

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE MECÂNICO
DO CALOR ATRAVÉS DE MEDIDAS ELÉTRICAS**

MARCO ANTONIO DIAS JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA

Sorocaba - SP
Abril de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE MECÂNICO
DO CALOR ATRAVÉS DE MEDIDAS ELÉTRICAS**

MARCO ANTONIO DIAS JUNIOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

Sorocaba - SP
Abril de 2019

MARCO ANTONIO DIAS JUNIOR


**DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE MECÂNICO DO CALOR ATRAVÉS
DE MEDIDAS ELÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.

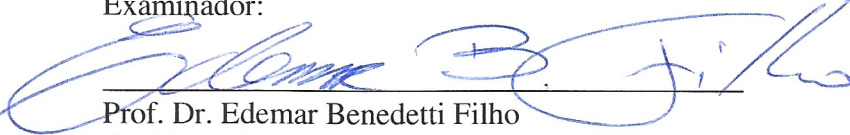
Sorocaba 25 de abril de 2019.

Orientador:



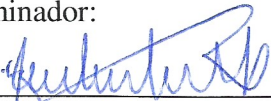
Prof. Dr. James Alves de Souza
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Edemar Benedetti Filho
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Marco Aurélio Euflauzino Maria
FACENS – Sorocaba

Sorocaba
Abril de 2019

Dias Junior, Marco Antonio

Determinação do Equivalente Mecânico do Calor através de Medidas Elétricas / Marco Antonio Dias Junior. -- 2019.

118 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: James Alves de Souza

Banca examinadora: Edegar Benediti Filho, Marco Aurélio Euflauzino

Maria

Bibliografia

1. Experimentação para o Ensino de Física. 2. Efeito Fotovoltaico. 3. Equivalente Mecânico do Calor. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

*Dedico essa dissertação a minha esposa Luciana, a minha mãe Eliete que sempre me incentivaram a concluir essa dissertação e colher os frutos desse trabalho.
Dedico essa dissertação a todos os professores que lutam pela melhoria do ensino nesse país.*

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu orientador James Alves de Souza pelo acolhimento como seu aluno, pelas suas sugestões e pela orientação dedicada ao desenvolvimento desse mestrado com a melhor qualidade possível, e pelo empenho como coordenador desse programa de pós-graduação.

Agradeço à minha família pelo incentivo aos estudos e por reconhecer a importância dessa dissertação no meu desenvolvimento profissional. Agradeço à UFSCar e aos professores que contribuíram efetivamente nas disciplinas ministradas.

Meus agradecimentos ao Professor Sérgio e Edegar pela contribuição na qualificação e pelas sugestões que ajudaram a melhorar esse trabalho.

Meus agradecimentos aos professores que compuseram a banca de defesa de mestrado, pela disponibilidade e presteza em avaliar e validar essa dissertação de mestrado.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação. Agradeço adicionalmente à CAPES pela bolsa de estudos.

“An experiment is a question which science poses to Nature, and a measurement is the recording of Nature's answer.”

Max Planck

RESUMO

DIAS JUNIOR, Marco Antonio. Determinação do Equivalente Mecânico do Calor através de Medidas Elétricas. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

A experimentação científica é uma atividade prática que pode ser utilizada em sala de aula para aumentar a motivação de alunos para aprendizagem de conceitos de física, podendo ser promissora também para a melhoria da relação entre professor e alunos. Esta pode ser utilizada como uma metodologia complementar das aulas teóricas de física no intuito de ser uma atividade facilitadora para o entendimento de conceitos físicos usualmente tratados de forma abstrata e matemática. A experimentação pode ser aplicada como uma atividade de demonstração, em que o professor é o mediador da atividade, ou uma atividade realizada pelos próprios alunos partindo da descrição de um determinado fenômeno que se deseja investigar. Neste trabalho construímos um experimento para a determinação do equivalente mecânico da caloria através de uma abordagem um pouco diferente do célebre experimento realizado por James Prescott Joule. Nosso objetivo foi, através do experimento, inserir novas tecnologias e equipamentos de monitoramento de propriedades físicas do sistema para obtenção do equivalente entre joules e calorias através de medidas de parâmetros elétricos, como tensão e corrente elétricas. Utilizando uma placa solar fotovoltaica como fonte de alimentação conectada a um resistor inserido em um calorímetro adiabático foi possível 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. Nossa proposta foi muito bem recebida em sala de aula, tendo um caráter motivador, integrador e promissor para o tratamento matemático dos fenômenos envolvidos através da propagação de erros, plotagem e ajuste da curva obtida experimentalmente e a modelagem do sistema. Nosso produto educacional consiste de um guia para a montagem do experimento e várias sugestões de conceitos que podem ser abordados durante a execução do experimento em uma linguagem simples e adequada para o professor de Física do nível médio de ensino.

Palavras-chave: Joule. Caloria. Leis da Termodinâmica. Efeito Fotovoltaico. Experimentação.

ABSTRACT

DIAS JUNIOR, Marco Antonio. Determination of the Mechanical Equivalent of Heat through Electrical Measurements. 2019. Master's Thesis (Master's degree in Physics Teaching) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

Scientific experimentation is a practical activity that can be widely used in the classroom to boost the motivation of students for learning Physics concepts. It can also be promising to improve the relationship between teacher and students. Experimentation can be used as a complementary methodology for the theoretical classes of Physics in order to facilitate the understanding of physical concepts usually treated in an abstract and mathematical way. Experimentation can be applied as a demonstration activity, in which the teacher is the mediator of the activity, or an activity performed by the students themselves, aiming the description of a investigated phenomenon. In this work we perform an experiment for the determination of the mechanical equivalent of the calorie through a different approach to the celebrated experiment carried out by James Prescott Joule. Our goal was to introduce new technologies and devices used to monitor the physical properties of the system for obtaining the equivalent between joules and calories through measurements of parameters such as electric voltage and current. Using a solar photovoltaic cell, as a power source, connected to a resistor inserted in an adiabatic calorimeter, we explore concepts such as heat and temperature and the difference between both, energy, analysis and processes of thermodynamic systems, the laws of thermodynamics and the Joule and photovoltaic effects. Our proposal was successfully received by the students, having a motivating and integrative character. It is also promising for the mathematical treatment of the phenomena described through propagation of errors, by plotting and fitting the curve obtained experimentally and the modeling of the system. Our educational product consists of a guide for assembling the experiment and several suggestions of physical concepts that can be approached during the execution of the experiment in a simple and adequate language for high school Physics teachers.

Keywords: Joule. Heat. Laws of Thermodynamics. Photovoltaic Effect. Experimentation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1 – 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..... 18
- Figura 3.2 – 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 aproximadamente constante. À direita temos a tampa do calorímetro com dois conectores borne soldados a um resistor cerâmico. 18
- Figura 3.3 – 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. 19
- Figura 3.4 – 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..... 20
- Figura 3.5 – 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..... 30
- Figura 3.6 – 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 34
- Figura 3.7 – 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 36
- Figura 3.8 – 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 °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 $T_E = 29,6$ °C..... 38
- Figura 3.9 – Curvas de aquecimento da água obtidas utilizando a fonte de tensão e a célula solar, Exp.6 e Exp.7, respectivamente. 39

- Figura 3.10 – Esquema de bandas de um semicondutor 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.....45
- Figura 3.11 – (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.47
- Figura 4.1 – A esquerda é mostrada a célula solar posicionada na janela para captação de energia solar em sala de aula e a direita o experimento preparado para demonstração...50

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Registro da temperatura T em função do tempo t para os experimentos 1 e 2.	33
TABELA 3.2 – Registro da temperatura T em função do tempo t para os experimentos 3 e 4.	35
TABELA 3.3 – Registro da temperatura T em função do tempo t para o experimento 5.....	38
TABELA 3.4 – 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 4,75 V. Adicionalmente a estes dados foi utilizado para o cálculo de α o calor específico da água $c = 1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	40
TABELA 3.5 – 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	42
TABELA 3.6 – Valores das resistências R dos resistores utilizados para obtenção das curvas características da célula fotovoltaica, sendo V e i os valores da tensão e da corrente elétricas medidos na célula, respectivamente, e P o valor da potência correspondente.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SI – *Sistema Internacional de Unidades*

MNPEF – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física*

PROFIS-So – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	6
2.1 A EXPERIMENTAÇÃO COMO MEDIADORA NA APRENDIZAGEM DE CONCEITOS FÍSICOS	6
2.1.1 O Conhecimento Científico	11
2.2 JUSTIFICATIVA	13
CAPÍTULO 3 - PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 A EXPERIMENTAÇÃO EM SALA DE AULA	15
3.2 MONTAGEM DO PRODUTO EDUCACIONAL	17
3.3 CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER ABORDADOS DURANTE A EXPERIMENTAÇÃO	20
3.3.1 Calorimetria	20
3.3.1.1 Determinação da Capacidade Térmica do Calorímetro Utilizado	24
3.3.2 Explorando as Leis da Termodinâmica	25
3.3.3 Efeito Joule	30
3.3.4 Determinação do Equivalente Mecânico da Caloria através de Medidas Elétricas	31
3.3.4.1 Realização do Experimento e Determinação de α	33
3.3.4.2 Cálculo do Desvio de α	40
3.3.5 Energia Solar Fotovoltaica	43
3.3.5.1 Efeito Fotovoltaico	43
3.3.5.2 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas	46
CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO	48
4.1 ATIVIDADE 1: DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL	49
4.2 ATIVIDADE 2: QUESTIONÁRIO COM PERGUNTAS RELACIONADAS À APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	51

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL.....	62
APÊNDICE B – RESPOSTAS DOS ALUNOS AO QUESTIONÁRIO APLICADO	97

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O ensino de física requer um constante uso de ideias abstratas que tratam de assuntos relacionados ao cotidiano, mas que acabam sendo limitados a exemplos descritivos e enunciados de exercícios. A atividade prática é por muitas vezes esquecida e não faz parte do cotidiano escolar. Esta pode ser um importante complemento para auxiliar o professor na abordagem de conceitos e verificação de fenômenos físicos.

Ao introduzir uma discussão sobre o que devemos entender como física básica, Richard P. Feynman discute sobre como pensamos a forma que organizamos conceitos científicos para compreendermos a natureza das coisas como a vemos na atualidade.

Poucas centenas de anos atrás, foi concebido um método para encontrar respostas parciais a tais questões. Observação, razão e experiência constituem o que denominamos método científico. Teremos de nos limitar a uma simples descrição de nossa visão básica do que às vezes se denomina física fundamental, ou ideias fundamentais surgidas da aplicação do método científico (FEYNMAN, 2009, p.62).

A experimentação científica na escola encaminha-nos a necessidade de o aluno ser mais atuante perante à sua própria aprendizagem, realizar questionamentos que são despertados pela dúvida ao buscar o entendimento de um fenômeno físico. Quando o aluno se encontra passivamente reproduzindo e seguindo o conteúdo transmitido nas aulas teóricas, simplesmente tendo como atividade principal resolver exercícios matemáticos, percebe-se uma desmotivação e um aumento na dificuldade de compreensão da ciência e principalmente da física.

Devido à relevância da construção de aparatos científicos e experimentos no estudo de fenômenos eletromagnéticos, como a corrente elétrica, procuramos exemplificar o quanto foi importante a experimentação nos estudos que procuravam explicar e qualificar os fenômenos eletromagnéticos. “Podemos destacar a descoberta suprema da indução das correntes elétricas”

como descreve James C. Maxwell sobre o trabalho científico e a competência na explicação de um fenômeno de ordem eletromagnética:

Em dezembro de 1824, Faraday havia tentado obter uma corrente elétrica por meio de um ímã. Em três ocasiões, fizera tentativas complexas mas infrutíferas de produzir uma corrente num fio por meio de corrente em outro fio, ou por meio de um ímã. Mesmo assim perseverou. Em 29 de agosto de 1831, obteve a primeira prova de uma corrente elétrica que poderia induzir outra num circuito diferente (FARADAY, 2003, p.01).

Ao descrever as descobertas de Faraday, Maxwell enfatizou a importância desse trabalho da seguinte forma: “Mediante um esforço mental intenso, em menos de três meses, a contar de sua elaboração original, Faraday havia levado a nova ideia a um estado de perfeita maturidade” (FARADAY, 2003, p.13).

As unidades das grandezas físicas são usualmente atribuídas aos cientistas que obtiveram êxito na explicação de um fenômeno físico e com a construção de aparatos experimentais, bem como um árduo esforço, que envolve repetição e observação contínua sobre determinada questão relevante em sua época. Desta forma, puderam chegar a resultados experimentais e conclusões, que acabaram atribuindo sentido e qualidades lógicas a determinados fenômenos físicos.

No período da revolução industrial com a crescente demanda por desenvolvimento de máquinas operatrizes que fossem capazes de realizar trabalho mecânico através do processo de conversão de energia térmica, Joule se empenhou em determinar uma relação de conversão entre energia mecânica e calor e, por isso acabou se destacando como um cientista experimental.

É interessante destacarmos que o custo de produção de energia é um fator relevante quando tratamos de máquinas térmicas, as quais operam através de processos de transformação de energia. No século XIX, uma questão importante foi a determinação de fatores de conversão, como o equivalente mecânico do calor. Quando falamos em equivalência entre unidades de medidas apresentamos um coeficiente de conversão, mas no caso do equivalente mecânico do calor, estamos indo além disso, pois estamos analisando um estudo que foi determinante para o desenvolvimento da lei de conservação de energia.

A máquina a Vapor de James Watt, desenvolvida na segunda metade do século XVIII, era uma demonstração prática de que o calor leva à capacidade de produzir trabalho. Entretanto, a conexão entre calor e energia só foi estabelecida no século XIX. Joule ficou imortalizado pela determinação do equivalente mecânico do calor. O reconhecimento pelos seus esforços

experimentais levou a comunidade científica a atribuir seu nome à unidade de medida de energia.

As publicações de Joule mostram um conjunto de estudos com forte embasamento experimental que certamente pesaram para que o seu nome ficasse mais fortemente associado à determinação do equivalente mecânico do calor, além é claro, de ter tido o privilégio de ter suas ideias defendidas por William Thomson (lorde Kelvin), um dos mais respeitados cientistas da época (PASSOS, 2009, p.5).

Em nosso dia a dia, existem situações e atividades que podem ser exploradas para fazer com que as pessoas dominem corretamente o conceito de calor e temperatura, como ao expressar suas sensações térmicas quanto ao clima, por exemplo. Isso também é verificado quando se trata de propriedades e fenômenos elétricos, como tensão e corrente elétricas, cujas especificações são encontradas facilmente nas normas técnicas dos eletrodomésticos, e que são informações habituais e relevantes para o bom funcionamento e integridade desses aparelhos. Entretanto, o significado físico de processos de transmissão de energia como calor e trabalho e grandezas físicas como temperatura, tensão e corrente elétricas acabam sendo substituídos por expressões comuns da linguagem informal. A eletricidade e o conforto térmico são indispensáveis em nosso modo de vida, tornando assim, esses conhecimentos cientificamente relevantes.

Por muitas vezes, as pessoas confundem unidades de medidas elétricas como ampère (A), volts (V) ou watts (W), quando é necessário reconhecer os detalhes técnicos de um ar-condicionado, por exemplo, para poderem realizar a manutenção neste tipo de aparelho elétrico. Outro engano que ocorre muito frequentemente é uso inadequado da palavra calor quando as pessoas querem se referir à temperatura ou energia de um corpo.

Uma breve discussão sobre a evolução do conceito de calor permite esclarecer um pouco as razões dos entendimentos confusos ao seu respeito. Atualmente o termo científico calor é herdeiro do termo calor da teoria calórica, na qual o calor não pode ser criado nem destruído (SILVA e LABÚRU, et al, 2008).

Segundo Paulo Freire, o pensar certo que supera o ingênuo tem que ser produzido pelo próprio aprendiz em comunhão com o professor formador. Para tanto, a observação de uma experiência científica deve estimular tanto a reflexão, quanto a importância do processo de transformação do conhecimento em produtos tecnológicos e suas contribuições para melhoria da qualidade de vida da sociedade.

O que me interessa agora, repito, é alinhar e discutir alguns saberes fundamentais à prática educativo-crítica ou progressista e que, por isso mesmo, devem ser conteúdos obrigatórios à organização programática da formação docente. Conteúdos cuja compreensão, tão clara e tão lúcida quanto possível, deve ser elaborada na prática formadora. É preciso, sobretudo, e aí já vai um destes saberes indispensáveis, que o formando, desde o princípio mesmo de sua experiência formadora, assumindo-se como sujeito também da produção do saber, se convença definitivamente de que ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou a sua construção (FREIRE, 1996, p.12).

Ao consultarmos os Parâmetros Curriculares Nacionais, (PCN+, Brasil, 2002), verificamos que há competências relacionadas principalmente com a investigação e compreensão dos fenômenos físicos, enquanto há outras que dizem respeito à utilização da linguagem física e de sua comunicação, ou, finalmente, que tenham a ver com sua contextualização histórica e social.

Ainda pensando nas competências de investigação e compreensão os PCN+ (2002) destacam que para a física é necessário reconhecer a natureza dos fenômenos envolvidos em situações ou problemas concretos, situando-os dentro do conjunto de fenômenos da Física e identificar as grandezas relevantes em cada caso. Assim, diante de fenômeno térmicos e elétricos é necessário identificar fontes, processos envolvidos e seus efeitos, reconhecendo variações de temperatura ou de propriedades elétricas, como corrente e tensão, como indicadores relevantes.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A maior dificuldade encontrada no ensino de física, enquanto professor de escola Estadual na cidade de Campinas, é a falta de interesse dos alunos e como conseguir fazer com que os alunos se motivem a aprender física. Um dos fatores que podem contribuir para este cenário é a falta de compreensão adequada dos fenômenos físicos apresentados através de aulas expositivas. Isso nos motivou a elaborar uma atividade experimental para introduzir conceitos de Termodinâmica e o equivalente mecânico da caloria através de medidas elétricas como tensão e corrente elétricas.

No experimento construído exploramos a transformação da radiação térmica do sol em energia elétrica para obtenção de calor através da potência dissipada em um resistor, por efeito

Joule, no interior de um calorímetro. Para isso, utilizamos como fonte de energia uma placa solar fotovoltaica conectada ao resistor no interior do calorímetro. Este foi construído com uma latinha de refrigerante envolta por isopor. O sistema foi monitorado por um medidor elétrico que fornece simultaneamente medidas de tensão e corrente no resistor e um termômetro digital para obtenção da variação de temperatura no interior do calorímetro. A partir disso desenvolvemos uma atividade educacional organizada e sistematizada para utilizar o experimento de forma demonstrativa para complementar as aulas teóricas e também para inserção de novas tecnologias no ensino médio para discussão de questões importantes como novas fontes de energia e energia limpa.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

2.1 A EXPERIMENTAÇÃO COMO MEDIADORA NA APRENDIZAGEM DE CONCEITOS FÍSICOS

Nossa metodologia de trabalho e nossos objetivos foram pensados para superar as dificuldades encontradas pelos alunos quanto a aprendizagem de conceitos físicos, sendo essas dificuldades muitas vezes recorrentes durante as aulas de física.

Para melhorar a prática do ensino de física é preciso durante as aulas, incentivar discussões bem contextualizadas com os alunos quanto a relevância dos conteúdos científicos apresentados para as suas vidas. Atividades experimentais quando realizadas em sala de aula podem contribuir para uma melhoria deste cenário, pois neste tipo de atividade possibilita-se que os alunos tenham um papel mais ativo na assimilação do conhecimento. Desta forma, pretendemos estimular a obtenção de uma aprendizagem mais significativa, que proporcione o desenvolvimento de habilidades e competências relacionadas a física.

Propor situações que explorem os fenômenos naturais através de práticas investigativas, mostrando a importância do que está sendo trabalhado na vida cotidiana dos alunos, pode ser uma forma interessante de começar a superar o pragmatismo e os dogmas impostos pelo método tradicional de aprendizagem mecânica (ARAUJO e ABIB, 2003; MOREIRA, 2010).

Azevedo *et al.* (2009) faz um levantamento sobre o uso de experimentos no ensino de Física. Eles analisam as tendências sobre as metodologias empregadas em artigos publicados nas principais revistas em ensino de ciências no Brasil e verificam que a maior concentração de

trabalhos em física experimental está nas revistas *Caderno Brasileiro de Física*, a *Revista Brasileira de Física* e seu suplemento *A Física na Escola*. Um levantamento semelhante foi realizado por Carlos *et al.* (2009) sobre o uso de atividades experimentais de física em artigos publicados nas atas do Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (Enpec), desde a sua primeira edição em 1997 até a sexta, realizada em 2007.

Em ambos os trabalhos, os autores analisaram os artigos a partir de categorias que separavam o uso de experimentos em: demonstrativos com aparatos de montagem simples, experimentos quantitativos com aparatos de montagem simples e sofisticados, experimentos problematizadores, experimentos realizados a partir de reconstruções históricas e experimentos para portadores de necessidades especiais (AZEVEDO, 2009; CARLOS, 2009).

Com relação aos periódicos brasileiros, os autores verificaram uma tendência no uso de experimentos demonstrativos, com objetivo apenas de verificação e demonstração de teorias científicas e fenômenos e uma outra tendência em que é priorizado o tratamento quantitativo durante a realização das atividades experimentais (AZEVEDO, 2009). Já os autores que analisaram os trabalhos publicados no Enpec verificaram que as propostas de atividades experimentais no ensino de Física estão evoluindo de uma postura mais tradicional e estruturada, em que o experimento é usualmente utilizado para verificação de leis e fenômenos, para uma proposta mais aberta, em que são priorizados métodos de problematização e investigação (CARLOS, 2009).

A tendência atual de utilização de experimentos nas aulas de Física está mais consonante com o processo de problematização e investigação dos fenômenos estudados, em que os experimentos são usualmente utilizados para complementar o tratamento teórico do assunto.

Nosso trabalho segue exatamente esta postura. Após explorar teoricamente conceitos como calor, transformações de energia, temperatura, tensão e corrente elétricas, entre outros, nós exploramos o efeito Joule para obtenção do equivalente mecânico do calor através de medidas elétricas de uma forma investigativa para que os conceitos tratados teoricamente pudessem ser explorados na prática.

Optamos por uma abordagem experimental um pouco diferente daquela descrita nos livros didáticos para obtenção do análogo, para podermos explorar fenômenos elétricos e poder introduzir novas tecnologias, como a placa fotovoltaica, e discutir formas limpas de energia, como a solar. Vale lembrar que Joule também utilizou o calor dissipado por uma resistência elétrica para obtenção do análogo da caloria (Joule, 1843). Passos (2009) fornece maiores detalhes sobre os aspectos históricos sobre os resultados obtidos por Joule em seus experimentos para obtenção do equivalente mecânico do calor.

A fim de explorar historicamente o experimento desenvolvido por Joule para a determinação do equivalente mecânico do calor, Souza *et al.*(2014) construíram um aparato similar ao utilizado por Joule. Apesar de tentarem reproduzir o experimento original trabalhando os mesmos princípios físicos para ressaltar a sua complexidade, os autores utilizaram materiais e dispositivos atuais. O aparato original de Joule era constituído de um recipiente de cobre, com pás acionados pela queda de pesos. Devido à altura de 2 metros necessária para a queda dos pesos, os autores acharam mais conveniente utilizar um motor elétrico para acionar as mesmas. O movimento das pás agita a água no interior do calorímetro e, através de um termômetro, a variação da temperatura da água pode ser aferida.

Segundo os autores o objetivo deste trabalho não foi somente obter o equivalente mecânico do calor, mas também analisar todas as variáveis envolvidas antes e depois da realização do experimento. Para tanto, os dados obtidos possibilitaram a discussão sobre a validade e precisão em relação principalmente, aos dados obtidos por Joule no século XIX. Para os autores, o importante é a validade da investigação do ponto de vista epistemológico e metodológico ao realizar a reprodução do experimento, pois esse processo pode permitir que hipóteses sejam levantadas para a solução de problemas encontrados tanto na montagem experimental, quanto na análise dos dados obtidos, retomando a complexidade do conhecimento científico e o papel dos experimentos.

Quando nos questionamos sobre a utilização de aparatos científicos e história da ciência para o ensino de física, podemos considerar a reconstrução de experimentos históricos como uma ferramenta de trabalho no ambiente escolar. “O fundador do início do século XX de um influente programa didático e experimental de física, Robert Pohl, de Göttingen, leu e refez experimentos originais de pesquisa e envolveu os alunos no desenvolvimento deles em aparatos adequados à sua missão educacional” (HERING e WITTJE, 2011).

Pensando no papel das atividades práticas sobre o ensino de ciências, Borges (2002) revê como o laboratório de ciências tem sido usado e qual a natureza do conhecimento que suportam esses usos e os equívocos que podem ser conduzidos. Ele ressalta que os estudantes deveriam conhecer alguns dos principais produtos da ciência e suas implicações para o desenvolvimento de novos conhecimentos para compreenderem os métodos usados pelos cientistas e como a ciência é capaz de transformar o mundo.

Ao convidarmos os alunos a participar ativamente das aulas, esperamos que eles opinem e apresentem o seu conhecimento sobre determinado assunto. Porém, muitas vezes esse conhecimento é de senso comum e não apresentam características conceituais adequadas a uma explicação científica.

Podemos organizar o laboratório de diversas maneiras e utilizarmos demonstrações até atividades prático-experimentais dirigidas diretamente pelo professor ou indiretamente. A utilidade de cada uma delas vai depender dos objetivos pretendidos pelo professor (BORGES, 2002, p.).

As atividades experimentais não são realizadas usualmente em sala de aula porque os professores, geralmente, alegam que não há oportunidade, disponibilidade ou tempo viável para o seu desenvolvimento. Eles também acreditam que essas atividades não cumprem com os conteúdos curriculares obrigatórios das escolas. O que ocorre na realidade é que os docentes, por muitos motivos em geral, desconhecem as reais possibilidades de abordagem das atividades experimentais para o ensino de ciências. Apesar de terem interesse em desenvolver essa atividade com os alunos, eles as utilizam algumas vezes com a finalidade equivocada. (OLIVEIRA, 2010).

Ao introduzir atividades experimentais no ensino, além do caráter motivador, espera-se explorar os modelos científicos, as relações entre a teoria e a comprovação experimental. Como Giordan (1999) ressalta, essas relações podem contribuir para abrir discussões sobre “o papel da experimentação na elaboração do pensamento científico, elevando-a à categoria de processo de natureza social, técnica e cognitiva.”

Diferentes abordagens podem ser conduzidas e exploradas utilizando um experimento. Sère (2003) destaca que estes diferentes enfoques de um experimento podem resultar em diferentes atividades para os alunos. Ao descrever uma experimentação Sère diz que é preciso considerar três polos: o referencial empírico; os conceitos, as leis e teorias; e as diferentes linguagens e simbolismos utilizados na Física. Isso significa que ao realizarmos uma experimentação em sala de aula, podemos atribuir diferentes papéis para ela, seja esta realizada de forma demonstrativa durante o desenvolvimento teórico dos conceitos, ou em aulas práticas, realizadas em laboratório.

A validação da metodologia e dos resultados experimentais pode ser discutida através das técnicas, instrumentos e procedimentos utilizados durante a experimentação.

Para que os alunos se tornem realmente experimentadores, sejam ativos durante a experimentação e construam seu saber ativamente, é preciso propor objetivos conceituais e procedurais (SÈRE, 2008, p.41).

A ciência não se desenvolveu de forma categórica e estruturada como a conhecemos nos livros didáticos, ela foi proposta a partir de hipóteses e teorias, e a experimentação passou a ser um método de comprovação de ideias e proposições. Portanto, é preciso fomentar a discussão

das proposições científicas e as práticas históricas utilizadas para a construção do conhecimento científico.

O processo de objetivação do conhecimento, por ser uma necessidade social, deve ser um eixo central da prática educativa e aqui a experimentação desempenha um papel de fórum para o desenvolvimento dessa prática (GIORDAN, 1999, p.46).

A própria formação docente pressupõe a utilização de atividades experimentais, quando se propõem para estudantes experientes e futuros professores, que realizem atividades experimentais e na sequência verifiquem as possibilidades de discussão e diálogos que originam justificativas aos fenômenos observáveis e principalmente o processo de construção de argumentos, no contexto da socialização em pequenos grupos.

Em relação aos aspectos apontados, pensamos que as atividades experimentais precisam proporcionar a discussão das teorias do grupo como modo de favorecer a construção de argumentos mais enriquecidos (GALIAZZI e GONÇALVES, 2004, p.329).

Ao questionarmos estudantes em relação ao que aprenderam os envolvemos com a necessidade de refletir e pensar sobre a validade do conhecimento científico adquirido. Nesse processo é necessário buscar o reconhecimento de valores lógicos para a construção de respostas cientificamente adequadas através da argumentação.

No processo de enculturação científica, as atividades que proporcionam interações e argumentações entre os alunos devem ser encorajadas, pois estas propiciam que os alunos levantem e discutam suas hipóteses. Neste contexto, a resolução de problemas experimentais, se bem conduzidos, cumpre bem este papel (BIASOTO e CARVALHO, 2007).

Ao introduzirmos as atividades experimentais nos planos de ensino ou diretamente durante as aulas, procura-se uma ampliação nas possibilidades de apresentação dos fenômenos físicos e um maior engajamento dos estudantes em atividades como pensar, solucionar e questionar as teorias e fenômenos físicos presentes no seu dia a dia. Dessa forma, espera-se que os alunos reconheçam a importância da física no desenvolvimento de dispositivos tecnológicos da sociedade contemporânea, dos quais nos beneficiamos.

A análise do papel das atividades experimentais desenvolvida amplamente nas últimas décadas revela que há uma variedade significativa de possibilidades e tendências de uso dessa estratégia de ensino de Física, de modo que essas atividades podem ser concebidas desde situações que focalizam a mera verificação de leis e teorias, até situações que privilegiam as condições para os alunos refletirem e reverem suas ideias a respeito dos fenômenos e conceitos abordados, podendo assim atingir um nível de aprendizado que lhes permita efetuar uma reestruturação de seus modelos explicativos dos fenômenos (ARAÚJO e ABIB, 2003, p.177).

Ao procurarmos explicar os fenômenos e a tecnologia que permeiam nosso cotidiano estamos instigando os alunos a observarem ao seu redor e serem capazes tanto de explicar quanto de compreenderem a ciência contida nos meios de produção e nos serviços básicos que usufruímos em nossos domicílios como: energia elétrica, água tratada e telecomunicações. Por sua vez, os trabalhos que envolvem situações do cotidiano tendem a favorecer o aprendizado de conceitos novos na medida em que enfocam uma realidade vivida pelos estudantes e que são normalmente caracterizadas por situações nas quais os estudantes criam suas próprias concepções acerca de diversos fenômenos (ARAÚJO e ABIB, 2003, p.190).

2.1.1 O Conhecimento Científico

A ciência é uma atividade humana através da qual problemas e questões que lidam com fenômenos naturais podem ser identificados e definidos, e soluções para estes podem ser propostas e testadas. Neste processo, dados são coletados e analisados e o conhecimento disponível é utilizado para explicar os resultados. Através desta atividade, mais conhecimento é adquirido para entendermos os fenômenos à nossa volta. Adicionalmente, o conhecimento também é aplicado podendo trazer mudanças consideráveis para a sociedade e cultura, tendo um impacto direto na nossa qualidade de vida.

Dessa forma, não podemos deixar de considerar o processo de construção do conhecimento científico no ensino de Física.

A produção do conhecimento humano se caracteriza por uma permanente interação entre pensar, sentir e fazer. Qualquer tipo de conhecimento produzido pelo homem é fruto desta interação. O ser humano é um ser que se caracteriza por pensar, sentir e fazer (MOREIRA e OSTERMANN, 1993, p.116).

Conforme nos exemplificam Moreira e Ostermann (1993), pensar seria o domínio conceitual da pesquisa, o fazer relacionamos ao domínio metodológico da investigação e o sentir é inerente a qualquer pessoa que pode cometer erros e atingir acertos. Então, não devemos considerar o ensino do método científico, mas sim ensinar procedimentos para a produção científica, sendo estes produzidos a partir da capacidade intelectual dos homens.

Segundo a Associação Americana dos Professores de Física (<http://www.aapt.org/Resources/policy/goaloflabs.cfm>), existem 5 critérios (objetivos) a serem considerados nos laboratórios de ensino básico:

1. A arte da experimentação que considera que os estudantes pratiquem experimentos com situações significantes com verificações conceituais;
2. Habilidades de análise e execução dos experimentos de modo a permitir que o estudante desenvolva o domínio de uma ampla capacidade de utilização de ferramentas básicas da física experimental e para análise de dados;
3. Aprendizagem de conceitos através das atividades experimentais;
4. Compreensão dos conhecimentos básicos em física diferenciando a função da observação direta de fenômenos e distinguindo entre as diferenças de fazer inferências baseadas na teoria e os resultados experimentais;
5. Desenvolvimento de habilidades para aprendizagem colaborativa, com o objetivo de obter sucesso nos empreendimentos ao longo da vida.

Em geral, os 5 critérios apresentados acima perfazem uma coletânea de situações e objetivos que as atividades experimentais proporcionam quando estão relacionados às teorias de aprendizagem construtivistas e pretendem fortalecer o desenvolvimento de habilidades específicas do conhecimento científico.

Quando se propõe a experimentação como meio e linguagem de comprovação de teorias e modelos científicos, surge o conflito da dificuldade habitual dos alunos com a matemática. Como enfatiza Pietrocola:

Ensino Médio, este problema assume contornos muito específicos, devido ao caráter não profissionalizante do ensino. Na perspectiva de uma educação geral e formativa do cidadão, os compromissos do ensino não se vinculam apenas com as necessidades intrínsecas da atividade profissional do físico ou do cientista. O ensino das ciências no Ensino Médio não pode e não deve ser visto como um estágio anterior a uma formação científica profissional (PIETROCOLA, 2000, p.91).

O ensino de física não pode ser simplesmente baseado na formulação matemática e na resolução de problemas e exercícios teóricos com objetivo de memorização. O desenvolvimento conceitual e a compreensão da matemática envolvidas na explicação são importantes para a aprendizagem científica. Deste modo, Pietrocola (2002) esclarece e questiona que: “O pedágio anteriormente citado torna-se fardo insuportável para os alunos do Ensino Médio, pois implica em pedir aos mesmos que se submetam ao ensino de algo sem justificativas a priori.”

A experimentação pode contribuir para melhor esclarecermos os conteúdos de física e sua relação com a matemática e também elencar, através de fatos históricos, a contribuição dos célebres cientistas no desenvolvimento da ciência e da sociedade.

2.2 JUSTIFICATIVA

O experimento que utilizamos em nossa proposta possui uma importância histórica muito grande, tanto para a consolidação da Primeira Lei da Termodinâmica que trata do princípio de conservação e transformação de energia, quanto para o desenvolvimento experimental da ciência.

James Prescott Joule (1818 – 1889) caracterizou-se por ter realizado várias contribuições importantes para a termodinâmica, a principal delas um minucioso e perseverante trabalho experimental para determinar o equivalente mecânico do calor onde, ao longo de 35 anos, aperfeiçoou métodos experimentais a fim de conseguir crescente precisão, como se observa em seus sucessivos trabalhos (PASSOS, 2009, p.4).

Pensar o ensino e propor atividades que levem em conta os conteúdos conceituais, procedimentais e atitudinais é tentar fazer com que o objetivo do ensino seja a formação cidadã dos alunos, para que eles estejam preparados para os desafios da vida e possam contribuir para um melhor bem-estar social. Analisando do ponto de vista científico, necessitamos formar alunos mais capazes e preparados para ingressar em carreiras que tem como base as ciências exatas e possam contribuir para sairmos do papel de economia periférica. É necessário formar engenheiros, cientistas, arquitetos, matemáticos, físicos e químicos para nos tornarmos um país com um desenvolvimento autossustentado e possibilitarmos, enquanto professores da rede pública de ensino, que jovens de classes mais baixas tenham acesso a essas carreiras profissionais.

A utilização da experimentação científica como atividade demonstrativa e quantitativa pode favorecer a aprendizagem de conceitos físicos que foram inseridos durante o desenvolvimento de conteúdos teóricos específicos (GIORDAN, 1999; SERÈ, 2003). Isso pode auxiliar o professor a estimular os alunos constantemente fazendo com que eles exponham suas opiniões e discutam entre si as situações e questões colocadas em sala de aula (GALIAZI e GONÇALVES, 2004). Para o desenvolvimento do conteúdo conceitual é necessário seguir métodos de resolução de problemas experimentais e, no nosso caso, de uma fundamentação matemática (BIASOTO e CARVALHO, 2010). Lembrando que é sempre importante identificar o que alunos trazem de conhecimento prévio consigo, em relação à conceitos físicos, para utilizarmos como referência no desenvolvimento dos assuntos abordados e que possam ser transformados em conhecimentos científicos.

A atividade experimental demonstrativa com caráter interpretativo pode ser facilitada com a utilização de instrumentos de fácil acesso como o calorímetro e o termômetro durante as aulas expositivas. Segundo Gaspar (2005) é possível utilizar um único instrumento para toda a turma na sala. Isso pode ser intercalado em meio as aulas teóricas através de uma abordagem conceitual que motive e desperte o interesse dos participantes.

Ao definir os temas a serem trabalhados sempre buscamos desenvolver a formulação de hipóteses para que os alunos sejam capazes de comunicar, expressar e interpretar a ciência com clareza e domínio dos conceitos básicos (ZABALA, 1998). Através de atividades procedimentais, aprender a fazer, observamos o comportamento dos alunos perante aos novos conhecimentos apresentados e o interesse deles em participar das atividades. Para tanto foi necessário levar em consideração, durante as atividades desenvolvidas, não somente o quão participativo eles foram durante as aulas, mas também como foi o desenvolvimento de suas ações durante a interpretação dos problemas e a sua capacidade de reproduzir e desenvolver o conhecimento adquirido durante o processo de ensino e de aprendizagem.

A sequência de conteúdos descrita nesta dissertação tem por objetivo produzir conflitos cognitivos através de diferentes abordagens e atividades para que os alunos sejam ativos durante as aulas, abandonem a passividade de copiar/reproduzir e sejam motivados a pensar e refletir criticamente quanto ao conhecimento que foi exposto e discutido durante as aulas. Espera-se que os alunos aprendam significativamente o que está sendo ministrado para uma melhor enculturação científica dos produtos tecnológicos e possam vir a dominar a produção do conhecimento de tecnologias como futuros profissionais de engenharias e ciências exatas (MOREIRA e OSTERMANN, 1993), reconhecendo a ciência como um bem comum à sociedade e o produto do trabalho científico.

Capítulo 3

PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 A EXPERIMENTAÇÃO EM SALA DE AULA

Ao concluir um determinado conteúdo de física na escola, quando provas e avaliações são aplicadas para verificar o rendimento dos alunos, é comum perceber a falta de compreensão quanto aos conceitos físicos estudados e erros conceituais que julgamos ser importantes para a aprendizagem da física de nível médio. Vemos na experimentação científica uma opção de atividade para melhorar esse cenário, auxiliando na aprendizagem dos conceitos físicos trabalhados neste nível de ensino (BIASOTO e CARVALHO, 2007).

Nós visamos proporcionar aos alunos a observação dos fenômenos e caracterizá-los através da medição das grandezas física envolvidas. Tudo foi realizado com a justificativa de podermos melhorar a compreensão dos alunos com relação aos conteúdos teóricos desenvolvidos, estimular a curiosidade e a motivação deles para que pudessem fazer uma reflexão crítica sobre o que foi observado (GALIAZZI e GONÇALVES, 2004).

Quando buscamos exemplificar e qualificar nossas aulas, apresentamos os conceitos, equações, leis e princípios que foram sendo definidos e explicados pelos cientistas ao longo dos séculos e períodos históricos de desenvolvimento da sociedade (SERÈ, 2008). A aula organizada em tópicos e apresentada de forma sistematizada, atende à demanda educacional moderna de massificação da educação e universalização do ensino. Porém, é insuficiente a

demanda educacional contemporânea onde os alunos precisam ser mantidos interessados e motivados com sua própria aprendizagem (GIORDAN,1999).

A experimentação científica pode ser, de maneira geral, uma atividade integrada às aulas de física e não apenas utilizada separadamente como aulas experimentais que tem como objetivo reproduzir experimentos para aprender os métodos científicos e instrucionais, para análise de dados e medidas experimentais. Ao demonstrar um experimento bem elaborado são apresentadas informações científicas que são estruturadas com diversos conteúdos específicos que se completam e compõem um conhecimento mais amplo relacionando diversas grandezas e conceitos físicos comuns a uma das áreas da física.

Ao desenvolver um experimento didático o professor necessita planejar o assunto a ser discutido e torná-lo aplicável, ou seja, verificar as grandezas físicas mensuráveis e refletir sobre os materiais e equipamentos que podem ser utilizados para o desenvolvimento das atividades instrucionais, sejam elas demonstrativas ou de verificação. A montagem de um aparato experimental requer uma organização prévia de conteúdos disciplinares e requer um esforço na sua construção e operacionalização para fins educacionais.

Com a ideia inicial de utilização de energia renovável, como a energia solar, é possível explorar inúmeros assuntos adicionalmente àqueles referentes às aulas teóricas de Física, como a tecnologia fotovoltaica, a importância de introduzirmos fontes de energia limpa, a relação entre tecnologia e meio ambiente, entre outros. Para isso optamos por utilizar uma placa solar fotovoltaica para demonstrar a conversão de radiação solar em energia elétrica e utilizarmos essa energia para alimentar um sistema termodinâmico. Dessa forma, mesmo um experimento clássico e de importância histórica para a ciência, como o de Joule para a determinação do equivalente mecânico do calor, pode ser enriquecido com tecnologia atual e utilizado de forma eficiente para discussão não apenas da Física referente a um sistema termodinâmico simples, mas também como introdução a assuntos de importância universal como o uso e eficiência de fontes de energia renovável.

Adicionalmente a isso, a abordagem histórica do experimento de Joule pode evidenciar a importância da experimentação para o desenvolvimento da física principalmente quando pensamos no período da revolução industrial e do desenvolvimento da termodinâmica, ramo esse muito importante para o desenvolvimento industrial e aprimoramento científico no fim do século XIX.

Nosso objetivo no experimento desenvolvido foi obter uma relação que nos fornecesse o equivalente mecânico do calor obtido por Joule, atualmente dado por $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$, através de medidas elétricas. Fatores de conversão de uma modalidade de energia em outra, como este,

são muito importantes para avaliar o custo de produção da modalidade de energia desejada em determinadas máquinas, as quais operam sobre o princípio de transformação de energia. Quando falamos em equivalência entre unidades de medida apresentamos um coeficiente de conversão, mas no caso do equivalente mecânico da caloria não estamos abordando apenas isso, estamos analisando um estudo que foi determinante para o estabelecimento definitivo da primeira lei da Termodinâmica, que é a lei de conservação e transformação de energia.

Nas próximas seções será apresentado como foi feita a montagem do produto educacional para ser aplicado em sala de aula e a forma como os conceitos de física foram tratados juntamente com o experimento.

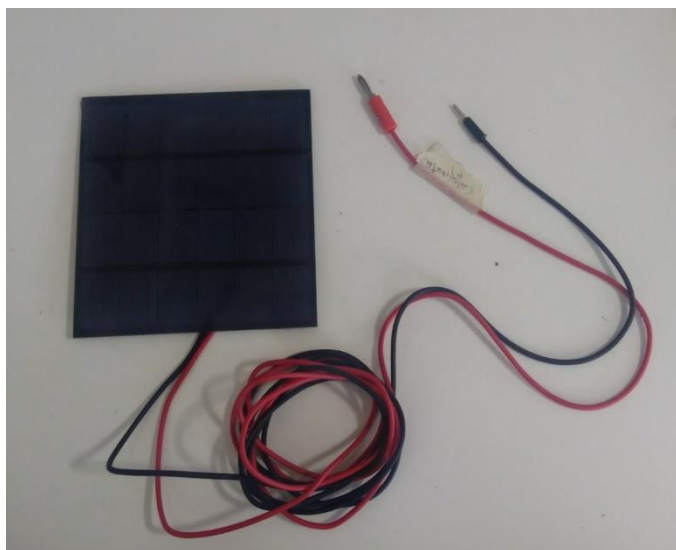
3.2 MONTAGEM DO PRODUTO EDUCACIONAL

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 utilizada, mostrada na figura 3.1, possui dimensões de (145 x 145 x 2,5) mm, (comprimento x largura x espessura), e especificações técnicas como tensão máxima na saída de 6 V, corrente máxima de 500 mA e potência máxima de 3 W. Para que a placa pudesse ser posicionada facilmente em locais com boa incidência solar foram soldados dois fios na placa, preto e vermelho, com dois metros de comprimento com conectores banana correspondendo aos seus polos negativo e positivo, respectivamente. 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 3.2. 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.

Figura 3.1 – 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.

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.

Figura 3.2 – 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 aproximadamente constante. À direita temos a tampa do calorímetro com dois conectores borne soldados a um resistor cerâmico.



Fonte: Elaborada pelos autores.

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 3.3. O

intervalo de medição da tensão elétrica deste dispositivo vai de 0 a 100 V, com medição mínima de 0,01 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.

A variação da temperatura da massa de água no interior do calorímetro foi medida através de um termômetro digital composto por um sensor metálico, conforme mostra a figura 3.3. 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 3.3 – 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.



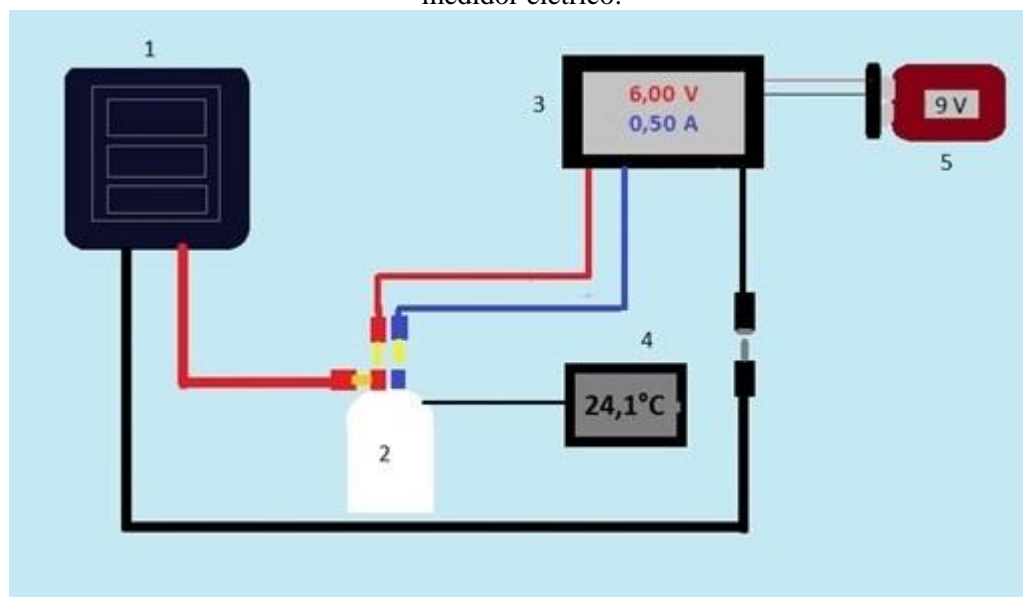
Fonte: Elaborada pelos autores.

Na figura 3.4 mostramos um esquema ilustrativo da montagem do nosso experimento apresentando os principais equipamentos utilizados.

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.

Figura 3.4 – 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.

3.3 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.

3.3.1 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. 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,

$$Q = C\Delta T, \quad (3.1)$$

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 incandescente 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,

$$C = mc, \quad (3.2)$$

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 quantidade de 1 g 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, 2008).

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.(3.1) e (3.2).

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,

$$\begin{aligned} Q_A + Q_{LA} &= 0 \rightarrow -Q_A = Q_{LA}, \\ -m_A c_A (T_f - T_A) &= (mc + C_L)(T_f - T_i), \\ \therefore c_A &= \frac{(mc + C_L)(T_f - T_i)}{m_A(T_A - T_f)}. \quad (3.3) \end{aligned}$$

A primeira equação indica que não há perda ou ganho líquido de energia no calorímetro, de modo que o sinal negativo que aparece indica apenas que a direção do fluxo de energia entre Q_A e Q_{LA} são opostas, pois a substância A perde energia e o sistema água+latinha recebe esta mesma energia. Ou seja, o sinal negativo não indica o sinal de Q_A ou Q_{LA} . Nesta situação específica que estamos exemplificando Q_A possui valor negativo, pois $T_A > T_f$, e Q_{LA} é positivo, pois $T_i < T_f$, confirmando a transferência de energia térmica da substância A para o sistema água+latinha. Como já discutido, 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 .

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 cal/g°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.

Pelo exposto anteriormente vimos que a 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.(3.3)? 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).

Em nosso experimento utilizamos o trabalho elétrico no processo de conversão para energia térmica monitorando a variação de temperatura observada no sistema para demonstrar a equivalência entre Joule e caloria.

3.3.1.1 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.(3.3) da seguinte forma:

$$m_A c_A (T_A - T_f) = (mc + C_L)(T_f - T_i),$$
$$C_L (T_f - T_i) = m_A c_A (T_A - T_f) - mc(T_f - T_i),$$

$$\therefore C_L = \frac{m_A c_A (T_A - T_f) - mc(T_f - T_i)}{(T_f - T_i)}. \quad (3.4)$$

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

3.3.2 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 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 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.(3.1). 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 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,

$$dU = \delta Q - \delta W, \quad (3.5)$$

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.(3.5), 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 e colocamos a mão sobre o capô do carro percebemos que o mesmo 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 para um determinado

propósito em processos espontâneos, 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,

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (3.6)$$

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,

$$dS = dS_1 + dS_2. \quad (3.7)$$

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 3.5, para a água à temperatura T_2 , temos pela eq. (3.6) e pela lei de aumento da entropia que,

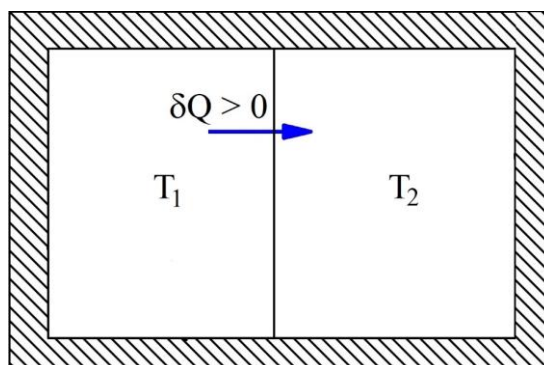
$$dS = -\frac{\delta Q}{T_1} + \frac{\delta Q}{T_2} > 0. \quad (3.8)$$

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.(3.8) 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 3.5 – 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.

3.3.3 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 (ddp), isso permite a passagem de corrente elétrica 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 conseqüentemente a energia dos elétrons passa a ser dissipada como energia térmica através de calor.

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

$$P = Vi. \quad (3.9)$$

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.

3.3.4 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,

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{W_e}{\Delta t} \rightarrow W_e = Vi\Delta t. \quad (3.10)$$

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 $\alpha = 4,186 \text{ J/cal}$, 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 casas decimais para α , mas sempre estaremos limitados à barra de erros do experimento.

Outra forma alternativa de obter o equivalente mecânico do calor com este experimento a partir das medidas elétricas seria determinar o calor específico da água considerando a igualdade $W_e = Q$, em vez de assumir o valor $c = 1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e considerar o fator α . Nós preferimos proceder com a obtenção de α porque é possível analisar a primeira lei da termodinâmica através do processo de conversão de energia elétrica, através do trabalho elétrico, em energia térmica, através do calor.

Utilizando as relações acima e a eq. (3.10) tem-se

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

$$\therefore \alpha = \frac{Vi}{(mc + C_L) \frac{\Delta T}{\Delta t}}. \quad (3.11)$$

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.

3.3.4.1 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.(3.4). 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 obtivemos uma temperatura final de equilíbrio de $T_A = 38,4$ °C. A massa de água aquecida foi despejada imediatamente 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.(3.4) 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 3.1. 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 3.1 – 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

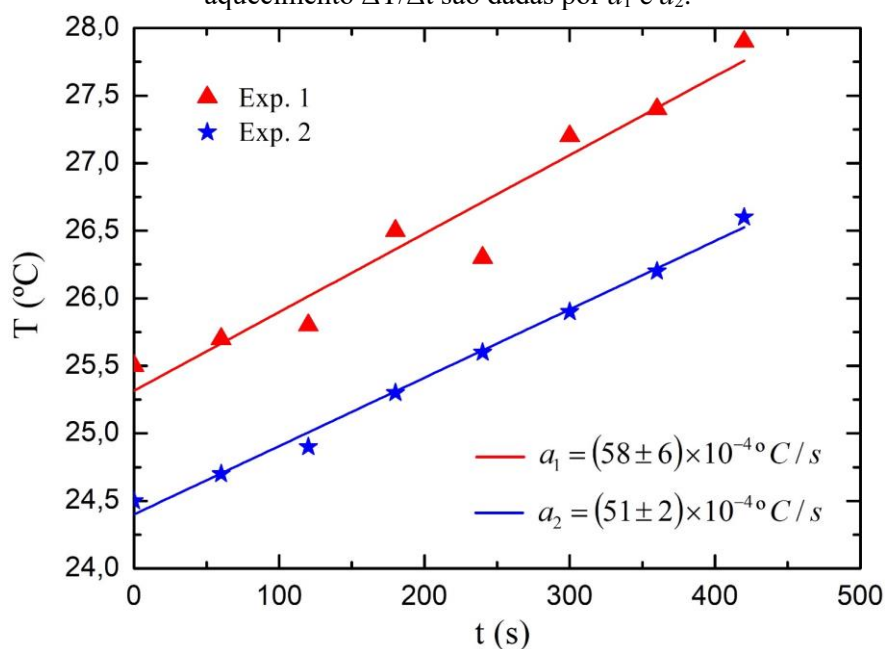
Fonte: elaborada pelo autor.

No gráfico da figura 3.6 plotamos os resultados da Tabela 3.1 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 consequentemente da tensão no resistor.

Utilizando esses valores na eq.(3.11) obtivemos para o valor do equivalente mecânico do calor $\alpha_1 = 3,55$ J/cal e $\alpha_2 = 4,03$ 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 3.6 – 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 $T_E = 29,9$ °C. A temperatura de

equilíbrio obtida com a célula solar foi de $T_E = 31,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Os dados são apresentados na Tabela 3.2 e o gráfico da temperatura em função do tempo na figura 3.7.

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 $i_3 = 0,32 \text{ A}$, e pela célula solar foi de $V_4 = 3,64 \text{ V}$, com $i_4 = 0,28 \text{ A}$. 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.

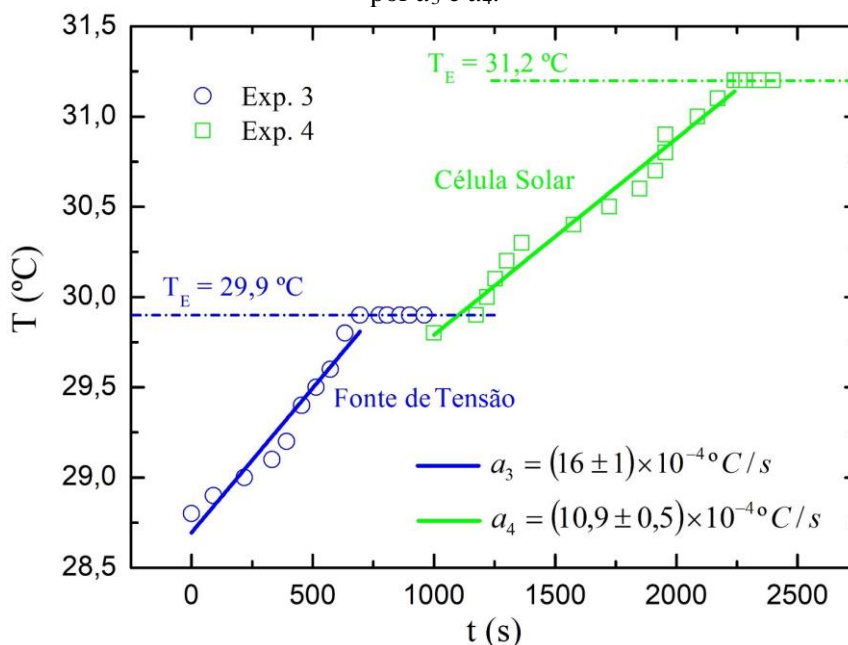
TABELA 3.2 – Registro da temperatura T em função do tempo t para os experimentos 3 e 4.

$t_3 \text{ (s)}$	$T_3 \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_4 \text{ (s)}$	$T_4 \text{ (}^\circ\text{C)}$
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.

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

Figura 3.7 – 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 $T_E = 29,9\text{ }^\circ\text{C}$ o resistor foi ligado à célula solar e uma nova rampa de aquecimento para a água foi obtida até atingir a temperatura de equilíbrio $T_E = 31,2\text{ }^\circ\text{C}$. As respectivas taxas de aquecimento $\Delta T/\Delta t$ são dadas por a_3 e a_4 .



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 aconteceu 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 à 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 a partir 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. No nosso experimento utilizamos uma fonte de tensão utilizada como carregador de celular com tensão máxima de saída de 4,75 V. No momento da realização do experimento a tensão da fonte foi aferida com o medidor elétrico.

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 com a célula fotovoltaica.

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 3.3 e o gráfico de T vs t na figura 3.8.

Este experimento foi realizado nas mesmas condições do experimento 4. No gráfico da figura 3.8 podemos ver claramente a mudança da taxa de aquecimento de $a_{5A} = (8,3 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ °C/s para $a_{5B} = (33,3 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ °C/s até o sistema atingir a temperatura de equilíbrio em $T_E = 29,6$ °C. Após a obtenção do equilíbrio térmico é possível verificar que as flutuações continuaram, pois a temperatura oscila entre valores maiores e menores em torno de T_E .

Utilizando a taxa a_{5A} o valor do equivalente mecânico obtido é de $\alpha_5 \approx 4,72$ J/cal. Pelo gráfico é possível observar que houve poucas flutuações na primeira rampa de aquecimento, taxa a_{5A} . Apenas com o resultado de minimizar as flutuações já foi 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.

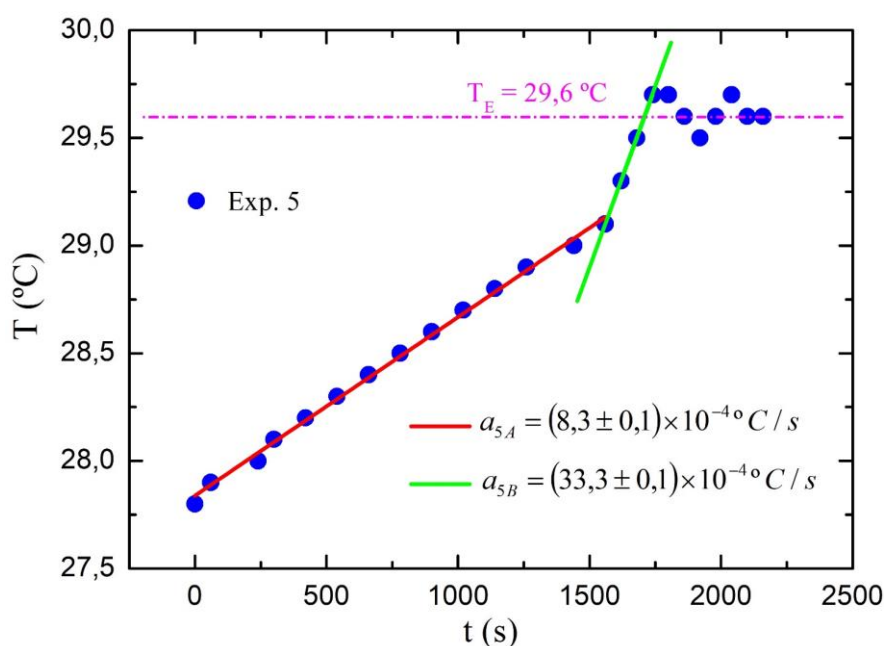
TABELA 3.3 – Registro da temperatura T em função do tempo t para o experimento 5.

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.

Uma alternativa para minimizar ainda mais os erros neste experimento 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 .

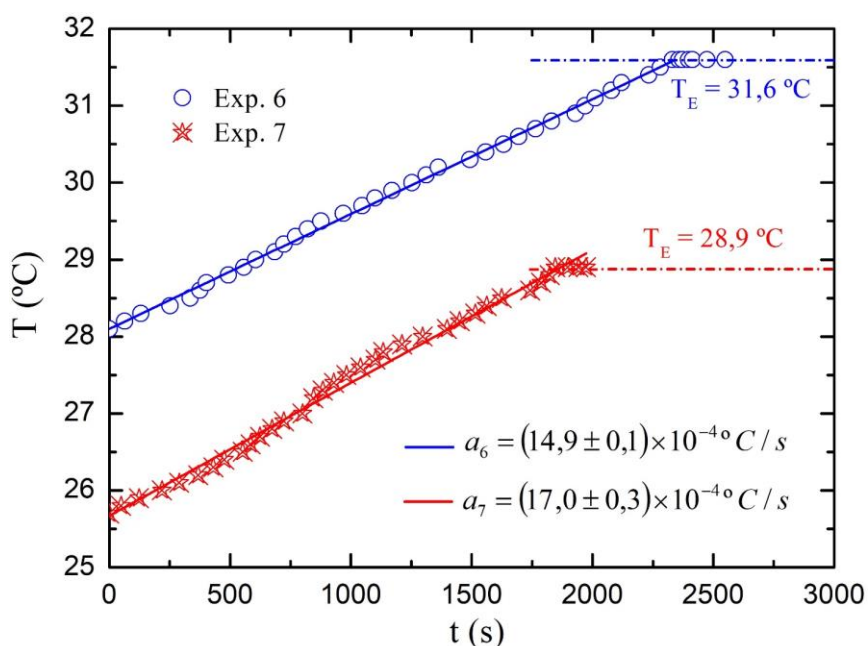
Figura 3.8 – Curva de aquecimento da água obtida utilizando a célula solar. Neste experimento houve flutuações na radiação solar devido à presença de nuvens. Isso é evidenciado quando o sistema atinge a temperatura de 29,1 °C, em que a taxa de aquecimento $\Delta T/\Delta t$ aumenta de a_{5A} para a_{5B} , e também pelas flutuações observadas quando o sistema tende ao equilíbrio térmico $T_E = 29,6$ °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 $m = 200$ 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 $C_{L6} = 13,66$ cal/°C e $C_{L7} = 13,86$ cal/°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 $T_E = 31,6$ °C, e após 33 minutos para o Exp.7, em que $T_E = 28,9$ °C, conforme mostrado na figura 3.9.

Figura 3.9 – 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.

O valor do equivalente mecânico obtido nestes experimentos foi de $\alpha_6 = 4,05$ J/cal e $\alpha_7 = 3,93$ 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 $\alpha = 4,186$ J/cal. O melhor resultado obtido com a célula solar foi de $\alpha_2 = 4,03$ 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.

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 3.4. 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 3.4 – 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 4,75 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.

3.3.4.2 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,

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} dy\right)^2}, \quad (3.12)$$

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.(3.11). 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.(3.12), 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.(3.4).

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.(3.11) da seguinte forma,

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

em que $C = mc$ é a 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.(3.12) obtemos:

$$\Delta\alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta i}{i}\right)^2 + \frac{(\Delta C)^2 + (\Delta C_L)^2}{(C + C_L)^2} + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2}. \quad (3.13)$$

Como $C = mc$, o valor de ΔC , utilizando a eq.(3.12), fica,

$$\Delta C = C \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}. \quad (3.14)$$

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.(3.13) 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 3.4 e suas respectivas incertezas nas eqs.(3.13) e (3.14) podemos estimar o erro do valor do equivalente mecânico para todos os experimentos realizados. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5. 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 3.4.

TABELA 3.5 – 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	$10,9 \pm 0,5$	$8,3 \pm 0,1$	$14,9 \pm 0,1$	$17,0 \pm 0,3$
$(\alpha \pm \Delta\alpha)$ J/cal	$3,6 \pm 0,4$	$4,0 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,4$	$4,7 \pm 0,5$	$4,1 \pm 0,5$	$3,9 \pm 0,5$

Fonte: Elaborada pelos autores.

Note que o resultado obtido para o Exp.3 continua discrepante mesmo com o desvio calculado adequadamente, 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.

3.3.5 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.

3.3.5.1 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,

$$E = hf, \quad (3.15)$$

sendo $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J/s}$.

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*.

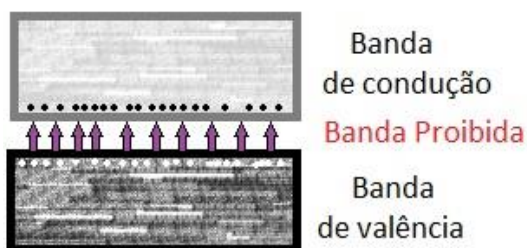
De acordo com o modelo de bandas de energia um par elétron-lacuna é gerado quando elétrons da banda de valência passam para a banda de condução através da absorção de energia por algum mecanismo, como a excitação térmica dos átomos. Este processo é ilustrado na figura 3.10. A banda proibida ilustrada 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.

A fotoexcitação é uma outra maneira de reforçar a condutividade elétrica do semicondutor. 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.

Figura 3.10 – 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.

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. Consequentemente, 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.

3.3.5.2 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 vs V* e *P vs V*. Os valores da potência foram obtidos pela relação $P = Vi$. Todos os dados estão dispostos na Tabela 3.6.

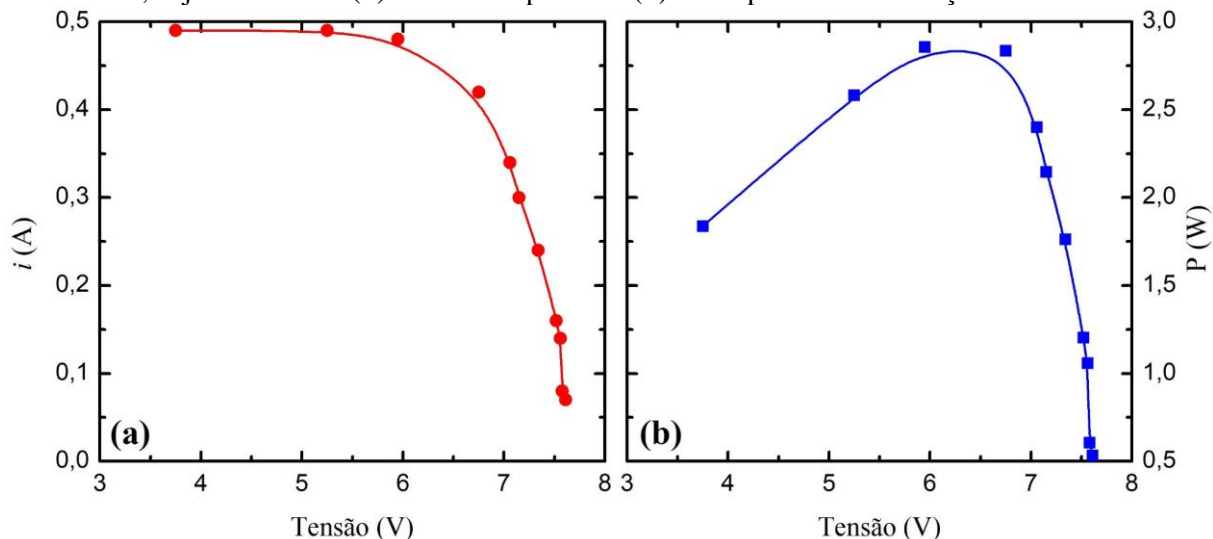
TABELA 3.6 – Valores das resistências *R* dos resistores utilizados para obtenção das curvas características da célula fotovoltaica, sendo *V* e *i* os valores da tensão e da corrente elétricas medidos na célula, respectivamente, e *P* o valor da potência correspondente.

<i>R</i> (Ω)	<i>V</i> (V)	<i>i</i> (A)	<i>P</i> (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.

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

Figura 3.11 – (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.

Note pelo gráfico da figura 3.11(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 3.11(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.

O gráfico apresentado na figura 3.11(a) mostra também que a corrente elétrica na placa decresce drasticamente quando utilizamos resistores com resistência maior que 15Ω , pois estes produzem sobrecarga elétrica na célula e trabalham com valores de tensão superior ao valor nominal da mesma, que é de 6 V. Consequentemente, o mesmo é observado para a potência, figura 3.11(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.

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO

Nossa proposta foi aplicada de maneira demonstrativa, com os alunos sendo expectadores, mas com uma postura interpretativa quanto a qualidade dos conceitos físicos e quantitativa em relação aos dados obtidos. A atividade consistiu em explicar para a turma como o equivalente mecânico do calor poderia ser determinado através de medidas elétricas. Iniciamos o processo com a descrição dos instrumentos de medida utilizados para a monitoração das propriedades do sistema. Ao longo do desenvolvimento da atividade os alunos foram convidados a realizar tal monitoração verificando como a voltagem, a intensidade da corrente elétrica e a temperatura do sistema variavam com relação ao tempo utilizando um cronômetro. O experimento foi conduzido pelo professor com os alunos participando ativamente nas discussões dos conceitos físicos e processos elétricos e termodinâmicos envolvidos em cada etapa.

A atividade dos alunos durante a experimentação foi a de observar atentamente os principais passos na execução e montagem experimental para realizar a investigação dos fenômenos envolvidos. Como se trata de uma atividade colaborativa e interpretativa, eles podiam se manifestar a qualquer momento para discutir o que estava sendo observado com os colegas ou com o professor. Após a demonstração do experimento os alunos tiveram que responder a um questionário sobre o mesmo.

Com o nosso produto educacional foi possível manter o interesse dos alunos durante toda a realização da atividade experimental. Após a experimentação os alunos foram efetivos e dedicados durante a resolução do questionário.

4.1 ATIVIDADE 1: DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL

Ao iniciarmos a aula a turma foi comunicada sobre a realização do experimento para a determinação do equivalente mecânico do calor através de medidas elétricas.

Os alunos ficaram muito intrigados e curiosos com o funcionamento da célula solar fotovoltaica, pois nunca tiveram contato com esse produto tecnológico e nem haviam observado um processo de transformação de radiação solar em energia elétrica.

De maneira geral, a utilização do experimento para a discussão dos tópicos de Física abordados agradou os alunos. Eles colaboraram e acompanharam atentos e curiosos todo o processo de montagem e ligação dos fios da placa ao circuito elétrico do experimento. A sala de aula em que a proposta foi aplicada tem uma grande janela onde incide luz solar no período da manhã. No dia da aplicação a luz solar incidente estava com intensidade adequada para a realização do experimento, de modo que a célula solar pudesse ser utilizada como fonte de alimentação de energia para o experimento para mostrarmos os processos de conversão da energia solar em energia elétrica e, através do resistor no interior do calorímetro, de energia elétrica para energia térmica para podermos obter o fator de equivalência proposto, entre joules e calorias.

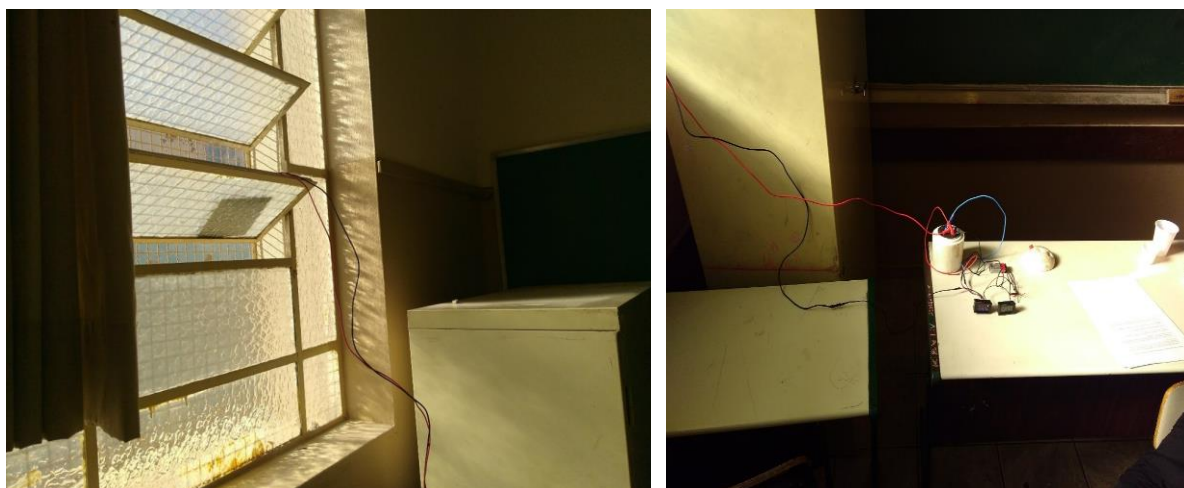
A célula fotovoltaica foi adequadamente posicionada na janela basculante da sala de aula, conforme figura 4.1. O experimento foi iniciado com as ligações dos instrumentos de medida para o monitoramento das propriedades físicas do sistema, conforme discutido no capítulo anterior. Durante essa etapa foram apresentados aos alunos o dispositivo utilizado para realizar o monitoramento dos parâmetros elétricos, como a intensidade da corrente e diferença de potencial.

Em seguida o professor utiliza o calorímetro para discutir sobre isolantes térmicos e sistemas fechados, pois como este possui paredes adiabáticas, a troca de energia através de calor entre o sistema em estudo e a vizinhança é minimizada. Ao discutir a necessidade de obter a capacidade térmica do calorímetro os alunos auxiliaram o professor na determinação da mesma, obtendo o valor de $C_L = 10,17 \text{ cal/}^\circ\text{C}$.

Durante a explicação do princípio de conservação e transformação de energia o professor destacou que a experiência apresentada permitiria identificar as transformações de energia propostas, envolvendo radiação solar, energia elétrica e energia térmica.

Todos os dados experimentais utilizados para a determinação do equivalente mecânico do calor em sala de aula junto com os alunos se referem ao experimento 2, Exp.2, Tabela 3.1 e figura 3.6, apresentados na seção 3.3.4.1 do capítulo anterior.

Figura 4.1 – A esquerda é mostrada a célula solar posicionada na janela para captação de energia solar em sala de aula e a direita o experimento preparado para demonstração.



Fonte: Elaborada pelos Autores

Os alunos puderam observar as grandezas elétricas envolvidas no experimento, ou seja, a diferença de potencial elétrico aplicada ao resistor e a intensidade de corrente elétrica que o percorria. Eles registraram a temperatura inicial do sistema e monitoraram os valores de temperatura a cada minuto por sete minutos.

Após a coleta dos dados o equivalente entre joules e calorias foi determinado com valor de $\alpha = 4,03 \text{ J/cal}$. Em seguida o professor forneceu aos alunos uma descrição histórica da determinação deste equivalente por James Prescott Joule falando das inúmeras tentativas e diferentes experimentos realizados por Joule e sobre a importância desse resultado para o estabelecimento da primeira lei da Termodinâmica no século XIX, a qual trata do princípio de conservação e transformação de energia. O valor de α obtido em sala de aula foi comparado com o valor fornecido pela literatura, dado por $\alpha = 4,186 \text{ J/cal}$, apresentando uma concordância de mais de 96%. Apesar do excelente resultado, o professor discutiu sobre as possíveis fontes de erros que poderiam conter no experimento para justificar a diferença entre os resultados. Apesar de apresentarmos o cálculo dos erros associados a α no capítulo anterior para todos os experimentos realizados, não tivemos tempo hábil para realizar essa atividade com os alunos. A discussão sobre possíveis fontes de erro foi apenas qualitativa.

Ao final da demonstração experimental e das discussões foi solicitado aos alunos que respondessem a um questionário sobre o experimento em duplas. Durante a atividade eles tinham permissão para discutir com os colegas de outros grupos.

4.2 ATIVIDADE 2: QUESTIONÁRIO COM PERGUNTAS RELACIONADAS À APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O questionário apresentado aos alunos está relacionado a atividade experimental desenvolvida na sala de aula, elencando os principais conceitos, grandezas e fenômenos físicos envolvidos para a obtenção do equivalente mecânico do calor.

Ao responder as questões propostas, os alunos continuaram trabalhando em duplas para discutir as explicações do professor e os procedimentos experimentais observados por eles.

Para muitos alunos esta foi a primeira vez na vida escolar deles que eles puderam presenciar e realizar um relato de experimento científico. Isso pode ser evidenciado em suas respostas ao questionário, sendo frequente a presença do senso comum deles quanto à observação do experimento ou na narrativa dos fenômenos científicos e apresentação dos conceitos físicos de maneira bastante simplificada. De qualquer forma, nossa proposta foi muito útil para elucidar os objetivos de uma atividade experimental em sala de aula, no que diz respeito ao fazer ciência. Foi possível discutir a importância da observação de fenômenos físicos através da experimentação e utilizar isto como um recurso complementar para uma melhor aprendizagem dos conceitos teóricos trabalhados antes da atividade prática.

Apresentamos a seguir as respostas do questionário de alguns grupos formados por 2 alunos cada. No Apêndice B apresentamos as respostas manuscritas de seis grupos de alunos.

Questão 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.

Alunos: *“Os fenômenos físicos presentes no experimento são os raios solares e a água. Inicialmente, colocou a placa solar na janela para capturar a energia do sol, depois, colocou um pouco de água dentro do isopor com um calorímetro mostrando a temperatura e obtivemos como conclusão o aquecimento da água.”*

Alunos: *“No experimento o professor pega a energia solar, transforma em energia elétrica para gerar energia para esquentar a água = energia térmica. Depois aconteceu uma troca de calor entre a resistência e a água.”*

Note a dificuldade dos alunos de se expressarem de maneira correta através da escrita. De maneira geral, eles descreveram com simplicidade o experimento e pensaram nos fenômenos físicos de transformação de energia que envolvem os raios solares incidindo na célula fotovoltaica e a água sendo aquecida no calorímetro. É possível identificar na primeira resposta os dispositivos utilizados como o calorímetro e o termômetro, pois eles observam a temperatura do sistema.

Na segunda resposta os alunos apresentam um resumo simples e claro do experimento como uma sequência de processos de transformação de energia. Note que para eles o que é trocado entre a resistência e a água é o calor. Esse equívoco é muito comum e aparece em quase todas as respostas, com alguns grupos se referindo até à medida do calor. Usualmente os livros didáticos definem calor como energia em trânsito, reduzindo o mesmo a uma forma de energia, sendo o que ocorre na realidade é a troca de energia através do calor. Essa forma que é colocada nos livros e o que é falado no dia a dia dificulta a abordagem correta da definição de calor nos cursos de Física, como sendo uma forma de transmitir energia de um sistema a outro devido à diferença de temperatura entre eles. Esta dificuldade é observada mesmo em disciplinas avançadas de graduação.

Alguns alunos deram ênfase apenas ao processo de troca de energia, não fornecendo qualquer detalhe sobre a montagem experimental enquanto que outros responderam essa questão de forma mais detalhada dividindo os processos passo a passo desde o posicionamento da célula fotovoltaica na janela, conexão dos cabos até o monitoramento da temperatura do sistema. Outras respostas são apresentadas no Apêndice B.

Questão 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.

Alunos: *“A fonte de alimentação do dispositivo é a energia solar, o sol. A transformação de energia é dos raios solares, para energia elétrica, que passa para energia térmica, que transfere para a água, aquecendo-a.”*

Alunos: *“A principal fonte de energia é a luz solar que é absorvida pela placa solar e transformada em energia elétrica que é conduzida para a resistência e é transformada em energia térmica que transfere o calor para a água.”*

Praticamente todos os alunos reconhecem que a fonte de energia primária para o nosso experimento é o sol. Alguns fornecem maiores detalhes sobre o processo de captação da radiação solar através da célula fotovoltaica. As etapas das transformações de energia foram

reconhecidas por quase todos. Como na questão 1, em algumas respostas observa-se o uso do calor como algo que está sendo transferido para a água para aquecê-la.

Questão 3: Descreva os aparelhos utilizados para realizar as medidas no nosso experimento. Qual a função de cada um?

Alunos: *“Placa Fotovoltaica – transforma a radiação solar em energia elétrica.
Calorímetro – permite a troca de calor entre a resistência e a água sem perder calor para o ambiente.
Resistor – gera potência elétrica, fornece energia para a água.
Amperímetro – é a relação entre joule e a caloria.
Termômetro – mede a temperatura.”*

Alunos: *“A placa fotovoltaica – que tem a função de absorver a radiação solar.
Medidor elétrico – usado para medir intensidade de corrente elétrica e a tensão em volts aplicada no resistor.
Calorímetro – função de conservar o calor.”*

Todos os alunos conseguiram descrever os aparelhos utilizados no experimento. Contudo, como na primeira resposta acima, houve alguns equívocos com relação a funcionalidade dos dispositivos. Neste exemplo, os alunos descrevem que o amperímetro irá fornecer a relação entre joules e calorias. Na segunda resposta acima é possível reconhecer as paredes adiabáticas do calorímetro, uma vez que os alunos dizem que a função deste é conservar o calor.

Houve respostas mais elaboradas, respostas confusas com alunos confundindo calor com temperatura e também respostas mais resumidas, com alguns alunos apresentando somente os dispositivos sem descrever suas funcionalidades.

Questão 4: Quais as grandezas físicas envolvidas no experimento?

Alunos: *“Energia, calor, temperatura, potência elétrica, densidade e tensão de corrente elétrica.”*

Alunos: *“Energia, calor, intensidade de corrente elétrica, temperatura e graus Celsius.”*

É possível observar que em ambas as respostas o calor aparece como grandeza física, mesmo sendo discutido com os alunos que calor é a forma ou o método pelo qual energia térmica é transferida do resistor para a água no calorímetro. Por se tratar de um processo este não é mensurável. Não faz sentido falar em medir o calor do sistema. Todavia, os alunos ainda mantiveram o conceito de que é algo que pode ser medido. Como já discutido, eles acreditam

que é o calor que é transferido para a água e não energia térmica. É como se fosse algo que estivesse no interior do resistor, semelhante à ideia do calórico, que foi uma teoria estabelecida e utilizada até metade do século XIX para descrever as mudanças de temperatura de um sistema.

Pelas respostas analisadas vemos que o conceito de calor admitido pelos alunos é caracterizado pelo conhecimento empírico acumulado ao longo de gerações que utilizam tal conceito de forma incorreta no dia a dia e até mesmo em livros didáticos. Aparentemente, o conceito de calórico ainda está presente nos dias de hoje, sendo trocado por calor. Isso nos faz pensar que a teoria do calórico pode ter surgido a partir do senso comum das pessoas que observaram os fenômenos térmicos na época em que a mesma foi estabelecida.

Questão 5: Descreva com suas palavras: Por que estamos realizando este experimento?

Alunos: *“Para observarmos na prática como ocorre uma transformação de energia.”*

Alunos: *“Para estudar de um modo diferente, na prática, de fato, para entendermos melhor a matéria na prática, o que facilitou bastante a compreensão do que estamos estudando.”*

Para esta pergunta todos os alunos responderam de maneira semelhante aos dois exemplos acima. Alguns deram importância ao fenômeno de transformação de energia, como o principal objetivo do experimento, enquanto que outros valorizaram os objetivos educacionais da proposta para auxiliá-los no processo de aprendizagem dos conceitos físicos abordados.

Apesar da verificação dos processos de transformação de energia ser o principal objetivo do experimento, nenhum grupo mencionou o cálculo do fator de conversão de joules para calorias, ou seja, o equivalente mecânico do calor. Aparentemente o valor obtido de $\alpha = 4,03$ J/cal, que quantifica o processo de conversão de energia no interior do calorímetro, não teve muito significado para os alunos.

Questão 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.

Alunos: *“Entendemos parcialmente, a parte do experimento em si ficou bem clara, mas as contas e fórmulas não ficou bem explicada.”*

Alunos: *“Sim. Entendemos o processo de conversões de energia, mas não os cálculos sobre o assunto.”*

Nas respostas dos alunos fica evidente que o maior problema durante o desenvolvimento da atividade foi a quantificação dos fenômenos, ou seja, a parte matemática. Vários alunos

responderam que entenderam a montagem do experimento e os processos de conversão de energia, sem fornecer quaisquer detalhes sobre o que não entenderam.

Com esta questão podemos entender por que os alunos não mencionam em respostas anteriores o valor de α obtido a partir dos dados coletados durante a experimentação. Todo o processo de cálculo e desenvolvimento do modelo teórico através da manipulação de equações não ficou muito claro para os alunos, pois eles mencionam apenas as discussões qualitativas dos fenômenos e propriedades do sistema.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O produto educacional foi utilizado em aulas demonstrativas com alunos da rede estadual de ensino na cidade de Campinas, com 24 alunos da 2ª série do ensino médio.

De acordo com o currículo de física do estado de São Paulo a experimentação no ensino de física tem a seguinte finalidade:

“A experimentação, por sua vez, tem sido identificada apenas com as práticas laboratoriais e tem servido de pano de fundo para o exercício do suposto método científico. Não se deve descuidar da introdução do domínio empírico nas aulas de Física, mas isso pode ser feito de diversas maneiras, recorrendo a objetos e equipamentos de uso cotidiano, como cata-ventos, seringas de injeção, molas, alto-falantes e controles remotos, que podem servir para demonstrar fenômenos a serem discutidos (São Paulo, 2007).”

Nosso experimento foi realizado com um dispositivo tecnológico atual, o qual pode ser utilizado para discutir o princípio de conservação e transformação de energia, a utilidade e importância dos semicondutores nas tecnologias atuais e sobre energias renováveis. A abordagem pode ser tanto quantitativa, com o cálculo do equivalente mecânico do calor, por exemplo, ou qualitativa, com a discussão dos diversos conceitos e fenômenos do sistema.

No processo educacional proposto foi desenvolvido cada etapa do processo de transformação de energia, desde o aproveitamento da radiação solar para geração de energia elétrica e o aquecimento da água, à parte de monitoração das propriedades físicas do sistema. Nós conduzimos os alunos a realizar uma investigação científica dos fenômenos envolvidos no sistema e a vivenciar os aspectos da metodologia científica, tanto em termos de desenvolvimento teórico através da manipulação algébrica de equações e considerações na modelagem do sistema, quanto em termos experimentais, com a montagem do experimento,

utilização dos instrumentos de medidas e monitoramento das propriedades físicas. Com isso foi possível fazer com que os alunos estabelecessem uma relação científica com fenômenos presentes no dia a dia deles e tecnologias atuais.

É importante ressaltar que a nossa proposta foi realizada em aulas normais, previstas no planejamento da escola e no currículo oficial do estado de São Paulo, bem como, as diretrizes curriculares nacionais, sem a necessidade de qualquer atividade extraclasse. O processo de planejamento anual das aulas prevê que o professor tenha autonomia para organizar os conteúdos disciplinares orientados pelo currículo oficial, mas que possa desenvolver as atividades de ensino com base na sua experiência pessoal e na sua formação específica. Para realizar uma atividade como esta é necessário pensar, organizar e realizar o experimento antes de aplicar em sala de aula, pois podem aparecer implicações inesperadas como as flutuações da tensão no resistor entre outras fontes de erro, como discutido no capítulo 3. Se o professor não estiver preparado e ciente do que está acontecendo no experimento, um resultado discrepante com relação à literatura, pode trazer consequências negativas para a discussão dos conceitos e fenômenos abordados e os alunos podem acabar desacreditando na metodologia científica. Se o professor estiver preparado, mesmo um erro maior no experimento será uma fonte e oportunidade para a aprendizagem. Propor as atividades de maneira adequada e organizada pode possibilitar o desenvolvimento de competências e habilidades dos alunos.

Segundo a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) a competência específica 1 das ciências da natureza e suas tecnologias define:

Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global (BNCC, p.554, 2018).

A competência apresentada acima está relacionada com a habilidade de analisar e representar as transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria e de energia com o uso de dispositivos digitais específicos, permitindo realizar previsões sobre seus comportamentos em situações cotidianas e em processos produtivos que priorizem o desenvolvimento sustentável.

Com o fechamento das atividades, através do questionário com perguntas relacionadas ao experimento, foi possível mapear as dúvidas remanescentes dos alunos e suas maiores dificuldades, como o tratamento teórico do sistema através de equações. Eles se mostraram motivados e empenhados durante toda a realização do experimento e nas discussões para responderem o questionário. O questionário e a atividade desenvolvida em sala de aula, a qual

faz parte dos critérios avaliativos adotados pela escola, foram considerados para avaliar o desempenho dos alunos com relação aos tópicos de física abordados. Segundo Zabala (1998), o professor pode avaliar seus alunos segundo critérios atitudinais, desde que o aluno seja ativo na realização das atividades propostas sempre orientadas ao conteúdo da disciplina.

Desta forma, podemos concluir que a experimentação pode e deve ser usada como uma atividade em sala de aula de maneira complementar ao desenvolvimento do conteúdo da disciplina de física. A partir das próprias concepções sobre os fenômenos físicos as atividades experimentais demonstrativas são meios para reestruturar as concepções espontâneas em concepções científicas (ARAÚJO e ABIB, 2003; GASPAR, 2005).

Como houve um maior envolvimento dos alunos durante a atividade em sala de aula, pretendemos continuar com esta abordagem e procurar alternativas para que o desenvolvimento dos cálculos e equações durante a modelagem de sistemas, seja assimilado pelos alunos de maneira mais efetiva.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS, Goals of Introductory Physics Laboratory, American Journal of Physics, v.66, n.6, p. 483-485, 1998. “Disponível em:” <http://www.aapt.org/Resources/policy/goaloflabs.cfm>. acessado em setembro de 2016

ARAÚJO, M. S. T. ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol.25, n.2, pp.176-194, 2003.

AZEVEDO, H. L.; MONTEIRO, F. A.J. SANTOS, T. P. CARLOS, J. G. TANCREDO, B. N. Uso do experimento no ensino de física: tendências a partir do levantamento dos artigos em periódicos da área no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7, Florianópolis, 2009. *Atas [...]* Florianópolis: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (ABRAPEC), 2009.

BIASOTO, J. D.; CARVALHO, A. M. P. Análise de uma atividade experimental que desenvolva a argumentação dos alunos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6, Florianópolis, 2007. *Anais [...]* Florianópolis, 2007.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.19, n.3, p.291-313, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação e Tecnologia, PCN+ - Ensino Médio Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais Brasília, 2002.

CARLOS, J. G.; MONTEIRO JÚNIOR, F. N.; AZEVEDO, H. L.; dos SANTOS T. P. e TANCREDO, B. N. Análise de artigos sobre atividades experimentais de física nas atas do encontro nacional de pesquisa em educação em ciências. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7, Florianópolis, 2009. *Atas [...]* Florianópolis: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (ABRAPEC), 2009.

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.

EISBERG, R. RESNICK, R. *Física Quântica*, 23ª Edição, Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1979.

FARADAY, M. *A História Química de uma Vela: As forças da matéria*. Tradução: Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2003.

FEYNMAN, R. P. *Física em seis lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004

FREIRE, P. *Pedagogia da Autonomia: Saberes necessários à prática educativa*. São Paulo: Paz e Terra, Coleção Leitura, 2014.

GALIAZI, M.C; GONÇALVES, F. P. A Natureza pedagógica da experimentação: uma pesquisa na licenciatura em química. *Química Nova na Escola*, Vol. 27, No. 2, 326-331, 2004.

GASPAR, A. Atividades experimentais de demonstração em sala de aula: uma análise segundo o referencial de Vygotsky. Investigações em Ensino de Ciências, V10(2), p. 227-254, 2005.

GIORDAN, M. O papel da experimentação no ensino de ciências. Química Nova na Escola, n.10, p.43-49, 1999.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables: version 16. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384, 2000.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. KRANE, K.S. Princípios de Física: movimento, ondulatória e termodinâmica. v. 2, 3ª Edição Rio de Janeiro: LTC Ltda, 2013.

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

IVIC, IVAN. Lev Semionovich Vygotsky / I; Edgar Pereira Coelho (org.) – Recife: Fundação Joaquim Nabuco, Editora Massangana, 2010.

JOULE, J.P. Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London, 5, 839 (1843a).

LABURÚ, C.E. MOURA DA SILVA, O. H. NARDI, R. Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.25, n.3: p.383-396, dez. 2008.

MELLO, H. A. De, Introdução à Física de semicondutores. Ed. Edgard Blucher, 1975

MOREIRA, M. A. O que é final a aprendizagem significativa? Curriculum, La Laguna, Espanha, 2012.

MOREIRA, M. A. OSTERMANN, F. Sobre o método do ensino científico. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v.10, n.2: p.108-117, ago.1993

MOREIRA, M. A. Teorias de aprendizagem: A teoria de aprendizagem de Vygotsky, São Paulo: EPU, p.109-122. 1999.

NUSSENZVEIG, H.M., Curso de Física Básica, v. 1, São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1987.

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

OLIVEIRA, J. R. S. Contribuições e abordagens das atividades experimentais no ensino de ciências: reunindo elementos para a prática docente. Acta Scientiae, V.12, n. 1, p.139-153 jan/jun 2010.

PASSOS, J. C. Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 3, p.3603, 2009.

PIACENTINI, J.J. [et al.] Introdução ao laboratório de física. 5ª Ed. Florianópolis: Editora da UsFC, 2015.

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

SOUZA, R. DA S. DA SILVA, A. P. B. ARAUJO, T. James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: Reproduzindo as dificuldades do laboratório. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 3, p.3309 2014).

SÈRE, M. G., O papel da experimentação no ensino de física. Caderno Brasileiro de Ensino de Física., v.20, n.1 p.30-42, abr. 2003.

TIPLER, P.A., MOSCA, G., Física. 6ª edição, v. 1, Rio de Janeiro: LTC, 2013.

VYGOTSKI, L. S. A formação social da mente. 4a edição brasileira. São Paulo: Fontes Editora Ltda, 1991.

SWART J. W. SEMICONdutoRES: Fundamentos, Técnicas e Aplicações. 2ª Edição. São Paulo: Ed. UNICAMP, 2008.

ZABALA, A. A prática educativa: As sequências didáticas e as sequências de conteúdo. São Paulo: ARTMED, 1998. Pp 52-86.

BNCC – Base Nacional Comum Curricular. “Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acessado em 15/05/2019

CRESESB – Energia Solar: Princípios e Aplicações. “Disponível em:” http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acessado em 17/07/2018.

Apêndice A

PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo UFSCar Sorocaba

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

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



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

UFSCar – Sorocaba

Abril de 2019

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, o 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

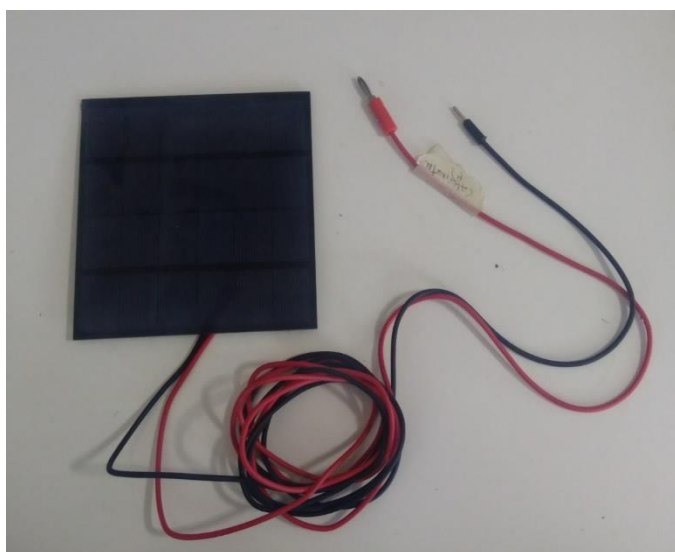
A.1. Montagem do Experimento.....	65
A.2. Conceitos de Física que podem ser abordados durante a Experimentação.....	68
A.2.1. Calorimetria.....	69
A.2.2. Determinação da Capacidade Térmica do Calorímetro Utilizado.....	72
A.2.3. Explorando as Leis da Termodinâmica.....	73
A.2.4. Efeito Joule.....	79
A.2.5. Determinação do Equivalente Mecânico da Caloria através de Medidas Elétricas....	79
A.2.6. Realização do Experimento e Determinação de α	81
A.2.7. Cálculo do Desvio de α	88
A.2.8. Energia Solar Fotovoltaica.....	91
A.2.8.1. Efeito Fotovoltaico.....	91
A.2.8.2. Características Elétricas das Células Fotovoltaicas.....	94
A.2.9. Questionário Sugestivo.....	96

A.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 A.1, e especificações técnicas como tensão máxima na saída de 6 V, corrente máxima de 500 mA e potência máxima de 3 W. Para que a placa pudesse ser posicionada facilmente em locais com boa incidência solar foram soldados dois fios na placa, preto e vermelho, com dois metros de comprimento com conectores banana correspondendo aos seus polos negativo e positivo, respectivamente. Esta placa pode ser adquirida facilmente pela internet em sítios de compra e venda de produtos diversos.

Figura A.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.

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 A.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.

Figura A.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.



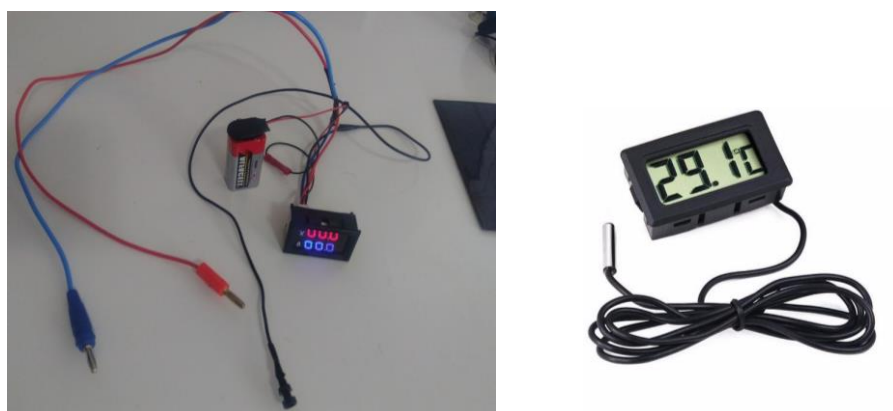
Fonte: Elaborada pelos autores.

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 A.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.

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 A.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.

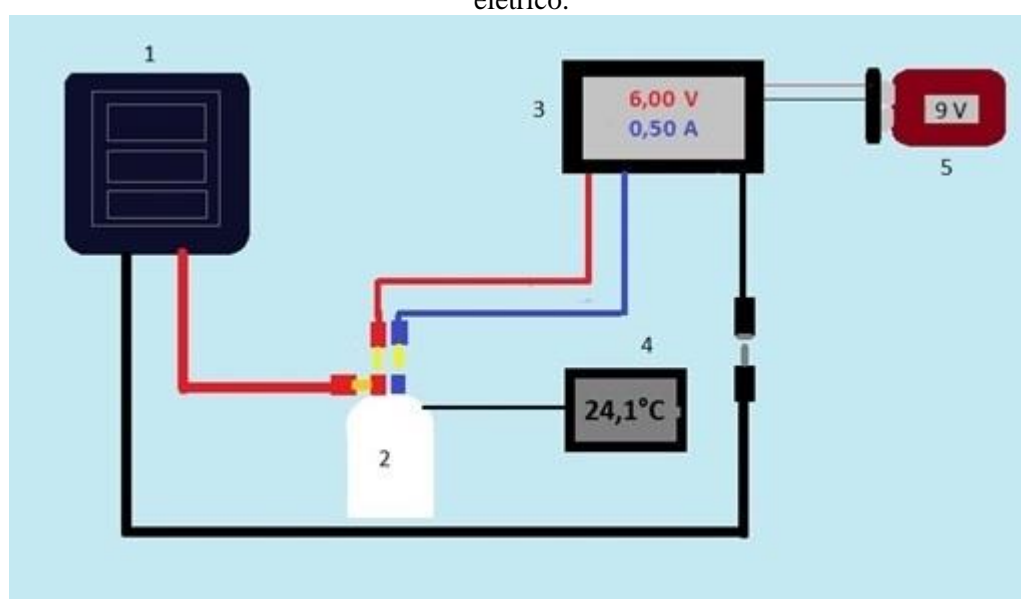
Figura A.3 – À esquerda mostramos um medidor elétrico com display digital para o monitoramento simultâneo da tensão e corrente elétricas da célula fotovoltaica e do resistor no interior do calorímetro. À direita temos um termômetro digital com sensor metálico para aferir a variação da temperatura da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



Fonte: Elaborada pelos autores.

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

Figura A.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.

O valor empregado na montagem do nosso produto educacional tem uma boa relação de custo benefício. É possível montar o kit experimental completo com aproximadamente R\$ 140,00. O custo individual de cada componente do kit foi:

- uma placa solar fotovoltaica de R\$ 50,89;
- um termômetro com display digital de R\$13,90;
- um porta latas de R\$ 10,00;
- uma bateria de 9V de R\$ 5,00 com um medidor elétrico digital (amperímetro/voltímetro) de R\$ 33,94;
- fios e conectores custando aproximadamente R\$30,00.

Deve-se considerar que esses valores estão sujeitos a reajuste em relação ao período que o nosso produto educacional foi desenvolvido. Porém, se levarmos em conta os benefícios da inserção de equipamentos e tecnologias atuais no ensino de física, o custo do kit acaba não sendo um investimento muito elevado.

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

A.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.

A.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. 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,

$$Q = C\Delta T, \quad (\text{A.1})$$

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 incandescente 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,

$$C = mc, \quad (\text{3.2})$$

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 quantidade de 1 g de uma dada substância, e é medido em caloria por grama por grau Celsius, ou seja, cal/g°C.

Se tivermos água e areia expostas à luz solar, como em uma praia, por exemplo, a água ($c = 1,0$ cal/g°C) sofre menos variação de temperatura que a areia ($c = 0,2$ cal/g°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, 2008).

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.(A.1) e (A.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,

$$\begin{aligned} Q_A + Q_{LA} &= 0 \rightarrow -Q_A = Q_{LA}, \\ -m_A c_A (T_f - T_A) &= (mc + C_L)(T_f - T_i), \\ \therefore c_A &= \frac{(mc + C_L)(T_f - T_i)}{m_A(T_A - T_f)}. \quad (A.3) \end{aligned}$$

A primeira equação indica que não há perda ou ganho líquido de energia no calorímetro, de modo que o sinal negativo que aparece indica apenas que a direção do fluxo de energia entre Q_A e Q_{LA} são opostas, pois a substância A perde energia e o sistema água+latinha recebe esta mesma energia. Ou seja, o sinal negativo não indica o sinal de Q_A ou Q_{LA} . Nesta situação específica que estamos exemplificando Q_A possui valor negativo, pois $T_A > T_f$, e Q_{LA} é positivo, pois $T_i < T_f$, confirmando a transferência de energia térmica da substância A para o sistema água+latinha. Como já discutido, 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 .

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 cal/g°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.

Pelo exposto anteriormente vimos que a 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.(A.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).

Em nosso experimento utilizamos o trabalho elétrico no processo de conversão para energia térmica monitorando a variação de temperatura observada no sistema para demonstrar a equivalência entre Joule e caloria.

A.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:

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

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

A.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 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 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.(A.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 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,

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

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.(A.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 e colocamos a mão sobre o capô do carro percebemos que o mesmo 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 para um determinado propósito em processos espontâneos, 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,

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

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,

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

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 A.5, para a água à temperatura T_2 , temos pela eq. (A.6) e pela lei de aumento da entropia que,

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

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.(A.8) de modo que,

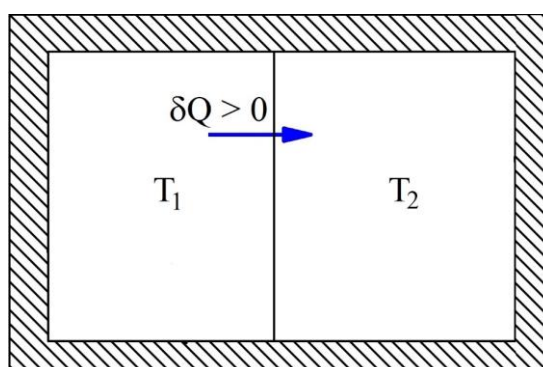
$$-\frac{\delta Q}{T_1} + \frac{\delta Q}{T_2} > 0,$$

$$\frac{\delta Q}{T_2} > \frac{\delta Q}{T_1} \rightarrow \frac{1}{T_2} > \frac{1}{T_1},$$

$$\therefore T_1 > T_2,$$

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.

FiguraA.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.

A.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 (ddp), isso permite a passagem de corrente elétrica 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 conseqüentemente a energia dos elétrons passa a ser dissipada como energia térmica através de calor.

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

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

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,

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

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 $\alpha = 4,186 \text{ J/cal}$, 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 casas decimais para α , mas sempre estaremos limitados à barra de erros do experimento.

Outra forma alternativa de obter o equivalente mecânico do calor com este experimento a partir das medidas elétricas seria determinar o calor específico da água considerando a igualdade $W_e = Q$, em vez de assumir o valor $c = 1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e considerar o fator α . Nós preferimos proceder com a obtenção de α porque é possível analisar a primeira lei da termodinâmica através do processo de conversão de energia elétrica, através do trabalho elétrico, em energia térmica, através do calor.

Utilizando as relações acima e a eq. (3.10) tem-se

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

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

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.

A.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.(A.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 obtivemos uma temperatura final de equilíbrio de $T_A = 38,4$ °C. A massa de água aquecida foi despejada imediatamente 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.(A.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 A.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.

No gráfico da figura A.6 plotamos os resultados da Tabela A.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

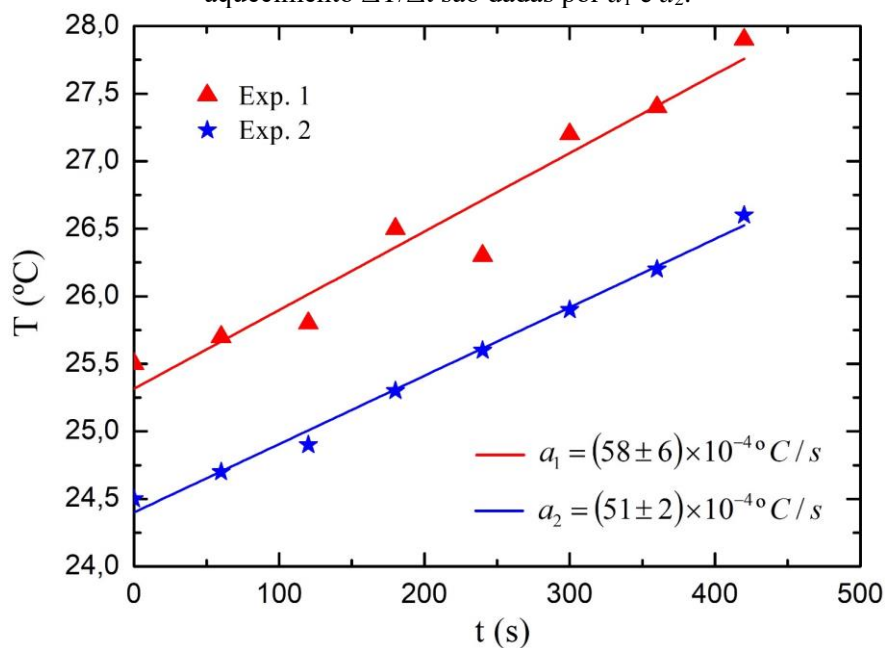
flutuações que no Exp.2. Essas são decorrentes da maior presença de nuvens durante a realização do Exp.1, fazendo com que houvesse variação da radiação solar na célula e consequentemente da tensão no resistor.

TABELA A.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.

Figura A.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.

Utilizando esses valores na eq.(A.11) obtivemos para o valor do equivalente mecânico do calor $\alpha_1 = 3,55$ J/cal e $\alpha_2 = 4,03$ 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.

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 $T_E = 29,9 \text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura de equilíbrio obtida com a célula solar foi de $T_E = 31,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Os dados são apresentados na Tabela A.2 e o gráfico da temperatura em função do tempo na figura A.7.

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

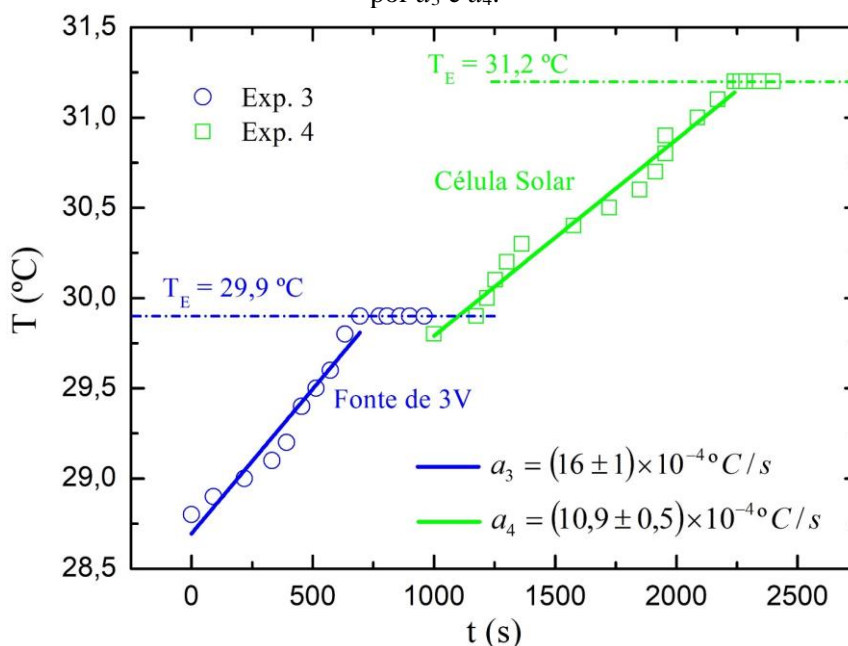
t_3 (s)	T_3 ($^\circ\text{C}$)	t_4 (s)	T_4 ($^\circ\text{C}$)
0	28,8	1000	29,8
91	28,9	1175	29,9
218	29,0	1220	30,0
332	29,1	1254	30,1
392	29,2	1301	30,2
454	29,4	1363	30,3
514	29,5	1577	30,4
573	29,6	1723	30,5
633	29,8	1849	30,6
695	29,9	1914	30,7
775	29,9	1956	30,8
808	29,9	1956	30,9
860	29,9	2088	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.

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 $i_3 = 0,32 \text{ A}$, e pela célula solar foi de $V_4 = 3,64 \text{ V}$, com $i_4 = 0,28 \text{ A}$. 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.

Figura A.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 $T_E = 29,9\text{ °C}$ o resistor foi ligado à célula solar e uma nova rampa de aquecimento para a água foi obtida até atingir a temperatura de equilíbrio $T_E = 31,2\text{ °C}$. 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 aconteceu 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 à 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 a partir 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. No nosso experimento utilizamos uma fonte de tensão utilizada como carregador de celular com tensão máxima de saída de 4,75 V. No momento da realização do experimento a tensão da fonte foi aferida com o medidor elétrico.

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 com a célula fotovoltaica.

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 A.3 e o gráfico de T vs t na figura A.8.

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 $a_{5A} = (8,3 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ °C/s para $a_{5B} = (33,3 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ °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 oscila entre valores maiores e menores em torno de T_E .

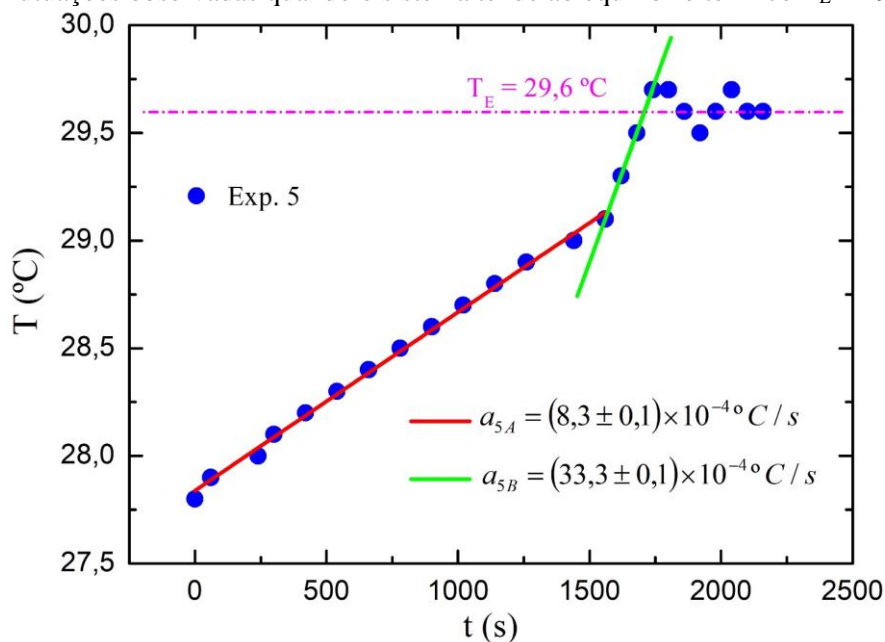
Utilizando a taxa a_{5A} o valor do equivalente mecânico obtido é de $\alpha_5 \approx 4,72 \text{ J/cal}$. Pelo gráfico é possível observar que houve poucas flutuações na primeira rampa de aquecimento, taxa a_{5A} . Apenas com o resultado de minimizar as flutuações já foi possível verificar que o valor obtido para o equivalente é superestimado como esperado, mostrando que as mesmas podem ser consideradas como a maior fonte de erro do nosso experimento.

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

t_5 (s)	T_5 ($^\circ\text{C}$)	t_5 (s)	T_5 ($^\circ\text{C}$)
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.

Figura A.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.

Uma alternativa para minimizar ainda mais os erros neste experimento 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 .

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 $m = 200$ 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 $C_{L6} = 13,66$ cal/°C e $C_{L7} = 13,86$ cal/°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 $T_E = 31,6$ °C, e após 33 minutos para o Exp.7, em que $T_E = 28,9$ °C, conforme mostrado na figura A.9.

O valor do equivalente mecânico obtido nestes experimentos foi de $\alpha_6 = 4,05$ J/cal e $\alpha_7 = 3,93$ 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 $\alpha = 4,186$ J/cal. O melhor resultado obtido com a célula solar foi de $\alpha_2 = 4,03$ 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.

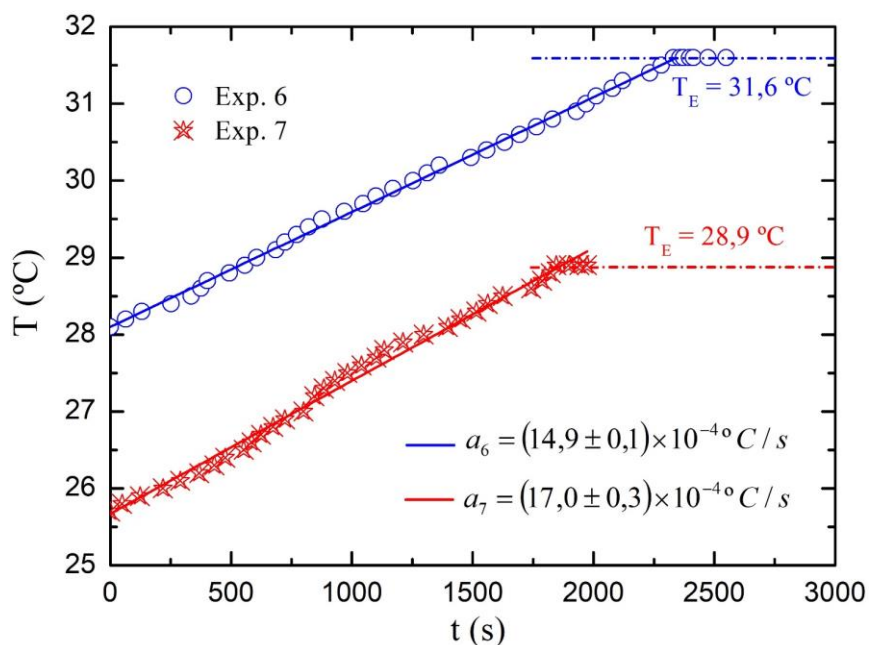
A mudança no valor da capacidade térmica do calorímetro ao mudarmos a quantidade de água em seu interior sugere que uma análise deve ser conduzida para verificar tal influência. Isso é de certa forma esperado, pois estamos mudando a relação de volume de água pelo volume de ar no interior do calorímetro.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

Figura A.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.

TABELA A.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 4,75 V. Adicionalmente a estes dados foi utilizado para o cálculo de α o calor específico da água $c = 1,0 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

	<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 ($\times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/s}$)	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.

A.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,

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

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.(A.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.(A.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.(A.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.(A.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.(A.12) obtemos:

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

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

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

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.(A.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 $\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2$ 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 A.4 e suas respectivas incertezas nas eqs.(A.13) e (A.14) podemos estimar o erro do valor do equivalente mecânico para todos os experimentos realizados. Os resultados são apresentados na Tabela A.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 A.4.

Note que o resultado obtido para o Exp.3 continua discrepante mesmo com o desvio calculado adequadamente, 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.

TABELA A.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	$10,9 \pm 0,5$	$8,3 \pm 0,1$	$14,9 \pm 0,1$	$17,0 \pm 0,3$
$(\alpha \pm \Delta\alpha)$ J/cal	$3,6 \pm 0,4$	$4,0 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,4$	$4,7 \pm 0,5$	$4,1 \pm 0,5$	$3,9 \pm 0,5$

Fonte: Elaborada pelos autores.

A.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.

A.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,

$$E = hf, \quad (\text{A. 15})$$

sendo $h = 6,63 \times 10^{-34}$ 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.

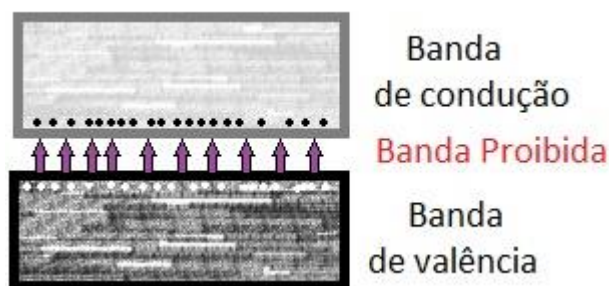
Para os semicondutores extrínsecos a concentração de portadores de cargas pode ser modificada através da adição de pequenas quantidades de outras substâncias, usualmente chamadas de dopantes. Os dopantes mais usados são normalmente pentavalentes, que são elementos com cinco elétrons em sua camada de 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 A.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 A.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. Consequentemente, 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 vs V* e *P vs V*. Os valores da potência foram obtidos pela relação $P = Vi$. Todos os dados estão dispostos na Tabela A.6.

Os gráficos das curvas *i vs V* e *P vs V* são apresentados na figura A.11(a) e (b), respectivamente.

Note pelo gráfico da figura A.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 A.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

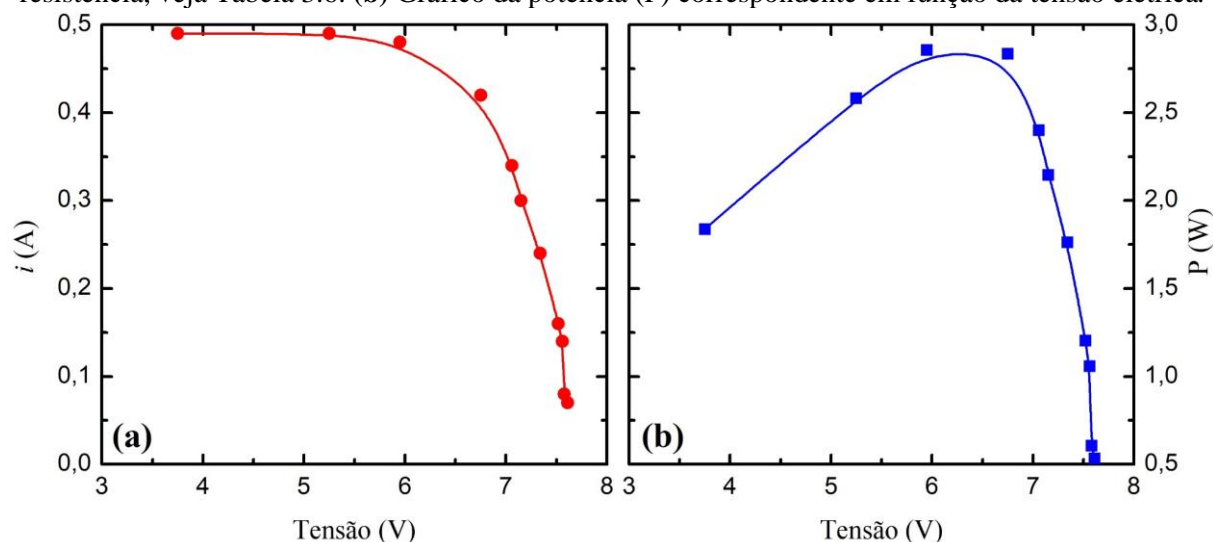
célula fotovoltaica (COSTA e CHERPINSKI, 2018). Como isto foge da proposta do nosso trabalho nós não realizamos tais cálculos.

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

figura A.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.

A.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.

Apêndice B

RESPOSTAS DOS ALUNOS AO QUESTIONÁRIO APLICADO

Neste apêndice apresentamos as respostas na íntegra de seis grupos, formados por dois alunos cada, ao questionário proposto ao final da aplicação da nossa proposta.

Questão 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.

1- Os fenômenos físicos presentes no experimento são os raios solares e a água. Inicialmente, colocou a placa solar na janela para capturar a energia do sol, depois, colocou um pouco de água dentro do isopor com um calorímetro mostrando a temperatura e obtivemos como conclusão o aquecimento da água.

2- No experimento o pap pega a energia solar, transforma em energia elétrica para gerar energia para esquentar a água = energia térmica. Depois aconteceu uma troca de calor entre a resistência e a água.

1- Primeiro o professor colocou a placa solar sobre a janela para pegar a corrente solar que foi transformada em energia elétrica que passa para a resistência que gera energia térmica que passa calor a água que acaba sendo aquecida, e que ao mesmo tempo está sendo medida pelo termômetro, que pode medir o calor por conta do isolamento térmico que é isolante.

1. Primeiro foi usada uma placa que está ligada à unidade elétrica para pegar a radiação solar, transforma-la em energia elétrica e depois em energia térmica. É assim, ou seja a água. O fenômeno físico envolvido foi a troca de calor entre a resistência e a água.

1º passo: foi utilizada uma placa que está ligada à unidades elétricas para pegar a radiação solar.

2º passo: a radiação solar se transforma em energia elétrica.

3º passo: a energia elétrica se transforma em energia térmica.

4º passo: com isso, a água é aquecida.

1- Primeiro ele pegou a água;

Abriu a janela e posicionou a placa fotovoltaica;

Conectou o fio da placa no calorímetro.

Calorímetro conectado ao termômetro e medida de corrente.

Quando tudo posicionado, mediu a temperatura da água, logo a transferindo separadamente para o calorímetro;

A corrente elétrica vindo da placa fotovoltaica, tendo seu calor gerado pela energia solar, aquece a água dentro do calorímetro, no qual tem sua temperatura marcada pelo ~~termômetro~~ termômetro.

Então a cada minuto era registrado uma temperatura diferente se estabilizando em 21,2 °C no ~~10~~ ⁵ minutos.

1. 1ª etapa → Colocar a placa fotovoltaica no sol
- 2ª etapa → Colocar água no Calorímetro
- 3ª etapa → ligar o resistor para aquecer a água
- 4ª etapa → Anotar o valor de calor da água variando-se o termômetro.

Os fenômenos foi a transformação de energia solar em energia elétrica.

Condição entre as fontes: Placa Fotovoltaica → Calorímetro → Resistor → Termômetro

Questão 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.

2- A fonte de alimentação do dispositivo é a energia solar, o sol. A transformação de energia é do calor solar, para energia elétrica, que passa para energia térmica, que transfere para a água, aquecendo-a

2- A fonte de energia inicial que alimenta o dispositivo é a energia solar. Depois gera energia térmica, depois houve uma troca de calor entre a resistência e a água.

2. A fonte de energia inicial do sistema é a radiação solar, que foi transformada em energia elétrica e depois em energia térmica.

2- A placa fotovoltaica.

Calorímetro

2. Energia solar. Energia solar → Energia elétrica → Energia térmica

2- A principal fonte de energia é a luz solar que é absorvida pela placa solar e transformada em energia elétrica que é conduzida para resistência e é transformada em energia térmica que transfere o calor para água.

Questão 3: Descreva os aparelhos utilizados para realizar as medidas no nosso experimento. Qual a função de cada um?

3- Placa Fotovoltaica - transforma a radiação solar em energia elétrica.

Calorímetro - permite a troca de calor entre a resistência e a água sem perder calor para o ambiente.

Resistor - gera potência elétrica, fornece energia para a água.

Comprimetro - é a relação entre joule e a caloria.

Termometro - mede a temperatura.

3- Placa solar fotovoltaica, termometro, medidor digital, calorímetro.

3. A Placa fotovoltaica - que tem a função de converter a radiação solar.

Medidor elétrico - usado para medir intensidade corrente elétrica e a tensão em volts aplicado no resistor calorímetro - função de conservar o calor.



3- Calorímetro, Placa fotovoltaica, medidor de corrente, termometro, água resistor. Placa fotovoltaica capta o calor, levado por fios ao calorímetro que é o recipiente onde a água é aquecida e marcado pelo termometro que indica o calor e o resistor que indica a voltagem e a intensidade da corrente elétrica.



3. Placa Fotovoltaica : Recibir radiação solar
 Calorímetro : Responsável pelo transformação de energia solar em elétrica
 Resistor : Aquecer a água
 Termômetro : Medir a temperatura da água

3^a - Placa fotovoltaica - serve para transformar a radiação solar em energia elétrica
 - Calorímetro - Permite a troca de calor entre a resistência e a água sem perder calor do ambiente
 - Resistência - Ela gera potência elétrica, fornece energia para a água.
 - Ampímetro - é a relação entre tensão e a corrente
 - Termômetro - termômetro mede a temperatura

Questão 4. Quais as grandezas físicas envolvidas no experimento?

4- Energia, calor, temperatura, potência elétrica, densidade e tensão de corrente elétrica

4. Energia, calor, intensidade de corrente elétrica, temperatura e graus Celsius

4. $H_{mp} = 2,1, 2^{\circ}C$ em 8 min $P = 0,5208 \text{ W}$
 densidade de corrente elétrica $E = 249,9845$
 voltagem - $6,5 \text{ V}$ $Q = 2,0 \text{ cal}$
 Calor - Intensidade de
 potência elétrica - corrente - $0,08 \text{ A}$

4. Energia elétrica, mecânica.

4. Energia elétrica, térmica e calor.

4- temperatura, densidade corrente elétrica, calor, energia, potência elétrica, tensão

Questão 5: Descreva com suas palavras: Por que estamos realizando este experimento?

5- Estamos realizando esse experimento para aumentar o nosso conhecimento e entendermos melhor a matéria que estamos estudando

5- Para vermos a troca entre a energia solar para a térmica, assim esquentando a água. ex: o chuveiro.

5. Para observarmos na prática como ocorre uma transformação de energia.

5. Para estudar de um modo diferente, na prática, de fato, para entendermos melhor a matéria na prática, o que facilitou bastante a compreensão do que estamos estudando.

5. Para melhor aprendizado e obtenção de conhecimentos

5 - Para a gente ver como a energia solar pode aquecer a água. e ~~isso~~

Questão 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.

6- Entendemos parcialmente, a parte do experimento em si ficou bem clara, mas as centrais e fórmulas não ficou bem explicada

6- Sim, entendi a mudança de temperatura e energias

6. Sim, entendemos como que se passa a radiação solar que se transforma em energia elétrica, depois térmica e aquece a água.

6- Sim, entendemos que o experimento mostrou a energia elétrica aquecendo a água e foi bem fácil resolver as questões junto do professor.

6. Sim. Entendemos sobre o processo de conversão de energia, mas não sobre os cálculos sobre os assuntos.

6-^o Entendemos sobre a conversão de energia
e sobre a conversão dessa energia
em calor, para esquentar a água.