

kit para a Determinação do Equivalente Mecânico do Calor
através de Medidas Elétricas



M. A. Dias Junior e J. A. Souza

Prefácio

O produto educacional a seguir é composto por um guia didático para a montagem de um kit experimental para a obtenção do equivalente mecânico do calor através de medidas elétricas. O experimento proposto pode ser utilizado tanto em práticas laboratoriais, em disciplinas específicas de laboratório de Física, quanto como um complemento em sala de aula para auxiliar o professor na abordagem dos tópicos de Física relacionados ao assunto.

O experimento foi construído e elaborado com o objetivo de inserir novas tecnologias e equipamentos de monitoramento de propriedades físicas do sistema seguindo uma abordagem um pouco diferente do celebre experimento realizado por James Prescott Joule para obtenção do equivalente entre joules e calorias. No lugar de propriedades mecânicas utilizamos medidas de parâmetros elétricos, como a tensão e a corrente elétricas em um resistor. Utilizando uma célula solar fotovoltaica como fonte de alimentação conectada a um resistor inserido em um calorímetro adiabático apresentamos sugestões para explorar conceitos como calor e temperatura e a diferença entre ambos, energia, análise e processos de sistemas termodinâmicos, as leis da Termodinâmica e os efeitos Joule e fotovoltaico. Além de permitir a abordagem de tais assuntos o experimento proposto fornece possibilidades para discutir a importância da ciência no desenvolvimento de novas tecnologias e no uso de fontes de energia renováveis.

Nossa proposta é também promissora para o tratamento matemático dos fenômenos envolvidos através da propagação de erros, plotagem de gráficos, ajuste de curvas obtidas experimentalmente e a modelagem do sistema em uma linguagem simples e adequada para o professor de Física do nível médio de ensino.

É importante ressaltar que o desenvolvimento matemático de alguns tópicos apresentado neste material é para fornecer melhor entendimento para os professores de Física e não para os alunos. A transposição didática das equações e a própria abordagem dos temas, se será mais quantitativa ou qualitativa, fica a cargo do professor que escolherá a melhor maneira de trabalhar o conteúdo com os seus alunos.

Esperamos que esse material seja útil para complementar as aulas de Física dos professores do Ensino Médio e que o mesmo contribua como uma boa alternativa metodológica para a melhoria do ensino de Física.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
marcodjunior@gmail.com

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da
Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, abril de 2019.

Sumário

1. Montagem do Experimento.....	5
2. Conceitos de Física que podem ser abordados durante a Experimentação.....	8
2.1. Calorimetria.....	8
2.2. Determinação da Capacidade Térmica do Calorímetro Utilizado.....	12
2.3. Explorando as Leis da Termodinâmica.....	13
2.4. Efeito Joule.....	18
2.5. Determinação do Equivalente Mecânico da Caloria através de Medidas Elétricas.....	19
2.6. Realização do Experimento e Determinação de α	20
2.7. Cálculo do Desvio de α	29
2.8. Energia Solar Fotovoltaica.....	31
2.8.1. Efeito Fotovoltaico.....	31
2.8.2. Características Elétricas das Células Fotovoltaicas.....	33
2.9. Questionário Sugestivo.....	36
3. Referências.....	37

PRODUTO EDUCACIONAL

1. Montagem do Experimento

No experimento construído temos como objetivo explorar a transformação da radiação térmica do sol em energia elétrica e desta para energia térmica, através do efeito Joule. Para a primeira conversão utilizamos uma célula solar fotovoltaica, que produz energia elétrica através da incidência de energia solar na mesma. A corrente elétrica produzida percorre um resistor e aquece a água contida em um calorímetro, caracterizando a segunda conversão de energia. Todos os parâmetros relevantes como temperatura, corrente e voltagem no sistema foram monitorados por equipamentos específicos como um termômetro digital e multímetros.

A célula solar fotovoltaica possui dimensões de (145 x 145 x 2,5) mm, (comprimento x largura x espessura), como a mostrada na figura 1, e especificações técnicas como tensão máxima na saída de 6V, corrente máxima de 500 mA e potência máxima de 3W. Foi necessário soldar dois fios, preto e vermelho, com conectores banana na placa correspondendo aos seus polos negativo e positivo, respectivamente. Para que a placa pudesse ser posicionada facilmente em locais com boa incidência solar colocamos fios com dois metros de comprimento. Esta placa pode ser adquirida facilmente pela internet em sítios de compra e venda de produtos diversos.

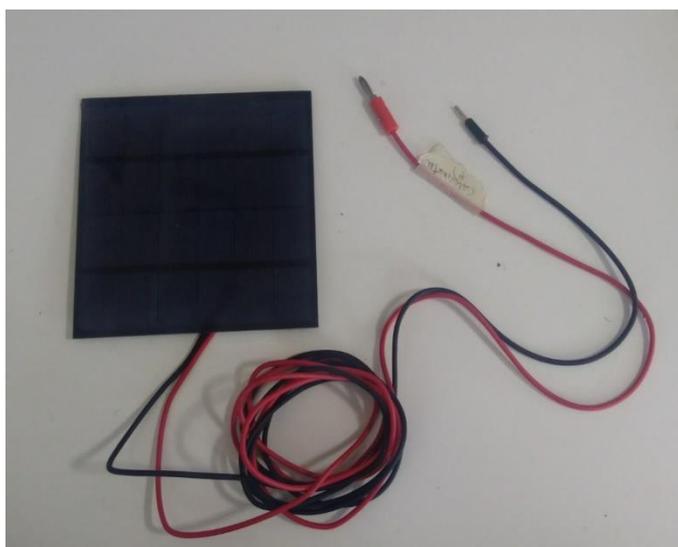
O calorímetro em que o resistor cerâmico foi inserido foi construído com uma latinha de refrigerante de 350 ml e um porta latas, como mostrado na figura 2. A latinha é colocada no interior do porta latas. Este consiste em um copo de isopor utilizado para manter a temperatura da bebida no interior da latinha aproximadamente constante. Ou seja, o objetivo é termos um sistema adiabático ou termicamente isolado de sua vizinhança.

A tampa do calorímetro foi feita com material isolante, facilmente penetrável para que dois conectores borne pudessem ser inseridos no mesmo de forma bem ajustada para não termos perdas de energia através do calor. Os conectores foram soldados a um resistor cerâmico para que a tensão e a corrente no mesmo pudessem ser monitoradas por um medidor elétrico.

Para o monitoramento elétrico da célula solar fotovoltaica e do resistor no interior do calorímetro nós utilizamos um medidor elétrico com display digital nas cores vermelho e azul, mostrando, respectivamente, as medidas da tensão e corrente elétricas, veja figura 3. O intervalo de medição da tensão elétrica deste dispositivo vai de 0 a 100 V, com medição mínima de 0,1

V, para corrente contínua (CC). Sua tensão de alimentação (CC) é de 4,5 a 30 V. Para a corrente elétrica o mesmo possui medição mínima de 0,01 A e corrente de funcionamento de 20 mA.

Figura 1 – Célula solar fotovoltaica utilizada no experimento, com tensão máxima de saída de 6 V, corrente elétrica máxima de 500 mA e dimensões (145 x 145 x 2,5) mm, (comprimento x largura x espessura). Os fios preto e vermelho foram soldados na placa correspondendo aos seus polos negativo e positivo, respectivamente.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 2 – Partes do calorímetro utilizado em nosso experimento. À esquerda mostramos o corpo do calorímetro composto por uma latinha de refrigerante e um porta latas para manter a temperatura do sistema constante. À direita temos a tampa do calorímetro com dois conectores borne soldados a um resistor cerâmico.

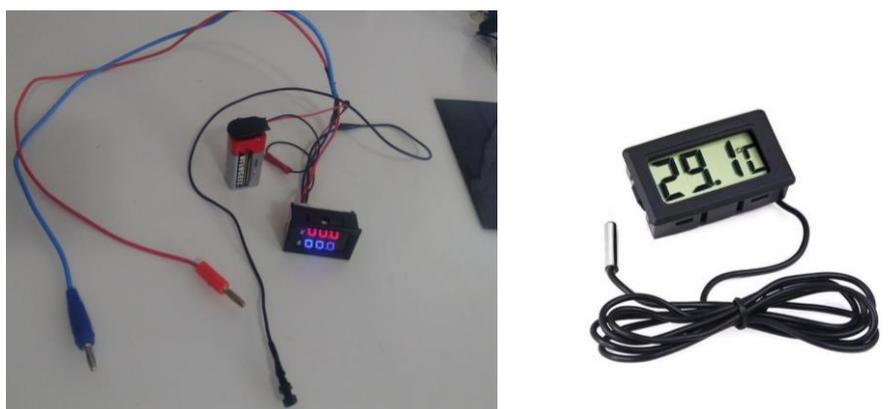


Fonte: Elaborada pelos autores.

A variação da temperatura da massa de água no interior do calorímetro foi medida através de um termômetro digital composto por com sensor metálico, conforme mostra a figura 3. Com este é possível medir temperaturas na faixa de -50 a 100 °C, com resolução de 0,1°C.

A utilização de todos os componentes do experimento mostra a possibilidade de automatização do mesmo colocando os alunos do ensino básico em contato com novas tecnologias para uso científico.

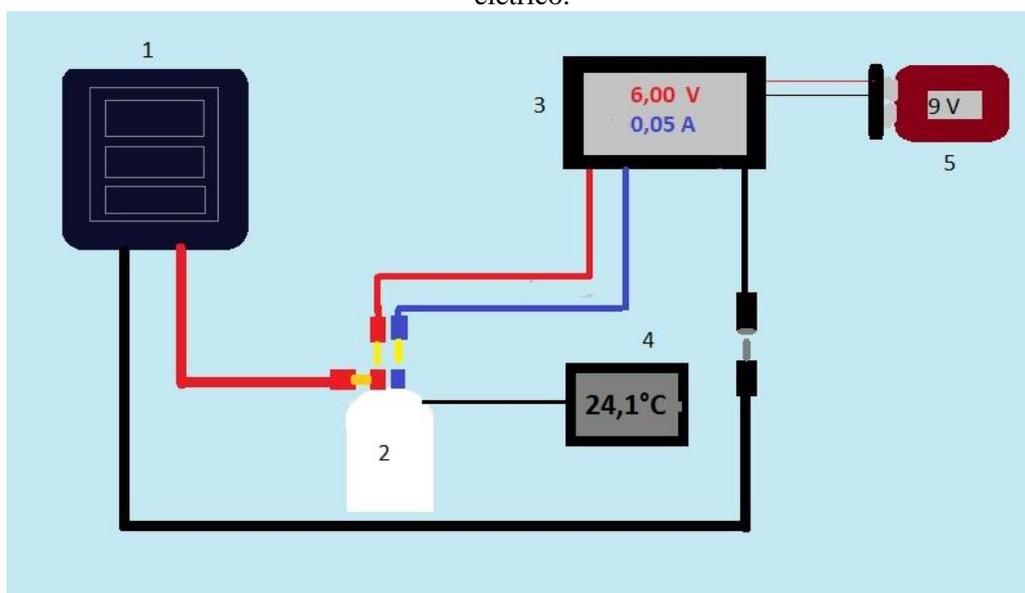
Figura 3 – À esquerda mostramos um medidor elétrico com display digital para o monitoramento simultâneo da tensão e corrente elétricas da célula fotovoltaica e do resistor no interior do calorímetro. À direita temos um termômetro digital com sensor metálico para aferir a variação da temperatura da água contida no calorímetro.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Na figura 4 mostramos um esquema ilustrativo da montagem do nosso experimento apresentando os principais equipamentos utilizados.

Figura 4 – Esquema ilustrativo do experimento montado e em operação mostrando em (1) a célula solar fotovoltaica, (2) o calorímetro contendo o resistor cerâmico e água em seu interior, (3) o medidor elétrico, (4) o termômetro digital utilizado e (5) uma bateria de 9 V para alimentação do medidor elétrico.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A célula fotovoltaica e o resistor no interior do calorímetro são conectados ao medidor elétrico através de conectores e cabos banana macho e fêmea para monitoramento da tensão e corrente elétricas nos mesmos. O medidor elétrico funciona com uma bateria de 9 V. O sensor metálico do termômetro digital é colocado no interior do calorímetro para monitorar a variação de temperatura do sistema até que o equilíbrio térmico seja atingido.

Nosso produto educacional é operacionalmente muito simples e pode ser utilizado na sala de aula para abordagem dos conceitos físicos relacionados ao seu funcionamento tanto para uma aula demonstrativa como para um laboratório de física como um kit experimental.

Os custos de montagem do nosso produto educacional têm uma boa relação de custo benefício, com R\$ 140,68 foi possível construir o kit experimental. Este kit é constituído de uma placa solar fotovoltaica de R\$ 50,89, um termômetro com display digital R\$13,90, um porta latas R\$ 10,00, uma bateria de 9V de R\$ 5,00, com um medidor elétrico de digital (amperímetro/voltímetro) de R\$ 33,94 e fios e conectores custando R\$30,00. Devemos considerar que esses valores estão sujeitos a reajuste em relação ao período que foi desenvolvido o nosso produto educacional, porém, não é um investimento muito elevado pelo kit experimental produzido e considerando os equipamentos e tecnológicas atuais.

Em geral os produtos são encontrados em lojas de eletrônica e em portais de vendas de produtos pela internet.

2. Conceitos de física que podem ser abordados durante a experimentação

Nas próximas seções discutiremos os principais conceitos que podem ser abordados utilizando o nosso experimento como temperatura, calor e a diferença entre ambos, capacidade térmica e calor específico, as leis da Termodinâmica, efeitos Joule e Fotovoltaico e as características elétricas de uma célula fotovoltaica.

2.1. Calorimetria

A calorimetria é a parte da Física responsável por medir mudanças nas variáveis de estado de um sistema, como volume, pressão, temperatura, entre outras, com o propósito de derivar a energia absorvida ou perdida pelo sistema através de calor devido a reações químicas, mudanças físicas ou transições de fase sob condições específicas. Apesar da palavra

calorimetria nos remeter ao significado de *medida de calor* nestes processos o que verificamos, como já dito, é a medida da *energia transferida* através do calor. Como, o calor não é uma propriedade física do sistema, este não é mensurável e, portanto, não podemos dizer que estamos fazendo uma medida de calor. O calor é a forma pela qual energia térmica é transferida de um sistema a outro devido à diferença de temperatura entre eles. Usualmente os livros didáticos se referem ao calor como energia em trânsito. Isto não está completamente correto, porque calor não é energia, mas sim a forma ou método pelo qual a energia é transferida de um corpo a outro. Contudo, o calor se manifesta apenas em processos para levar o sistema de um estado de equilíbrio a outro, ou seja, se há trânsito de energia térmica podemos falar em calor. O outro método de transferência de energia que conhecemos e utilizamos muito na Física é o trabalho.

A calorimetria é realizada com um calorímetro. Este dispositivo é utilizado para o estudo de sistemas em diversas áreas da ciência como Termodinâmica, Química, Bioquímica, entre outras, e pode ter diferentes configurações, dependendo do tipo de caracterização que se deseja realizar. O calorímetro que construímos e descrevemos na seção anterior é um dos tipos mais simples e consiste basicamente de um termômetro conectado a um contêiner de metal, em contato com uma fonte térmica, contendo água em seu interior. Nossa fonte térmica é composta por um resistor de cerâmica que fornecerá energia térmica ao calorímetro através do efeito Joule quando uma corrente elétrica passar pelo mesmo. Nós discutiremos esse efeito mais adiante.

Nosso calorímetro é classificado como adiabático. Este tipo de calorímetro é utilizado para examinar trocas de energia entre sistemas em um ambiente termicamente isolado. Isso significa que toda a energia térmica dissipada pelo resistor deverá ser, a princípio, absorvida pela água do calorímetro até que o equilíbrio térmico entre ambos se estabeleça. Esta é uma situação ideal, pois sempre existem dissipações no sistema, mas estas podem ser arbitrariamente minimizadas. Por isso construímos nosso calorímetro envolvido por materiais isolantes térmicos, como o isopor.

Conhecendo-se as temperaturas iniciais (T_i) das substâncias no interior do calorímetro, podemos calcular a energia transferida entre as mesmas através do calor quando elas estão em equilíbrio térmico à uma temperatura final (T_f). Essa energia transferida é usualmente conhecida como quantidade de calor Q e é dada pela relação,

$$Q = C\Delta T, \quad (1)$$

sendo $\Delta T = T_f - T_i$ e C a capacidade térmica da substância em análise.

A capacidade térmica do sistema está relacionada com a capacidade do mesmo de armazenar energia térmica. Quando um serralheiro corta uma chapa de aço, vários cavacos

incandescentes a uma temperatura aproximada de 1.200°C são lançados contra o seu corpo, mas o serralheiro não é queimado. Isso ocorre porque a capacidade térmica destas pequenas partículas de aço é muito pequena, de modo que estas não contêm energia térmica armazenada suficiente para provocar qualquer dano na pele do serralheiro. Se tomarmos um bloco relativamente maior do mesmo material à mesma temperatura, uma folha de papel pode ser incendiada pela simples aproximação da folha ao bloco, pois este possui uma grande capacidade térmica. É por isso que a manipulação de grandes quantidades de massa de metal ocorre por meio de máquinas operatrizes ou pessoal com equipamento isolante adequado. Com este exemplo não é difícil perceber que a capacidade térmica depende da massa m do corpo, ou seja, esta é dada por,

$$C = mc, \quad (2)$$

em que c é uma propriedade física do material que compõe o corpo em estudo, sendo chamado de *calor específico*. No exemplo anterior tanto o cavaco de aço quanto o bloco possuem o mesmo calor específico, pois ambos são feitos do mesmo material. O calor específico mede a inércia térmica de um material, ou seja, o quão difícil é aquecer um material, sendo descrito como a quantidade de energia térmica necessária para elevar de 1°C a temperatura de uma dada substância, e é medido em caloria por grama por grau Celsius, ou seja, $\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$.

Se tivermos água e areia expostas à luz solar, como em uma praia, por exemplo, a água ($c = 1,0 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$) sofre menos variação de temperatura que a areia ($c = 0,2 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$) em um mesmo intervalo de tempo, pois ela possui calor específico maior do que a areia. Diferenças como estas são responsáveis por diversos fenômenos climáticos decorrentes do movimento de grandes massas de ar (HEWITT, 2002).

Portanto, se tivermos m gramas de uma substância pura de calor específico c é possível medirmos, através de um calorímetro, a quantidade de energia térmica necessária para elevar sua temperatura de $\Delta T > 0$, através da relação $Q = mc\Delta T$, que é uma combinação das eqs.(1) e (2).

O calorímetro pode também ser utilizado em sala de aula, como atividade prévia ao que estamos propondo, para a determinação do calor específico de uma determinada substância. Seja uma substância A de massa m_A , que pode ser um prego ou qualquer outro objeto, com temperatura T_A conhecida, maior que a temperatura da água e da latinha de refrigerante, as quais estão em equilíbrio térmico inicialmente à temperatura T_i . Após inserir a substância A no calorímetro a temperatura do mesmo será monitorada pelo termômetro digital até atingir a temperatura de equilíbrio T_f . Conhecendo-se a massa m de água no calorímetro, seu calor específico c , a capacidade térmica C_L da latinha de refrigerante e considerando o sistema

adiabático, a energia térmica Q_A liberada pela substância A será igual à energia térmica absorvida pelo sistema latinha + água Q_{LA} . Logo, o calor específico c_A da substância A, pode ser obtido pela relação,

$$\begin{aligned} -Q_A &= Q_{LA}, \\ -m_A c_A (T_f - T_A) &= (mc + C_L)(T_f - T_i), \\ \therefore c_A &= \frac{(mc + C_L)(T_f - T_i)}{m_A(T_A - T_f)}, \quad (3) \end{aligned}$$

em que o sinal negativo em Q_A significa que a substância A liberou energia. Note que foi necessário levar em consideração a capacidade térmica da latinha de refrigerante, pois esta também irá absorver energia térmica proveniente da substância A. Para a realização do experimento principal também deveremos considerar o valor de C_L .

Pelo discutido anteriormente vimos que temperatura é uma propriedade física do sistema, ou seja, esta pode ser medida por um termômetro quando o sistema está em equilíbrio. Já o calor é a forma pela qual energia térmica é transferida de um corpo para outro devido à diferença de temperatura entre eles, ou seja, quando ocorre um processo para mover o sistema de um estado de equilíbrio para outro. O calor não é uma propriedade física do sistema e não pode ser medido em nenhuma hipótese. Portanto, calor e temperatura não são a mesma coisa. O aumento da temperatura de um sistema é decorrente da transferência de energia através do calor e esse acréscimo de energia térmica pode ser verificado através da medida da temperatura. Mas os alunos podem perguntar: Mas nós não estamos medindo calor quando utilizamos Q nas equações, como na eq. (3)? E o fato de Q estar relacionado com ΔT ? Pensando nesses prováveis questionamentos por parte dos alunos devemos enfatizar que: O que estamos medindo e calculando através de Q é a energia térmica transferida ou perdida pelo sistema através do calor e não propriamente o calor e essa energia está associada com a diferença de temperatura do sistema. Portanto, calor não é energia e nem temperatura.

A determinação da equivalência entre a caloria e a energia mecânica, dada em joules (J), foi realizada por James Prescott Joule. Em seu experimento ele utilizou uma configuração semelhante à nossa, mas no lugar de energia elétrica, para obtenção do fator de conversão, ele utilizou energia mecânica. Através da queda de pesos, posicionados a alturas conhecidas, conectados a um eixo de rotação que colocava um conjunto de pás em movimento no interior de um calorímetro cheio de água, Joule foi capaz de mostrar que o aumento da temperatura da água no calorímetro era consequência do aumento de energia da mesma. O que ele observou foi basicamente a conversão de trabalho mecânico em calor, conseguindo estabelecer um fator

de conversão entre calorias e joules, dado atualmente por $1 \text{ cal} = 4,816 \text{ J}$. Com este experimento foi possível verificar que existia uma nova forma de energia, chamada de energia térmica, a qual pode ser transferida de um corpo a outro através do calor quando uma diferença de temperatura é estabelecida entre os mesmos (NUSSENZVEIG, 2002).

Nesse experimento utilizamos o trabalho elétrico na conversão de energia térmica por meio da variação de calor observada em um sistema termodinâmico. E podemos assim demonstrar a equivalência entre Joule e caloria.

É interessante comentar com os alunos que o calor específico de um material não é constante, e que este varia geralmente com a temperatura. No caso da água, por exemplo, o calor específico é $1,008 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ no intervalo entre 0 e 1°C . Contudo, como a variação de temperatura é muito pequena em nosso experimento, podemos considerar o calor específico das substâncias envolvidas como sendo aproximadamente constante no intervalo de temperatura em que o experimento é realizado.

2.2. Determinação da Capacidade Térmica do Calorímetro Utilizado

Para obtermos o calor específico do nosso calorímetro, ou da latinha de refrigerante, teremos que proceder de forma semelhante ao que fizemos na seção anterior para a determinação do calor específico de um material ou substância A . Neste caso, podemos utilizar um volume conhecido de água a uma temperatura inicial T_A também conhecida, maior que a temperatura do calorímetro que, como no caso anterior está inicialmente em equilíbrio térmico a uma temperatura T_i com uma outra quantidade conhecida de água. Como a correspondência entre volume de água e sua massa é direta, pois sua densidade é 1 g/cm^3 , ou seja, para cada ml ou cm^3 de volume de água temos uma massa de 1 g de água, podemos determinar a capacidade térmica C_L do calorímetro rearranjando a eq.(A.3) da seguinte forma:

$$\begin{aligned} m_A c_A (T_A - T_f) &= (mc + C_L)(T_f - T_i), \\ C_L (T_f - T_i) &= m_A c_A (T_A - T_f) - mc(T_f - T_i), \\ \therefore C_L &= \frac{m_A c_A (T_A - T_f) - mc(T_f - T_i)}{(T_f - T_i)}. \end{aligned} \quad (4)$$

A obtenção de C_L é importante para obtenção do equivalente de energia porque pode diminuir as fonte de erros no valor obtido, uma vez que a latinha também absorverá parte da energia térmica proveniente do resistor cerâmico.

2.3. Explorando as Leis da Termodinâmica

A Termodinâmica é uma ciência dedutiva, tendo seu conteúdo principal derivado de duas leis fundamentais, a 1ª e a 2ª Leis da Termodinâmica, e que faz uso ao mesmo tempo de uma série de outros resultados experimentais.

Toda análise termodinâmica é focada em um sistema macroscópico, consistindo de um grande número de partículas ($N \gg 1$), o qual ocupa uma região definida no espaço, ou seja, possui uma fronteira. O sistema que estamos analisando no interior do calorímetro é um sistema desse tipo, macroscópico com um grande número de partículas limitado por uma fronteira. Toda essa discussão pode ser iniciada com os alunos para mostrar o que é um sistema termodinâmico e como a análise de tal sistema é realizada.

Podemos discutir também o conceito de vizinhança do sistema, como sendo caracterizada pela ação de forças externas no sistema, ou seja, a vizinhança será apenas a parte do universo próxima o suficiente do sistema para afetá-lo de alguma forma. O professor pode discutir também sobre a natureza da fronteira do sistema, a qual pode limitar como o sistema interage com a sua vizinhança. Em nosso caso temos uma fronteira espacial que limita a troca de energia através de calor do sistema com sua vizinhança. Dizemos que o sistema é formado por paredes adiabáticas. Podemos ir mais adiante na discussão falando sobre a caracterização e determinação do estado de um sistema termodinâmico. Aqui podemos dar o exemplo de como é feita a caracterização do estado de um sistema na mecânica clássica. Este é completamente determinado pela posição $x(t)$ e velocidade $v(t)$ do mesmo em um determinado instante de tempo t . Ou seja, precisamos conhecer os parâmetros (x, v) para caracterizar o estado do sistema clássico. Na Termodinâmica não é diferente, mas em vez de posição e velocidade do sistema, nós utilizamos parâmetros como temperatura, densidade, calor específico, pressão, energia, entropia, entre outros. A monitoração proposta em nosso experimento é justamente para caracterizar o estado termodinâmico do nosso sistema. Com isso poderemos verificar quando o sistema está em equilíbrio térmico, por exemplo. Podemos definir também o que é estado de equilíbrio termodinâmico, pois nosso sistema não sofre qualquer alteração química ou mecânica. Portanto, quando verificarmos que o sistema está em equilíbrio térmico, ele também estará em equilíbrio termodinâmico. Este é caracterizado por equilíbrio mecânico, pois o sistema não sofre deformações, equilíbrio térmico, caracterizado pela temperatura constante, e equilíbrio químico, não temos qualquer reação química ocorrendo no sistema. Portanto, quando dizemos que um sistema está em equilíbrio termodinâmico, ele está em equilíbrio mecânico, térmico e químico.

A riqueza de conceitos que podem ser tratados com nosso experimento nos permite abordar a lei zero da termodinâmica para definirmos temperatura. A lei zero diz que: *dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si*. Mas como podemos definir temperatura a partir disso?

O nosso sistema possui paredes adiabáticas de modo que a água na latinha com o resistor não troca, a princípio, energia térmica com a vizinhança. Isso significa que, quando o sensor metálico do termômetro é imerso no calorímetro, inicialmente sem passar corrente elétrica no resistor, a medida de temperatura observada é o equilíbrio térmico entre a latinha, a água e o resistor, ou seja, o sensor do termômetro será um sistema adicional que também estará em equilíbrio térmico com os demais sistemas. Isso mostra que o tipo e o tamanho do termômetro a ser utilizado em um experimento deve ser escolhido de tal forma que não altere o equilíbrio térmico do sistema quando o mesmo for introduzido.

Quando corrente elétrica passa pelo resistor o equilíbrio do sistema será perturbado de modo que o valor da temperatura no display do termômetro sofrerá variações, mostrando que nenhuma temperatura é definida até que um próximo estado de equilíbrio seja atingido e um valor constante de temperatura seja estabelecido. Dessa forma, podemos definir temperatura como sendo um parâmetro que caracteriza o estado interno do sistema, uma vez que o mesmo possui paredes adiabáticas. Na ocorrência de contato térmico de vários sistemas como a água, a latinha, o resistor e o sensor do termômetro, o valor da temperatura T variará como resultado da troca de energia entre os sistemas, até que o valor de T se estabilize permanecendo o mesmo, mostrando que o estado total do sistema, dado pela soma de todos os outros sistemas, está em equilíbrio térmico. Portanto, a temperatura é um parâmetro definido somente quando há equilíbrio térmico no sistema. Quando não há equilíbrio não é possível estabelecer ou definir uma temperatura para o sistema.

Note que essa definição também nos permite diferenciar calor de temperatura. O calor se manifestará no processo de aquecimento em que o sistema é tirado do equilíbrio quando a corrente passa pelo resistor. A troca de energia para o estabelecimento de um novo estado de equilíbrio se dá através do calor. Como o resistor é aquecido, essa energia será transmitida para os outros sistemas através do calor. Neste momento não tem sentido falar na temperatura do sistema, fato verificado pelas flutuações no display do termômetro. Quando o equilíbrio é estabelecido as trocas de energia se balanceiam com os sistemas absorvendo e emitindo energia à mesma taxa de modo que é possível definir um valor de temperatura para caracterizar o estado de equilíbrio do sistema total. Neste momento não há mais sentido falar em calor, pois o processo de transferência de energia é cessado.

Podemos ir além definindo o que é um processo na Termodinâmica, explorando o processo de aquecimento adiabático que ocorre quando acionamos a corrente no resistor. Como definimos temperatura como um parâmetro que caracteriza o estado de equilíbrio interno do sistema fica fácil descrever um processo como uma forma de mover o sistema de um estado de equilíbrio inicial para um estado final. O processo é adiabático porque as paredes do nosso sistema não permitem trocas de energia térmica com a vizinhança. Podemos introduzir este processo de forma matemática utilizando a eq.(1). Tomando sua forma diferencial temos que,

$$\delta Q = C dT.$$

Note que utilizamos a forma δQ para a quantidade de calor porque esta é uma diferencial inexata. Isso significa que não tem sentido estabelecermos estado inicial e final para o calor, porque o mesmo aparece no processo e depende do “caminho” para levar o sistema de um estado de equilíbrio a outro. Dependendo do caminho significa que depende da forma como a água em nosso calorímetro foi aquecida, por exemplo, podendo ser através da chama de um fogão, ou luz solar ou a corrente passando pelo resistor. Como o processo é adiabático temos $\delta Q = 0$, o que significa que o nosso sistema não troca energia através do calor com sua vizinhança. Sendo $dT \neq 0$ temos necessariamente que $C = 0$, ou seja, é como se o sistema fosse incapaz de armazenar energia, uma vez que o mesmo está isolado termicamente. Isso é evidenciado quando pegamos uma garrafa térmica cheia de água à temperatura de 100°C. Se a segurarmos externamente não saberemos, a princípio, que tem água a essa temperatura em seu interior, porque as paredes da garrafa são adiabáticas e impedem que haja troca de energia térmica entre a água e nossa mão. O mesmo ocorre se tentarmos aquecer a água no interior da garrafa fechada através de algum processo externo.

Este é um ótimo momento para introduzir para os alunos o conceito da primeira lei da Termodinâmica, dada em sua forma diferencial por,

$$dU = \delta Q - \delta W, \quad (5)$$

em que a variação da energia interna do sistema dU é dada pela energia fornecida ao mesmo através do calor δQ menos a energia fornecida pelo sistema à sua vizinhança através do trabalho δW . Note que, assim como a quantidade de calor, o trabalho também é uma diferencial inexata.

Como não há qualquer processo que caracterize transferência de energia do nosso sistema para a vizinhança através de trabalho, podemos concluir sem perda de generalidade que no nosso caso temos que $\delta W = 0$. Isso nos conduz ao resultado $dU = \delta Q$ pela eq.(5), que mostra que a quantidade de energia fornecida pelo resistor através do calor $\delta Q > 0$, quando corrente elétrica passa pelo mesmo, ocasiona o aumento da energia interna do sistema $dU > 0$.

Isso é verificado pelo aumento da temperatura do sistema mostrado no display do termômetro digital. Logo, podemos definir energia interna de um sistema como sendo a sua própria energia térmica, sendo caracterizada pela temperatura do mesmo. Além da definição de energia interna, podemos também discutir o princípio de conservação de energia que diz que energia não pode ser criada e nem destruída, mas apenas transformada de uma modalidade em outra. A energia elétrica gerada na placa solar é transformada em energia elétrica e em seguida em energia térmica quando corrente elétrica passa pelo resistor. Esta última transformação é evidenciada pelo aquecimento da água no calorímetro.

Note que falamos do trabalho realizado pelo nosso sistema, ou seja, o calorímetro e não do trabalho elétrico realizado pela célula solar no resistor. Este sim é diferente de zero e é responsável pela energia elétrica que passa pelo resistor.

Nosso experimento permite também abordar a Segunda Lei da Termodinâmica para mostrar que o fluxo espontâneo de energia através do calor ocorre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Para isso o professor pode escolher fazer diferentes abordagens iniciais para introduzir o conceito de entropia S de um sistema. A entropia mede o quanto a energia se espalha ou se dissipa em um processo, tornando-a mesma menos útil para o propósito inicial estabelecido. Isso significa que é muito difícil reaproveitarmos a energia dissipada durante a realização de um determinado processo. Em um carro, por exemplo, utilizamos energia térmica obtida do combustível para realização de trabalho para colocar o carro em movimento. Quando dizemos que o rendimento de um carro a gasolina é de 23%, significa que, de toda a energia térmica fornecida no início do processo apenas 23% foi convertida em movimento do carro. Quando estacionamos o carro e colocamos a mão sobre o capô do mesmo percebemos que o capô está quente. É impossível recuperar essa energia térmica que aqueceu toda a carcaça do motor e o capô para transformá-la em movimento do carro. É exatamente essa impossibilidade que a entropia mede. De forma equivalente, podemos dizer também que a entropia mede a irreversibilidade de um processo. Dizer que recuperar uma quantidade de energia é impossível é equivalente a dizer que o processo é irreversível. Como a energia sempre tende a se espalhar ou se dissipar, se tornando menos útil em processos espontâneos para um determinado propósito, a entropia sempre tende a aumentar. Esta é conhecida usualmente como a lei do aumento da entropia.

Matematicamente podemos expressar a variação da entropia dS como,

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (6)$$

Isso significa que a mudança na entropia ocorre quando a transferência de energia através de calor ocorre à temperatura constante.

O fluxo espontâneo de energia através do calor é um processo irreversível, portanto, a lei do aumento da entropia se aplica. Vamos ver como esses conceitos podem ser aplicados ao nosso calorímetro. Vamos considerar apenas o resistor com temperatura T_1 e a água no calorímetro com temperatura T_2 . Sabemos que a energia térmica flui espontaneamente através do calor da temperatura mais alta para a temperatura mais baixa. Portanto, se o resistor é aquecido pela passagem de corrente elétrica, naturalmente espera-se que a água seja aquecida após um certo tempo, como no caso de uma resistência de chuveiro. Se o professor perguntar qual sistema tem maior temperatura, o resistor ou a água no calorímetro, os alunos responderão imediatamente que é o resistor. Vamos provar isso matematicamente utilizando a Segunda Lei da Termodinâmica.

Considerando que o resistor possui entropia dS_1 e a água dS_2 , a entropia total dS do sistema é dada, neste caso, pela soma das entropias do sistema, ou seja,

$$dS = dS_1 + dS_2. \quad (7)$$

Considerando que o resistor à temperatura T_1 transfere uma quantidade de energia térmica positiva através de calor ($\delta Q > 0$), como ilustrado na figura 5, para a água à temperatura T_2 temos pela eq.(6) e pela lei de aumento da entropia que,

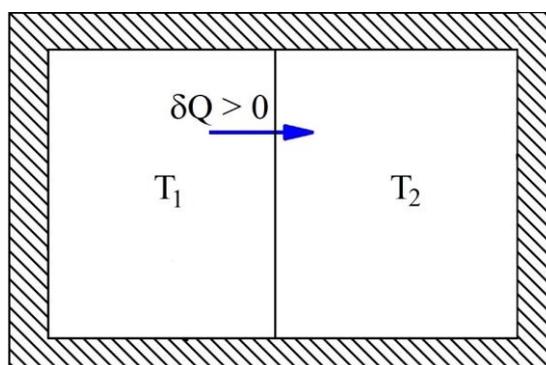
$$dS = -\frac{\delta Q}{T_1} + \frac{\delta Q}{T_2} > 0. \quad (8)$$

Note que o sinal negativo se refere à energia perdida pelo resistor. Como o sistema é isolado adiabaticamente a quantidade de energia que o resistor perde é igual à quantidade de energia que a água recebe. Sendo $\delta Q > 0$ podemos manipular a eq.(8) de modo que,

$$\begin{aligned} -\frac{\delta Q}{T_1} + \frac{\delta Q}{T_2} &> 0, \\ \frac{\delta Q}{T_2} > \frac{\delta Q}{T_1} &\rightarrow \frac{1}{T_2} > \frac{1}{T_1}, \\ \therefore T_1 &> T_2, \end{aligned}$$

mostrando que de fato a temperatura do resistor T_1 é maior que a temperatura da água T_2 , e o fluxo espontâneo de energia através do calor se dá através do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura.

Figura 5 – Dois corpos com temperaturas T_1 e T_2 colocados em contato térmico para mostrar que o fluxo espontâneo de energia através do calor ocorre do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A transposição didática dos cálculos anteriores para o nível do ensino médio pode ser feita diretamente bastando mudar a notação de diferencial para a variação dos parâmetros utilizando ΔT , ΔU , ΔW , ΔS e ΔQ .

Mostramos com isso as diferentes possibilidades de conceitos que podem ser abordados no tema Termodinâmica com o nosso experimento. O professor não precisa se limitar ao que foi discutido aqui. O nosso experimento pode ser utilizado como introdução para outros assuntos na Termodinâmica como máquinas térmicas ou até uma discussão avançada sobre o caráter unilateral de ocorrência de processos espontâneos, ou irreversíveis, podendo discutir o que seria a seta do tempo em tais processos.

2.4. Efeito Joule

O efeito Joule, caracterizado pelo físico inglês James Prescott Joule, é um processo em que ocorre o aquecimento de um condutor quando corrente elétrica passa pelo mesmo. Podemos obter calor a partir de uma resistência elétrica. Quando percorrida por uma corrente elétrica essa resistência, devido ao aumento da agitação térmica dos átomos do material, tem sua energia térmica aumentada e conseqüentemente temos transferência de energia da mesma para a sua vizinhança através de calor. Dessa forma é possível observar a transformação de energia elétrica em energia térmica. Por exemplo, nos chuveiros elétricos, fornos elétricos e aquecedores utilizamos uma resistência elétrica com potência bem alta em watts (W), ou seja, joules por segundo (J/s). Com isso, pode-se aproveitar o calor para aquecer a água do banho, assar

alimentos ou aquecer o ambiente, ou seja, esse processo é muito utilizado no dia a dia em nossas casas.

A essa transformação de energia denominamos de Efeito Joule. Quando um resistor ou resistência elétrica é submetida a uma diferença de potencial V , isso permite a passagem de corrente elétrica i pelo material. A propriedade física chamada de resistividade do material que faz com que os elétrons livres do condutor percorram o material com uma certa dificuldade. Isso faz com que haja aumento da agitação térmica dos átomos da rede cristalina do material e consequentemente a energia dos elétrons passa a ser dissipada como energia térmica através de calor.

A potência elétrica dissipada pela resistência elétrica quando submetida a uma diferença de potencial (ddp), em volts (V), é dada pelo produto dessa ddp e a corrente elétrica (i) que percorre a resistência e é dada pela equação:

$$P = Vi. \quad (9)$$

Portanto, no nosso experimento podemos monitorar a quantidade de energia elétrica que passa pelo resistor durante uma quantidade de tempo através das medidas de V e i utilizando os medidores elétricos. É essa energia que será convertida em energia térmica, nos permitindo determinar o equivalente mecânico do calor através de medidas elétricas.

A.2.5. Determinação do Equivalente Mecânico da Caloria através de Medidas Elétricas

A partir da definição de potência, dada pela variação da energia no tempo, podemos definir o fator de equivalência de Joule em medidas elétricas. A potência P no resistor, dada em joules por segundo J/s , é obtida pela taxa de variação da energia elétrica (ΔE) no mesmo, decorrente do trabalho elétrico realizado no resistor W_e , de modo que,

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{W_e}{\Delta t} \rightarrow W_e = Vi\Delta t. \quad (10)$$

Por efeito Joule o resistor libera energia térmica no interior do calorímetro. Pela lei de conservação de energia, a variação de energia no resistor, através do trabalho realizado no mesmo, deve ser igual à energia térmica fornecida ao calorímetro, a qual pode ser medida através da relação $Q = (mc + C_L)\Delta T$, dada em calorias (cal). O parâmetro $c = 1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ é o calor específico da água. Note que levamos em conta não só a água com calor específico c , mas

também a latinha com capacidade térmica C_L . Nós estamos assumindo que $W_e = Q$, o que significa que todo trabalho elétrico no resistor, em joules, é convertido em calor no calorímetro, em calorias. Dessa forma, podemos obter o fator de equivalência α entre as duas unidades, dado em joule por caloria (J/cal), ou seja, $\alpha = W_e/Q$. Mesmo utilizando instrumentos sofisticados para obtenção do fator de equivalência, a literatura fornece o valor de $\alpha = 4,186$ J/cal, com apenas três casas decimais. Isso é decorrente de não ser possível converter todo trabalho em calor. Pode-se melhorar as condições de conversão e conseguir mais casa decimais para α , mas sempre estaremos limitados à barra de erros do experimento.

Como outra forma alternativa de obter o equivalente mecânico do calor com este experimento, a qual, poderia ser determinar o calor específico da água considerando a igualdade $W_e = Q$, onde todo o trabalho elétrico é convertido em calor, a partir das medidas elétricas e da variação da temperatura pode-se determinar experimentalmente o valor do calor específico para água.

Utilizando as relações acima e a eq. (10) tem-se

$$\alpha = \frac{W_e}{Q} = \frac{Vi\Delta t}{(mc + C_L)\Delta T}$$

$$\therefore \alpha = \frac{Vi}{(mc + C_L) \frac{\Delta T}{\Delta t}} \quad (11)$$

A expressão acima mostra que para a determinação do fator de equivalência α , entre joules e caloria, utilizando medidas elétricas como a tensão V e a corrente i , é necessário obter a taxa de variação da temperatura $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ no interior do calorímetro. Isso é feito através da monitoração da temperatura do sistema com o termômetro digital. Como o resistor está liberando energia térmica no interior do calorímetro precisamos obter a taxa de aquecimento do sistema água + latinha. Conhecendo essa taxa, as grandezas elétricas tensão e corrente no resistor, obtidas pelo medidor elétrico, a massa e o calor específico da água e a capacidade térmica da latinha, podemos obter α . Na próxima seção apresentamos os resultados obtidos para sete experimentos realizados considerando diferentes condições.

2.6. Realização do Experimento e Determinação de α

Para a determinação do equivalente mecânico do calor α , através de medidas elétricas, é necessário obter o valor da capacidade térmica do calorímetro C_L , o qual pode ser calculado pela eq.(4). Utilizando 100 ml de água ($m = 100$ g) inicialmente no interior do calorímetro

obtivemos uma temperatura de equilíbrio de $T_i = 26,0$ °C. Aquecendo a mesma quantidade de água, $m_A = 100$ g, por 30 segundos em um micro-ondas, e com uma temperatura final de equilíbrio de $T_A = 38,4$ °C, temperatura medida previamente a sua utilização. A massa de água aquecida foi despejada no calorímetro e o mesmo foi fechado até que a temperatura final de equilíbrio fosse aferida. O equilíbrio foi atingido após 2 minutos com $T_f = 31,9$ °C. Utilizando esses resultados e o calor específico da água $c_A = c = 1,0$ cal/g °C na eq.(4) obtemos para a capacidade térmica do calorímetro $C_L = 10,17$ cal/°C.

Após acionar a célula solar, energia elétrica passa pelo resistor no interior do calorímetro iniciando o processo de aquecimento da água por efeito Joule. Para obtenção da taxa de aquecimento da água nós realizamos 7 experimentos. Nos dois primeiros experimentos, Exp.1 e Exp.2, nós coletamos os valores de temperatura em função do tempo por 7 minutos, com passo de 1 minuto. As medidas são apresentadas na Tabela 1. Nestes dois primeiros experimentos o valor da tensão aplicada no resistor foi de $V = 5,27$ V com uma intensidade de corrente elétrica de $i = 0,43$ A.

TABELA 1 – Registro da temperatura T em função do tempo t para os experimentos 1 e 2.

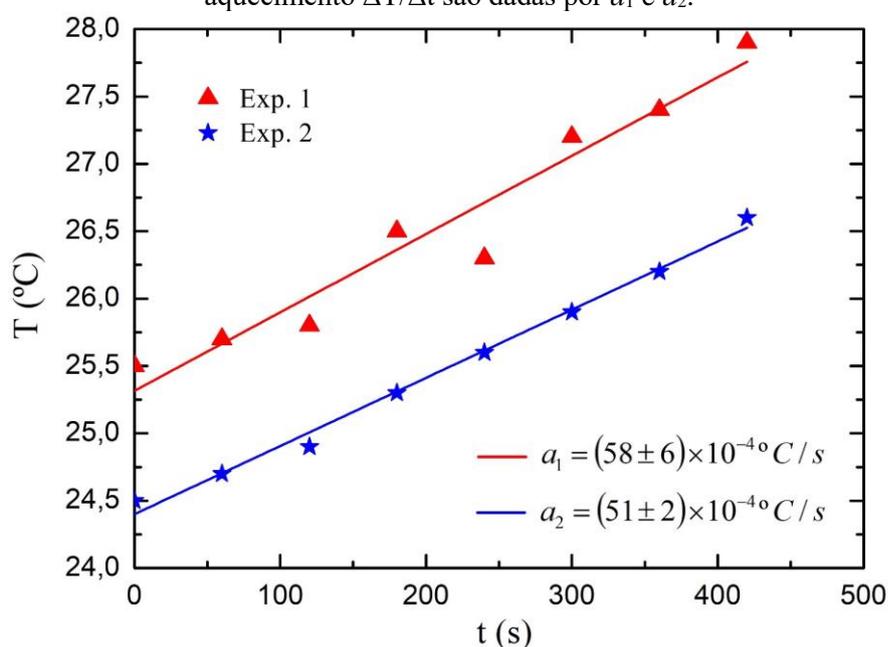
t (s)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)
0	25,5	24,5
60	25,7	24,7
120	25,8	24,9
180	26,5	25,3
240	26,3	25,6
300	27,2	25,9
360	27,4	26,2
420	27,9	26,6

Fonte: elaborada pelo autor.

No gráfico da figura 6 plotamos os resultados da Tabela 1 e fizemos o ajuste linear da curva para obtenção da taxa de aquecimento da água $a = \Delta T / \Delta t$ para os dois experimentos. No experimento 1 (Exp.1) obtemos $a_1 = (58 \pm 6) \times 10^{-4}$ °C/s enquanto que no Exp.2 obtemos um valor um pouco menor $a_2 = (51 \pm 2) \times 10^{-4}$ °C/s. Pelos desvios obtidos podemos concluir que as taxas de aquecimento foram praticamente as mesmas como esperado, pois os experimentos foram realizados nas mesmas condições. Note que no Exp.1 houve mais flutuações que no Exp.2. Essas são decorrentes da maior presença de nuvens durante a realização do Exp.1, fazendo com que houvesse variação da radiação solar na célula e conseqüentemente da tensão no resistor.

Utilizando esses valores na eq.(11) obtivemos para o valor do equivalente mecânico do calor $\alpha_1 = 3,55 \text{ J/cal}$ e $\alpha_2 = 4,03 \text{ J/cal}$ para os Exp.1 e Exp.2, respectivamente. Isso significa que pelo Exp.1 temos que 1 caloria (cal) equivale a aproximadamente 3,55 joules (J), enquanto que pelo Exp.2 tem-se que $1 \text{ cal} \approx 4,03 \text{ J}$. Note que o segundo resultado está bem próximo do valor fornecido pela literatura $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$, mostrando que se o experimento for conduzido em boas condições de sol, sem muitas nuvens, é possível obter um excelente resultado.

Figura 6 – Curvas de aquecimento da água obtidas em dois experimentos diferentes, Exp. 1 e Exp. 2, com temperaturas iniciais dadas respectivamente por 25,5 e 24,5 °C. As respectivas taxas de aquecimento $\Delta T/\Delta t$ são dadas por a_1 e a_2 .



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os experimentos 3 e 4, Exp.3 e Exp.4, foram realizados utilizando como fonte elétrica para o resistor uma fonte de tensão e a nossa célula solar. Nestes experimentos coletamos os valores de temperatura até que o equilíbrio térmico entre a água e o resistor fosse estabelecido. Neste procedimento a célula solar foi conectada ao resistor após a obtenção do equilíbrio térmico obtido utilizando-se a fonte de tensão, que ocorreu em $T_E = 29,9 \text{ °C}$. A temperatura de equilíbrio obtida com a célula solar foi de $T_E = 31,2 \text{ °C}$. Os dados são apresentados na Tabela A.2 e o gráfico da temperatura em função do tempo na figura 7.

Para estes experimentos utilizamos uma quantidade de água maior que nos experimentos 1 e 2, $m = 250 \text{ g}$, com o objetivo de diminuir a taxa de aquecimento da água. Como temos um volume maior de água é natural que o sistema leve mais tempo para atingir o equilíbrio. A tensão aplicada no resistor pela fonte de tensão foi de $V_3 = 4,15 \text{ V}$, com uma corrente de

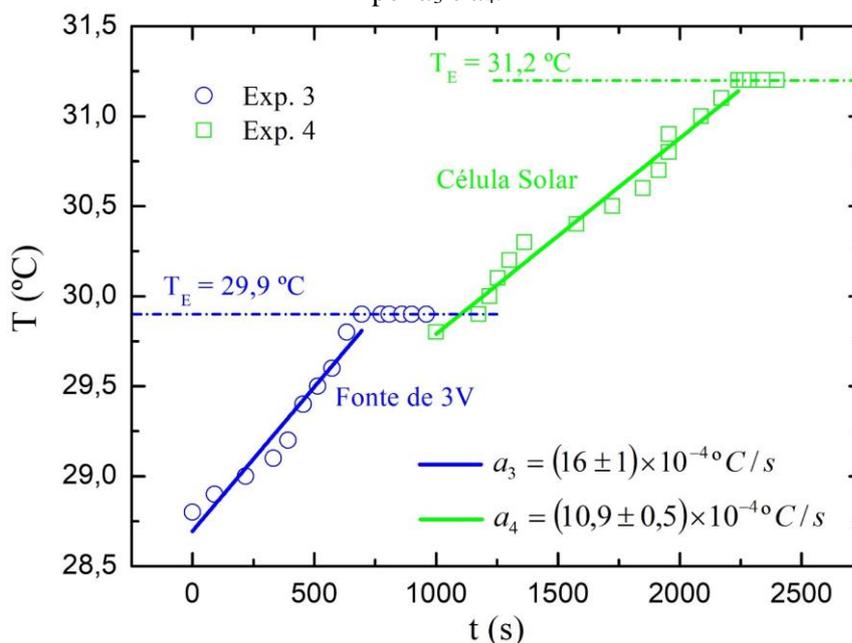
$i_3 = 0,32$ A, e pela célula solar foi de $V_4 = 3,64$ V, com $i_4 = 0,28$ A. Note que os valores fornecidos pela célula solar no Exp.3 é diferente daqueles dos experimentos 1 e 2, pois foram realizados em dias e horários diferentes. Portanto, é importante que o professor sempre verifique a tensão e a corrente no resistor antes de calcular o valor de α , pois este experimento depende da incidência da radiação solar na célula.

TABELA 2 – Registro da temperatura T em função do tempo t para os experimentos 3 e 4.

t_3 (s)	T_3 (°C)	t_4 (s)	T_4 (°C)
0	28,8	1000	29,8
91	28,9	1175	29,9
218	29,0	1220	30,0
332	29,1	1254	30,1
392	29,2	1301	30,2
454	29,4	1363	30,3
514	29,5	1577	30,4
573	29,6	1723	30,5
633	29,8	1849	30,6
695	29,9	1914	30,7
775	29,9	1956	30,8
808	29,9	1956	30,9
860	29,9	2088	31,0
900	29,9	2171	31,1
960	29,9	2240	31,2
		2265	31,2
		2289	31,2
		2322	31,2
		2344	31,2
		2400	31,2

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 – Curvas de aquecimento da água obtidas em dois experimentos diferentes, Exp. 3 e Exp. 4. No experimento 3 foi utilizada uma fonte de tensão. Após atingir a temperatura de equilíbrio $T_E = 29,9$ °C o resistor foi ligado à célula solar e uma nova rampa de aquecimento para a água foi obtida até atingir a temperatura de equilíbrio $T_E = 31,2$ °C. As respectivas taxas de aquecimento $\Delta T/\Delta t$ são dadas por a_3 e a_4 .



Fonte: Elaborada pelos autores.

As taxas de aquecimento obtidas utilizando a fonte de tensão e a célula solar são dadas, respectivamente, por $a_3 = (16 \pm 1) \times 10^{-4} \text{ °C/s}$ e $a_4 = (10,9 \pm 0,5) \times 10^{-4} \text{ °C/s}$, mostrando que com a fonte de tensão foi possível aquecer a água mais rapidamente.

Os valores do equivalente mecânico obtido para estes experimentos são $\alpha_3 = 3,19 \text{ J/cal}$ e $\alpha_4 = 3,59 \text{ J/cal}$. Note que em ambos os resultados obtivemos valores subestimados quando comparados com o valor fornecido pela literatura $\alpha = 4,186 \text{ J/cal}$. Estes resultados equivalem a dizer que $W_e < Q$ e energia térmica está sendo criada no interior do calorímetro, violando assim o princípio de conservação de energia. Se o professor obtiver um resultado superestimado, $\alpha > 1$, com seus alunos, a explicação é imediata, pois a eficiência em converter o trabalho elétrico em calor não é 100%. Não há problema nenhum com relação à conservação de energia neste resultado.

Se assumirmos que estes resultados estão corretos estamos dizendo que a primeira lei da Termodinâmica está sendo violada. Até hoje, ninguém foi capaz de mostrar um resultado experimental que mostrasse tal violação. O que está acontecendo no nosso experimento então? Como nosso procedimento experimental é realizado em diversas etapas, naturalmente pode ocorrer diversos erros durante as medidas ou monitoração do equipamento. Outro problema é a flutuação da tensão no resistor devido a passagem de nuvens no céu, causando uma diminuição

na mesma e, conseqüentemente, uma variação da energia no resistor devido ao trabalho elétrico realizado.

Estes resultados mostram a importância de estimarmos os erros de medidas em um experimento, para não cometermos erros de interpretação com relação às leis e princípios de conservação empregados na modelagem do sistema. Note a riqueza da discussão que pode ser conduzida mesmo de um resultado discrepante com relação ao fornecido pela literatura.

Como a relação $W_e = Q$ que utilizamos nos nossos cálculos representa a situação ideal em que não são considerados, por exemplo, o aquecimento do ar no interior do calorímetro, o aquecimento do isopor que utilizamos para isolar a latinha, entre outras perdas de energia térmica, espera-se que $W_e > Q$, de modo que o fator de equivalência seja sistematicamente maior que o valor esperado $\alpha = 4,186$ J/cal.

Como já discutido os casos em que são observados $W_e < Q$, ou equivalentemente $\alpha < 4,186$ J/cal são devidos, principalmente, à flutuação da tensão no resistor ocasionada pela variação da incidência da radiação solar na célula, a qual não temos controle. Tais flutuações também podem ser observadas na fonte de tensão, se esta não for muito estável.

A utilização da fonte elétrica foi para mostrar que o experimento pode ser realizado com outras fontes de energia alternativas, caso o professor ministre suas aulas durante a noite ou em um dia chuvoso, em que não há radiação solar para a realização do mesmo.

No experimento 5 verificamos uma mudança expressiva na mudança da taxa de aquecimento da água no interior do calorímetro devido às flutuações mencionadas anteriormente. Os valores da temperatura são apresentados na Tabela 3 e o gráfico de T vs t na figura 8.

TABELA 3 – Registro da temperatura T em função do tempo t para o experimento 5.

t_5 (s)	T_5 (°C)	t_5 (s)	T_5 (°C)
0	27,8	1440	29,0
60	27,9	1560	29,1
240	28,0	1620	29,3
300	28,1	1680	29,5
420	28,2	1740	29,7
540	28,3	1800	29,7
660	28,4	1860	29,6
780	28,5	1920	29,5
900	28,6	1980	29,6
1020	28,7	2040	29,7
1140	28,8	2100	29,6
1260	28,9	2160	29,6

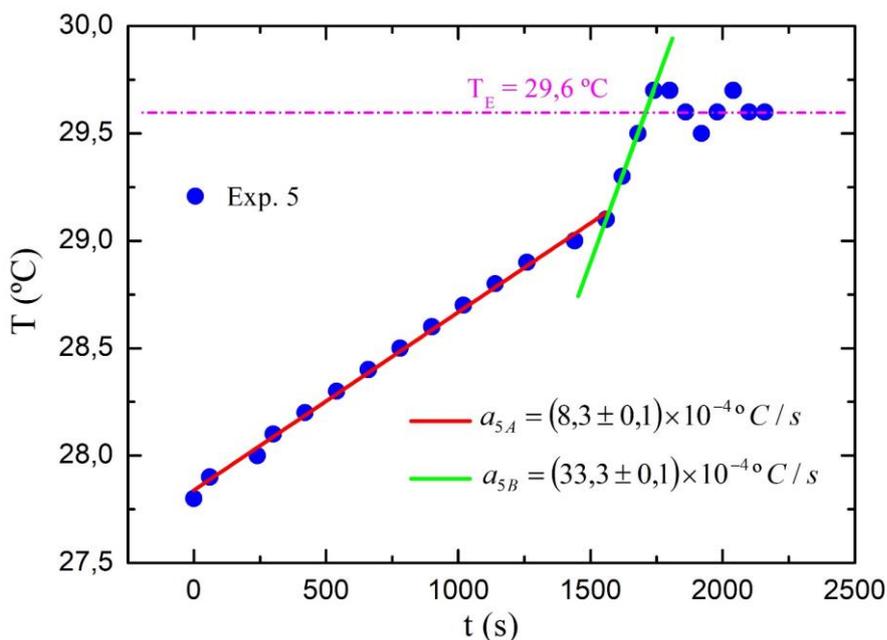
Fonte: Elaborada pelos autores.

Este experimento foi realizado nas mesmas condições do experimento 4. No gráfico da figura A.8 podemos ver claramente a mudança da taxa de aquecimento de $a_{5A} = (8,3 \pm 0,1) \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/s}$ para $a_{5B} = (33,3 \pm 0,1) \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/s}$ até o sistema atingir a temperatura de equilíbrio em $T_E = 29,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Após a obtenção do equilíbrio térmico é possível verificar que as flutuações continuaram, pois a temperatura fica variando para valores maiores e menores em torno de T_E .

Utilizando a taxa a_{5A} o valor do equivalente mecânico obtido é de $a_5 \approx 4,72 \text{ J/cal}$. Pelo gráfico é possível observar que houve poucas flutuações na primeira rampa de aquecimento, taxa a_{5A} . Minimizando essas flutuações é possível verificar que o valor obtido para o equivalente é superestimado como esperado, mostrando que as mesmas podem ser consideradas como a maior fonte de erro do nosso experimento.

Uma alternativa para minimizar esse erro seria monitorar a tensão e a corrente no resistor, juntamente com a temperatura no interior do calorímetro, durante toda a realização do experimento. Feito isso, pode-se utilizar o valor médio de V e i para o cálculo de α .

Figura 8 – Curva de aquecimento da água obtida utilizando a célula solar. Neste experimento houve flutuações na radiação solar devido à presença de nuvens. Isso é evidenciado quando o sistema atinge a temperatura de $29,1 \text{ }^\circ\text{C}$, em que a taxa de aquecimento $\Delta T/\Delta t$ aumenta de a_{5A} para a_{5B} , e também pelas flutuações observadas quando o sistema tende ao equilíbrio térmico $T_E = 29,6 \text{ }^\circ\text{C}$.



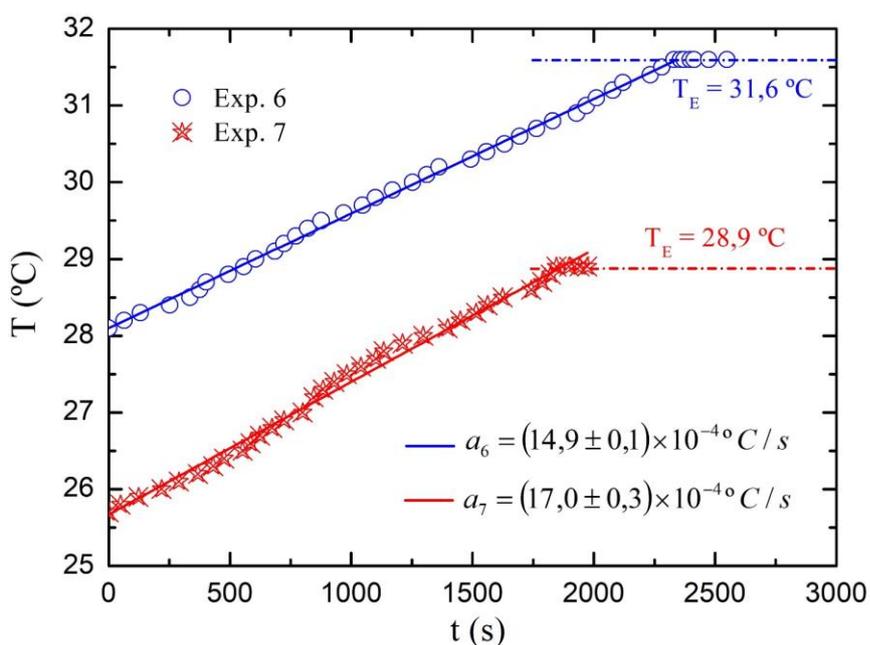
Fonte: Elaborada pelos autores.

Para compararmos os resultados obtidos utilizando a fonte de tensão e a placa solar, dois novos experimentos, Exp. 6 e 7, respectivamente, foram conduzidos. Nestes experimentos utilizamos uma massa de água de $m = 200 \text{ g}$ e medimos novamente a capacidade térmica do

calorímetro nas duas situações seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. Os resultados obtidos para o Exp. 6 e 7 são dados, respectivamente, por $C_{L6} = 13,66 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ e $C_{L7} = 13,86 \text{ cal/}^\circ\text{C}$. Em ambos os casos o sistema foi aquecido até que a temperatura de equilíbrio fosse atingida. O equilíbrio foi observado após decorridos 40 minutos para o Exp.6, quando o sistema atinge a temperatura de $T_E = 31,6 \text{ }^\circ\text{C}$, e após 33 minutos para o Exp.7, em que $T_E = 28,9 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme mostrado na figura 9.

O valor do equivalente mecânico obtido nestes experimentos foi de $\alpha_6 = 4,05 \text{ J/cal}$ e $\alpha_7 = 3,93 \text{ J/cal}$. Os desvios obtidos nestes experimentos é de menos de 4% para o Exp.6, em que utilizamos a fonte de tensão, e de 6% para o Exp.7 realizado com a célula solar, em comparação ao resultado esperado $\alpha = 4,186 \text{ J/cal}$. O melhor resultado obtido com a célula solar foi de $\alpha_2 = 4,03 \text{ J/cal}$, semelhante ao melhor resultado obtido com a fonte de tensão no Exp.6. Estes resultados mostram que o experimento pode ser conduzido com fontes de energia alternativas.

Figura 9 – Curvas de aquecimento da água obtidas utilizando a fonte de tensão e a célula solar, Exp.6 e Exp.7, respectivamente.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A mudança no valor da capacidade térmica do calorímetro ao mudarmos a quantidade de água em seu interior sugere que uma análise deve ser conduzida para verificar tal influência. Isso é de certa forma esperado, pois estamos mudando a relação de volume de água pelo volume

de ar no interior do calorímetro. Neste trabalho não tivemos tempo de trabalhar tal análise com os alunos, de modo que isso será feito em aplicações futuras.

Os resultados mostram que o uso da célula solar, além de fornecer um excelente resultado para o equivalente mecânico do calor através de medidas elétricas, oferece a oportunidade de discutir diversos outros assuntos, como fontes limpas de energia, introdução de novas tecnologias, efeito fotovoltaico, semicondutores, entre outros.

Todos os resultados obtidos nos sete experimentos são mostrados na Tabela 4. Considerando os valores de α obtidos com a célula solar, Exps.1, 2, 4, 5 e 7, o equivalente mecânico médio é dado por $\alpha_M \approx 4,0$ J/cal.

Na próxima seção apresentamos o cálculo do desvio de α considerando a incerteza na medida de cada propriedade do sistema.

TABELA 4 – Valor do equivalente mecânico do calor α para cada experimento realizado considerando as respectivas massas de água no calorímetro m , sua capacidade térmica C_L , a tensão V e a corrente i no resistor e a taxa de aquecimento da água a . Os experimentos 3 e 6 foram realizados utilizando uma fonte de tensão de 3 V. Adicionalmente a estes dados foi utilizado para o cálculo de α o calor específico da água $c = 1,0$ cal/g°C.

	<i>Exp. 1</i>	<i>Exp.2</i>	<i>Exp.3</i>	<i>Exp.4</i>	<i>Exp.5</i>	<i>Exp.6</i>	<i>Exp.7</i>
m (g)	100	100	250	250	250	200	200
C_L (cal/°C)	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	13,66	13,86
V (V)	5,27	5,27	4,15	3,64	3,64	4,03	4,2
i (A)	0,43	0,43	0,32	0,28	0,28	0,32	0,34
a ($\times 10^{-4}$ °C/s)	58	51	16	10,9	8,3	14,9	17
α (J/cal)	3,55	4,03	3,19	3,59	4,72	4,05	3,93

Fonte: Elaborada pelos autores.

2.7. Cálculo do Desvio de α

Ao determinarmos o valor de uma grandeza indiretamente, ou seja, dependente de outras medidas diretas de grandezas contidas nas expressões matemáticas que determinam os valores numéricos para essa grandeza, é preciso considerar os erros individuais contidos no resultado do valor final calculado.

Considerando uma grandeza f que depende de n variáveis independentes que podem ser medidas, como x e y , por exemplo, o desvio de $f = f(x,y)$ é dado por,

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} dy\right)^2}, \quad (12)$$

sendo $\frac{\partial f}{\partial x}$ e $\frac{\partial f}{\partial y}$ as derivadas parciais de $f(x,y)$ em relação a x e y , respectivamente, e dx e dy as incertezas nas medidas dos parâmetros x e y , respectivamente. Usualmente utilizamos $dx = \Delta x$ e $dy = \Delta y$.

No nosso caso precisamos calcular o desvio de α , dado pela eq.(11). Sendo $\alpha = \alpha\left(V, i, m, c, C_L, \frac{\Delta T}{\Delta t}\right)$, precisamos calcular as derivadas parciais em relação a todos estes parâmetros, como na eq. (12), para obtenção de $\Delta\alpha$. Esse procedimento também precisa ser conduzido para a obtenção de ΔC_L , pois a capacidade térmica do calorímetro é obtida indiretamente através da eq. (4).

Essa é uma boa oportunidade para discussão de erros, incertezas e resolução de instrumentos de medida nas aulas de Física no ensino médio. O cálculo do erro de α é importante para verificarmos se a metodologia empregada fornece um bom resultado quando comparado com o resultado encontrado na literatura. Adicionalmente, se o resultado obtido for muito discrepante com relação ao resultado esperado, esse procedimento nos permite verificar as fontes de erros do experimento para conduzir melhorias no mesmo.

As incertezas consideradas em cada medida foi de $\Delta V = 0,01$ V, $\Delta i = 0,01$ A, $\Delta m = 2$ g, $\Delta c = 0,008$ cal/g°C, $\Delta T = 0,1$ °C e para a taxa de aquecimento $a = \Delta T/\Delta t$ o valor de Δa é obtido pelo ajuste linear dos gráficos apresentados nas figuras da seção anterior para cada experimento.

Para o cálculo de $\Delta\alpha$ vamos começar reescrevendo a eq. (11) da seguinte forma,

$$\alpha = \frac{Vi}{(C + C_L)a},$$

em que $C = mc$ é capacidade térmica da água e $a = \Delta T/\Delta t$ é a taxa de aquecimento do sistema.

Note que agora temos $\alpha = \alpha(V, i, C, C_L, a)$. Aplicando a eq.(12) obtemos:

$$\Delta\alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta i}{i}\right)^2 + \frac{(\Delta C)^2 + (\Delta C_L)^2}{(C + C_L)^2} + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2}. \quad (13)$$

Como $C = mc$, o valor de ΔC , utilizando a eq.(12), fica,

$$\Delta C = C \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}. \quad (14)$$

O desvio da capacidade térmica do calorímetro, ΔC_L , é um pouco mais trabalhoso de ser obtido porque temos a dependência das temperaturas final e inicial tanto no numerador quanto no denominador da expressão para C_L , conduzindo a uma expressão complicada de ser manipulada com alunos do ensino médio. Contudo, podemos fazer uma estimativa para ΔC_L

considerando os valores obtidos para o Exp.1 e Exp.7, dados por $C_{L1} = 10,17 \text{ cal/}^\circ\text{C}$ e $C_{L7} = 13,86 \text{ cal/}^\circ\text{C}$, de modo que $\Delta C_L = C_{L7} - C_{L1} \approx 4 \text{ cal/}^\circ\text{C}$. Note que este é um valor relativamente alto, chegando a quase 40% do valor obtido para C_{L1} . Este pode ser minimizado se um estudo mais metucioso for conduzido para obtenção da capacidade térmica do calorímetro. Para os primeiros cinco experimentos esse erro alto não foi problema para o cálculo de $\Delta\alpha$, porque de acordo com a eq.(13) temos o termo $\frac{(\Delta C_L)^2}{(C+C_L)^2}$, o que fornece uma razão de algumas partes em 1000, enquanto que a contribuição de $\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2$ é de algumas partes em 100, ou seja, uma ordem de grandeza maior. Considerando as incertezas e valores das outras propriedades a razão entre as mesmas é ainda menor que para o caso da capacidade térmica do calorímetro. Portanto, o fator mais relevante para o cálculo da incerteza do equivalente nestes experimentos é o termo relacionado à taxa de aquecimento do sistema.

Como nos experimentos 6 e 7 nós minimizamos as flutuações das fontes elétricas o termo $\frac{(\Delta C_L)^2}{(C+C_L)^2}$ passa a ser dominante com relação a todos os outros, mostrando que se o erro na determinação da capacidade térmica do calorímetro for minimizado, podemos obter um desvio para α ainda menor.

Utilizando os valores apresentados na Tabela 4 e suas respectivas incertezas nas eqs.(13) e (14) podemos estimar o erro do valor do equivalente mecânico para todos os experimentos realizados. Os resultados são apresentados na Tabela 5. Note que utilizamos as regras de Algarismos significativos para escrever as medidas junto com suas incertezas correspondentes, bastando comparar estes com os resultados apresentados na Tabela 4.

TABELA 5 – Valor de todas as propriedades medidas para a obtenção do equivalente mecânico do calor α para cada experimento realizado e suas incertezas correspondentes. Apresentamos a massa de água no calorímetro m , a capacidade térmica da água C e do calorímetro C_L , a tensão V e a corrente i no resistor e a taxa de aquecimento da água a .

	<i>Exp. 1</i>	<i>Exp.2</i>	<i>Exp.3</i>	<i>Exp.4</i>	<i>Exp.5</i>	<i>Exp.6</i>	<i>Exp.7</i>
$(m \pm \Delta m)$ g	100 ± 2	100 ± 2	250 ± 2	250 ± 2	250 ± 2	200 ± 2	200 ± 2
$(C \pm \Delta C)$ cal/°C	100 ± 3	100 ± 3	250 ± 3	250 ± 3	250 ± 3	200 ± 3	200 ± 3
$(C_L \pm \Delta C_L)$ cal/°C	10 ± 4	10 ± 4	10 ± 4	10 ± 4	10 ± 4	14 ± 4	14 ± 4
$(V \pm 0,01)$ V	5,27	5,27	4,15	3,64	3,64	4,03	4,2
$(i \pm 0,01)$ A	0,43	0,43	0,32	0,28	0,28	0,32	0,34
$(a \pm \Delta a) \times 10^{-4}$ °C/s	58 ± 6	51 ± 2	16 ± 1	10,9 ± 0,5	8,3 ± 0,1	14,9 ± 0,1	17,0 ± 0,3
$(\alpha \pm \Delta\alpha)$ J/cal	3,6±0,4	4,0±0,3	3,2±0,4	3,6±0,4	4,7±0,5	4,1±0,5	3,9±0,5

Fonte: Elaborada pelos autores.

Note que o resultado obtido para o Exp.4 continua discrepante apesar do cálculo do desvio calculado, o que mostra que outras fontes de erro devem ser analisadas além daquelas que mencionamos anteriormente. Todos os outros resultados estão em excelente acordo com o valor fornecido pela literatura $\alpha = 4,186 \text{ J/cal}$.

Outra possibilidade que pode ser explorada em sala de aula com a nossa proposta é o cálculo do equivalente médio α_M e seu desvio padrão.

2.8. Energia Solar Fotovoltaica

Nesta seção apresentamos outros assuntos que podem ser abordados em sala de aula a partir de nosso experimento, como efeito fotovoltaico, semicondutores, suas características e propriedades.

2.8.1. Efeito Fotovoltaico

A capacidade de certos materiais produzirem energia elétrica a partir da incidência de luz é denominada de efeito fotovoltaico. Alguns materiais liberam elétrons quando são submetidos à incidência de luz. O conhecimento do efeito fotovoltaico remonta ao século XIX, quando em 1839 Becquerel demonstrou a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado em uma solução eletrolítica.

A radiação eletromagnética, como a luz visível proveniente do sol, é composta por fótons com energia E dada pela frequência f da radiação correspondente, multiplicada pela constante de Planck h , ou seja,

$$E = hf, \quad (15)$$

sendo a constante de Planck dada por $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J/s}$.

As células solares fotovoltaicas são constituídas de materiais semicondutores dopados com portadores de cargas elétricas que, ao absorverem a energia dos fótons incidentes e estando sujeitos a uma diferença de potencial elétrico, geram uma corrente elétrica.

O silício é um material semicondutor muito utilizado na construção de células solares ou fotovoltaicas para realização da conversão da energia solar em energia elétrica. O chamado efeito fotovoltaico que presenciamos neste tipo de material é proveniente da excitação dos elétrons do material quando expostos à luz solar ou outras formas apropriadas de energia. A

qualidade das células solares é determinada geralmente pela sua eficiência na conversão de energia.

Os semicondutores se caracterizam por apresentarem à temperatura ambiente, uma resistividade intermediária entre a dos metais e a dos isolantes. Os semicondutores podem ser denominados como intrínsecos e extrínsecos, devido a presença de átomos de outros elementos químicos, em sua composição, que são tratados como impurezas. Os materiais intrínsecos são aqueles que não apresentam impurezas em quantidades suficientes para alterar suas propriedades, de modo que a concentração dos portadores de carga do material, dados por elétrons ou a ausência deles (buracos ou lacunas), não é alterada.

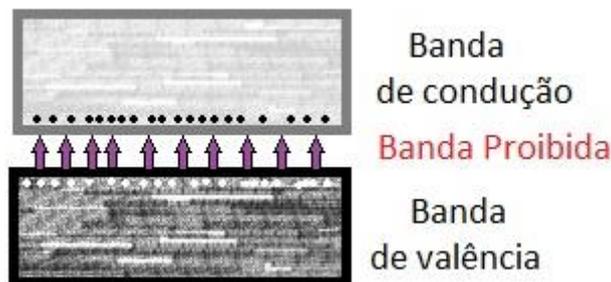
Para os semicondutores extrínsecos a concentração de portadores de cargas pode ser modificada através da adição de pequenas quantidades de outras substâncias, usualmente chamadas de dopantes. Os dopantes mais usados são normalmente pentavalentes, que são elementos com cinco elétrons em sua camada de valência, como arsênio, o fósforo e o antimônio, ou dopantes trivalentes, com três elétrons em sua camada de valência como o boro, o alumínio, o gálio e o índio. Se o silício for o material que forma a matriz do semicondutor, a dopagem do mesmo com elementos pentavalentes irá aumentar o número de elétrons livres no material, enquanto que a dopagem com elementos trivalentes irá aumentar o número de lacunas ou buracos no mesmo, uma vez que o silício é tetravalente.

Os elétrons livres são portadores de cargas negativas, possibilitando a circulação de uma corrente elétrica no material. Se os elétrons livres forem majoritários o material é chamado de semicondutor do tipo n enquanto que no caso das lacunas, que são ausências de elétrons e por isso são portadores de cargas positivas, o material é chamado de semicondutor do tipo p .

De acordo com o modelo de bandas de energia um par elétron-lacuna é gerado quando elétrons da banda de valência passam para a banda de condução através da absorção de energia por algum mecanismo, como a excitação térmica dos átomos. Este processo é ilustrado na figura 10. A banda proibida ilustrada na figura representa a quantidade mínima de energia (*gap*), dada por alguns elétrons-volt, que os elétrons precisam absorver para sair da banda de valência para a banda de condução.

A propriedade de condutividade elétrica dos semicondutores pode ser alterada pela variação da temperatura do material. Estes podem atingir condutividades semelhantes a dos metais. Se a condutividade de um semicondutor for proveniente de excitações térmicas, esta é denominada de condutividade intrínseca.

Figura 10 – Esquema de bandas de um semiconductor mostrando a formação de pares elétron-lacuna quando os elétrons, pontos pretos, passam da banda de valência para a banda de condução, ao absorver energia suficiente para transpor a barreira proibida. Neste processo os elétrons deixam lacunas na banda de valência, representadas pelos pontos brancos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A fotoexcitação é uma outra maneira de reforçar a condutividade elétrica do semiconductor. Se a energia fornecida por um fóton estiver na região do infravermelho, que corresponde ao intervalo de energia proibida (*gap*), tem-se a chamada fotocondução e os semicondutores são denominados de fotocondutores. Desta forma, a intensidade da luz incidente em um material semiconductor pode contribuir para o aumento da sua condutividade elétrica.

Para obtenção de corrente elétrica em células solares, que compõem uma placa solar fotovoltaica, é preciso produzir uma junção entre dois semicondutores, do tipo *p* e do tipo *n*. Esta é chamada de junção *pn*. Na prática a junção *pn* da célula fotovoltaica é produzida a partir de uma lâmina de silício cristalino previamente dopado em sua fabricação com elementos do tipo *p*. Os elementos do tipo *n* são introduzidos posteriormente na lâmina através de técnicas adequadas até que uma região do tipo *n* seja estabelecida, formando assim a junção tipo *pn* (PINHO, GALDINO, 2014).

Na junção *pn* os elétrons livres da região *n* passam para o lado *p* completando as lacunas. A migração dos elétrons da região *n* para a região *p* faz com que o material fique eletricamente polarizado, de modo que o campo elétrico formado neste processo impede que mais elétrons livres migrem para a região *p*. Dessa forma uma barreira é formada para os elétrons livres remanescentes, caracterizada por uma diferença de potencial. Quando a junção *pn* é exposta à incidência de luz, com fótons com energia maior que o *gap*, ocorre a geração de pares elétron-lacuna. Se estes forem gerados na região em que há a diferença de potencial, campo elétrico diferente de zero, haverá uma corrente através da junção produzida pela aceleração das cargas. Todo esse processo da origem ao efeito fotovoltaico. Conseqüentemente, se as duas extremidades da lâmina forem conectadas por um fio, observa-se uma corrente elétrica,

fornecendo a base de funcionamento de uma célula fotovoltaica. Maiores detalhes são fornecidos em https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321.

Em resumo, o efeito fotovoltaico consiste basicamente na diferença de potencial que é estabelecida na junção *pn*, produzindo uma corrente elétrica devido aos efeitos da fotocondução nos semicondutores.

A.2.8.2. Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

As células solares podem ser caracterizadas por duas curvas, a da corrente elétrica (*i*) em função da voltagem (*V*) no dispositivo e a curva de sua potência (*P*) em função da voltagem. A placa solar fotovoltaica utilizada neste trabalho possui especificações nominais de potência de 3 W, tensão máxima de 6 V, intensidade de corrente de curto circuito de 0,5 A e mede 145 mm de largura por 145 mm de comprimento.

O valor da resistência *R* utilizada no interior do calorímetro para obtenção do equivalente mecânico do calor através de medidas elétricas foi estimado utilizando os valores nominais da placa para a tensão e para a corrente, ou seja, $R = V/i = 6/0,5 = 12 \Omega$. Esses valores foram utilizados com o intuito de obtermos a potência máxima no resistor cerâmico para conseguirmos melhor eficiência na obtenção de energia térmica dissipada no calorímetro por efeito Joule. Além disso, essa estimativa é importante para que o valor escolhido da resistência utilizada esteja de acordo com as características técnicas da célula solar. Dependendo dos valores de resistência utilizados nenhuma corrente passará pelo resistor.

Nós verificamos isso utilizando diferentes valores para a resistência plotando as curvas características da placa utilizada no nosso experimento *i* x *V* e *P* x *V*. Os valores da potência foram obtidos pela relação $P = Vi$. Todos os dados estão dispostos na Tabela 6.

Os gráficos das curvas *i* x *V* e *P* x *V* são apresentados na figura 3.11(a) e (b), respectivamente.

Note pelo gráfico da figura 11(a) que a célula fotovoltaica não se comporta como uma fonte elétrica convencional, pois a tensão de saída depende de sua corrente elétrica. O gráfico da potência em função da corrente, apresentado em 11(b), é útil para determinar a potência útil da placa, dada pelo ponto máximo da curva, estando de acordo com as especificações técnicas da mesma, ou seja, aproximadamente 3 W. O professor pode também, a partir destes dados, explorar didaticamente a caracterização da célula solar junto com os alunos e determinar sua eficiência, definida pela potência útil fornecida pela célula dividido pela potência absorvida pela célula. Para isso é necessário obter a intensidade da radiação solar que atinge a área da

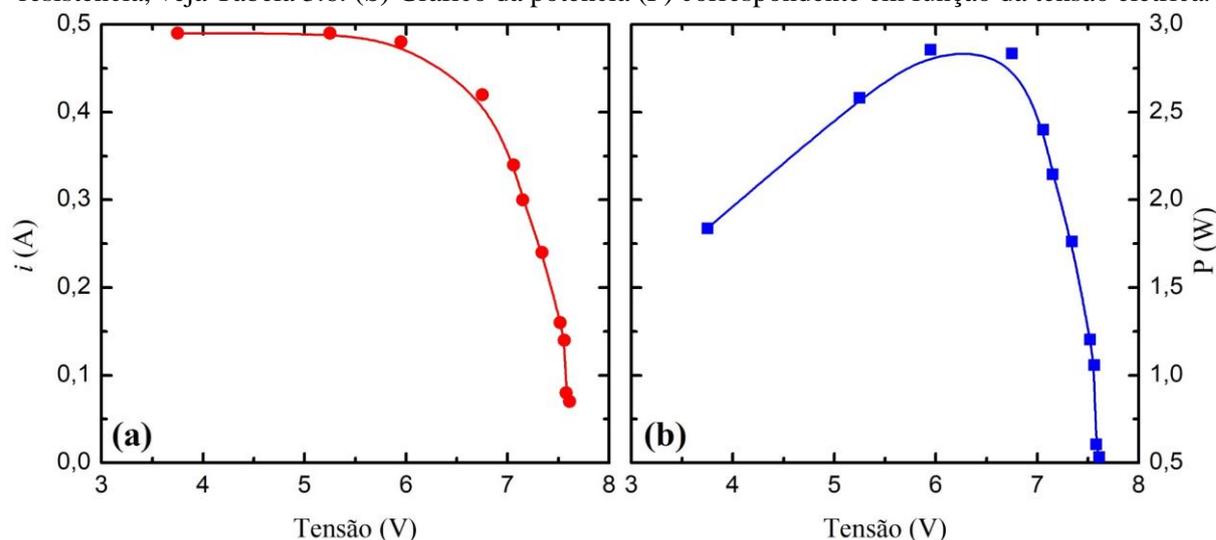
célula fotovoltaica (COSTA e CHERPINSKI, 2018). Como isto foge da proposta do nosso trabalho nós não realizamos tais cálculos.

Tabela 6 – Valores das resistências R dos resistores utilizados para obtenção das curvas características da célula fotovoltaica, sendo V , i o valores da tensão e da corrente medidos na célula, respectivamente, e P o valor da potência correspondente.

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
6,8	3,75	0,49	1,8375
10	5,25	0,49	2,5823
12	5,95	0,48	2,8560
15	6,75	0,42	2,8350
18	7,06	0,34	2,4004
22	7,15	0,30	2,1450
27	7,34	0,24	1,7616
30	7,52	0,16	1,2032
38	7,56	0,14	1,0584
68	7,58	0,08	0,6064
82	7,61	0,07	0,5327

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 11 – (a) Gráfico da intensidade de corrente elétrica i em função da tensão elétrica V característica da célula solar utilizada no nosso experimento, obtida para diferentes valores de resistência, veja Tabela 3.6. (b) Gráfico da potência (P) correspondente em função da tensão elétrica.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O gráfico apresentado na figura 11(a) mostra também que a corrente elétrica na placa decresce drasticamente quando utilizamos resistores com resistência maior que 15 Ω , pois estes produzem sobrecarga elétrica na célula e trabalham com valores de tensão superior ao valor nominal da mesma, que é de 6 V. Conseqüentemente, o mesmo é observado para a potência,

figura 11(b). Se caso o professor não tiver em mãos um resistor cerâmico com resistência de 12Ω , ele pode utilizar outras resistências, como de $6,8 \Omega$ e 10Ω . Com estas é possível obter também o aproveitamento máximo de corrente na célula com potências elétricas satisfatórias para a transferência de energia térmica do resistor para a água no calorímetro e obter uma curva de aquecimento adequada para fins didáticos em intervalos entre 5 e 10 minutos.

A seguir apresentamos uma sugestão de questionário que pode ser utilizado pelo professor após a realização das atividades.

2.9. Questionário Sugestivo

1. Descreva cada parte do experimento separadamente. Quais os fenômenos físicos envolvidos em cada parte? Agora faça a conexão entre as partes do dispositivo e descreva o experimento como um todo adotando a ordem que você achar melhor.
2. Qual a fonte de energia inicial do sistema, ou seja, qual a fonte de alimentação do dispositivo? A partir desta, descreva todas as transformações de energia envolvidas no experimento.
3. Descreva os aparelhos utilizados para realizar as medidas no nosso experimento. Qual a função de cada um?
4. Quais as grandezas físicas envolvidas no experimento?
5. Descreva com suas palavras: Por que estamos realizando este experimento?
6. Com este experimento você conseguiu entender melhor o assunto discutido em sala de aula? Descreva o que você entendeu e o que você ainda não entendeu.

3. Referências

COSTA, T. Q. e CHERPINSKI, U. S. Medição da eficiência de uma célula fotovoltaica: Uma proposta de baixo custo para fins didáticos. Física na Escola. v. 16, n. 2, p.73-77, 2018.

HEWITT, P. G. Física Conceitual. 9ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, H.M. Fluidos, Oscilações e Ondas: Curso de Física Básica 2. 4ª Edição. São Paulo: Edgar Blücher LTDA, 2002.

PINHO, J. P. GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: cepel/cresesb, 2014.