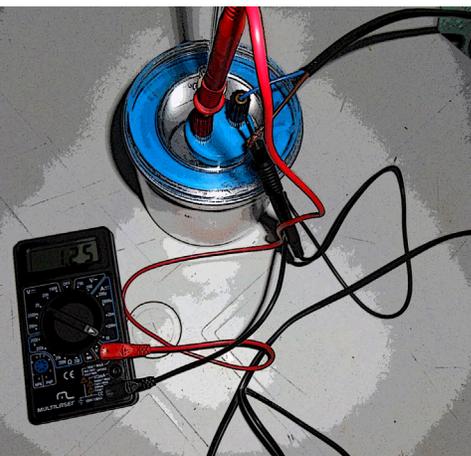


Equivalente mecânico do calor: Aprimorando um calorímetro elétrico para obtenção da relação entre calor e trabalho



.....

Jacson Santos Azevedo*

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Francisco Nairon Monteiro Júnior

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

RESUMO

O objetivo deste artigo é descrever todo o percurso trilhado por nós na busca de aperfeiçoar um calorímetro elétrico para encontrar a relação entre trabalho e calor, mais conhecida como equivalente mecânico do calor, estabelecida por James Prescott Joule (1818 - 1889) e dada por $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$. Para tal, nosso aparato, mesmo não realizando trabalho mecânico, foi gradualmente se aproximando da igualdade anterior por meio de substituições da fonte chaveada e do cuidado na aferição da temperatura de equilíbrio térmico, dentre outros ajustes, conduzindo a resultados interessantes e aproximados do valor tabelado. Sem tomar como uma busca desmedida a validação da relação entre calor e trabalho, também queríamos um aparato mais consistente e qualificado para ser implementado em sala de aula.

Palavras-chave: equivalente mecânico do calor; atividades experimentais; calorímetro elétrico

.....

1. Introdução

O equivalente mecânico do calor desperta muita curiosidade pelo alto teor de engenhosidade que cerca o aparato construído pelo cientista inglês James Prescott Joule que basicamente, de acordo com Souza e cols. [1], transformava energia de gravidade, pela interação das duas massas iguais com a Terra, em energia interna da água, considerando o conceito atual de energia interna de uma substância, ou seja, uma energia essencialmente associada ao movimento translacional e rotacional de átomos e moléculas de um objeto mais sua energia potencial de ligação [2, 3]. Essa conceituação é de extrema importância quando consideramos que, em determinado momento de suas investigações sobre a natureza do calor, Joule abraçou a concepção de calor como movimento ou vibração de partículas em uma substância, defendida, dentre outros, por Rumford (1753-1814) ao realizar experiências com usinagem de canhões [4, 5, 6]. Portanto, Joule passou a ser um crítico da teoria do calórico como veremos em seguida.

Carvalho e Gomes [7], fazendo uso da análise textual discursiva com textos originais publicados por Joule, descrevem a passagem dele entre a concepção do calórico e a teoria dinâmica do calor. Porém, segundo os autores, essa transição conceitual de Joule se deu dentro de uma zona contínua, entre o calórico e a ideia de calor como movimento microscópico em substâncias nos extremos desse contínuo, isto é, ele não executou um salto discreto entre a posição dos caloristas para a conceituação dinâmica do calor. Medeiros e Monteiro Jr. [8] e Carvalho e Sasseron [9], em se tratando do uso da história da ciência como ferramenta instrucional no ensino, apontam a transitoriedade dos

conhecimentos científicos e o caráter de atividade humana, passível de erros e reconstruções de conceitos, porém pouco presente no imaginário dos estudantes. Episódios como os evocados por Carvalho e Gomes [7] contribuem para desmistificar a atividade científica investigativa construída pelos cientistas como obra de deuses e sem equívoco.

Passos [10], centrando sua pesquisa na construção coletiva do princípio da conservação da energia ou primeira lei da termodinâmica em uma perspectiva histórica, traz considerações importantes a respeito do equivalente mecânico do calor. Entre essas considerações, o autor cita Mayer (1814-1878) como o primeiro a obter um valor de $3,6 \text{ J/cal}$ para o equivalente mecânico do calor, mas injustiçado pelo não reconhecimento de seu pioneirismo em uma disputa travada com Joule [11]. Outros nomes importantes da física também encontraram valores para o equivalente mecânico do calor por métodos experimentais distintos, tais como o Conde Rumford com $5,5 \text{ J/cal}$; Carnot (1796-1832) com $3,7 \text{ J/cal}$; Hirn (1815-1890), em 1854, com $3,6 \text{ J/cal}$ e $4,2 \text{ J/cal}$, e Joule, em 1850, com $4,159 \text{ J/cal}$, de acordo com uma tabela apresentada por Passos [10].

Souza [12] comenta a tentativa de Heinz Otto Sibus, na década de 1990, em validar o valor encontrado por Joule para o equivalente mecânico do calor pela reconstrução fiel do aparato de Joule, mediante consulta às fontes primárias deixadas por ele. Segundo a autora, Otto Sibus descreve dificuldades para reconstruir fielmente o aparato original, pois, os termômetros utilizados por Joule não podiam mais ser reconstruídos: o laboratório de Sibus não reproduzia condições climáticas análogas à adega usada por Joule,

*Autor de correspondência. E-mail: jacsonsantosazevedo@gmail.com

variando a temperatura ambiente com o passar do tempo, e a turbina da reconstrução de Sibum era distinta das pás do calorímetro de Joule. O resultado definitivo encontrado por Sibum, nessa reconstrução híbrida, mas que preservou o princípio da conservação da energia, foi de 772,692 lbf.pé/BTU e, portanto, muito próximo do encontrado por Joule em 1850, correspondente a 772,55 lbf.pé/BTU [10].

Souza e cols. [1] apresentam uma tentativa de reprodução híbrida do equivalente mecânico do calor. Preservando o mesmo princípio físico que balizou o calorímetro de pás de Joule, os autores fizeram adaptações no aparato como, por exemplo, fazendo uso de um motor elétrico para agitar a massa de água no calorímetro. A turbina que agitava a água também passou por aperfeiçoamentos como o tipo de material utilizado em sua fabricação e o número de pás, assim como o volume de água no vaso calorimétrico passou por mudanças para compensar seu calor específico alto que dificultava aumentos expressivos de sua temperatura, gerando assim grandes dissipações de energia durante o funcionamento do aparato. Contudo, de acordo com os autores, não foi possível encontrar um valor para o equivalente mecânico do calor, então contentaram-se em descrever os percalços enfrentados na adaptação desse experimento histórico, sem a preocupação de validá-lo.

Alves [13] concentra seu trabalho para fins didático-pedagógicos na reprodução da experiência de Joule. A autora afirma que sua reprodutibilidade é inviável como implementação em sala de aula, mas elenca substitutos interessantes que visam encontrar a relação entre trabalho e calor por meio do princípio da equivalência [10]. Um desses substitutos é o tubo de cartão com esferas de chumbo munido de um termômetro digital. Ao realizar trabalho mecânico sobre o tubo com as esferas, fazendo as esferas despencarem sucessivamente de certa altura 50 vezes, a temperatura delas aumentava e, assim, sua energia interna também. O valor encontrado pela pesquisadora para o equivalente mecânico do calor, em uma série de três repetições, foi de 6,16 J/cal. Essa discrepância poderia ter sido maior se não tivessem ocorrido perdas de energia para o tubo e para o ambiente.

Outra experiência alternativa sugerida por Alves [13] é a plataforma elevatória que, basicamente, transforma

energia potencial de gravidade em aumento da energia térmica (energia interna) de certa massa de água contida em um calorímetro elétrico. Nesse aparato, a energia elétrica pertence à cadeia de transformações energéticas que vai abastecer o calorímetro. Esse aparato é mais sofisticado que o relatado acima, sendo composto por uma plataforma elevatória de metal acoplada a uma caixa redutora que, por meio de fios de conexões, alimenta uma resistência elétrica de um calorímetro com água, aumentando, assim, sua temperatura via calor. Lembrando o perfil demonstrativo do experimento e repetindo sua execução três vezes, o valor encontrado pela autora para a relação entre calor e trabalho foi de 6,81 J/cal.

As tentativas de reprodução do experimento de Joule narradas no presente artigo, sejam para fins investigativos como validar a relação entre caloria e joule, seja para fins didáticos, buscando explorar as diferentes modalidades de energia envolvidas em tais reproduções alternativas e simplificadas, demonstram a importância histórica do aparato construído pelo cientista inglês como aplicação do princípio da conversão de “forças”¹, isto é, entre trabalho e calor. Essa experiência também foi objeto de estudo de uma sequência investigativa para aprendizagem significativa da relação entre calor e trabalho [14], da qual pretendemos descrever o caminho percorrido por nós para aprimorar um calorímetro elétrico, desde a obtenção de sua capacidade térmica até os valores encontrados para o equivalente mecânico do calor com o uso de seu análogo

elétrico.

2. Aprimorando o aparato

Nosso aparato consiste em um calorímetro elétrico com um vaso calorimétrico de capacidade igual a 195 mL, com uma resistência elétrica acoplada e um termômetro analógico com uma escala compreendida entre -10°C e 110°C , cabos de conexão, um multímetro e uma fonte AC/DC com voltagem máxima de 5 V e corrente elétrica de até 2 A, conforme mostra a Fig. 1. Um comentário importante a ser feito, antes de relatar os aprimoramentos realizados por nós, é a respeito dos roteiros experimentais que guiaram os ajustes do aparato. Os roteiros encontram-se pormenorizados para consulta no trabalho de Azevedo [14].

Primeiramente, buscamos encontrar um valor mais confiável para a capacidade térmica do calorímetro. Para tal, o calorímetro elétrico teve sua resistência removida e passou a ser um simples calorímetro de mistura, uma vez que, duas massas diferentes de água a temperaturas distintas foram misturadas. De fato, colocamos 70 mL de água no calorímetro e esperamos o equilíbrio térmico com o vaso calorimétrico, registrando uma temperatura inicial de 27°C com uma temperatura ambiente igual a 28°C e uma massa inicial de água aproximadamente de 70 g. Em seguida, adicionamos ao sistema água-calorímetro 100 mL de água, aquecida até atingir 100°C , e aguardamos um novo equilíbrio térmico para encontrar uma temperatura de aproximadamente $63,1^{\circ}\text{C}$. Considerando o valor tabelado do calor específico da água,

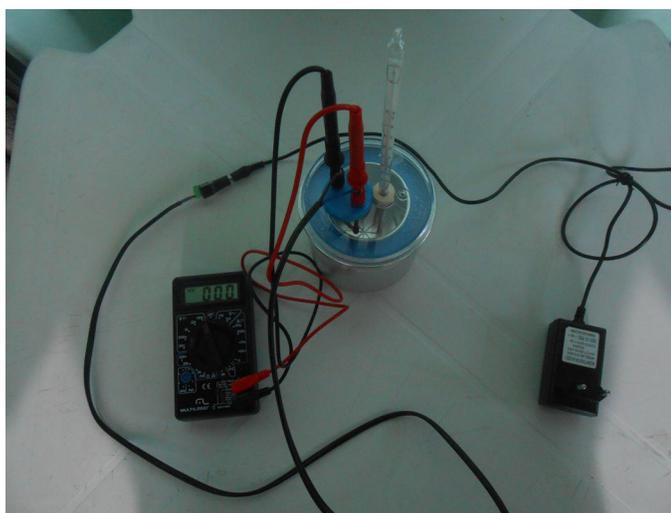


Figura 1 - Calorímetro associado em paralelo.

$c = 1,0 \text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$, e aplicando o princípio da conservação da energia (princípio das trocas de calor), a capacidade térmica do calorímetro foi de $32,2 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$.

Reproduzimos várias vezes essa atividade experimental, elaborada e centrada na determinação da capacidade térmica do calorímetro seguindo os mesmos passos descritos anteriormente, sendo nossa maior preocupação encontrar a temperatura de equilíbrio térmico entre as massas de água e a massa do calorímetro. Para isso, era necessário aguardar um intervalo de tempo, entre 2 min e 5 min, até que a coluna de mercúrio do termômetro analógico se estabilizasse. Feito isso, encontramos, para a capacidade térmica do calorímetro, valores variando entre $32,2 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$, já mencionado, e $35,0 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$. Outros valores encontrados, a título de exemplos, foi $32,8 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$ e $34,0 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$, sempre considerando uma temperatura ambiente entre 28°C e 29°C . Definimos, então, que a capacidade térmica do calorímetro seria $33,0 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$.

Encontrada a capacidade térmica do calorímetro, passamos a nos concentrar em valores mais consistentes para o equivalente mecânico do calor utilizando um calorímetro elétrico. O que queremos afirmar com valores consistentes para o equivalente mecânico do calor são medidas com uma maior proximidade do valor tabelado, sem o intuito de validá-lo. Nas primeiras experimentações, deixamos a resistência elétrica ligada durante intervalos de tempo que variaram entre 600 s e 1200 s. Paralelamente a esses intervalos de tempo, a temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e o calorí-

metro era obtida alguns minutos após se desligar a fonte, tempo julgado por nós como necessário ao estabelecimento do equilíbrio térmico, utilizando-se, para tanto, do termômetro analógico. Para um calorímetro com uma capacidade térmica de aproximadamente $33,0 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$, os valores encontrados para o equivalente mecânico do calor, por meio de seu análogo elétrico, ficaram compreendidos entre $6,145 \text{ J/cal}$ e $8,194 \text{ J/cal}$.

É muito importante mencionar que a fonte de alimentação que tínhamos adotado oscilou muito ao longo do experimento, tanto para uma associação em série, para encontrar a intensidade da corrente elétrica, como para uma associação em paralelo, para determinar a diferença de potencial nos terminais do resistor do calorímetro. A corrente variou entre $1,25 \text{ A}$ e $1,28 \text{ A}$, enquanto a ddp oscilou de 4 V a 5 V . Para fins de cálculos, adotamos $1,27 \text{ A}$, para a intensidade da corrente elétrica, e $4,5 \text{ V}$ para a ddp, os quais são, respectivamente, a média aritmética dos extremos da corrente elétrica e da tensão elétrica mencionados anteriormente. Outra coisa a ser dita, pelos resultados encontrados para o equivalente elétrico do calor, é que não houve incrementos significativos de energia da vizinhança para o calorímetro, pois as trocas de energia foram minimizadas ao máximo, contando com um bom isolamento do calorímetro que, internamente, é revestido por uma camisa de isopor e, externamente, tem paredes de alumínio polido, otimizando a reflexão da luz do meio externo. A Fig. 2 mostra uma associação em série entre a resis-

tência do calorímetro e o multímetro, no modo amperímetro, com a fonte AC/DC antiga, antes de sua substituição.

Nosso próximo passo era aumentar nosso rigor ao efetuar as medições, ou seja, ampliar a atenção na aferição da temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e o vaso calorimétrico e ajustar a parte elétrica do circuito. Primeiramente, resolvemos substituir a fonte de alimentação por outra fonte chaveada AC/DC com tensão máxima de 5 V . A corrente continuou oscilando entre $1,10 \text{ A}$ e $1,18 \text{ A}$, assim como a ddp nos terminais para qual, ao realizar as contas, adotamos um valor igual a $4,5 \text{ V}$. Para fazer as contas do equivalente elétrico do calor, resolvemos adotar $1,14 \text{ A}$, que é justamente a média dos valores anteriores. Definida a intensidade da corrente e a ddp, descobrimos que a capacidade do calorímetro, segundo as especificações do fabricante, estava errada, isto é, a capacidade máxima do calorímetro era de 195 mL e não de 220 mL . Em seguida, reduzimos o intervalo de tempo de acionamento da resistência para 300 s . Os resultados foram imediatos e encontramos um equivalente mecânico da caloria, pelo seu similar elétrico, entre $3,882 \text{ J/cal}$ e $4,500 \text{ J/cal}$.

Esses valores são muito mais coerentes que os anteriores, uma vez que as perdas de energia para o meio ambiente foram minimizadas, muito embora haja, ainda, as perdas ôhmicas pelos fios de conexão do circuito elétrico. Além desses efeitos, não podemos ignorar a radiação vinda da vizinhança ou a emitida pelo calorímetro elétrico, que também afetam o resultado final do fator de conversão. Assim sendo, concluímos que esse experimento, o equivalente elétrico da caloria ou equivalente mecânico do calor pelo seu análogo elétrico, depois de todos os aperfeiçoamentos e dos resultados obtidos, estava em condições apropriadas para ser aplicado.

A seguir vamos tecer alguns comentários conclusivos a respeito de nosso trabalho nas melhorias efetuadas.

3. Conclusões

A proposta deste artigo era evidenciar as dificuldades inerentes à reconstrução do aparato de Joule e a necessidade, considerando a inviabilidade de sua reprodução fiel como recurso didático-pedagógico, de implementar aparatos mais simples, mas preservando o mesmo princípio físico que municia o equivalente mecânico do calor: o

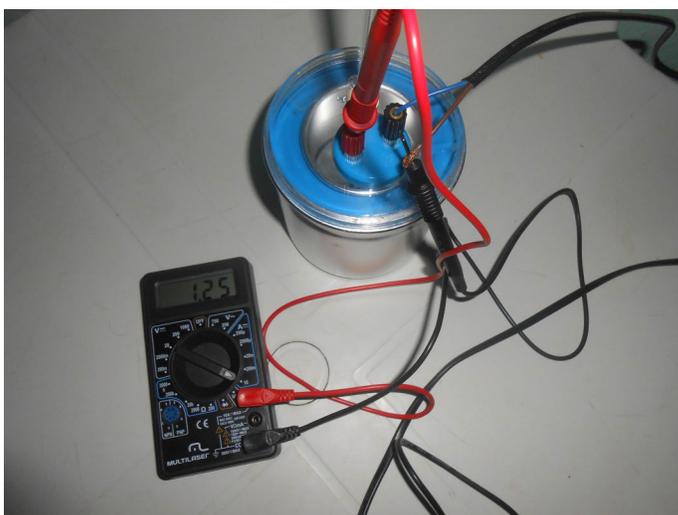


Figura 2 - Resistência associada em série com multímetro.

princípio da conservação da energia [10]. Portanto, longe de validar o fator de conversão 4,186 J/cal, pretendíamos tornar aplicável nosso aparato para garantir resultados mais razoáveis e, simultaneamente, compreender as dificuldades que tais aparatos apresentavam quando utilizados em sala de aula. O processo de aprimoramento do calorímetro elétrico ampliou nosso entendimento dos obstáculos, subsidiando

intervenções mais qualificadas na aplicação de nossa sequência didática investigativa [14].

De fato, ao trilhar as dificuldades descritas anteriormente, aumentamos nossa visão a respeito dos obstáculos com os quais os estudantes iriam se deparar, sofisticando nossas intervenções durante a realização dos experimentos e, principalmente, incutindo nos educandos a cultura científica mais próxima

do que acontece nos laboratórios reais, nos quais o fazer ciência é sempre acompanhado de erro, empecilhos, divergências de resultados e conflitos de ideias e teorias, como relata a história da ciência [15, 16]. Por outro lado, nos livros textos a ciência é apresentada pronta e acabada, o que ajuda a fortalecer uma concepção de ciência equivocada, dogmática e distante da realidade [4, 7, 8].

Referências

- [1] R.S. Souza, A.P.B. Silva e T.S. Araujo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 3 (2014).
- [2] M.A. Moreira, *Textos de Apoio ao Professor de Física* **9** (1998).
- [3] P. Hewitt, *Física Conceitual* (Editora Bookman, Porto Alegre, 2002), 9ª ed., p. 114-120.
- [4] A. Medeiros, *A Física na Escola* **10**, 1 (2009).
- [5] A.P.B. Silva, T.C.M. Forato e J.L.A.M. Gomes, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **30**, 3 (2013).
- [6] W.P. Queirós, R. Nardi e D. Delizoicov, *Investigações em Ensino de Ciências* **19**, 1 (2014).
- [7] B.C. Carvalho e L.C. Gomes, *Investigações em Ensino de Ciências* **22**, 3 (2017).
- [8] A. Medeiros e F.N. Monteiro Jr., in: *Anais do III Encontro Nacional de Pesquisa em Educação e Ciências*, Atibaia, 2001, disponível em <http://abrapecnet.org.br/enpec/iii-enpec/o12.html>, acesso em 25/12/2018.
- [9] A.M.P. Carvalho e L.H. Sasseron, *Em Re-Vista* **22**, 2 (2015).
- [10] J.C. Passos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**, 3 (2009).
- [11] R.A. Martins, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, **6** (1984).
- [12] R.S. Souza, *O Experimento de Joule e o Ensino de Termodinâmica Baseado na História da Ciência: Uma Proposta Didática*. Monografia, Universidade Estadual da Paraíba, 2012, p. 15-24.
- [13] P.P. Alves, *A Experiência de Joule Revisitada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- [14] J.S. Azevedo, *Equivalente Mecânico do Calor: Atividade Experimental Investigativa para Aprendizagem Significativa da Relação entre Calor e Trabalho*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2019.
- [15] T.S. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Editora Perspectiva, São Paulo, 2007), 9ª ed.
- [16] J. Valadares, in: *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*, editado por L.O.Q. Peduzzi, A.F.P. Martins e J.M.H. Ferreira (Editora da UFRN, Natal, 2012).

Nota

¹Segundo a Ref. [6], “força”, naquele período do século XIX, era entendida como energia, em seu conceito atual.