Sibum. A partir de 1990, ele procurou seguir rigorosamente as poucas instruções adquiridas, e percebeu que não seria possível repetir a sequência mecânica tal como consta nas anotações e nos documentos de Joule. Em 1992, após uma série de atribuições e testes, foi possível obter um valor para o equivalente calor de 746,89 flbs/BTU, depois com novos testes, obteve um valor de 772, 692 flbs, aproximando-se dos valores obtidos no experimento de Joule.

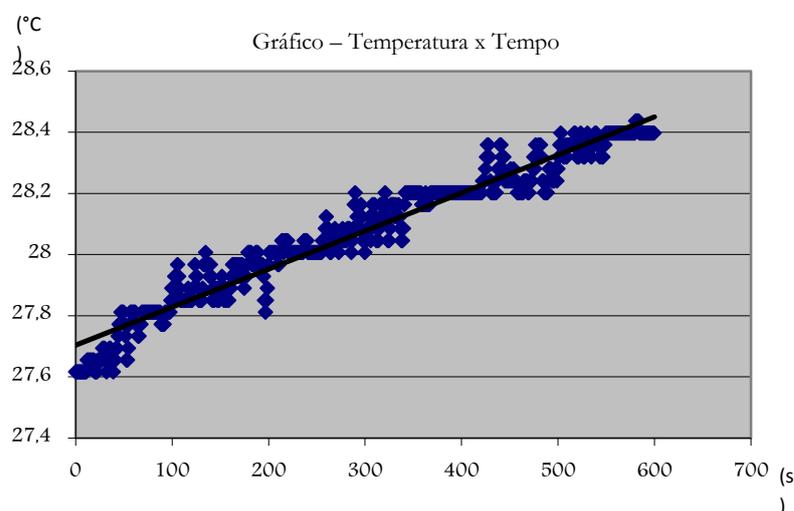
Recentemente houve outra tentativa de reproduzir fielmente o experimento, da mesma forma que Joule teria feito, e assim como na tentativa anterior não foi possível, devido à limitação de fontes primárias que fornecessem as informações necessárias para tal montagem. Dessa vez, utilizou-se meios alternativos para a construção do experimento, porém respeitando os mesmos princípios básicos (SOUZA, 2012).

Depois de várias tentativas de montagem e busca por uma melhor construção do aparato, obteve-se um modelo no qual se constituía por um calorímetro, ao invés de pesos, o fornecedor energia mecânica seria um motor, que através de duas roldanas, uma partindo do motor e outra conectada ao eixo de atrito, ambas associadas por uma correa, permitiria transformar energia elétrica em energia mecânica. No lugar do termômetro utilizou-se um sensor de precisão para captar os sinais de temperatura. O eixo de atrito, foi feito de metal com 2 pás dispostas horizontalmente. A seguir temos a imagem do experimento reproduzido.

Figura 5: Reprodução do Experimento de Joule



Realizado testes, obteve-se um aumento no valor da temperatura, evidenciando que a partir do atrito da água a elevação foi de aproximadamente $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Abaixo temos um gráfico resultante do teste:



Diante as experiências citadas qual a relação de energia identificada?

O princípio da conservação da energia estabelece que as diferentes formas de energia podem ser transformadas umas nas outras, mas nunca criadas ou destruídas, sendo que a energia total do universo é constante. O que percebemos no segundo exemplo de reprodução do experimento de Joule (Fig. 5) é que diante seu processo ocorreram três transformações de energia, primeiramente tinha a energia elétrica, recebida diretamente de uma tomada de 220 V , a qual ao acionar o motor era transformada em energia mecânica que, acelerando duas roldanas ativava o eixo de atrito, e, conseqüentemente através da fricção da água, essa energia era transformada em energia térmica. Pode-se constatar através do gráfico acima, o aumento na temperatura da água apenas com o atrito das pás. Podemos chegar à conclusão que a quantidade de calor produzida pelo atrito é proporcional ao trabalho mecânico executado.

E você acha que as conseqüências da ideia do calor energia param por aí?

A ideia de calor como energia acabou tendo participação em outro processo que desencadeou uma verdadeira revolução na história da ciência. Na época da segunda revolução industrial (segunda metade do séc. XIX), o controle da temperatura na produção de aço era de grande importância, tendo em vista a qualidade desejada para tal produto. Esse controle era dificultado pelas altas temperaturas envolvidas, as quais inviabilizavam a utilização de termômetros convencionais. Surgiu, então, a necessidade de se pesquisar um novo parâmetro que, ligado à energia desses corpos, servisse de base para medidas de temperaturas.

Quando um objeto está a uma temperatura muito alta, manifesta certo brilho, uma incandescência, é o caso da lâmpada incandescente, das brasas do fogo e do Sol. Já se sabia que uma das formas de transferência de calor é a irradiação, assim buscava-se uma explicação científica que pudesse dar ideia da quantidade de energia liberada por um corpo aquecido, a chamada radiação térmica, como por exemplo, no processo de produção do aço. Os resultados teóricos da termodinâmica, da mecânica e do eletromagnetismo, encontrados até então, estavam em desacordo com os resultados experimentais. Não se havia encontrado uma “fórmula” que pudesse prever com precisão a energia irradiada por um corpo aquecido.

Na verdade, as previsões teóricas previam uma energia infinita, resultado que ficou conhecido como “catástrofe ultravioleta”. Em dezembro de 1900, contudo, Max Planck (1858 – 1947), um professor de termodinâmica, apresentou um artigo sobre as propriedades da radiação térmica que, a princípio, atraiu pouca atenção da comunidade científica, mas acabou sendo um marco para a ciência. Em seus estudos, Planck assumiu que para se explicar a radiação térmica era preciso supor que a energia era emitida em pacotes, ou grãos de ondas eletromagnéticas. Tais grãos foram chamados de *quanta* (plural de *quantum*) de energia. O artigo de Planck trouxe ao mundo da ciência as ideias da quantização da energia e da natureza dual da matéria, que sob certos aspectos pode se comportar como onda ou como partícula. Essa ideia também foi associada à luz nos trabalhos de Einstein sobre o efeito fotoelétrico. Foi o surgimento da mecânica quântica, e ainda hoje, estudos da estabilidade da matéria, átomos e moléculas são possíveis graças a essas considerações.

As leis da Termodinâmica

Quando falamos em termômetros relacionamos a um mesmo processo o aparelho que entra em equilíbrio térmico com o sistema, cuja temperatura se busca medir. Ou seja, quando um corpo mais quente entra em contato com um corpo mais frio, depois de um certo tempo, ambos atingem a mesma temperatura, que é expressa no termômetro.

Em relação ao equilíbrio térmico, o físico e matemático britânico James Clerk Maxwell (1831-1879) observa que, se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si. Esta lei, originada da observação, é conhecida hoje como Lei Zero da Termodinâmica.

Para essa consideração é necessário distinguir os conceitos de calor e temperatura. O que se transmite neste processo não é a temperatura, pois, a temperatura é uma grandeza característica do corpo, num certo instante, não dependendo da sensação subjetiva de quente e frio, o que se transmite é o calor. E como vimos o conceito de calor tem como base as observações experimentais, seguidas a longa discussão já mencionada acima. Define-se calor como o minúsculo movimento de vibração das partículas, ou seja, o calor é tido como uma forma de energia.

Em 1847, o físico e fisiologista alemão Helmholtz formalizou definitivamente esta ideia sob a forma de Princípio da Conservação de Energia, chamada atualmente de Primeira Lei da Termodinâmica. Esta lei se aplica não só aos fenômenos físicos, como também aos químicos e biológicos. Na medida em que se considera o calor como forma de energia, alarga-se o princípio da conservação de energia da Mecânica, incluindo todas as outras formas de manifestações do mesmo. A Primeira Lei pode ser entendida como a evidência de que se pode alterar o estado termodinâmico do sistema através da troca de calor ou da realização de trabalho.

Fica claro que a extensa discussão ocorrida acerca da natureza do calor traduz uma tendência no pensamento do século XVIII a materializar o mundo físico. Podemos considerar tal tendência como uma consequência natural do pensamento mecanicista da época, segundo o qual qualquer fenômeno natural resulta da ação de forças nos meios materiais. No entanto, com base em todas as argumentações já expostas, a natureza do calor como forma de energia é, finalmente, aceita e, como consequência, se estabelece a Primeira Lei da Termodinâmica.

Conforme o exposto, podemos perceber que a evolução das ideias da Termodinâmica apresenta uma forte ligação com as atividades experimentais, e traz consigo questões teóricas bastante polêmicas, a exemplo da diferença entre os conceitos de temperatura e calor e a discussão da natureza do calor.

Exercícios

1. Em resumo, a teoria do calórico considera o calor como sendo uma substância pertencente ao corpo. Retome as suas leituras e compare a teoria atual do calor com a teoria do calórico. Procure pontos comuns e pontos contraditórios entre as duas.
2. Provavelmente o trabalho mais conhecido de Joule, que inclusive aparece na maioria dos livros de termodinâmica, foi a obtenção experimental de um equivalente mecânico para o calor. Que consequência esse experimento trouxe no desenvolvimento do conceito de calor?
3. No experimento de Joule, que consiste em agitar uma massa de água por meio de um sistema mecânico. Ao verificar o aumento de temperatura, demonstrou-se que o trabalho se converte em calor, ou seja, existe no sistema uma transformação de energia. Quanto à reprodução do experimento (figura 5), que transformação de energia é possível identificar? São as mesmas do experimento de Joule? Existe conservação da energia?

Debate

Ao longo da história, houve o desenvolvimento de um conceito de calor, aceito atualmente como científico. Diante das discussões feitas ao longo do texto, como você encara suas concepções sobre calor?

REFERENCIAS

Dicionário de bibliografias científicas / organizador Charles Coulston Gillispie; tradução Carlos Almeida Pereira... [et al.]. – Rio de Janeiro: Contraponto, 2007.

ROCHA, J. F. M. Origens e evolução das ideias da física / José Fernando M. Rocha (Org.). – Salvador: EDUFBA, 2002. Pg. 139-160.

SOUZA, R. S.; SILVA, A. P. B. Experimentos históricos no Ensino de Física: Joule e o equivalente mecânico do calor. 13º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia. USP, São Paulo. 2012.