

Equivalente Elétrico do Calor

Física II, 2025/2026

José Luís Argain, Dário Passos

1 Resumo

Neste trabalho, considerando que qualquer tipo de energia se pode transformar noutro, coloca-se em evidência que o calor é uma forma de energia, estabelecendo uma relação quantitativa entre a energia elétrica e o calor (equivalente elétrico do calor). Além disso, estabelecida esta relação e cumprida a conservação da energia, pretende-se determinar a eficiência de uma lâmpada de incandescência.

2 Fundamento teórico

Até meados do século XIX as leis de conservação da energia pareciam confinadas à área da mecânica. Só nessa altura foi demonstrado que existiam outras formas de energia, nomeadamente a térmica, e que estas se podiam converter umas nas outras. Só após se ter introduzido a ideia de energia térmica, é que o conceito de calor toma o significado que atualmente lhe é conferido que é, como se sabe, o de transferência de energia térmica entre dois sistemas, a temperaturas diferentes.

Com este trabalho pretende-se colocar em evidência a relação entre a energia térmica e a energia elétrica. O objetivo é medir a energia elétrica fornecida ao sistema (em joule) e, admitindo que esta é totalmente transformada em calor, medir o aumento da energia térmica (em caloria), estabelecendo, desta forma, a constante de proporcionalidade entre estas duas unidades.

A montagem experimental (ver Fig. 1) consiste num boião de plástico cheio de água, dentro do qual está, totalmente imersa, uma lâmpada incandescente de uma dada potência elétrica. Esta, uma vez acesa, emite energia na forma de radiação eletromagnética, transmitindo calor à água, ao boião e ao meio ambiente, por radiação, condução e conveção. Para reduzir ao máximo as perdas para o meio ambiente, o boião é introduzido dentro de um calorímetro de esferovite (material de muito baixa condutividade térmica) e a água é tingida com tinta da Índia, para maximizar a absorção de calor por radiação, pela água.

Como é do conhecimento geral, quando um determinado sistema recebe energia térmica podem ocorrer duas situações distintas: a temperatura do sistema aumenta (calor sensível) ou o sistema muda de fase (calor latente). Admitindo que apenas a primeira situação ocorre, a variação da energia térmica (ou calor - Q) é proporcional ao produto da variação da temperatura (ΔT) multiplicada pela massa do corpo (m). A constante de proporcionalidade é uma propriedade do corpo à qual se dá o nome de calor específico (c). Assim

$$Q = mc\Delta T. \quad (1)$$

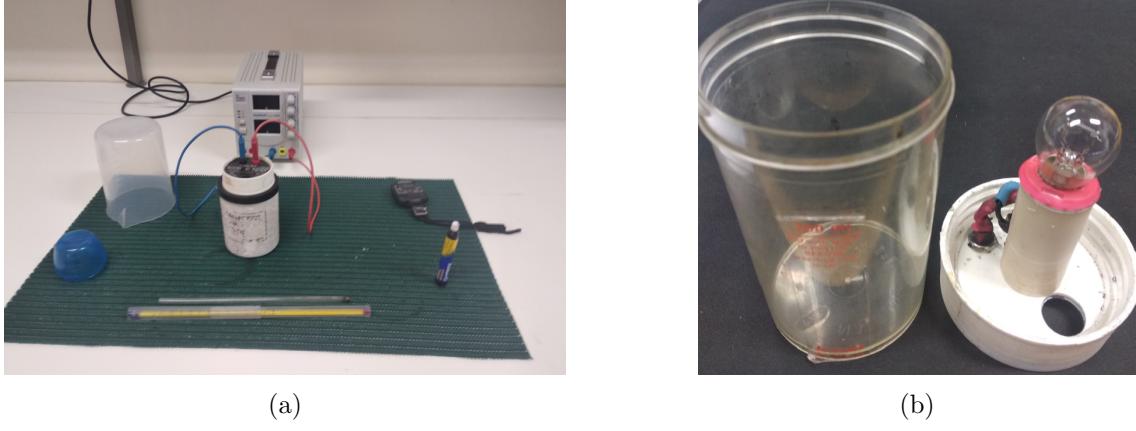


Figura 1: a) Instalação experimental. b) Boião de plastico transparente, com lâmpada de incandescência fixa na tampa.

Neste trabalho recorre-se a esta expressão para calcular a quantidade de calor que é transferida para a água. O calor específico da água encontra-se tabelado, $c_{ag}=1\text{ cal}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$. A massa de água m_{ag} e ΔT são medidas.

O boião colocado dentro de um calorímetro, tem duas finalidades. A primeira é a fixação da lâmpada e a segunda é para minimizar as perdas de calor para o exterior. A maior parte do calor é, de facto, absorvida pela água tingida com tinta (Q_{ag}), no entanto, uma parte do calor não desprezável é absorvida pelo boião (Q_{ag}) e outra parte (espera-se que seja pequena) pelo meio ambiente (Q_{ext}). Neste trabalho Q_{ext} é desprezado. Para calcular o calor total absorvido pelo sistema usamos a seguinte expressão:

$$Q = m_{ag}c_{ag}\Delta T + m_b c_b \Delta T, \quad (2)$$

em que o índice b refere-se ao boião. O valor de c_b é dado e a massa m_b é medida.

Para tentar minimizar, mais ainda, as perdas para o exterior, sugere-se que as temperaturas da água de início ($T_{ag,i}$) e fim ($T_{ag,f}$) da experiência, tenham valores, em relação à temperatura ambiente, T_0 , tais que

$$T_0 - T_{ag,i} \approx T_{ag,f} - T_0. \quad (3)$$

Desta forma, espera-se que o calor absorvido, do ambiente pelo sistema, quando $T_0 > T_{ag,i}$ seja aproximadamente igual ao calor cedido pelo sistema, quando $T_0 < T_{ag,f}$. Portanto, deve haver uma compensação entre o calor cedido e o absorvido do exterior.

À medida que a lâmpada acesa aquece a água, a diferença de temperatura, em relação à temperatura inicial, ΔT , aumenta. Se a cada certo tempo, t , decorrido desde o início da medição, registamos os valores de t e ΔT , obtemos um conjunto de pontos $(t, \Delta T)$. Mediante a equação (2), calculamos o valor de Q para cada ΔT e, assim temos o conjunto de dados (t, Q) .

Por outro lado, a expressão da energia elétrica (E), fornecida a uma lâmpada, é dada por:

$$E = VIt, \quad (4)$$

onde V é a diferença de potencial ou tensão aplicada aos terminais da lâmpada, I representa a intensidade de corrente que flui no filamento e t é o tempo durante o qual a lâmpada se encontra acesa e no qual foi registado o valor de ΔT da água, acima referido. Portanto, conhecendo t e medindo V , I , podemos determinar E , através da expressão anterior, para cada instante t e assim

obter o conjunto de pontos (t, E) . Finalmente, combinando os dados (t, Q) e (t, E) , determinamos o conjunto de pontos (Q, E) , o qual será usado para determinar o equivalente elétrico do calor, J_e .

Como E e E devem estar relacionados linearmente, através da constante de proporcionalidade $J_e = 4.186 \text{ J}$ (valor de referência estabelecido experimentalmente), então,

$$E = J_e Q, \quad (5)$$

ou

$$\underbrace{E}_y = \underbrace{J_e}_{a_t} \underbrace{Q}_x + \underbrace{0}_{b_t}, \quad (6)$$

Espera-se que o declive, a da reta $y = ax + b$, ajustada aos pontos (Q, E) , obtidos experimentalmente nesta experiência, seja próximo ao valor de referência J_e .

A eficiência de uma lâmpada incandescente pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{\text{Energia luminosa obtida}}{\text{Energia elétrica consumida}} = \frac{E - Q}{E} = \frac{E_L}{E}. \quad (7)$$

Não é difícil compreender que, se o objetivo da lâmpada é iluminar, ela é mais eficiente, quanto maior é a quantidade de energia elétrica (E), por ela consumida, que é transformada em luz ou, dito de outra forma, quanto menor é quantidade dessa energia que é perdida, noutras formas de energia (neste caso, na forma de calor).

Analisado (5), vemos que é possível estimar a eficiência da lâmpada, usando o mesmo conjunto de dados (Q, E) , obtido para calcular J_e . Escrevendo a equação anterior na forma:

$$\underbrace{E_L}_y = \underbrace{\eta}_{a_t} \underbrace{E}_x + \underbrace{0}_{b_t}, \quad (8)$$

vemos que, o declive, a , da reta $y = ax + b$, ajustada aos pontos (E, E_L) nos dá o valor experimental de η .

3 Materiais

Os materiais usados são (ver Fig. 1): Boião transparente com uma lâmpada de incandescência fixa na tampa, calorímetro, tinta da Índia, fonte de alimentação com saída máxima de 3 A a 12 V, cronómetro, termômetro, balança, cabos de ligação e gelo picado.

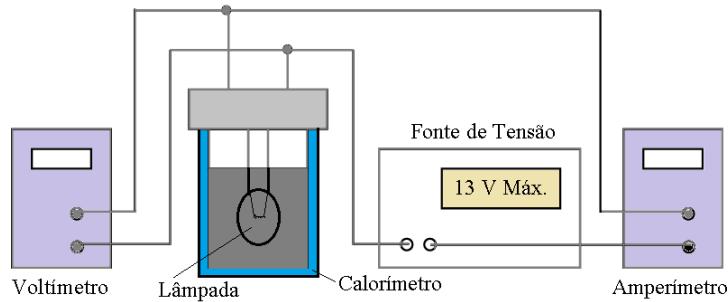


Figura 2: Esquema da instalação experimental.

4 Precauções

1. Não encher o boião de água acima da linha indicada. Isto implica uma diminuição significativa do tempo de vida da lâmpada;
2. Acender a lâmpada apenas quando esta já estiver imersa na água;
3. Não exceder os 13 V na alimentação da lâmpada.

5 Procedimento experimental

1. Anote todos os erros de leitura;
2. Meça a temperatura ambiente T_0 ;
3. Pese o boião vazio (m_b), sem a tampa com lâmpada. Encha-o de água fria até à linha indicada (lembre-se que não pode exceder essa linha). A temperatura inicial da água ($T_{ag,i}$) deve estar, pelo menos 10°C, abaixo da temperatura ambiente, T_0 . Adicione um pouco de gelo picado para arrefecer a água¹. Adicione cerca de 10 gotas de tinta da Índia na água, ou seja, o suficiente para que o filamento da lâmpada se torne pouco visível, quando esta se encontra acesa. Pese novamente o boião cheio de água ($m_b + m_{ag}$);
4. Estabeleça a ligação entre a fonte de alimentação e o boião (ver Fig. 2);
5. Tape o boião e coloque-o no calorímetro e introduza o termómetro no orifício da tampa do boião;
6. Ligue a fonte de tensão e ajuste-a rapidamente para $V = 11,5$ V (lembre-se que o valor não pode exceder 13 V). Registe o valor de I . Ajuste estes dois valores durante toda a experiência, de modo a ficarem constantes. Se se verificar uma variação grande destas grandezas, registe vários valores ao longo da experiência, e utilize os valores médios destas, nos cálculos;
7. Ao fim de poucos segundos (o mínimo possível), inicie a contagem do tempo no cronómetro ($t_i = 0$ s) e anote a temperatura da água ($T_{ag,i}$). Vá agitando suavemente a água para uniformizar a sua temperatura e tenha cuidado de não encostar o termómetro à lâmpada;
8. De minuto a minuto meça a temperatura da água até esta atingir aproximadamente o valor $2T_0 - T_{ag,i}$;
9. Desligue imediatamente a fonte de alimentação.

6 Análise de resultados

6.1 Determinação do equivalente elétrico do calor

1. Calcule a energia elétrica fornecida à lâmpada (em Joule) para cada instante, usando a expressão (4).
2. Calcule as variações de temperatura, tomando como valor de referência a temperatura inicial, $T_{ag,i}$;

¹Quando iniciar as medições certifique-se que o gelo derreteu completamente.

3. Calcule o calor transferido (em calorias), para a água e o boião, em cada instante t (ver Eq. 4). O docente fornecer-lhe-á, na aula, o calor específico do plástico do boião (c_b).
4. Construa um gráfico de E vs. Q ;
5. Ajuste uma reta de regressão linear ($y = ax + b$) ao gráfico, calculando o declive, a (note que deve verificar-se que $\delta a/a << 1$), a ordenada na origem, b , e os seus respetivos erros, δa e δb . Para isto, recomenda-se usar a função proj.lin do *software* Excel (ver seção 4.3 da sebenta "Fundamentos de Análise de Dados", na tutoria eletrónica). Note que o *software* Excel está acessível a todos os alunos da UAlg, no pacote Microsoft Office 365;
6. Verifique se $a_t = J_e \in [a - \delta a, a + \delta a]$. Adicionalmente, determine o erro relativo percentual de a , em relação a $a_t = J_e = 4.186$ J;
7. Discuta os resultados e retire conclusões.

6.2 Determinação da eficiência da lâmpada

1. Calcule $E_L = E - Q$;
2. Construa um gráfico de E_L vs. Q e ajuste-lhe uma reta $y = ax + b$, determinando a , b , δa e δb .
3. A eficiência da lâmpada, aqui usada, oscila entre 2 e 5%. Verifique se o valor, por si obtido ($\eta = a$), está dentro desse intervalo;
4. Discuta os resultados e retire conclusões.