

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

**EXPERIMENTO PARA A ESTIMATIVA DA
IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL: UMA ABORDAGEM
PARA O ENSINO MÉDIO**

THIAGO DO NASCIMENTO PEREIRA GOMES

ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA

Sorocaba – SP

Maio de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**EXPERIMENTO PARA A ESTIMATIVA DA
IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL: UMA ABORDAGEM
PARA O ENSINO MÉDIO**

THIAGO DO NASCIMENTO PEREIRA GOMES

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
Maio de 2019

THIAGO DO NASCIMENTO PEREIRA GOMES

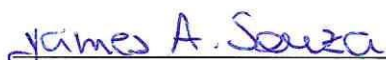
**EXPERIMENTO PARA A ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL:
UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

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, 03 de maio de 2019.

Orientador:



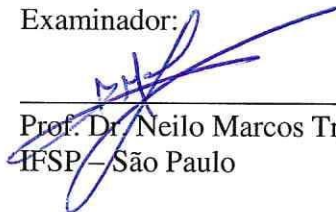
Prof. Dr. James Alves de Souza
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Sérgio Dias Campos
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Neilo Marcos Trindade
UFSP – São Paulo

Sorocaba
Maio de 2019

Gomes, Thiago do Nascimento Pereira

Experimento para a estimativa da irradiância solar total: uma abordagem para o ensino médio / Thiago do Nascimento Pereira Gomes. -- 2019.
172 f. : 30 cm.

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

Orientador: James Alves de Souza

Banca examinadora: Sérgio Dias Campos, Neilo Marcos Trindade

Bibliografia

1. Energia. 2. Calor. 3. Irradiância solar total. 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

Em primeiro lugar, dedico este trabalho à minha mãe, Maria, e ao meu pai Walderjan, os quais sempre reconheceram a importância da educação e me forneceram o apoio necessário para que eu pudesse prosseguir com meus estudos, mesmo durante momentos de dificuldade.

Dedico este trabalho a todos os meus professores, desde a educação básica, o que inclui o ensino infantil, fundamental e médio, até o ensino superior, o que inclui a graduação e pós-graduação. Graças à dedicação de muitos desses, desenvolvi apreço pelos estudos, especialmente em relação à física e matemática, e hoje tenho a honra e orgulho de também ser um professor. Em especial, dedico esse trabalho ao professor de matemática João Carlos Peçanha da Silva Leme, o primeiro a despertar em mim o gosto pela matemática e que me incentivou a seguir essa carreira, mesmo aos 10 anos de idade.

Este trabalho também é dedicado a todos os meus alunos, do passado, presente (se é que ele de fato existe) e futuro, especialmente àqueles que valorizam o trabalho do professor e se dedicam aos estudos.

AGRADECIMENTO

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. Adicionalmente, agradeço a bolsa de estudos concedida.

Sou imensamente grato ao Prof. Dr. James Alves de Souza pela paciência, compreensão, incentivo, cooperação, direcionamentos, auxílios e, principalmente, por algo de muito precioso que temos: o tempo. Sem tais fatores, jamais concluiria o presente trabalho.

Agradeço aos professores da escola em que o produto foi aplicado, em especial aos estimados colegas da área de ciências da natureza Ângelo Correa, Carlos Momberg, Emerson Nery e Roberto Ramos, os quais proporcionaram condições para que o produto educacional fosse aplicado, o que inclui ceder aulas e empréstimo de materiais. Adicionalmente, sou grato ao meu amigo Cláudio Oliveira, o qual providenciou materiais imprescindíveis para a realização do experimento.

Agradeço também àqueles que são a razão deste trabalho: os meus alunos! Em especial, expresso meus maiores agradecimentos àqueles que se dedicam e dão o máximo de si em cada atividade proposta em aula.

“Mas, quando refleti em todas as obras que minhas próprias mãos tinham feito e em todo o trabalho árduo que eu tinha realizado com tanto esforço, vi que tudo era vão, era correr atrás do vento; não havia nada de real valor debaixo do sol.”

Eclesiastes 2:11, Tradução do Novo Mundo da Bíblia Sagrada

*“And you run and you run to catch up with the sun, but it's sinking
Racing around to come up behind you again
The sun is the same in a relative way, but you're older
Shorter of breath and one day closer to death.”*

Pink Floyd

RESUMO

GOMES, Thiago do Nascimento Pereira. Experimento para a estimativa da irradiância solar total: uma abordagem para o ensino médio. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

A energia é a propriedade física mais fundamental no estudo da ciência e na compreensão do mundo que nos cerca. Essa grandeza é abordada com muita frequência no ensino de física em áreas como a Termodinâmica, pois esta trata de conceitos e aplicações referentes à transferência de energia através de calor e trabalho e suas aplicações. Para contextualizar tais conceitos em sala de aula optamos por tratar assuntos sobre a energia solar. O Sol é a nossa principal fonte de energia. Em média, a cada segundo, cerca de 1360 J de energia incide perpendicularmente sobre cada metro quadrado da atmosfera terrestre. Este valor é chamado de irradiância solar total, que pode ser calculado pela lei de Stefan-Boltzmann. Neste trabalho propomos uma atividade experimental que pode ser conduzida em qualquer nível de ensino para a obtenção de uma estimativa desse valor. O experimento é de simples reprodução e faz uso de materiais de fácil obtenção. Através dele é possível discutir conceitos como energia, temperatura, calor, radiação de corpo negro, propagação de erros e os fatores que atenuam o valor da energia solar que efetivamente atinge a superfície terrestre. A aplicação de nossa proposta foi feita em uma escola integral da rede pública de ensino do estado de São Paulo para 55 alunos da segunda série do ensino médio. Com o experimento desenvolvido mostramos a possibilidade de trabalhar com os alunos o método científico e a propagação de erros a partir do tratamento estatístico dos dados obtidos, demonstrando a importância da matemática na ciência. Baseado no engajamento e participação dos alunos no desenvolvimento do experimento e levantamento de hipóteses ao longo das aulas, consideramos que a aplicação foi muito bem-sucedida. A partir dos resultados obtidos pelos alunos foi possível aprimorar nossa proposta inicial e desenvolver um produto educacional mais elaborado, tanto experimentalmente quanto teoricamente, para a determinação da irradiância solar total através da lei de Stefan-Boltzmann.

Palavras-chave: Energia. Calor. Irradiância solar total. Radiação de corpo negro. Lei de Stefan-Boltzmann.

ABSTRACT

GOMES, Thiago do Nascimento Pereira. Experiment to estimate total solar irradiance: an approach to high school. 2019. Master's thesis (Master's degree in Physics Teaching) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

Energy is the most fundamental physical property in the study of science and in the understanding of the world around us. This physical quantity is often approached during the teaching of physics in areas like Thermodynamics, which concerns with the transference of energy through heat and work and its applications. In order to contextualize these concepts in classroom, we chose to discuss solar energy issues. The Sun is our main source of energy. Every second, each square meter of the atmosphere of Earth receives around 1360 J of energy from the Sun. Such value is called the total solar irradiance, which can be calculated by Stefan-Boltzmann's law. In this work we propose an experimental activity to estimate the total solar irradiance. The experiment is simple to reproduce and makes use of easily obtainable materials. With our purpose it is possible to discuss concepts such as energy, temperature, heat, blackbody radiation, error propagation and the causes for attenuating the value of solar energy that effectively reaches the Earth's surface. Our purpose was conducted in a public school of São Paulo (Brazil) for 55 high school students. With our experiment we show the feasibility of working the scientific method and how to perform the error propagation using the collected data, demonstrating the importance of mathematics in science. Based on the engagement and motivation of the students during the execution of the experiment and the results obtained, we consider that the application of our purpose was successful. From the results obtained by the students, we updated our initial proposal to a more elaborated educational product, both experimentally and theoretically, for the calculation of the total solar irradiance through Stefan-Boltzmann's law.

Keywords: Energy. Heat. Total solar irradiance. Black-body radiation. Stefan-Boltzmann's law.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Pôr do sol observado a partir da beira de um lago. | 1 |
| Figura 2.1 – Esquema do experimento para a determinação da irradiância solar com base na fusão do gelo. | 11 |
| Figura 2.2 – Esquema do experimento para a determinação da irradiância solar com base na variação da temperatura da água utilizando-se um pote de vidro. | 12 |
| Figura 3.1 – Um aquecedor localizado na ponta de um tubo em “J” submerso em água gera correntes de convecção, reveladas pelas sombras (causadas pelas reflexões sofridas pela luz na água a diferentes temperaturas). | 26 |
| Figura 3.2 – Espectro eletromagnético. | 27 |
| Figura 3.3 – Espectro de radiação em função da frequência. | 28 |
| Figura 3.4 – Espectro da radiação solar em função do comprimento de onda. | 29 |
| Figura 3.5 – Imagem em infravermelho com falsa cor revelando a radiação emitida por várias partes do corpo humano. A emissão mais forte (partes avermelhadas do rosto) vem das áreas mais quentes, ao passo que, as partes mais escuras, como a garrafa de bebida gelada, emitem muito pouco. | 29 |
| Figura 3.6 – Um orifício em uma cavidade se aproxima de um corpo negro ideal. A radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair dela antes de ser completamente absorvida. A radiação emitida pelo orifício (não mostrada) é, portanto, característica da temperatura das paredes da cavidade. | 30 |
| Figura 3.7 – Espectro contínuo da radiação emitida por um corpo negro a 4000 K, mostrando a região visível do espectro em cores. | 31 |
| Figura 3.8 – Gráfico da radiância espectral de um corpo negro para cinco temperaturas diferentes. | 32 |
| Figura 3.9 – Radiação de corpo negro obtida experimentalmente para diferentes temperaturas (linhas coloridas) e resultado obtido pela teoria clássica da radiação em cavidades (linha preta). Enquanto as previsões funcionavam bem para comprimentos de onda maiores, existe uma grande diferença para comprimentos de onda menores. | 34 |
| Figura 3.10 – Estrelas com diferentes cores, as quais são atribuídas às temperaturas superficiais diferentes. | 36 |
| Figura 3.11 – Emissão espectral de estrelas a diferentes temperaturas superficiais. | 36 |
| Figura 3.12 – A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia. O Sol está posicionado sobre a linha dos Trópicos de Câncer e de Capricórnio nos dias de solstício e posicionado sobre o Equador nos equinócios. | 39 |
| Figura 3.13 – Variação da duração do dia ao longo do ano em função da latitude. | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.14 – Ângulos notáveis na solarimetria. | 40 |
| Figura 3.15 – Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Os valores numéricos representam a fração de energia em cada processo radiativo na atmosfera. | 41 |
| Figura 3.16 – Componentes da irradiância solar. | 42 |
| Figura 3.17 – Conjunto experimental da proposta inicial montado. | 47 |
| Figura 3.18 – (a) A partir da sombra da haste projetada, s , na placa de isopor é possível encontrar o ângulo θ formado entre a radiação incidente e a haste de altura h . (b) Com base no ângulo encontrado, é possível calcular a irradiância solar total I_{ST} , a qual é perpendicular à superfície. | 49 |
| Figura 3.19 – Conjunto experimental final, mostrando que a placa de isopor foi substituída por uma placa de madeira pintada com a mesma tinta utilizada para pintar a chapinha de metal. | 51 |
| Figura 4.1 – Médias de proficiência da escola na Prova Brasil referentes ao nono ano do ensino fundamental. | 54 |
| Figura 4.2 – Série histórica de desempenho da escola no IDESP. | 54 |
| Figura 4.3 – Demonstração da inclinação da incidência da luz solar a partir de uma lanterna e uma folha de papel. | 60 |
| Figura 4.4 – Temperatura em função do tempo obtido pela Turma A. | 64 |
| Figura 4.5 – Temperatura em função do tempo obtido pela Turma B. | 65 |
| Figura 4.6 – Cálculo da potência solar local realizado pelo grupo I da Turma A. | 67 |
| Figura 4.7 – Hipóteses levantadas pelos alunos do Grupo I da Turma A para explicar a diferença no valor calculado para a potência solar local em comparação com dados da literatura. | 69 |
| Figura 4.8 – Propagação de erros desenvolvido pelo grupo I da Turma A. | 69 |
| Figura 4.9 – Cálculo da potência solar local realizado pelo grupo II da Turma B. | 70 |
| Figura 4.10 – Hipóteses levantadas pelos alunos do Grupo I da Turma B para explicar a diferença no valor calculado para a potência solar local em comparação com dados da literatura. | 71 |
| Figura 4.11 – Propagação de erros desenvolvido pelo grupo I da Turma B. | 71 |
| Figura 4.12 – Gráfico da temperatura em função do tempo obtido com os dados dos experimentos finais. | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 2.1 – Principais características das atividades experimentais de demonstração, verificação e investigação. | 9 |
| TABELA 2.2 – Graus de liberdade do professor/aluno em aulas de laboratório..... | 10 |
| TABELA 3.1 – Habilidades previstas para o ensino de ciências da natureza de acordo com a BNCC. | 17 |
| TABELA 3.2 – Habilidades previstas para o tema calor, ambiente e usos de energia no Currículo do Estado de São Paulo..... | 18 |
| TABELA 3.3 – Habilidades previstas para o tema calor, ambiente e usos de energia na Matriz de Avaliação Processual da Secretaria da Educação do Estado de São Paulo. | 19 |
| TABELA 3.4 – Calor específico de algumas substâncias. | 23 |
| TABELA 3.5 – Condutividade térmica de algumas substâncias. | 25 |
| TABELA 3.6 – Divisão do espectro solar em bandas de cores e regiões de energia..... | 38 |
| TABELA 3.7 – Componentes da irradiância solar..... | 43 |
| TABELA 3.8 – Materiais utilizados no experimento..... | 46 |
| TABELA 3.9 – Espectros de medição mais comuns na operação de termômetros infravermelhos e suas aplicações, mostrando a temperatura mínima (min.)..... | 46 |
| TABELA 3.10 – Unidades de medida utilizadas para as grandezas envolvidas no experimento. | 49 |
| TABELA 4.1 – Potência solar local por metro quadrado (P_S) calculada pelos alunos dos grupos I, II, III e IV da Turma A utilizando a eq.(3.20), como mostrado na figura 4.6. | 68 |
| TABELA 4.2 – Potência solar local por metro quadrado (P_S) calculada pelos alunos dos grupos I, II, III e IV da Turma B utilizando a eq.(3.20), como mostrado na figura 4.9. | 70 |
| TABELA 4.3 – Irradiância solar local (I_{SL}) calculada para os três experimentos, Exp.1, 2 e 3, utilizando a lei de Stefan-Boltzmann dada pela eq.(3.15)..... | 74 |
| TABELA 4.4 – Propagação de erro considerando os três experimentos realizados para a determinação da irradiância solar local a partir da lei de Stefan-Boltzmann..... | 76 |
| TABELA 4.5 – Propagação de erro dos resultados obtidos nos três experimentos para a estimativa da irradiância solar total..... | 76 |
| TABELA 4.6 – Valores da altura da haste (h), tamanho da sombra projetada (S) na placa de madeira e ângulos formados em relação à normal (θ) e em relação à superfície (α) obtidos nos três experimentos, Exp.1, 2 e 3, para o cálculo da irradiância solar total $I_{ST}/2$ perpendicular à superfície da chapinha de metal, dado pela eq.(3.26) ou (3.27). | 76 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – *Agência Nacional de Energia Elétrica*

BNCC – *Base Nacional Comum Curricular*

CAPES – *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*

CRESESB – *Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito*

ECOA – *Ecologia e Ação*

FMC – *Física Moderna e Contemporânea*

IDESP – *Índice de Desenvolvimento da Educação do Estado de São Paulo*

LDB – *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

PCN – *Parâmetros Curriculares Nacionais*

PCN+ – *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais*

PEI – *Programa de Ensino Integral*

PhET – *Physics Education Technology*

SAEB – *Sistema de Avaliação da Educação Básica*

SARESP – *Sistema de Avaliação de Rendimento Escolar do Estado de São Paulo*

SciELO – *Scientific Electronic Library Online*

SI – *Sistema Internacional de Unidades*

SORCE – *Solar Radiation and Climate Experiment*

TIM – *Total Irradiance Monitor*

UFPR – *Universidade Federal do Paraná*

UFRGS – *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

USP – *Universidade de São Paulo*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS | 4 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA | 6 |
| 2.1 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE FÍSICA: BENEFÍCIOS E DIRECIONAMENTOS | 6 |
| 2.2 REVISÃO DA LITERATURA | 11 |
| 2.3 JUSTIFICATIVA | 12 |
| CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL | 14 |
| 3.1 ENSINO DE COMPETÊNCIAS E HABILIDADES | 14 |
| 3.1.1 Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e suas Orientações Complementares (PCN+) | 15 |
| 3.1.2 Base Nacional Comum Curricular (BNCC) | 16 |
| 3.1.3 Currículo do Estado de São Paulo | 17 |
| 3.1.4 Matriz de Avaliação Processual | 18 |
| 3.2 CONTEÚDO DE FÍSICA QUE PODE SER ABORDADO COM O EXPERIMENTO PROPOSTO..... | 19 |
| 3.2.1 Energia, Trabalho e Calor | 19 |
| 3.2.2 Temperatura | 21 |
| 3.2.3 Calor específico | 22 |
| 3.2.4 Transferência de energia através do calor | 24 |
| 3.2.4.1 Condução | 24 |
| 3.2.4.2 Convecção | 25 |
| 3.2.4.3 Radiação | 26 |
| 3.2.5 Radiação de corpo negro | 29 |
| 3.2.5.1 Lei de Rayleigh-Jeans e a “catástrofe do ultravioleta” | 33 |
| 3.2.5.2 Teoria de Planck e a hipótese quântica..... | 34 |
| 3.2.6 Irradiância solar | 37 |
| 3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO..... | 44 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.1 Versão inicial do experimento: determinação da irradiância solar local através da variação da temperatura..... | 45 |
| 3.3.2 Versão final do experimento: determinação da irradiância solar total através do equilíbrio térmico | 51 |
| CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO | 53 |
| 4.1 LOCAL DE APLICAÇÃO..... | 53 |
| 4.2 METODOLOGIA DA APLICAÇÃO..... | 56 |
| 4.3 PRIMEIRO ENCONTRO: DISCUSSÃO INICIAL DA SITUAÇÃO-PROBLEMA E APRESENTAÇÃO DOS CONTEÚDOS DE FÍSICA | 57 |
| 4.3.1 Turma A | 57 |
| 4.3.2 Turma B | 61 |
| 4.4 SEGUNDO ENCONTRO: EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO | 63 |
| 4.4.1 Turma A | 63 |
| 4.4.2 Turma B | 65 |
| 4.5 TERCEIRO ENCONTRO: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS | 66 |
| 4.5.1 Turma A | 66 |
| 4.5.2 Turma B | 70 |
| 4.6 AUTOAVALIAÇÃO E REFORMULAÇÃO DO EXPERIMENTO..... | 72 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 78 |
| REFERÊNCIAS | 82 |
| APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL..... | 89 |
| APÊNDICE B - PROPAGAÇÃO DE ERROS | 137 |
| APÊNDICE C - REGISTRO DAS RESPOSTAS DOS ALUNOS..... | 142 |
| ANEXO A - EXCERTOS DO MANUAL DE INSTRUÇÕES DO TERMÔMETRO INFRAVERMELHO..... | 167 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Ministrar aulas de Física em qualquer nível de ensino envolve mais do que demonstrar e descrever matematicamente fenômenos e propriedades físicas de um determinado sistema ou colocar os alunos para resolverem exercícios que tratam de sistemas ideais em que são considerados processos com ausência de atrito, cordas e polias com massas desprezíveis, entre outros. Ensinar Física envolve possibilitar que o aluno estabeleça um contato íntimo com a natureza para desvendar e compreender um pouco mais acerca de seus mistérios. Para que o professor possa atingir tal objetivo, os experimentos atuam como poderosos instrumentos. Estes permitem que o aluno conheça a realidade de fenômenos e a validade das aproximações dos nossos modelos teóricos para descrevê-los. Este contato íntimo pode ser realizado da maneira mais simples e barata possível, bastando o professor abrir a porta da sala de aula e pedir para os alunos olharem para o céu. Em um dia ensolarado é possível ver nuvens se movendo ou um céu limpo na cor azul que tende ao laranja e vermelho ao entardecer (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Pôr do sol observado a partir da beira de um lago.



Fonte: LAGO, G. [Pôr do sol em Palmas encanta moradores pela exuberância](http://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2016/05/por-do-sol-em-palmas-encanta-moradores-pela-exuberancia.html). “Disponível em:” <http://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2016/05/por-do-sol-em-palmas-encanta-moradores-pela-exuberancia.html>. Acesso em: 29 nov. 2018.

Em um dia chuvoso aparecem nuvens carregadas que produzem relâmpagos entre elas e entre elas e a superfície da Terra. Em decorrência desses relâmpagos, temos os trovões. Vemos a chuva cair em diferentes inclinações e, ao final de algumas tempestades, é possível apreciar a beleza das cores de um arco-íris. E o que dizer sobre o céu noturno? As estrelas fornecem um cenário inspirador para os alunos se questionarem acerca da origem da vida e do universo. O movimento da lua em torno da Terra, os eclipses lunares e solares, entre muitos outros fenômenos astronômicos, despertam interesse e curiosidade nos alunos. Todos esses experimentos fornecidos pela natureza podem ser explorados através da Física.

Neste trabalho focaremos nossa atenção para o Sol. Quanta Física podemos explorar ao descrever um belo pôr do sol, como o mostrado na figura 1.1? Da perspectiva da mecânica, podemos analisar a trajetória desenvolvida pelo astro ao percorrer um arco no céu até o momento em que começa a desaparecer por trás da linha do horizonte. Astronomicamente falando, é possível abordar a influência gravitacional que ele exerce sobre os corpos do sistema solar, em especial sobre nosso planeta. Tal análise pode ser feita matematicamente partindo-se da proposição de Newton, de que a força gravitacional é proporcional ao produto da massa entre dois corpos pela razão do quadrado da distância que os separa, ou sob a ótica de Einstein, de que a gravidade é o resultado da deformação do tecido do espaço-tempo ao seu redor, causada pelas massas dos corpos. Na terminologia, podemos abordar a grande quantidade de energia radiante que o Sol transfere à Terra a todo momento, bem como sua influência em fenômenos e processos naturais que ocorrem na superfície terrestre.

Utilizando um prisma é possível analisar a composição da luz proveniente do Sol, bem como fenômenos referentes a refração e reflexão dos raios luminosos, o que possibilita a percepção do mundo ao nosso redor e a apreciação de uma bela paisagem. Na área da eletricidade, podemos descrever o modo como a luz solar pode ser utilizada para gerar correntes elétricas através do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico para obtermos energia de um modo não prejudicial ao meio ambiente. Já na Física moderna e contemporânea é possível analisar a fusão dos núcleos atômicos no interior do Sol, o que gera uma quantidade exorbitante de energia a cada segundo. Podemos analisar também como a fusão nuclear promove a sintetização de elementos cada vez mais pesados enquanto seu tempo de vida como uma estrela da sequência principal vagarosamente vai diminuindo.

É possível abordar uma quantidade ilimitada de conceitos relacionados ao Sol em um curso de Física. Apesar dos exemplos citados serem discutidos em diferentes áreas da Física, todos possuem a manifestação de uma grandeza, presente em qualquer sistema, chamada de energia. Entender como a energia se manifesta e o modo como ela se transforma é vital para a

compreensão do mundo que nos cerca. Por essa razão, ela é um dos temas centrais no estudo da Física.

Dentre as diversas formas em que a energia pode ser abordada no ensino de Física, podemos destacar sua importância na compreensão da termodinâmica. Isso é perceptível nos documentos que orientam o ensino de Física, seja em âmbito nacional ou estadual. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), por exemplo, destacam que devem ser analisados e investigados fenômenos que contemplem a análise do calor, dos processos que o envolvem e das transformações de energia, com o intuito de que o aluno consiga construir uma visão mais ampliada acerca do conceito de energia. Além disso, discutir fontes, processos e maneiras em que a energia se transforma ou é “produzida” pode propiciar ao educando a oportunidade de entender como o domínio desse tema está ligado à trajetória humana, bem como o modo em que a própria humanidade tem se deparado e lidado com problemas relacionados a fenômenos dessa natureza (BRASIL, 2000).

As Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) definem “calor, ambiente e usos de energia” como um tema estruturador no ensino de Física. Esse documento destaca que o estudo do calor possibilita o desenvolvimento de competências e habilidades requeridas do aluno ao lidar com fontes de energia e com as propriedades e processos térmicos que envolvem diferentes tipos de materiais. Sugere-se, novamente, a abordagem da “produção” e aplicação dos diversos tipos de energia na sociedade, analisando problemas oriundos a recursos e obtenção de energia no mundo atual (BRASIL, 2002).

Com relação aos documentos orientadores a nível estadual, o Currículo do Estado de São Paulo, embasado nos documentos supracitados, aponta que reconhecer fontes e sistemas que abrangem a troca de calor no dia a dia é uma forma de compreender o comportamento da matéria com relação à variação de temperatura. Além disso, as diferentes formas de troca de energia através do calor (condução, convecção e irradiação) bem como seus modelos explicativos possibilitam ao aluno compreender a natureza do calor e as maneiras que ele se manifesta (SÃO PAULO, 2012).

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A Termodinâmica tem como objeto de estudo as propriedades gerais de sistemas físicos em equilíbrio e seus resultados são obtidos a partir de dados experimentais e de duas leis básicas, chamadas de Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica (BORGNAKKE & SONNTAG, 2013). Estas leis são decorrentes das diferenças entre dois métodos de transferência de energia, chamados de calor e trabalho. Como o conceito de calor surge na termodinâmica, sendo responsável pela transferência de energia térmica entre dois corpos devido a diferença de temperatura entre eles, é imprescindível que o aluno compreenda o que é o calor e em quais processos ele está presente.

O experimento é essencial para um melhor entendimento destes conceitos. No entanto, não é raro encontrar situações em que tais assuntos são abordados de maneira excessivamente abstrata no ensino de Física. A situação torna-se ainda mais agravante quando a matemática é utilizada para quantificar grandezas físicas, pois muitos alunos acreditam que o calor é algo que está presente nos corpos e pode ser medido (KÖHNLEIN & PEDUZZI, 2002; HÜLSENDEGER, COSTA & CURY, 2006). Entre outros fatores, isso se deve ao modo extremamente abstrato e formal com que a matemática é abordada durante as aulas (KNIJNIK & SILVA, 2008). Assim, a utilização de fórmulas de um modo descontextualizado durante a resolução mecânica de exercícios também pode apresentar-se como um entrave na compreensão dos conceitos físicos envolvendo calor.

Dessa forma, nossa motivação para o desenvolvimento deste trabalho é auxiliar os professores no tratamento de conceitos e fenômenos físicos em que o calor está presente. Nossa proposta consiste especificamente de uma atividade experimental desenvolvida para a determinação da irradiação solar total. Esta grandeza representa a quantidade de energia solar que atinge um metro quadrado da superfície terrestre a cada segundo. Tal atividade possibilita uma abordagem contextualizada não só sobre o calor, mas também de outros conceitos fundamentais em termodinâmica, como temperatura, transferência e absorção de energia, e sobre processos físicos que ocorrem na atmosfera e que atenuam o valor da energia que efetivamente atinge o solo. Além da experimentação, desenvolvemos a modelagem do sistema através das relações matemáticas que existem entre as grandezas físicas envolvidas e fizemos a propagação de erros dos resultados obtidos. Esperamos que, com uma utilização mais contextualizada da matemática, ela possa assumir novos e reais significados ao aluno, auxiliando-o numa compreensão mais abrangente da Física.

Nossa proposta permite também abordar temas atuais e de extrema importância para o meio ambiente como obtenção de energia limpa, economia de energia, utilização de placas solares e preservação do meio ambiente. A energia solar que atinge a Terra por ano representa mais que 15 mil vezes o consumo mundial de energia. Alguns benefícios referentes à sua utilização é o fato de que ela é gratuita, não polui durante sua utilização, a manutenção das centrais energéticas é mínima e os painéis solares têm se tornado cada vez mais baratos ao mesmo tempo em que sua eficiência tem aumentado, fazendo da energia solar algo economicamente viável. Além disso, a obtenção de energia através de placas solares é muito útil em locais remotos ou de difícil acesso e diminui a perda de energia que ocorre em sistemas de transmissões de longa distância. Outro ponto favorável é o fato de que o Brasil possui um grande potencial energético (ECOIA, 2019). Por essas razões, ter um conhecimento acerca do valor da energia solar incidente sobre a Terra é de extrema importância para uma educação que vise abordar tais temas relevantes, com o objetivo de promover uma conscientização ambiental aos alunos.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

2.1 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE FÍSICA: BENEFÍCIOS E DIRECIONAMENTOS

A utilização de atividades experimentais no ensino de Física apresenta diversos aspectos positivos, dentre os quais destacamos dois: o atendimento à demanda educacional e os impactos benéficos no processo de ensino-aprendizagem de Física. Com respeito às demandas educacionais, a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) determina que o ensino médio, etapa concludente da educação básica, deve propiciar ao aluno o desenvolvimento de competências e habilidades necessárias para a construção de sua cidadania, resultando em uma atuação de modo crítico na sociedade (BRASIL, 1996). Para que a educação pudesse atingir tais objetivos, foram elaborados os PCN. Eles comentam que o ensino de Física deveria receber novos enfoques, novas dimensões, possibilitando um conhecimento contextualizado e articulado com situações reais e cotidianas dos alunos. Ao utilizar situações reais no ensino, aquilo que se aprende assume novos e duradouros significados. Para possibilitar tal tipo de abordagem, além de se considerar a realidade dos alunos, seria imprescindível tratar de problemas e desafios que despertassem sua curiosidade (BRASIL, 2000). Nesse sentido, as atividades experimentais podem partir de situações-problema e questionamentos reais utilizando-se do contexto do aluno, possibilitando ao educando obter informações e resolver problemas práticos do mundo ao seu redor. Isso permitiria que aquilo que se aprende assumia significados efetivos e reais, além de propiciar o desenvolvimento do pensamento crítico frente a problemas sociais que envolvem o uso de energia.

Entre as principais contribuições que as práticas experimentais podem fornecer ao processo de ensino-aprendizagem de Física, Oliveira (2010) cita alguns exemplos: motivam e despertam a atenção dos alunos; desenvolvem a capacidade de trabalhar em grupo; desenvolvem a iniciativa pessoal e a tomada de decisões; estimulam a criatividade; aprimoram a capacidade de observação e registro de informações; auxiliam na aprendizagem da análise de dados e elaboração de hipóteses para os fenômenos; propiciam a aprendizagem de conceitos científicos; ajudam a identificar e corrigir erros conceituais dos alunos; auxiliam na compreensão da natureza da ciência e o papel do cientista numa investigação; possibilitam a compreensão das relações entre ciência, tecnologia e sociedade; aprimoram habilidades manipulativas. Tendo em vista todas essas contribuições ao processo de ensino-aprendizagem, a utilização das atividades experimentais é fortemente recomendada pelos documentos oficiais que orientam a educação.

A grande importância em tratar do tema atividades experimentais é também evidenciada pela quantidade cada vez maior de artigos sobre o assunto, os quais podem ser encontrados através de buscas em sites especializados, como, por exemplo, o Google Acadêmico, o SciELO (*Scientific Electronic Library Online*) e o Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Em buscas rápidas, é possível encontrar propostas experimentais para diversos assuntos dentro da Física, como mecânica, ondulatória, termologia, eletricidade, magnetismo etc. É possível também encontrar alguns trabalhos que apresentam um levantamento bibliográfico sobre artigos que abordam atividades experimentais publicados em periódicos de grande relevância, os quais também podem servir de ponto de partida para a consulta dos professores (MOREIRA & PENIDO, 2009; JARDIM & GUERRA, 2017).

Quanto aos enfoques que as atividades experimentais podem receber, Araújo & Abib (2003) apresentam três modalidades. Elas podem ser classificadas como atividades de demonstração/observação, atividades de verificação e atividades de investigação. As atividades de demonstração/observação são experimentos executados pelo professor, sendo os alunos meros observadores. Tais atividades podem ser fechadas ou abertas. As classificadas como fechadas são experimentos utilizados para a simples apresentação de algum fenômeno, sendo a atividade centrada no professor. As classificadas como abertas permitem uma maior flexibilidade, visto que envolvem discussões, levantamento de hipóteses e reflexão crítica acerca do que se observa. Naturalmente, as atividades demonstrativas abertas são preferíveis em relação às fechadas. Quando tal atividade ocorre de modo compartilhado e interativo, emulando situações que fazem parte do cotidiano do aluno, ela pode melhorar o

desenvolvimento e fortalecimento dos conceitos relacionados com a atividade (GASPAR & MONTEIRO, 2005).

As atividades de verificação consistem em experimentos utilizados na comprovação da validade de uma lei ou a determinação do valor de alguma grandeza física. Tais atividades facilitam a compreensão dos princípios que determinam o comportamento dos conceitos físicos estudados e pode promover uma aprendizagem significativa, tendo em vista que envolve uma participação mais ativa do aluno. Além disso, podem possibilitar a realização de generalizações e extrapolações dos limites do experimento, elaborando-se novas hipóteses e examinando-se novas situações.

As atividades investigativas consistem na ausência de roteiros estruturados. A partir de alguma situação-problema os alunos devem elaborar hipóteses e testá-las através de roteiros elaborados por eles mesmos, aprimorando suas capacidades de observação e descrição dos fenômenos físicos. Tais atividades permitem a reelaboração de conceitos, a reflexão e o avanço intelectual dos alunos. Nesses casos, o professor atua como um mediador, auxiliando, direcionando e estimulando os alunos. Naturalmente, tais atividades demandam um tempo maior de estudo, execução e análise. No entanto, o resultado pode ser uma melhor compreensão dos fenômenos físicos. A Tabela 2.1 apresenta uma síntese com os tipos de abordagens dos experimentos em seus diferentes aspectos.

Aparentemente, à primeira vista, pode-se encarar as atividades investigativas como as mais recomendáveis para o ensino de Física. No entanto, elas demandam uma certa experiência dos alunos no desenvolvimento de experimentos, os quais podem não apresentar no momento as competências e habilidades requeridas para o trabalho. Portanto, em uma situação dessas, as atividades de verificação com um roteiro estruturado podem contribuir para o desenvolvimento de uma maturidade científica do aluno, requisito básico para as atividades investigativas. Embora as atividades de verificação possam ser encaradas por alguns como pouco contribuintes para o processo da aprendizagem de conceitos, isso pode ser superado quando o experimento parte de uma situação-problema real, em que o professor questiona e discute junto com os alunos os fenômenos físicos envolvidos no processo do desenvolvimento da atividade. Além disso, com base no produto educacional que propomos neste trabalho, a atividade experimental não se trata de uma simples verificação de um valor universal, pois o resultado do cálculo da irradiação solar não é inteiramente previsível, tendo em vista que ela varia de local para local.

TABELA 2.1 – Principais características das atividades experimentais de demonstração, verificação e investigação.

| | <i>Demonstração</i> | <i>Verificação</i> | <i>Investigação</i> |
|-----------------------------------|---|--|--|
| Papel do professor | Executar o experimento; fornecer as explicações para os fenômenos. | Fiscalizar a atividade dos alunos; diagnosticar e corrigir erros. | Orientar as atividades; incentivar e questionar as decisões dos alunos. |
| Papel do aluno | Observar o experimento; em alguns casos, sugerir explicações. | Executar o experimento; explicar os fenômenos observados. | Pesquisar, planejar e executar a atividade; discutir explicações. |
| Roteiro de atividade experimental | Fechado, estruturado e de posse exclusiva do professor. | Fechado e estruturado. | Ausente ou, quando presente, aberto ou não estruturado. |
| Posição ocupada na aula | Central, para ilustração; ou após a abordagem expositiva. | Após a abordagem do conteúdo em aula expositiva. | A atividade pode ser a própria aula ou pode ocorrer previamente à abordagem do conteúdo. |
| Algumas vantagens | Demandam pouco tempo; podem ser integradas à aula expositiva; úteis quando não há recursos materiais ou espaço físico suficiente para todos os alunos realizarem a prática. | Os alunos têm mais facilidade na elaboração de explicações para os fenômenos; é possível verificar através das explicações dos alunos se os conceitos abordados foram bem compreendidos. | Os alunos ocupam uma posição mais ativa; há espaço para criatividade e abordagem de temas socialmente relevantes; o “erro” é mais aceito e contribui para o aprendizado. |
| Algumas desvantagens | A simples observação do experimento pode ser um fator de desmotivação; é mais difícil para manter a atenção dos alunos; não há garantia de que todos estarão envolvidos. | Pouca contribuição do ponto de vista da aprendizagem de conceitos; o fato dos resultados serem relativamente previsíveis não estimula a curiosidade dos alunos. | Requer maior tempo para sua realização. Exige um pouco de experiência dos alunos na prática de atividades experimentais. |

Fonte: Oliveira (2010, p. 151).

Falando sobre o papel que as práticas experimentais têm no desenvolvimento de uma enculturação científica dos alunos, Carvalho (2011) aborda que as atividades devem ser capazes de possibilitar a superação de concepções empírico-indutivistas da ciência, promover a argumentação dos alunos, incorporar as ferramentas matemáticas e transpor o novo conhecimento para a vida social. O professor tem o papel de tornar o problema experimental sempre claro ao estudante, realizando e modificando perguntas sempre que possível, mediando a resolução dos problemas pelos alunos.

Pella (1969), conforme citado por Carvalho (2011), aborda alguns graus de liberdade que existem nos papéis dos professores e alunos durante a realização de uma atividade experimental, os quais apresentamos na Tabela 2.2. O grau I de liberdade ocorre quando os alunos apenas obtêm dados, sendo que o problema, as hipóteses, o plano de trabalho e as conclusões já estão definidos. Já no grau II, o aluno tem a liberdade de tirar conclusões a partir dos dados que obtiveram. Em uma atividade de verificação, isso exigiria mudar a colocação do problema. Por exemplo, ao invés de se propor que o aluno prove que a aceleração da gravidade é aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$, pode-se perguntar qual a aceleração da gravidade que pode ser obtida no local em que se realiza o experimento e o porquê. O grau III ocorre quando os próprios alunos devem desenvolver o plano de trabalho para a resolução do problema. No grau IV os alunos apenas recebem o problema, ficando responsáveis por todos os demais passos do experimento. Já no grau V, os próprios alunos propõem os problemas.

TABELA 2.2 – Graus de liberdade do professor/aluno em aulas de laboratório.

| | <i>Grau I</i> | <i>Grau II</i> | <i>Grau III</i> | <i>Grau IV</i> | <i>Grau V</i> |
|-------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Problema | Professor | Professor | Professor | Professor | Aluno |
| Hipóteses | Professor | Professor | Professor | Aluno | Aluno |
| Plano de trabalho | Professor | Professor | Aluno | Aluno | Aluno |
| Obtenção de dados | Aluno | Aluno | Aluno | Aluno | Aluno |
| Conclusões | Professor | Aluno | Aluno | Aluno | Aluno |

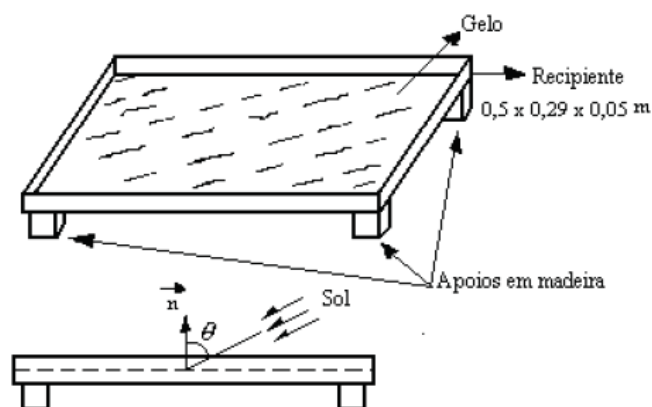
Fonte: Adaptado de Pella (1969).

Embora as atividades de grau IV e V possam ser encaradas como as mais recomendadas no ensino de Física, novamente retoma-se o fato de que muitos alunos ainda não possuem a experiência científica necessária para o desenvolvimento de uma prática experimental como essas. Nesses casos, atividades em que o problema e o plano de trabalho são propostos pelo professor e os alunos ficam responsáveis pela obtenção de dados e elaboração de conclusões, através de uma discussão conjunta de hipóteses, podem contribuir para o aprimoramento de competências e habilidades requeridas no desenvolvimento de atividades com um nível maior de complexidade.

2.2 REVISÃO DA LITERATURA

A utilização de experimentos que envolvem a obtenção do valor da irradiação solar em um determinado local não é algo inédito (GANIEL & KEDEM, 1983; BARTLETT, 1986). Perottoni & Zorzi (1993), por exemplo, propõem a determinação desse valor com base no volume de água resultante da fusão do gelo exposto ao Sol. Inicialmente, um recipiente com uma fina camada de gelo é colocado ao ar livre, protegido do Sol, como ilustrado na figura 2.1. Após o início da fusão do gelo, mede-se o volume de água a cada dez minutos, com o objetivo de se determinar qual o volume de gelo fundido devido à convecção do ar. Depois, um novo recipiente com gelo, semelhante ao anterior, é exposto ao Sol e novamente mede-se o volume de água a cada dez minutos para, nesse caso, obter o volume de gelo fundido em decorrência da convecção e irradiação solar ao mesmo tempo. Excluindo-se o valor da medição realizada sob a sombra da medição realizada sob o Sol, é possível identificar o quanto do gelo foi fundido em água devido exclusivamente à radiação solar. Com base nos dados obtidos, é possível calcular o valor da irradiação solar local.

Figura 2.1 – Esquema do experimento para a determinação da irradiância solar com base na fusão do gelo.



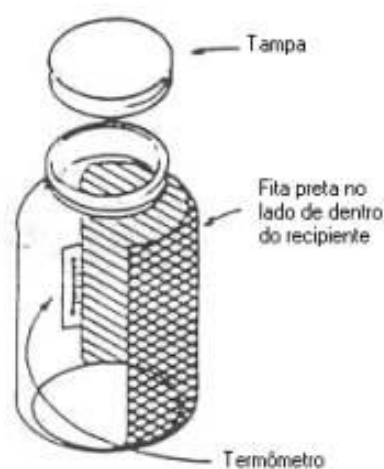
Fonte: Perottoni & Zorzi (1993).

Outra proposta semelhante sugere utilizar dois recipientes com gelo, deixando um exposto ao Sol e outro na sombra, ambos próximos um do outro. Tal como no experimento citado anteriormente, é possível obter o volume de gelo fundido em decorrência exclusivamente da radiação solar. O diferencial desse experimento reside na sugestão de misturar nanquim à água que será congelada, com o objetivo de que ela adquira uma tonalidade escura, aumentando

a quantidade de energia absorvida pelo gelo e, conseqüentemente, tornando o resultado mais preciso (UFRGS, 2018).

Saraiva & Fraquelli (2018) propõem a utilização de um pote de vidro de conserva com metade de seu interior coberto por um plástico preto para permitir uma maior absorção de energia pela água, conforme apresentado na figura 2.2. O vidro deve ser preenchido com água e um termômetro deve ser acoplado ao sistema. O experimento deve ser realizado tanto na sombra quanto exposto ao Sol, com o intuito de se obter a alteração de temperatura exclusivamente em função da radiação solar, semelhante aos procedimentos citados anteriormente. Frazzoli (2012) propõe a utilização de um recipiente de isopor no formato de um copo, com o interior totalmente pintado de preto, dentro do qual será depositada a água. O recipiente deve ser coberto por um filme PVC transparente e exposto ao Sol. Utilizando-se um termômetro, a variação da temperatura da água é registrada e, a partir desse valor, obtêm-se o valor da irradiação solar.

Figura 2.2 – Esquema do experimento para a determinação da irradiação solar com base na variação da temperatura da água utilizando-se um pote de vidro.



Fonte: Saraiva & Fraquelli (2018).

2.3 JUSTIFICATIVA

Nas atividades descritas na seção anterior utiliza-se a variação da temperatura da água para a aquisição de dados, sendo necessário a reprodução de dois experimentos, um sob a sombra e outro sob o Sol. Como a água possui alta inércia térmica, traduzida pelo seu alto valor

de calor específico $c = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, o sistema pode levar um tempo considerável para que o seu equilíbrio térmico seja atingido, dependendo da quantidade de água utilizada, podendo inviabilizar a utilização destes experimentos em sala de aula.

No experimento proposto nesse trabalho sugerimos a utilização da variação de temperatura de uma pequena e fina chapa metálica. O calor específico do alumínio, por exemplo, é em torno de cinco vezes menor que o da água ($c = 0,22 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$), de modo que o tempo de resposta do sistema para que o mesmo atinja o equilíbrio será bem menor se compararmos ambos, água e alumínio, na mesma quantidade. Para outros metais como a prata, ouro e ferro o calor específico é ainda menor. Isso permite que o experimento seja realizado num tempo menor em comparação com os experimentos que fazem uso da água, otimizando o tempo disponível na aula. Além disso, o experimento nos permitiu explorar a utilização da lei de Stefan-Boltzmann e a aproximação de considerar o sistema como um corpo negro, o que possibilita abordar uma infinidade de outros assuntos relacionados à Física Moderna.

A atividade experimental proposta é considerada como sendo de verificação, ainda que o resultado não seja inteiramente previsível. No entanto, ela pode tornar-se de investigação, dependendo do direcionamento da discussão que o professor realizar com os alunos. Seu grau de liberdade permeia entre o III e o IV, uma vez que o professor apenas lança o problema e apresenta a proposta. Porém, dependendo dos rumos tomados pela aula introdutória, é possível que os próprios alunos sugiram uma proposta de trabalho que se adeque ao experimento que será desenvolvido.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

“A Física estuda as leis de várias formas de movimento da matéria como o movimento mecânico, movimento térmico, processos eletromagnéticos, processos atômicos e nucleares e o movimento de micropartículas. A medida comum do movimento material em suas transformações de uma forma para outra é chamada energia.” – I. P. Bazarov (1969, p. 10).

3.1 ENSINO DE COMPETÊNCIAS E HABILIDADES

Recentemente, o foco da educação tem passado do ensino de conteúdos para o ensino de competências e habilidades. No entanto, isso não significa que os conteúdos específicos de cada disciplina em si sejam prejudicados. Agora eles atuam como um meio para que as competências e habilidades sejam consolidadas. No caso específico da Física é possível utilizar várias metodologias com esse objetivo, como aulas expositivas, desenvolvimento de atividades, aulas experimentais, vídeos, simuladores, etc. A seguir, apresentamos algumas competências e habilidades previstas em documentos orientadores do ensino e que se relacionam com a aplicação do nosso produto educacional, as quais são possíveis de serem consolidadas através da metodologia de aplicação. Obviamente, é impossível atingir e avaliar todas as habilidades apresentadas a seguir com apenas algumas aulas durante a aplicação do produto educacional. Portanto, o professor deve escolher as habilidades mais convenientes, dando-lhes a necessária atenção e desenvolvendo métodos que lhe permita avaliar a consolidação ou não dessas habilidades.

3.1.1 Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e suas Orientações Complementares (PCN+)

Os PCN+, desenvolvidos com base nos PCN, apresentam uma série de competências e habilidades em Física esperadas do aluno ao final do ensino médio (BRASIL, 2000, 2002). Uma das competências apresentadas é a de “representação e comunicação”. Especificamente na Física, e de acordo com o conteúdo que é abordado no produto educacional, destacamos seis habilidades requeridas dos alunos nessa área. A primeira é a de saber reconhecer e utilizar de maneira correta símbolos, códigos e nomenclaturas de grandezas da Física, como identificar temperaturas, por exemplo. A segunda é a de saber ler e interpretar corretamente gráficos, tabelas, diagramas e esquemas. Um exemplo seria um gráfico que apresenta uma variação de temperatura. A terceira habilidade é a de construir sentenças ou esquemas com o objetivo de resolver problemas, bem como construir tabelas e transformá-las em um gráfico. A quarta habilidade é a de compreender que tabelas, gráficos e expressões matemáticas são maneiras diferentes de representar a mesma relação, cada um possuindo pontos positivos e negativos, sendo que o aluno deve desenvolver a capacidade de optar por aquela que melhor se adapta à situação. O aluno também deve ser capaz de compreender o significado de cada uma dessas linguagens. A quinta habilidade envolve relatar fenômenos que envolvam conceitos físicos, para que os alunos possam apresentar de modo claro e objetivo suas considerações e utilizar corretamente a linguagem científica. A sexta habilidade envolve elaborar relatórios analíticos, discutindo os dados e resultados obtidos através de experimentos, fazendo uso de uma linguagem científica apropriada.

Na área “investigação e compreensão”, destacamos cinco habilidades. A primeira é a de que o aluno deve ser capaz de reconhecer a natureza dos fenômenos envolvidos em uma situação-problema ou problema concreto e identificar as grandezas físicas relevantes em cada caso. Por exemplo, ao lidar com fenômenos envolvendo calor, o aluno deve ser capaz de identificar fontes, processos envolvidos e seus efeitos, além de reconhecer variações de temperatura como um indicador importante. A segunda habilidade é a de identificar regularidades e associar fenômenos que ocorrem em situações similares com a finalidade de utilizar leis que tratam dessas regularidades ao realizar análises e previsões de situações do cotidiano. A terceira habilidade é a de que o aluno seja capaz de utilizar formas e instrumentos de medida adequados para cada situação e estabelecer comparações quantitativas. A quarta habilidade envolve utilizar o conhecimento de modelos microscópicos para atribuir significados mais profundos para os fenômenos e utilizar tais conceitos na análise de situações-problema.

Um exemplo seria a utilização do modelo microscópico do calor para a explicação das propriedades térmicas dos materiais. A quinta e última habilidade relacionada é a de utilizar conceitos ou unidades de grandeza e reconhecer suas generalidades e significados nas diferentes áreas da ciência. Por exemplo, energia e equilíbrio são conceitos presentes nas disciplinas de Física, Química e Biologia e que possuem significados diferentes em cada caso, embora estejam relacionados.

3.1.2 Base Nacional Comum Curricular (BNCC)

Em dezembro de 2018, o Ministério da Educação homologou a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), um documento contendo orientações que servem de base para o desenvolvimento do currículo de todas as escolas do país, sejam públicas ou privadas. Ela aborda também os conhecimentos essenciais, as competências e aprendizagens esperadas para os alunos em cada etapa da educação básica. Durante o ano subsequente à publicação do documento, os sistemas de ensino deverão discutir e estabelecer um cronograma de implementação, o qual deverá ocorrer a partir do segundo ano a partir da homologação.

A BNCC apresenta três competências específicas ao ensino de ciências da natureza. A primeira envolve a análise de fenômenos naturais e processos tecnológicos, baseando-se nas interações e relações entre matéria e energia. Envolve também elaborar ações, individuais ou coletivas, que aprimorem processos produtivos, diminuam impactos socioambientais e aperfeiçoem as condições de vida, independentemente do contexto (local, regional ou global). A segunda competência envolve investigar e aplicar interpretações sobre a dinâmica da vida, da Terra e do cosmos, com o objetivo de desenvolver argumentos, elaborar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo. A terceira competência envolve investigar situações-problema e analisar aplicações do conhecimento científico utilizando procedimentos e linguagens próprias da ciência (BRASIL, 2018).

Referente à terceira competência, o documento complementa que, quando articulada às duas primeiras, espera-se que o estudante seja capaz de apropriar-se de procedimentos e práticas científicas, estimulando sua curiosidade sobre o mundo, desenvolver e avaliar hipóteses, investigar situações-problema, realizar experimentos com uma análise cada vez mais aprimorada dos dados, bem como tornar-se mais autônomo na utilização da linguagem científica e na comunicação desses conhecimentos.

A Tabela 3.1 apresenta algumas habilidades subordinadas às competências apresentadas e que estão de acordo com o conteúdo abordado no desenvolvimento do nosso produto educacional.

TABELA 3.1 – Habilidades previstas para o ensino de ciências da natureza de acordo com a BNCC.

| <i>Código</i> | <i>Habilidade</i> |
|---------------|---|
| EM13CNT101 | Analisar e representar as transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria, de energia. |
| EM13CNT102 | Realizar previsões, avaliar intervenções e/ou construir protótipos de sistemas térmicos que visem à sustentabilidade, considerando sua composição e os efeitos das variáveis termodinâmicas sobre seu funcionamento, considerando também o uso de tecnologias digitais que auxiliem no cálculo de estimativas e no apoio à construção dos protótipos. |
| EM13CNT205 | Interpretar resultados e realizar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas noções de probabilidade e incerteza, reconhecendo os limites explicativos das ciências. |
| EM13CNT301 | Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica. |
| EM13CNT302 | Comunicar para públicos variados, em diversos contextos, resultados de análises, pesquisas e/ou experimentos, elaborando e/ou interpretando textos, gráficos tabelas, símbolos, códigos, sistemas de classificação e equações, por meio de diferentes linguagens. |

Fonte: BRASIL (2018, p. 554-560).

3.1.3 Currículo do Estado de São Paulo

O Currículo do Estado de São Paulo, elaborado com base nos PCN e PCN+, propõem algumas habilidades que devem ser consolidadas durante a abordagem do tema “calor, ambiente e usos de energia”, previsto para o primeiro bimestre da segunda série do ensino médio. A Tabela 3.2 apresenta as habilidades que estão relacionadas com o conteúdo do nosso produto educacional.

TABELA 3.2 – Habilidades previstas para o tema calor, ambiente e usos de energia no Currículo do Estado de São Paulo.

| <i>Habilidades</i> |
|--|
| Identificar fenômenos, fontes e sistemas que envolvem calor para a escolha de materiais apropriados a diferentes usos e situações. |
| Identificar e caracterizar a participação do calor nos processos naturais ou tecnológicos. |
| Reconhecer as propriedades térmicas dos materiais e sua influência nos processos de troca de calor. |
| Reconhecer o calor como energia em trânsito. |
| Propor procedimentos em que sejam realizadas medidas de temperatura. |
| Identificar e caracterizar o funcionamento dos diferentes termômetros. |
| Compreender e aplicar às situações reais o conceito de equilíbrio térmico. |
| Identificar a ocorrência da condução, convecção e irradiação em sistemas naturais e tecnológicos. |
| Explicar as propriedades térmicas das substâncias e as diferentes formas de transmissão de calor, com base no modelo cinético das moléculas. |
| Identificar os processos de troca de calor e as propriedades térmicas das substâncias, explicando fenômenos atmosféricos ou climáticos. |

Fonte: SÃO PAULO (2012, p. 109-110).

3.1.4 Matriz de Avaliação Processual

A Secretaria da Educação do Estado de São Paulo dispõe ao professor e ao aluno materiais de apoio baseados no currículo, chamados de Caderno do Professor e Caderno do Aluno (SÃO PAULO, 2014a, 2014b). Tais cadernos são divididos em situações de aprendizagem, cada qual contando com conteúdos e habilidades que devem ser desenvolvidas. Para auxiliar o professor na avaliação de quais habilidades foram consolidadas ao longo do processo de ensino-aprendizagem, a secretaria desenvolveu uma matriz de avaliação processual, indicando quais habilidades devem ser avaliadas de acordo com a situação de aprendizagem trabalhada (SÃO PAULO, 2016). Constitui-se, portanto, como um documento norteador do processo, permitindo ao professor que analise metodologias exitosas e pontos de atenção. A Tabela 3.3 apresenta algumas habilidades previstas para o tema “calor, ambiente e usos de energia” relacionadas com a aplicação do nosso produto educacional.

TABELA 3.3 – Habilidades previstas para o tema calor, ambiente e usos de energia na Matriz de Avaliação Processual da Secretaria da Educação do Estado de São Paulo.

| <i>Habilidades</i> |
|---|
| Identificar em seu cotidiano materiais, aparelhos e processos que sejam relacionados ao calor de forma geral. |
| Estimar medidas de temperatura. |
| Associar temperatura ao grau de agitação das moléculas. |
| Realizar conversões de temperatura utilizando as escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin. |
| Realizar a leitura de um termômetro. |
| Compreender e aplicar às situações reais o conceito de equilíbrio térmico. |
| Associar o aumento de temperatura ao aumento da energia cinética molecular. |
| Diferenciar materiais que conduzem ou isolam calor. |
| Identificar calor como processo dinâmico, diferenciando-o de temperatura. |
| Identificar que as trocas de calor ocorrem por diferentes processos. |
| Reconhecer a condução, a convecção e a irradiação. |
| Classificar os diferentes materiais de acordo com suas propriedades térmicas. |

Fonte: SÃO PAULO (2016, p. 32).

3.2 CONTEÚDO DE FÍSICA QUE PODE SER ABORDADO COM O EXPERIMENTO PROPOSTO

3.2.1 Energia, Trabalho e Calor

Uma das leis mais fundamentais da natureza é a da conservação da energia. Energia é uma propriedade dos corpos, transferível entre eles via interações, que pode ser convertida em diferentes formas, mas não pode ser criada e nem destruída. De acordo com Feynman *et al.* (2008), na Física nós não temos conhecimento sobre o que é energia, de modo que nenhuma definição satisfatória sobre isso seria possível, ou seja, a energia é descrita como algo que não pode ser definido. Abordar energia, que é a propriedade mais importante e presente na natureza, dessa forma para alunos do ensino básico, que chegam na escola com seus próprios conceitos de energia, tratando a mesma de forma incorreta como uma força, ou uma substância, etc., pode não ser muito positivo para o ensino de ciências. Podemos definir a energia através de suas

características (BÄCHTOLD, 2018), como feito no início deste parágrafo, ou utilizar a definição de Bazarov apresentada na epígrafe no início desse capítulo.

Outros conceitos que aparecem durante o tratamento da energia são trabalho e calor. É muito comum o uso da definição de energia como a capacidade de realizar de trabalho em livros do ensino médio (BÄCHTOLD, 2018). Mas quando é perguntado o que é trabalho, a resposta usual é que este é energia ou variação de energia, remetendo ao teorema do trabalho-energia. Nesta situação a energia é definida através do trabalho e o trabalho através da energia, de modo que podemos ser levados a ter a impressão de que nem um nem outro foram definidos. O trabalho é a forma pela qual energia é transmitida de um sistema a outro através de uma força generalizada A tendo como consequência a variação de uma coordenada generalizada a . Isso significa que o trabalho aparecerá em um processo de mover o sistema de um estado de equilíbrio 1 para outro estado de equilíbrio 2. Dessa forma podemos escrever:

$$W_{1\rightarrow 2} = \int_1^2 A da. \quad (3.1)$$

Para o caso em que a força generalizada é uma força mecânica aplicada em um corpo em uma dimensão, eixo- x por exemplo, tem-se $\delta W = Fdx$, ou seja, a coordenada generalizada associada à força mecânica é o deslocamento do corpo. Para um gás de volume V sob uma pressão P tem-se $\delta W = PdV$, um fio de comprimento L sob uma tensão τ , $\delta W = -\tau dL$. Podemos calcular o trabalho de uma força magnética, elétrica, entre outras.

O fato de expressarmos o trabalho matematicamente como uma variação de energia é natural, pois se o trabalho é um método de transmissão de energia o sistema irá ganhar ou perder energia durante a realização do processo e conseqüentemente teremos a variação de energia dele. Portanto, sempre que for possível realizar trabalho no sistema, ou em outras palavras, sempre que for possível transferir ou retirar energia do sistema através de trabalho, sua energia irá variar.

O calor, assim como o trabalho, é outro método que conhecemos de transmissão de energia de um sistema para o outro. Mas este é responsável pela transmissão de energia térmica quando dois corpos de diferentes temperaturas são colocados em contato térmico entre si. A confusão que aparece com relação ao calor é quando este é definido como energia em trânsito. Calor não é energia, é apenas o método de transferência da mesma e aparece apenas quando o sistema sofre um processo para movê-lo de um estado de equilíbrio para outro.

Quando um sistema atinge o equilíbrio não faz mais sentido falar em calor e trabalho. O enunciado matemático da primeira lei da termodinâmica, que trata do princípio de conservação de energia, estabelece que a energia interna U de um sistema, comumente chamada

de energia térmica, é uma função de único valor de seu estado e varia somente sob a influência de ações externas. Esta variação é igual à quantidade de energia fornecida ao sistema através de calor Q menos a quantidade de energia que o sistema transfere à sua vizinhança através de trabalho W , ou seja,

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W. \quad (3.2)$$

Apesar dos valores de Q e W poderem ser diferentes para processos diferentes, a diferença $Q - W$ tem o mesmo valor para todos os processos entre os mesmos estados 1 e 2.

3.2.2 Temperatura

Toda a matéria ordinária que existe no universo, chamada de matéria bariônica, independentemente de seu estado físico, é composta por átomos e moléculas que estão em constante movimento aleatório. Em decorrência disso, eles possuem o que chamamos de energia cinética. Quando obtemos o valor da energia cinética média de todos os átomos que compõem um determinado objeto, obtemos o valor de uma grandeza física chamada de temperatura T (HEWITT, 2015). No entanto, a situação mais recorrente é o movimento dos átomos em diferentes velocidades, resultando em diferentes valores de energia cinética para cada átomo. Seria extremamente difícil descrevermos a gama de valores diferentes encontrados para tal situação. Por isso, costumamos utilizar a média desses valores e traduzi-los como algo chamado temperatura.

Quanto ao tipo de movimento que os átomos podem realizar, existe o de translação (movimento de um lugar a outro), o de rotação e o de vibração. No entanto, o movimento que efetivamente contribui para a alteração da temperatura de uma substância é o de translação. Os fornos de micro-ondas, por exemplo, emitem ondas capazes de fazer as moléculas de água do alimento oscilar, invertendo suas orientações. Isso, de fato, produz um grande movimento rotacional. No entanto, se esse movimento não for comunicado às moléculas vizinhas, suas energias cinéticas não aumentarão e, conseqüentemente, o alimento não esquentará. Portanto, oscilar ou vibrar em torno de uma posição fixa não altera a temperatura do alimento de maneira significativa. Mas, quando as moléculas passam a se mover de um lugar a outro, elas ricocheteiam nas moléculas vizinhas, causando um aumento em suas energias cinéticas e, conseqüentemente, aumentando a temperatura do alimento (HEWITT, 2015).

Portanto, podemos resumir a descrição da temperatura como sendo uma medida da energia cinética translacional média das moléculas que compõem uma determinada substância.

As unidades de medida mais utilizadas para ela são as escalas Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) e Kelvin (K), sendo esta última a unidade padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI).

3.2.3 Calor específico

Algumas substâncias permanecem quentes por mais tempo que outras. De fato, substâncias diferentes possuem diferentes capacidades de armazenar energia interna e consequentemente manter sua temperatura constante. Ao colocarmos um recipiente com uma determinada quantidade de água sobre a chama de um fogão, ela levará um certo tempo para que sua temperatura passe da temperatura ambiente para a de ebulição. Se colocássemos a mesma quantidade de ferro, o tempo seria reduzido em 90%. Se utilizássemos a mesma quantidade de prata, o tempo seria reduzido em cerca de 95% (HEWITT, 2015).

Materiais diferentes requerem diferentes quantidades de energia para aumentar sua temperatura. Isso ocorre porque materiais diferentes absorvem energia de modos diferentes. Por exemplo, parte da energia recebida por um determinado material pode ser utilizada para aumentar a energia cinética rotacional das moléculas, o que não contribui de maneira significativa para o aumento da sua temperatura. Retomando o exemplo que envolve a água, o ferro e a prata, enquanto a água requer uma caloria ou 4,186 joules de energia para aumentar um grau da temperatura de um grama de sua massa, o ferro requer apenas um décimo desse valor. Essa propriedade, que mede a inércia térmica de uma substância, é chamada de calor específico c (HEWITT, 2015). A água possui um calor específico $c_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$, muito maior que o ferro ($c_{\text{Fe}} = 0,11 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$) e a prata ($c_{\text{Ag}} = 0,056 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$).

O calor específico pode então ser definido como a quantidade de energia necessária, transferida ao sistema através do calor, para elevar a temperatura de uma unidade de massa da substância em um grau. O calor específico também varia em função da temperatura. Essa quantidade de energia necessária para elevar a temperatura da massa m de uma substância de T_i até T_f é comumente chamada de quantidade de calor Q . Para processos quase-estáticos, Q pode ser relacionado com a variação de temperatura ΔT da seguinte forma,

$$Q = mc\Delta T = C\Delta T, \quad (3.3)$$

em que $C = mc$ representa a capacidade térmica do material. Esta é medida em unidades de energia por grau ou unidades de energia por Kelvin.

Quando Q e ΔT são positivos, significa que o objeto está recebendo energia através de calor e sua temperatura, consequentemente, aumenta. Quando são negativos, significa que o

corpo está liberando energia através de calor e sua temperatura diminui (YOUNG & FREEDMAN, 2015; HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2016a). Os valores do calor específico de algumas substâncias estão expressos na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Calor específico de algumas substâncias.

| <i>Substância</i> | <i>Calor específico (cal/g•C)</i> | <i>Substância</i> | <i>Calor específico (cal/g•C)</i> |
|-------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| água | 1,0 | Hidrogênio | 3,4 |
| álcool | 0,6 | Latão | 0,092 |
| alumínio | 0,22 | Madeira | 0,42 |
| Ar | 0,24 | Mercúrio | 0,033 |
| carbono | 0,12 | Nitrogênio | 0,25 |
| chumbo | 0,031 | Ouro | 0,032 |
| cobre | 0,091 | Oxigênio | 0,22 |
| ferro | 0,11 | Prata | 0,056 |
| Gelo | 0,5 | Rochas | 0,21 |
| hélio | 1,25 | Vidro | 0,16 |

Fonte: IF-USP. Tabela de calor específico de várias substâncias. “Disponível em:”
<http://fep.if.usp.br/~profis/experimentando/diurno/downloads/Tabela%20de%20Calor%20Especifico%20de%20Varias%20Substancias.pdf>.

Caso o sistema em análise seja formado por substâncias que apresentam calores específicos diferentes, a capacidade térmica é expressa por

$$C = m_1c_1 + m_2c_2 + \dots \quad (3.4)$$

Quando o intervalo de temperatura entre T_i e T_f é suficientemente grande de modo que seja necessário levar em conta a variação do calor específico com a temperatura, $c = c(T)$, a eq.(3.3) é substituída por

$$\delta Q = m \int_{T_i}^{T_f} c(T)dT. \quad (3.5)$$

Em casos em que a variação do calor específico é pequena no intervalo de temperatura considerado, a expressão acima pode ser escrita como $Q = m\bar{c}(T_f - T_i)$, sendo \bar{c} o calor específico médio entre as temperaturas T_i e T_f .

3.2.4 Transferência de energia através do calor

3.2.4.1 Condução

Utilizando uma panela com água sobre o fogo, podemos ilustrar as cinco leis básicas que regem a condução de energia através de calor: (1) a energia térmica flui sempre de um ponto a temperatura mais alta para um de temperatura mais baixa; (2) a quantidade de calor δQ transferida durante um intervalo de tempo Δt é diretamente proporcional à diferença de temperatura ΔT , pois a água ferve mais rápido se a temperatura da chama for maior; (3) é inversamente proporcional à espessura Δx da chapa metálica, pois a água levará mais tempo para ferver quanto maior for a espessura do fundo da panela; (4) é proporcional a área A através da qual está fluindo, no caso, o fundo da panela; (5) é proporcional ao intervalo de tempo Δt . A relação de proporcionalidade direta entre δQ e $\Delta T/\Delta x$ é chamada de gradiente de temperatura. Combinando todas essas relações, nota-se que δQ é proporcional a $A\Delta t(\Delta T/\Delta x)$, ou seja, a condução de energia através de calor através de uma espessura infinitésima Δx de um meio durante um intervalo de tempo Δt é expressa por

$$\frac{\delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (3.6)$$

sendo $k > 0$ uma constante de proporcionalidade chamada de condutividade térmica do material. O sinal negativo aparece porque a taxa $dT/dx < 0$, ou seja, quanto maior a espessura do material dx menor é a variação de temperatura dT (NUSSENSVEIG, 2005). A condutividade térmica de algumas substâncias é apresentada na Tabela 3.5.

O que define se um material será um bom ou mau condutor de energia térmica é sua estrutura atômica ou molecular. Ele é considerado um bom condutor quando um ou mais elétrons da camada mais externa dos átomos estão “fracamente” ligados ao átomo. Isso possibilita que eles se tornem livres para colidir com outros átomos e elétrons e, assim, transferir energia. Isso ocorre especialmente em metais, como prata e cobre, por exemplo. Em contraste, materiais como madeira, plástico, papel e isopor, são maus condutores de energia térmica. Isso ocorre porque os elétrons da camada mais externa dos átomos que compõem esse material estão mais “fortemente” ligados ao átomo e não possuem liberdade de vagar pelo objeto, transferindo energia. Tais materiais são chamados de isolantes. Por essa razão, costumamos utilizar cabos desses materiais para revestir superfícies metálicas que entram em contato com o fogo (HEWITT, 2015).

TABELA 3.5 – Condutividade térmica de algumas substâncias.

| <i>Substância</i> | <i>Condutividade Térmica (W/mK)</i> | <i>Substância</i> | <i>Condutividade Térmica (W/mK)</i> |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Alumínio | 205,0 | Vidro | 0,8 |
| Latão | 109,0 | Gelo | 1,6 |
| Cobre | 385,0 | Isopor | 0,027 |
| Chumbo | 34,7 | Madeira | 0,12 – 0,04 |
| Mercúrio | 8,3 | Ar | 0,024 |
| Prata | 406,0 | Argônio | 0,016 |
| Aço | 50,2 | Hélio | 0,14 |
| Concreto | 0,8 | Hidrogênio | 0,14 |
| Fibra de vidro | 0,04 | Oxigênio | 0,023 |

Fonte: Young & Freedman (2012, p. 571).

Resumindo, a transferência de energia térmica por condução pode ser definida como a transferência de energia por meio de colisões eletrônicas e moleculares no interior das substâncias. Ela ocorre especialmente em materiais sólidos. A maior parte dos líquidos e gases são maus condutores de energia térmica.

3.2.4.2 Convecção

A transferência de energia térmica em líquidos e gases se dá principalmente através de um processo chamado de convecção. Ele ocorre devido ao movimento de massa do próprio fluido. Enquanto a condução trata da transferência de energia em decorrência do movimento de partículas atômicas, a convecção envolve o movimento de grandes massas de líquidos e gases, ou seja, um grande conjunto de átomos e moléculas. Por exemplo, ao colocarmos uma panela com líquido sobre o fogo, o líquido localizado ao fundo esquentará mais rápido. Em decorrência do aumento da rapidez dessas moléculas, elas passarão a afastar-se umas das outras, criando uma região de menor densidade. Conseqüentemente, existirá uma força de empuxo que empurra o fluido quente e menos denso para cima, enquanto o fluido frio e mais denso desce. Essa circulação de fluido, chamada de correntes de convecção, permitem que o fluido aumente sua temperatura como um todo, as quais podem ser observadas na figura 3.1. As correntes de convecção ocorrem, por exemplo, na atmosfera. Elas causam os ventos quando regiões da superfície terrestre apresentam diferentes temperaturas (HEWITT, 2015).

Figura 3.1 – Um aquecedor localizado na ponta de um tubo em “J” submerso em água gera correntes de convecção, reveladas pelas sombras (causadas pelas reflexões sofridas pela luz na água a diferentes temperaturas).

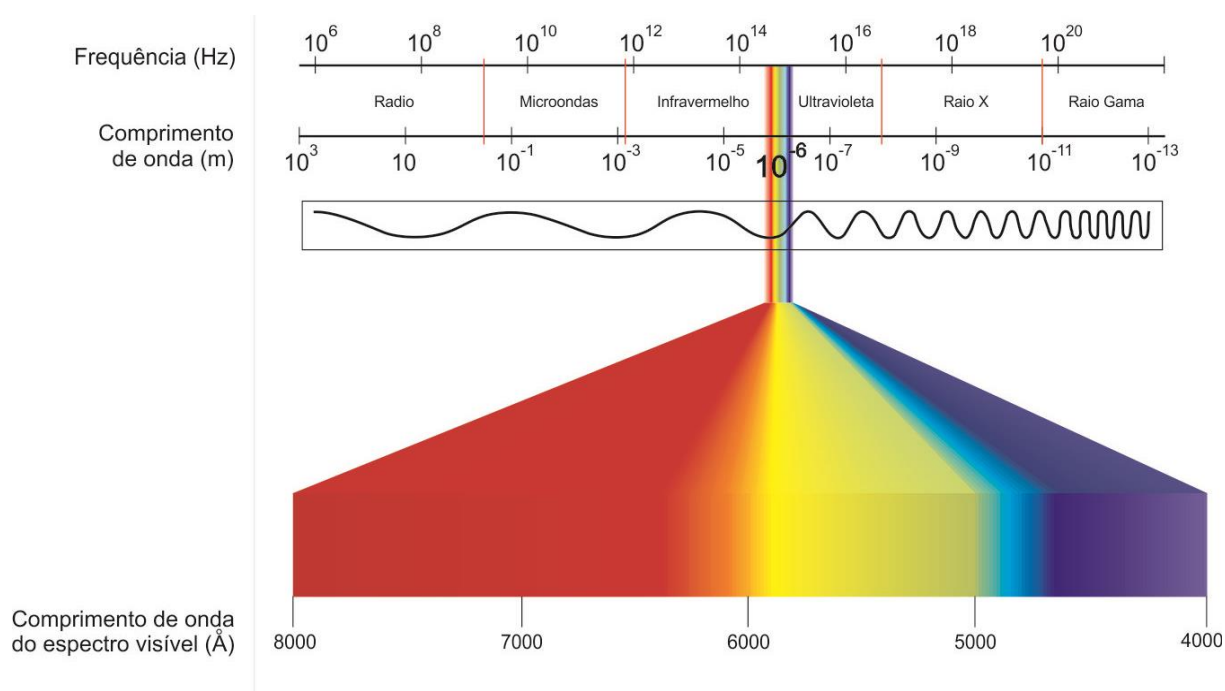


Fonte: Hewitt (2015, p. 306).

3.2.4.3 Radiação

Todos podemos sentir a energia que o Sol emite em direção à Terra. Tal transferência de energia não pode ocorrer por condução, pois o ar presente na atmosfera é um mau condutor de energia térmica. A transferência também não poderia ocorrer por convecção pois, para que ela tenha início, a superfície terrestre já deveria estar aquecida, o que não acontece pelo fato de não ter ocorrido a condução. Além disso, o vácuo entre o Sol e a atmosfera terrestre impedem a transferência de energia por condução e convecção, uma vez que seria necessário um meio material para que elas ocorressem. Portanto, a energia só pode ser transmitida de outra maneira: a radiação (HEWITT, 2015).

A energia transferida através da radiação também é chamada de energia radiante e é conduzida através de ondas eletromagnéticas. Estas podem ser ondas de rádio, micro-ondas, ondas infravermelhas, a luz visível, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama. Esta classificação está na ordem decrescente dos seus comprimentos de onda, como mostra a figura 3.2.

Figura 3.2 – Espectro eletromagnético.

Fonte: IF-UFRGS. Radiação. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aularad.htm>. Acesso em: 02 dez. 2018.

As ondas infravermelhas apresentam comprimentos de onda mais longos que o da luz visível, enquanto as ondas ultravioletas possuem comprimentos de onda mais curtos. O comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência da radiação eletromagnética, a qual representa a taxa de vibração de uma onda. Elétrons em vibração emitem ondas eletromagnéticas, e sua frequência depende da taxa de oscilação de tais elétrons. Ao interagir com os átomos que compõem um objeto, a energia proveniente das ondas eletromagnéticas faz com que a energia cinética dos átomos aumente e, conseqüentemente, a temperatura do sistema também aumenta (HEWITT, 2015).

A relação entre o comprimento de onda λ , a frequência f e a velocidade v de uma onda é dada por,

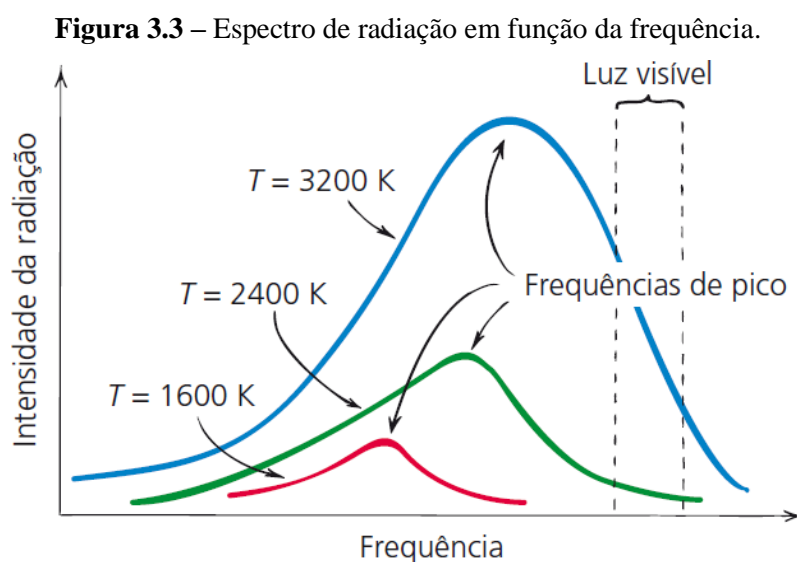
$$v = \lambda f. \quad (3.7)$$

Quando estamos analisando a propagação da luz no vácuo, a velocidade v é substituída pela velocidade da luz c no vácuo e a eq.(3.7) torna-se,

$$c = \lambda f \quad (3.8)$$

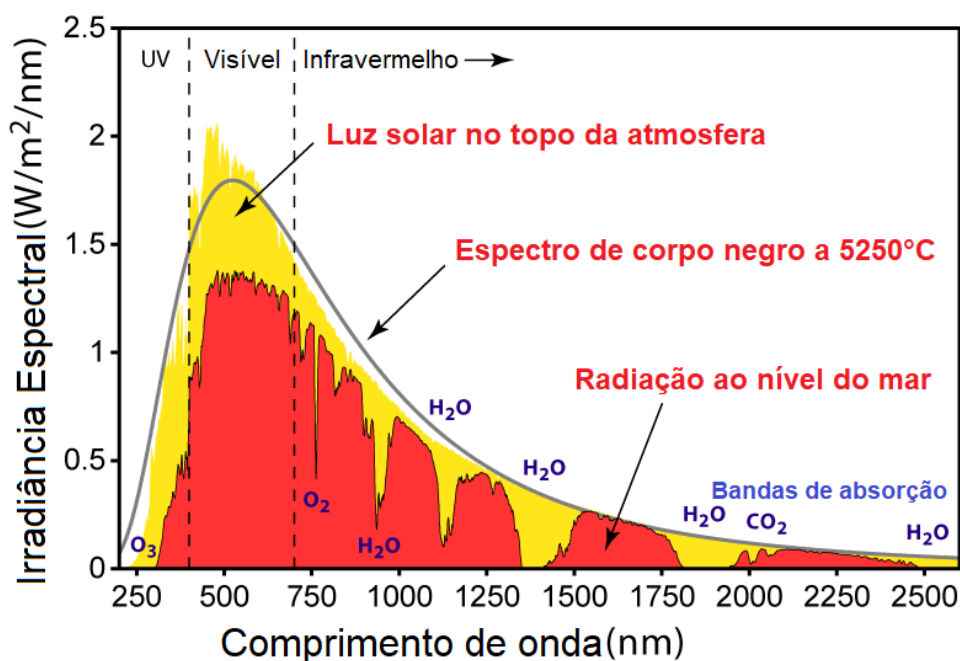
3.2.4.3.1 Emissão de radiação

Todas as substâncias emitem energia radiante a qualquer temperatura. A frequência da radiação máxima emitida é diretamente proporcional à temperatura absoluta do objeto emissor, como mostra o espectro de radiação apresentado na figura 3.3. O mesmo princípio vale para as estrelas: estrelas azuis são mais quentes que as brancas, que são mais quentes que as vermelhas. Como a superfície solar apresenta alta temperatura em comparação com os padrões terrestres (cerca de 5500 °C), o Sol emite radiação de alta frequência, sendo boa parte na faixa da luz visível do espectro eletromagnético, conforme apresentado na figura 3.4. Como a superfície terrestre apresenta uma temperatura menor em comparação com a solar, ela emite radiação de baixa frequência, na faixa das ondas infravermelhas (HEWITT, 2015).

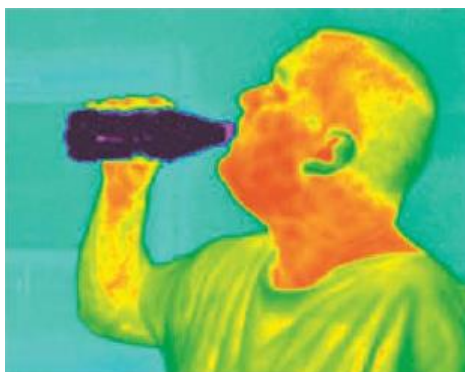


Fonte: Hewitt (2015, p. 308).

A radiação solar tem origem em reações nucleares que ocorrem em seu interior, assim como ocorre com a radiação terrestre. Objetos a temperatura ambiente emitem ondas infravermelhas de baixa frequência (Figura 3.5). Quando as ondas infravermelhas entram em contato com nossa pele, temos a sensação de aumento de temperatura. Por essa razão ela é chamada de radiação térmica. Termômetros infravermelhos funcionam com base na radiação térmica emitida por algum objeto. Basta apontar o aparelho para o objeto que desejamos aferir a temperatura e ele identificará a temperatura com base na radiação que ele emite (HEWITT, 2015).

Figura 3.4 – Espectro da radiação solar em função do comprimento de onda.

Fonte: adaptado de Wikimedia Commons. [Solar spectrum](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Solar_Spectrum.png). “Disponível em:”
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Solar_Spectrum.png. Acesso em: 01 jan. 2019.

Figura 3.5 – Imagem em infravermelho com falsa cor revelando a radiação emitida por várias partes do corpo humano. A emissão mais forte (partes avermelhadas do rosto) vem das áreas mais quentes, ao passo que, as partes mais escuras, como a garrafa de bebida gelada, emitem muito pouco.

Fonte: Young e Freedman (2016, p. 225).

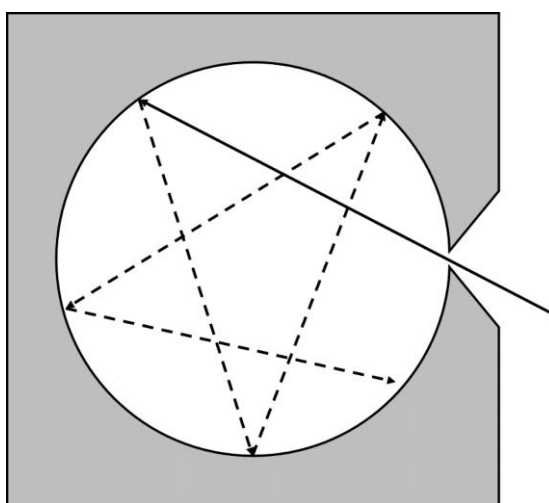
3.2.5 Radiação de corpo negro

Ao mesmo tempo em que emitem radiação os objetos também a absorvem. Bons emissores são também bons absorvedores e vice-versa. Se algo absorve mais energia do que emite, sua temperatura aumenta. O que define se um objeto será emissor ou absorvedor de radiação é a temperatura do ambiente ao seu redor, valendo o princípio de que a energia térmica flui de uma substância a maior temperatura para uma de menor temperatura. Podemos, por

exemplo, colocar um líquido quente em dois recipientes, sendo que um possui uma superfície preta enquanto o outro possui uma superfície branca ou espelhada. A água do recipiente escuro esfriará mais rápido. O mesmo princípio ocorre quando colocamos água fria nos recipientes e os expomos ao Sol. A água do recipiente escuro esquentará primeiro. Portanto, qualquer objeto que emita facilmente energia radiante, também a absorverá facilmente (HEWITT, 2015). Um corpo que absorve idealmente toda a radiação incidente, independente da frequência ou ângulo com o qual a radiação incide na superfície do corpo, é chamado de corpo negro. Este não é apenas um absorvedor ideal, ele é também um emissor ideal (TIPLER & MOSCA, 2009).

No início do século XX, discutia-se muito acerca de um problema envolvendo a radiação térmica emitida por um corpo negro, definido pelo físico alemão Gustav Kirchhoff como um corpo que possui emissividade igual a $\varepsilon = 1$ sendo, portanto, um emissor perfeito. Tal objeto é chamado de corpo negro porque, ao ser iluminado, parece ser totalmente negro, visto que ele não reflete luz alguma (OLIVEIRA FILHO & SARAIVA, 2004). No entanto, um corpo negro ideal inexistente na natureza, tal qual uma superfície inclinada sem atrito e uma corda sem massa alguma, mas sua idealização e conceitos envolvidos possuem algumas utilidades, visto que suas características são possíveis de serem descritas e calculadas teoricamente de maneira universal (TIPLER & MOSCA, 2009). Podemos conceber um corpo negro ideal, de maneira aproximada, como um recipiente oco com um orifício, como ilustrado na figura 3.6.

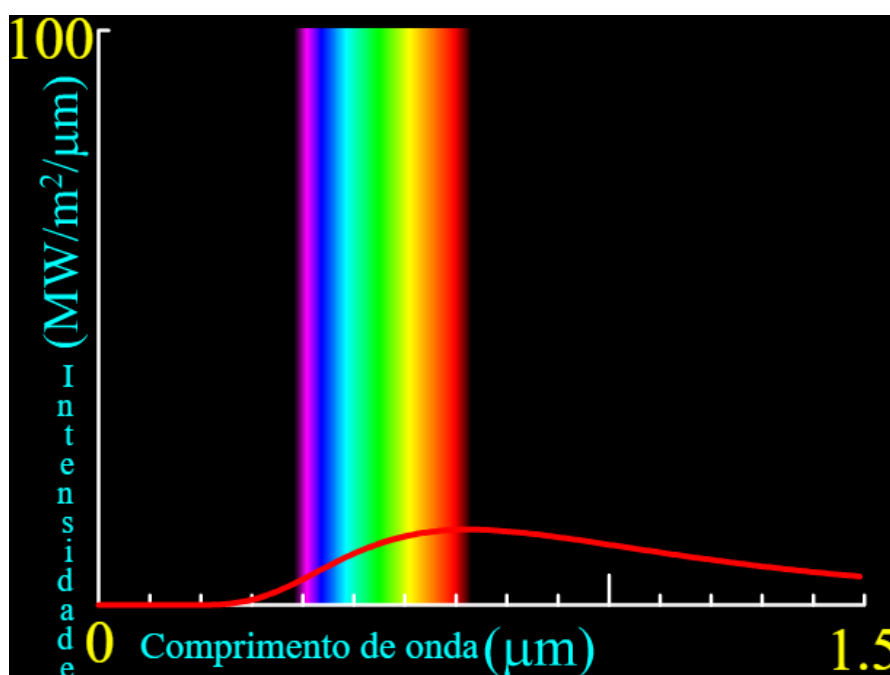
Figura 3.6 – Um orifício em uma cavidade se aproxima de um corpo negro ideal. A radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair dela antes de ser completamente absorvida. A radiação emitida pelo orifício (não mostrada) é, portanto, característica da temperatura das paredes da cavidade.



Fonte: adaptado de Tipler e Mosca (2009, p. 685).

A radiação que incide pelo furo é absorvida completamente pelas paredes da cavidade. Quando a cavidade é aquecida, os átomos de suas paredes passam a oscilar e emitir radiação eletromagnética. Quando o sistema atinge o equilíbrio térmico, a radiação emitida pelo orifício é chamada de radiação de corpo negro (TIPLER & MOSCA, 2009). A radiação emitida é constituída de diversos comprimentos de onda, produzindo um espectro contínuo como o mostrado na figura 3.7, ao contrário do espectro de linhas emitido por um gás.

Figura 3.7 – Espectro contínuo da radiação emitida por um corpo negro a 4000 K, mostrando a região visível do espectro em cores.



Fonte: PhET. Radiação do corpo negro. “Disponível em:” https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html. Acesso em: 08 jan. 2019.

Algumas características acerca de um corpo negro puderam ser determinadas ainda no início do século XX (YOUNG & FREEDMAN, 2016; HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2016b). Uma delas é que a intensidade da energia irradiada por unidade de área da superfície de um corpo negro para todos os comprimentos de onda possíveis por unidade de tempo, I , é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta T do corpo negro, ou seja,

$$I = \sigma T^4 \quad (3.9)$$

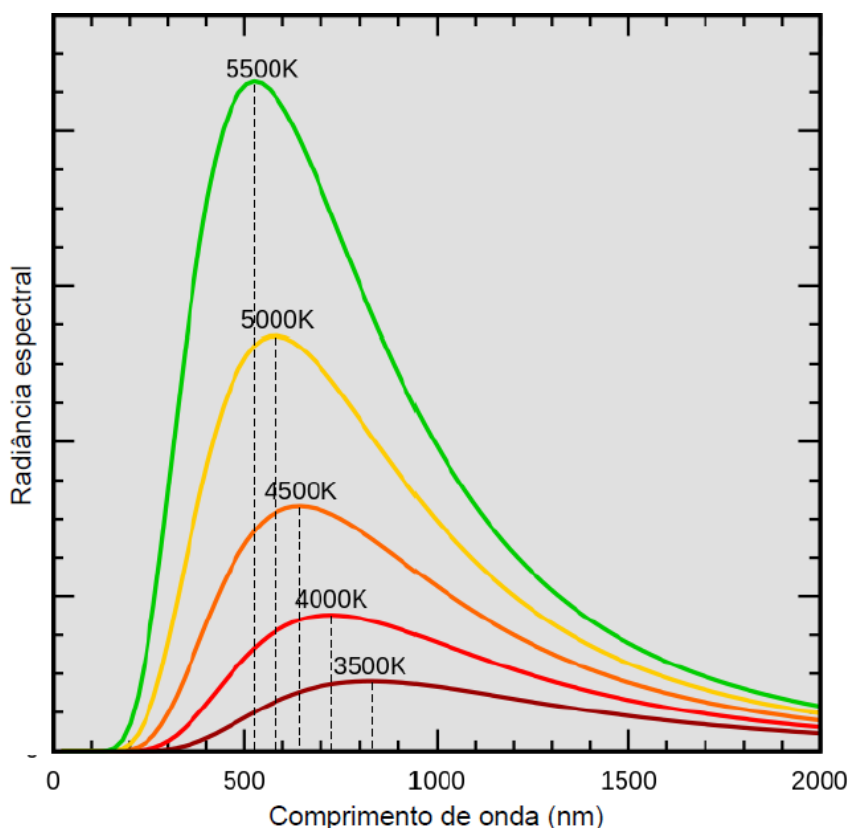
sendo $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ uma constante de proporcionalidade chamada de constante de Stefan-Boltzmann. A relação dada pela eq.(3.9) é chamada de lei de Stefan-Boltzmann de um corpo negro.

Para um corpo que não absorve toda a radiação incidente, usualmente chamado de corpo cinza, e, portanto, emite menos energia total que um corpo negro é caracterizado por uma emissividade $\varepsilon < 1$. Neste caso a lei de Stefan-Boltzman torna-se,

$$I = \sigma \varepsilon T^4. \quad (3.10)$$

Outra importante característica observada sobre a radiação de corpo negro era de que a distribuição da radiação não era uniforme para todos os comprimentos de onda, conforme apresentado na figura 3.8, onde é mostrado a radiância espectral para a radiação de um corpo negro para cinco temperaturas distintas.

Figura 3.8 – Gráfico da radiância espectral de um corpo negro para cinco temperaturas diferentes.



Fonte: adaptado de Wikimedia Commons. [Wien's law](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Wiens_law.svg). "Disponível em:"
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Wiens_law.svg. Acesso em: 09 jan. 2019.

A distribuição da intensidade de radiação em função do comprimento de onda é chamada de radiância ou emissão espectral, a qual simbolizaremos por $I(\lambda)$. Portanto, $I(\lambda) d\lambda$ é a radiância correspondente aos comprimentos de onda compreendidos no intervalo de λ a $\lambda + d\lambda$. A radiância total I é obtida pela integração da função de distribuição da radiação $I(\lambda)$ para todos os comprimentos de onda, sendo igual a área sob a curva de $I(\lambda)$ vs λ :

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda. \quad (3.11)$$

Conforme a temperatura aumenta, o pico de emissão máxima torna-se maior e desloca-se para frequências maiores ou, equivalentemente, para comprimentos de onda menores (YOUNG & FREEDMAN, 2016; HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2016b). As linhas tracejadas no gráfico da figura 3.8 indicam o comprimento de onda da radiação máxima λ_{max} para cada temperatura. Experiências mostram que λ_{max} é inversamente proporcional à temperatura T do objeto. O produto entre as duas grandezas, chamada de lei do deslocamento de Wien, é dado pela constante:

$$\lambda_{max}T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ mK}. \quad (3.12)$$

A expressão acima mostra que, à medida que a temperatura aumenta, λ_{max} diminui. Isso explica o fato de que ao aquecermos um objeto metálico, por exemplo, inicialmente ele emitirá luz na cor vermelha para, posteriormente, emitir uma luz azulada. É interessante notar que o aspecto da função da radiância espectral é a mesma para todas as temperaturas. Através de uma simples alteração nas escalas do gráfico é possível ajustar a curva de uma temperatura para qualquer outra desejada (YOUNG & FREEDMAN, 2016).

3.2.5.1 Lei de Rayleigh-Jeans e a “catástrofe do ultravioleta”

Ao longo da última década do século XIX, muitas foram as tentativas de se obter os resultados empíricos apresentados até aqui a partir de princípios básicos teóricos. Uma das tentativas foi realizada pelos matemáticos e físicos ingleses Lord Rayleigh e James H. Jeans. Eles utilizaram a teoria clássica da radiação de cavidade para calcular e descrever o espectro de radiação de corpo negro e o resultado obtido, chamado de lei de Rayleigh-Jeans, apresenta uma séria divergência entre a física clássica e os resultados experimentais (EISBERG, 1979). Tal divergência pode ser observada a figura 3.9.

A partir do cálculo do número de ondas estacionárias permitidas no interior de uma cavidade para um determinado intervalo de comprimentos de onda e o princípio da equipartição de energia, Rayleigh e Jeans obtiveram a seguinte expressão para a radiação de corpo negro,

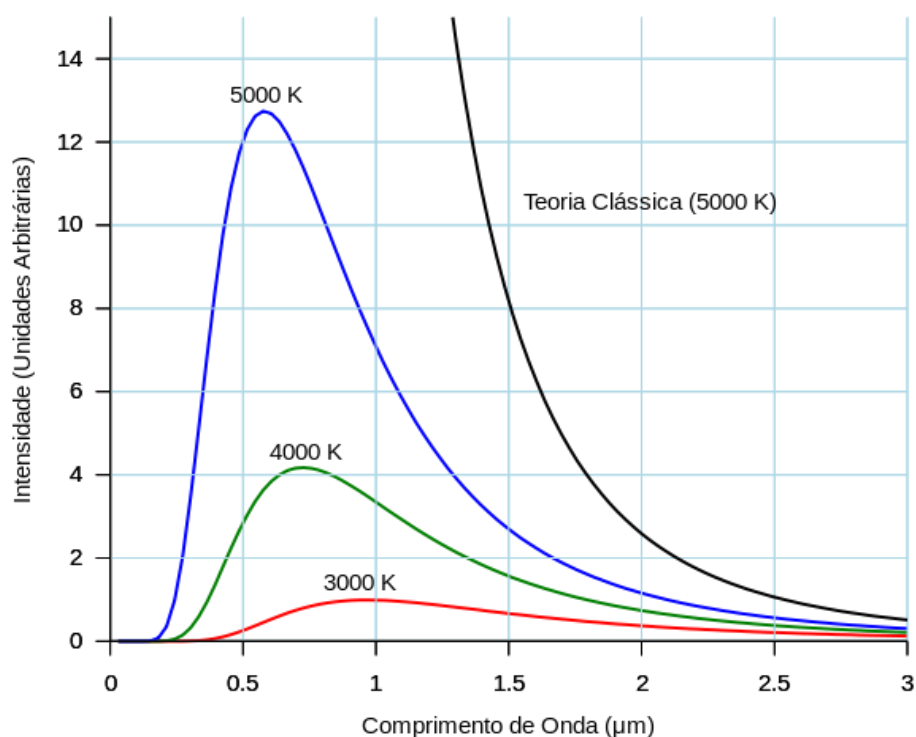
$$I(\lambda) = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^4}\right) k_B T \quad (3.13)$$

sendo $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ a constante de Boltzman.

A lei de Rayleigh-Jeans fornece resultados satisfatórios para grandes comprimentos de onda (baixas frequências). Para pequenos comprimentos de onda (altas frequências) o resultado diverge com a intensidade de energia da radiação tendendo a infinito. Experimentalmente observa-se que o resultado deveria tender a zero, conforme mostrado na figura 3.9. Este

resultado é conhecido como catástrofe do ultravioleta. Este nome foi dado para dar ênfase na não validade da teoria clássica nesta região.

Figura 3.9 – Radiação de corpo negro obtida experimentalmente para diferentes temperaturas (linhas coloridas) e resultado obtido pela teoria clássica da radiação em cavidades (linha preta). Enquanto as previsões funcionavam bem para comprimentos de onda maiores, existe uma grande diferença para comprimentos de onda menores.



Fonte: Wikimedia Commons. Corpo negro. “Disponível em:” https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Corpo_negro.svg. Acesso em: 01 jan. 2019.

3.2.5.2 Teoria de Planck e a hipótese quântica

No ano de 1900, o físico alemão Max Planck conseguiu obter uma expressão para a radiação de corpo negro que se ajustava adequadamente às curvas de distribuição de intensidades obtidas experimentalmente (YOUNG & FREEDMAN, 2016). Ela ficou conhecida como lei da radiação de Planck. Planck assumiu que os elétrons das paredes da cavidade absorviam a energia da radiação de forma discreta. Dessa forma ele supôs que a energia poderia ter apenas certos valores discretos e que estes fossem uniformemente distribuídos, ou seja, $E = 0, \Delta E, 2\Delta E, 3\Delta E, \dots, n\Delta E$. O intervalo ΔE seria o intervalo constante entre os possíveis valores de energia sucessivos (EISBERG, 1979).

Planck considerou que ΔE deveria ser uma função crescente da frequência f da onda tomando a relação mais simples possível, dada pelo *quantum* de energia $\Delta E = hf$, sendo h uma

constante de proporcionalidade denominada como constante de Planck $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Utilizando estas considerações no princípio de equipartição de energia com a energia assumindo apenas valores discretos $E = nhf$, para $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ponderados pelas suas respectivas probabilidades de ocorrência, Planck foi capaz de obter a radiância espectral $I(\lambda)$ de um corpo negro a uma temperatura constante T , a qual é dada por,

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \right). \quad (3.14)$$

Tudo o que Planck fez para chegar na sua fórmula que descreve o espectro da radiação de corpo negro foi tratar a energia das ondas estacionárias como uma grandeza que varia discretamente em vez de continuamente, como na teoria clássica. Ele não fez qualquer alteração no princípio de equipartição de energia. Os resultados experimentais são descritos em total concordância com a fórmula de Planck, ou seja, ele recupera o resultado clássico para grandes comprimentos de onda e mostra que $I(\lambda)$ tende a zero para pequenos comprimentos de onda, da mesma forma como observado experimentalmente. Esses resultados mostram que a ocorrência de ondas na cavidade com pequenos comprimentos de onda ou comprimentos muito grandes são pouco prováveis, tendendo a zero (YOUNG & FREEDMAN, 2016; HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2016b).

Um dos grandes trunfos da lei de Planck é que com ela é possível obter a lei do deslocamento de Wien, dada pela eq.(3.12), e a lei de Stefan-Boltzmann, eq.(3.9). Um exemplo da aplicação da lei de Planck é a explicação das diferentes cores que as estrelas possuem. Uma estrela não é um corpo negro, pois a radiação proveniente de suas camadas externas não está em equilíbrio térmico. O equilíbrio termodinâmico na atmosfera de uma estrela é local. Para o fluxo de radiação na fotosfera de uma estrela tem-se que (OLIVEIRA FILHO & SARAIVA, 2019):

$$I = \sigma T_{ef}^4 \quad (3.15)$$

em que T_{ef} é um parâmetro chamado de temperatura efetiva, sendo equivalente à temperatura de um corpo negro que emite a mesma quantidade de radiação que a estrela.

Através da lei do deslocamento de Wien, é possível notar que uma estrela com alta temperatura superficial, com 12.000 K, por exemplo, possui um comprimento de onda máximo no ultravioleta, fazendo com que a estrela emita uma maior quantidade de luz azul ao invés de vermelha. Em contraste, uma estrela com temperatura superficial baixa, com 3.000 K, por exemplo, possui um comprimento de onda máximo na região do infravermelho, fazendo com que emita mais luz vermelha do que azul. No caso do Sol, cuja temperatura superficial é em torno de 5.800 K, o comprimento de onda máximo encontra-se no espectro visível. Por isso

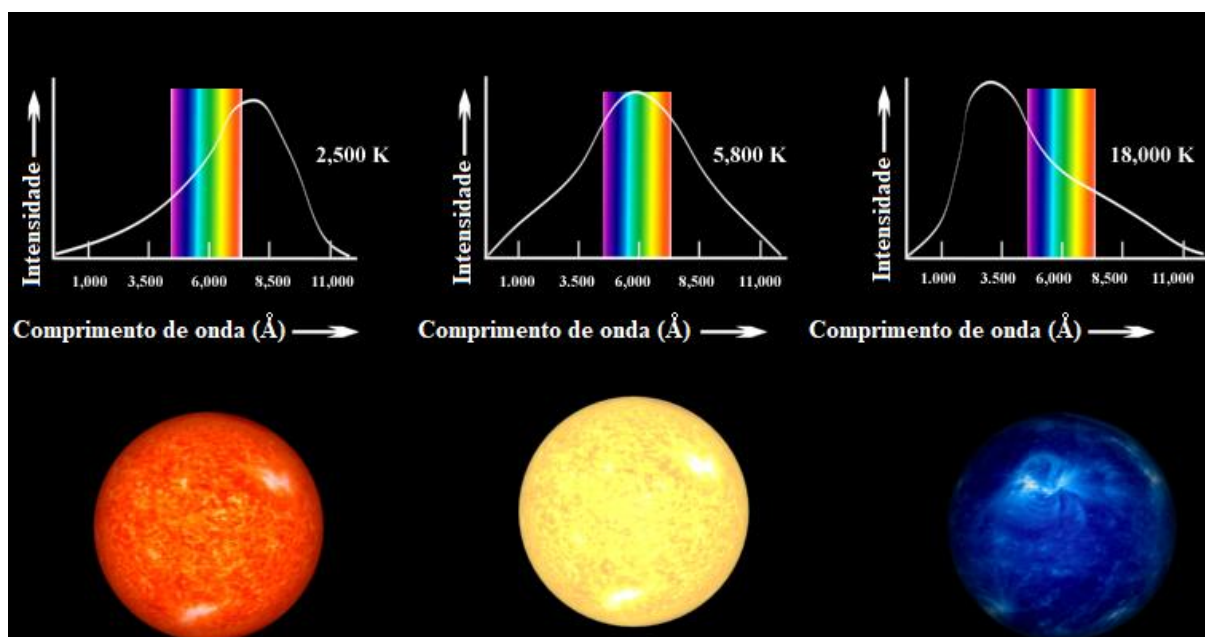
atribuímos a cor branca para o Sol, pois a soma das cores do espectro visível fornece a cor branca. A figura 3.10 apresenta estrelas com diferentes cores e a figura 3.11 apresenta a distribuição de radiação para estrelas a diferentes temperaturas superficiais.

Figura 3.10 – Estrelas com diferentes cores, as quais são atribuídas às temperaturas superficiais diferentes.



Fonte: NASA. Hubble Gazes at Stars of the Large Magellanic Cloud. “Disponível em:” https://www.nasa.gov/sites/default/files/styles/full_width_feature/public/thumbnails/image/hubble_friday_06242016.jpg. Acesso em: 12 jan. 2019.

Figura 3.11 – Emissão espectral de estrelas a diferentes temperaturas superficiais.



Fonte: adaptado de MUTLAQ, J. Star colors and temperatures. “Disponível em:” https://docs.kde.org/trunk5/en/extragear-edu/kstars/star_colors.png. Acesso em: 12 jan. 2019.

Utilizando a eq.(3.15) para calcular a intensidade da radiação emitida pelo Sol, obtemos:

$$I = \sigma T_{ef}^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 5800^4 = 6,42 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (3.16)$$

O valor de $64,2 \text{ MW/m}^2$ obtido acima refere-se à intensidade emitida por toda a superfície do Sol, o qual possui um raio de $R = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$. Considerando o Sol como uma estrela esférica o fluxo de radiação na sua superfície é proporcional a $1/R^2$. Para um ponto a uma distância d da superfície do Sol, o fluxo de radiação através de sua superfície é diluído por um fator de $1/d^2$ (OLIVEIRA FILHO & SARAIVA, 2004). Portanto, a energia irradiada pelo Sol que chega na superfície terrestre, a uma distância aproximada de $d = 150 \times 10^6 \text{ km}$, é menor que a radiação emitida na superfície do Sol por um fator de $R^2/d^2 \approx 2,2 \times 10^{-5}$, resultando numa intensidade de aproximadamente $1,4 \text{ kW/m}^2$.

3.2.6 Irradiância solar

Ao ficarmos expostos à luz solar nós sentimos um desconforto devido ao aumento de temperatura. Isso ocorre principalmente porque o Sol emite grandes quantidades de energia. No entanto, vimos na seção anterior que apenas duas partes em cem mil dessa energia chegam na Terra. De acordo com o *Total Irradiance Monitor* (TIM) do *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE), o valor da radiação solar que atinge perpendicularmente cada metro quadrado da superfície da atmosfera terrestre, a cada segundo, é de $(1360,8 \pm 0,5) \text{ J}$. Este valor é indevidamente chamado de constante solar, porque observa-se que este pode sofrer alterações ao longo dos anos (NASA, 2018). Um termo mais apropriado seria irradiância solar total. Esse valor pode ser escrito também como $1,361 \text{ kW/m}^2$. Note que este valor é bem próximo ao calculado na seção anterior utilizando a eq.(3.16), por meio da qual obtivemos $1,4 \text{ kW/m}^2$.

O espectro da radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre encontra-se em um intervalo de comprimentos de onda de $0,2 \mu\text{m}$ a $25 \mu\text{m}$. A distribuição espectral dessa radiação é apresentada na Tabela 3.6. Aproximadamente metade da irradiância solar encontra-se na região da luz visível e quase a mesma quantidade na região do infravermelho (MACAGNAN, 2019).

TABELA 3.6 – Divisão do espectro solar em bandas de cores e regiões de energia.

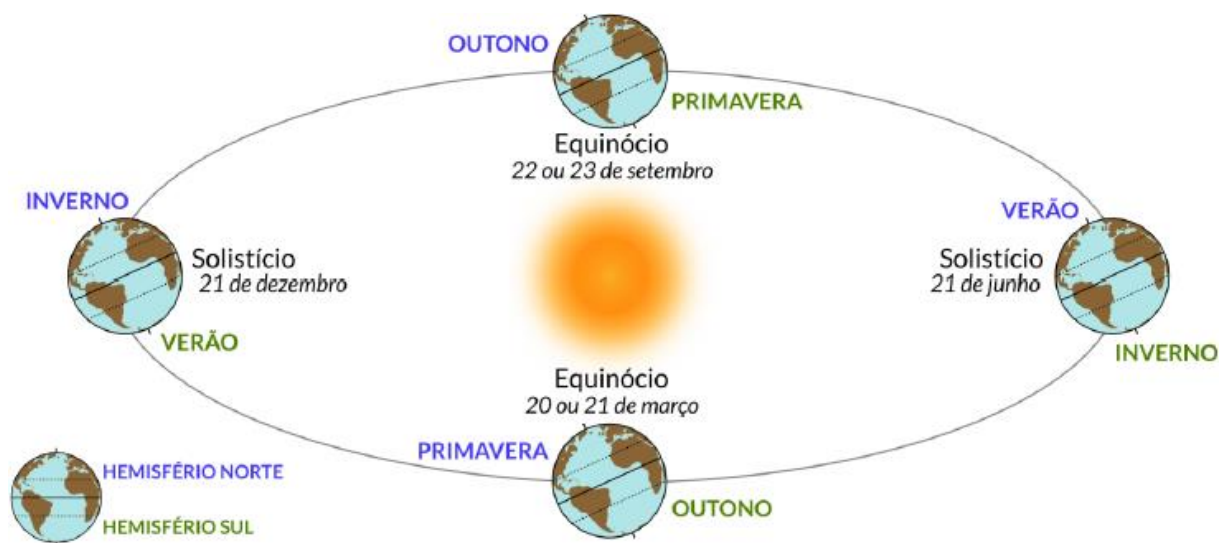
| <i>Cor</i> | <i>Comprimento de onda (μm)</i> | <i>Irradiância (W/m^2)</i> | <i>Porcentagem da irradiância total</i> |
|---------------|---|---|---|
| Violeta | 0,390 – 0,455 | 108,85 | 7,96 |
| Azul | 0,455 – 0,492 | 73,63 | 5,39 |
| Verde | 0,492 – 0,577 | 160,00 | 11,70 |
| Amarelo | 0,577 – 0,597 | 35,97 | 2,63 |
| Laranja | 0,597 – 0,622 | 43,14 | 3,16 |
| Vermelho | 0,622 – 0,770 | 212,82 | 15,57 |
| Ultravioleta | < 0,4 | 109,81 | 8,03 |
| Visível | 0,390 – 0,770 | 634,40 | 46,4 |
| Infravermelho | > 0,770 | 634,40 | 46,4 |

Fonte: MACAGNAN (2019, p. 12).

Alguns fatores astronômicos causam variação no valor da irradiância solar sobre nosso planeta, fazendo com que seu valor não seja uma constante (PEREIRA et al., 2017). Um deles é a posição da Terra em relação ao Sol. Ao longo de um período de 365,25 dias de translação, a distância entre os dois astros varia entre $1,47 \times 10^8 \text{ km}$ e $1,52 \times 10^8 \text{ km}$. Além disso, a quantidade de energia incidente em um determinado ponto e a duração do dia variam em função do ciclo anual e ciclo diário. O primeiro ocorre como consequência da inclinação do eixo de rotação terrestre de $23,45^\circ$ em relação ao plano orbital. Em decorrência dessa inclinação, há a ocorrência das estações do ano que, juntamente com a latitude, interferem na duração do dia, conforme apresentado nas figuras 3.12 e 3.13.

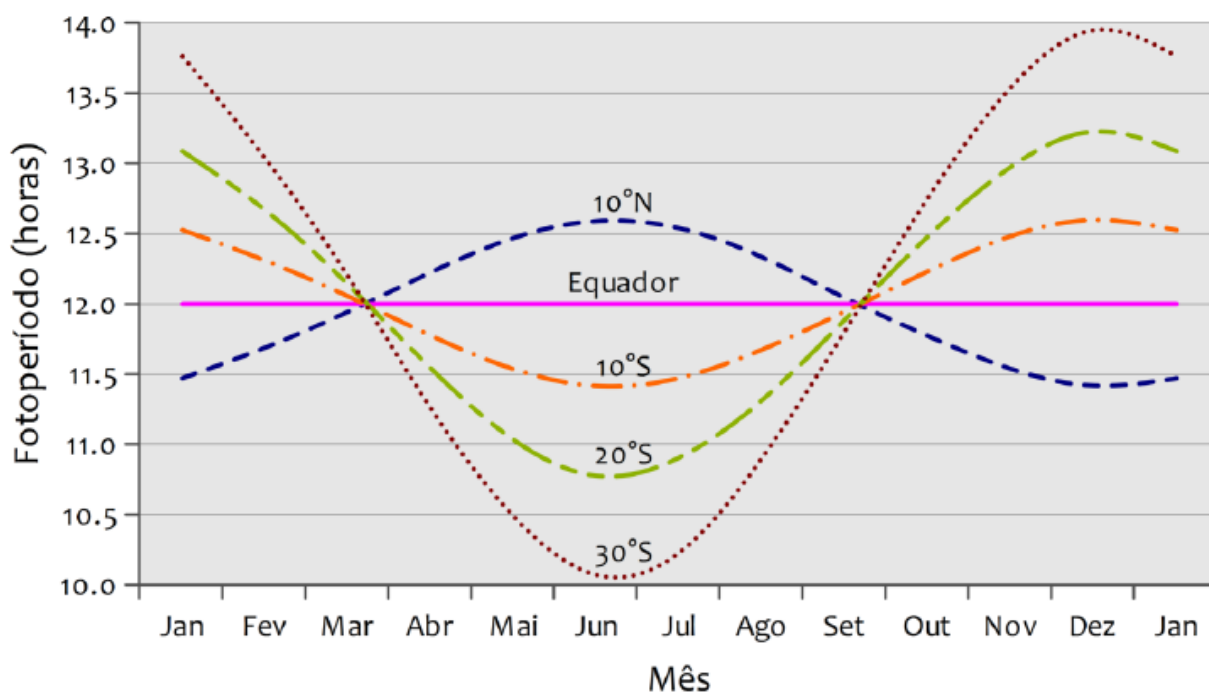
O movimento de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo causa uma variação diária no valor da radiação solar incidente sobre o planeta. Para a descrição dessa variação são utilizados alguns ângulos. A declinação solar, representada por δ , é o ângulo formado entre a inclinação do plano equatorial terrestre e a linha da direção Sol-Terra, a qual varia entre $-23^\circ 27'$ e $+23^\circ 27'$ durante o ano. O valor é negativo quando a linha da direção Sol-Terra se encontra sobre o hemisfério sul. Há também o ângulo horário solar, simbolizado por ω , que representa o deslocamento angular do movimento aparente do Sol em decorrência da rotação do planeta, variando entre -180° e $+180^\circ$. Cada hora corresponde a cerca de 15° e, por convenção, é positivo pela manhã, negativo pela tarde e assume o valor de zero no horário de meio-dia.

Figura 3.12 – A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia. O Sol está posicionado sobre a linha dos Trópicos de Câncer e de Capricórnio nos dias de solstício e posicionado sobre o Equador nos equinócios.



Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

Figura 3.13 – Variação da duração do dia ao longo do ano em função da latitude.



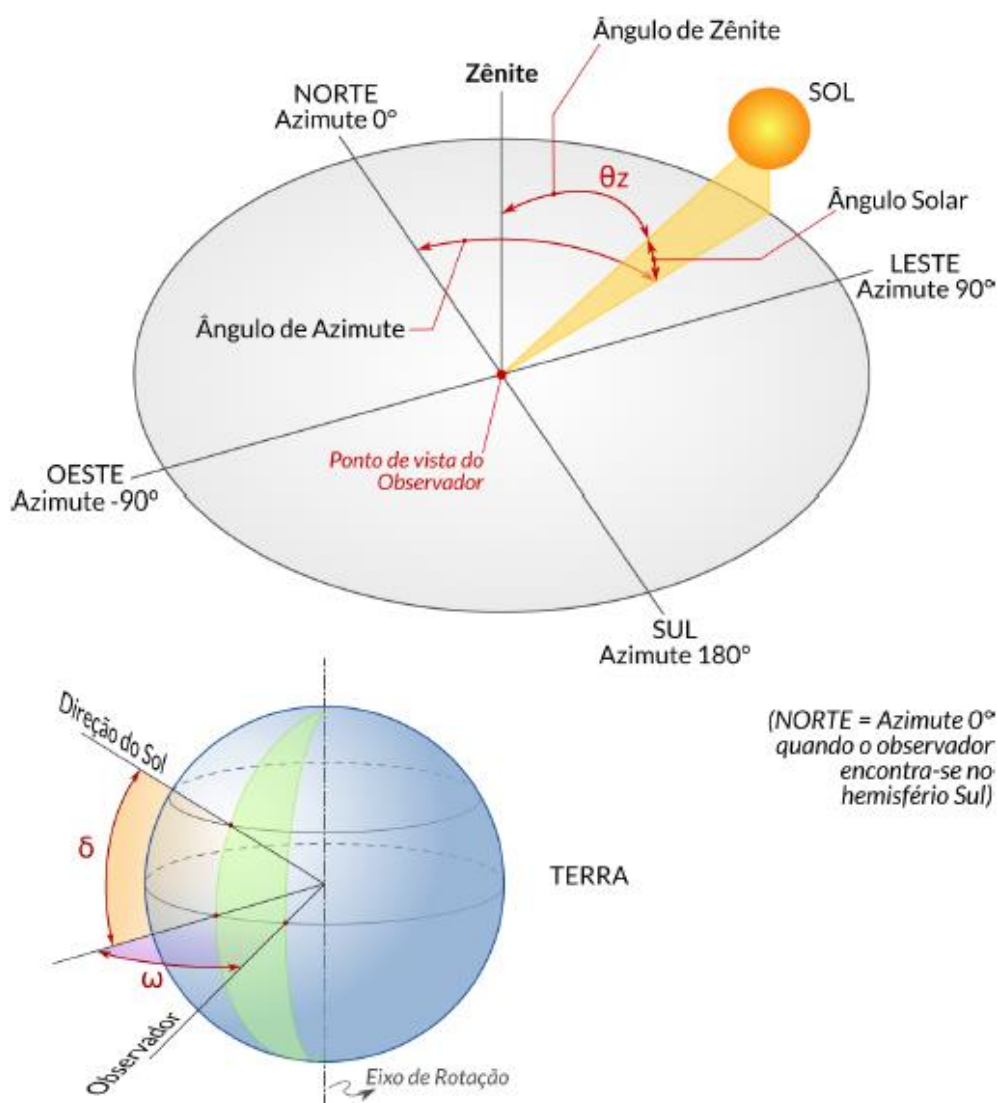
Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

O ângulo zenital solar, simbolizado por θ_z , é o ângulo formado entre a vertical do ponto onde se realiza a observação e a direção da linha formada entre o ponto de observação e o Sol. Tal valor pode ser estimado através de outros valores, como o da latitude local φ , declinação solar δ e o ângulo horário solar ω (CAMPOS & ALCANTARA, 2013, MACAGNAN, 2019).

Caso o Sol esteja no horizonte, no momento da nascente ou poente, o ângulo zenital é igual a 90° .

Por último, há o ângulo azimutal solar, formado entre o meridiano do observador e a linha de projeção da direção do Sol no plano horizontal, variando entre -180° e $+180^\circ$. Por convenção, o ângulo é positivo no sentido horário a partir da direção do norte geográfico no ponto do meridiano local. Na figura 3.14 são apresentados todos os ângulos supracitados.

Figura 3.14 – Ângulos notáveis na solarimetria.

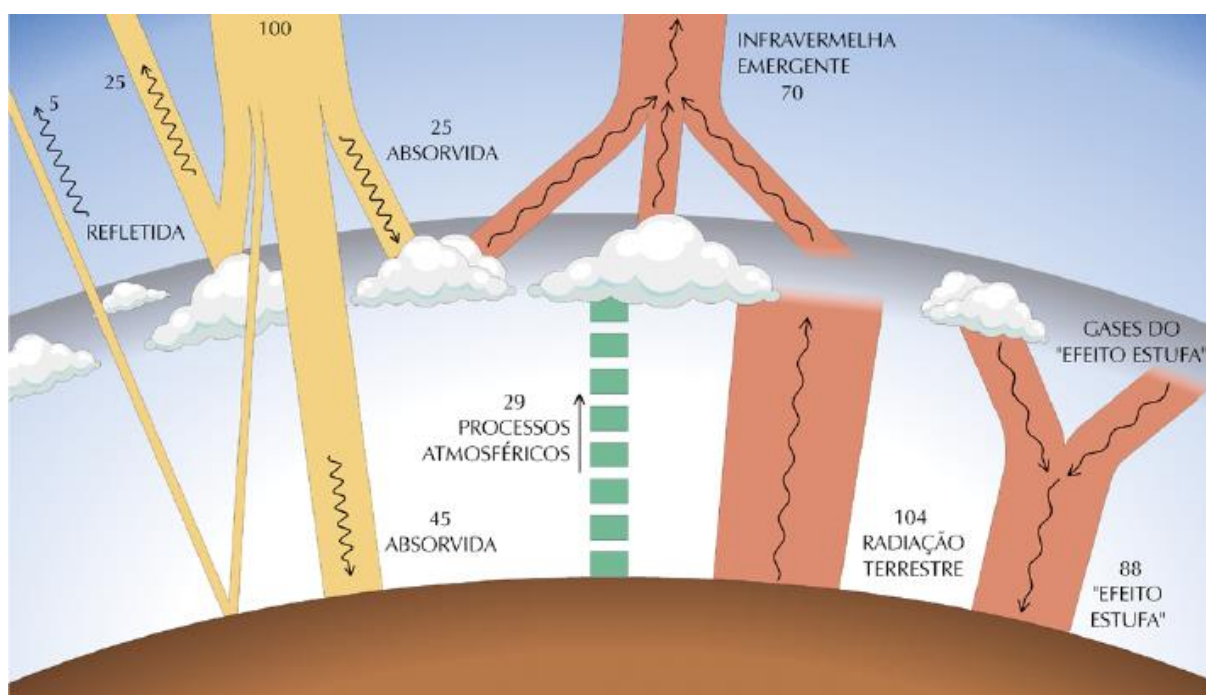


Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

Além dos fatores que influenciam no valor da irradiação solar que atinge o topo da atmosfera, existem diversos fatores físicos que atenuam a intensidade do valor que atravessa toda a camada de gases aerossóis (particulados) que a compõem (PEREIRA et al., 2017; UFPR,

2018; USP 2018). Os diferentes comprimentos de onda emitidos pelo Sol interagem de maneiras diferentes com cada um desses constituintes, sofrendo fenômenos como absorção e espalhamento, por exemplo. Desconsiderando o vapor de água, a parte seca da atmosfera é composta por 99% de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), e apenas 1% por argônio (Ar) e outros gases. Apesar de sua baixa concentração, há também os chamados gases-traço, como o dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), entre outros, que também cumprem um papel importante na interação com a radiação. A figura 3.15 apresenta os principais processos envolvidos na radiação que incide sobre a atmosfera terrestre.

Figura 3.15 – Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Os valores numéricos representam a fração de energia em cada processo radiativo na atmosfera.



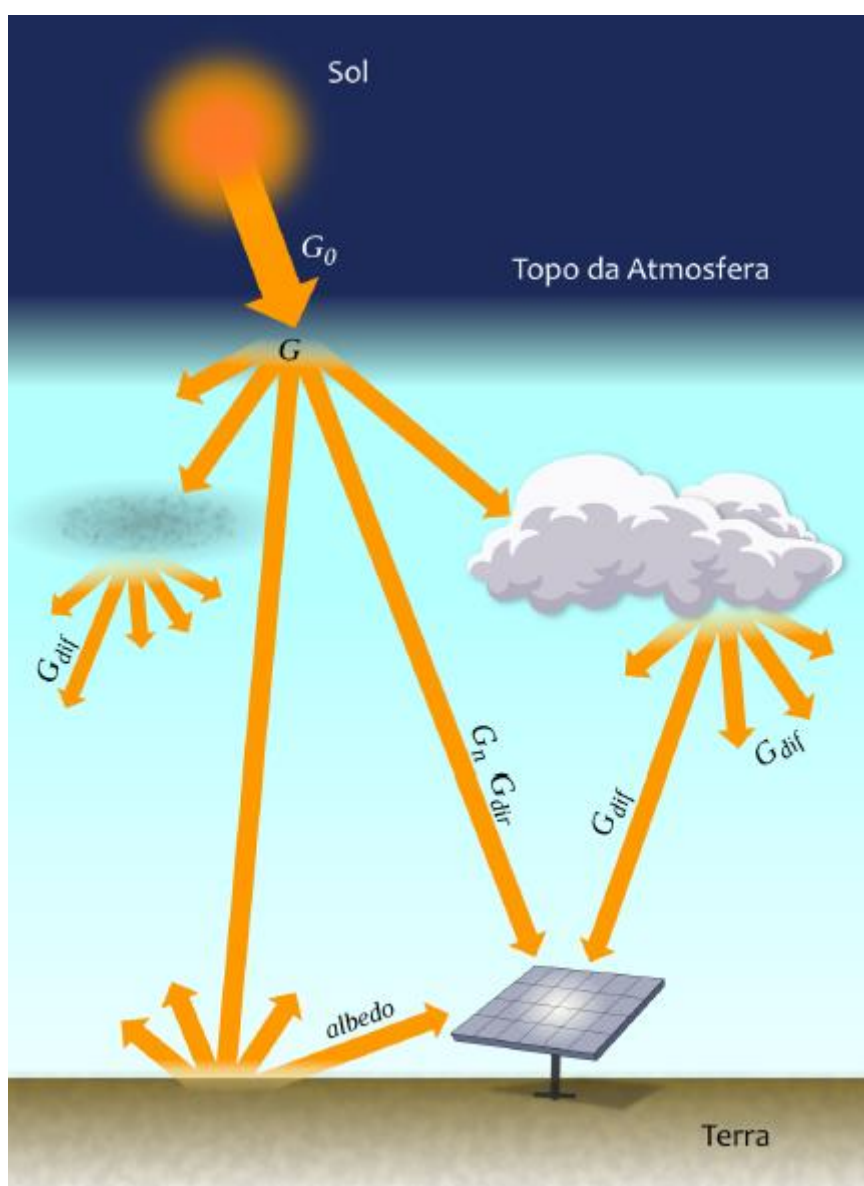
Fonte: Pereira et al. (2017, p. 17).

O processo de espalhamento é causado pelos gases e partículas em suspensão na atmosfera. A absorção é causada pelas moléculas de vapor de água, oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e dióxido de carbono (CO_2). Tais processos atenuam o valor da irradiância solar que efetivamente atinge a superfície terrestre, fazendo com que este possa ser reduzido pela metade. As nuvens também produzem espalhamento da radiação solar, devido às suas propriedades óticas.

A irradiância solar incidente sobre a superfície terrestre é composta por duas componentes: a direta e a difusa. A irradiância direta representa a radiação que não sofreu

atenuação por processos atmosféricos. A irradiância difusa é composta por todas as radiações provenientes das demais direções, surgindo a partir dos processos ocorridos na atmosfera. A figura 3.16 apresenta os componentes da irradiância solar, cujos significados são apresentados na Tabela 3.7.

Figura 3.16 – Componentes da irradiância solar.



Fonte: Pereira et al. (2017, p. 19).

TABELA 3.7 – Componentes da irradiância solar.

| <i>Símbolo</i> | <i>Nome</i> | <i>Significado</i> |
|----------------|--------------------------------|---|
| G_0 | Irradiância extraterrestre | Taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. |
| G_n | Irradiância direta normal | Taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície. |
| G_{dif} | Irradiância difusa horizontal | Taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos. |
| G_{dir} | Irradiância direta horizontal | Taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre G_n e o cosseno de θ_z . |
| G | Irradiância global horizontal | Taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. É dada pela soma $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cos(\theta_z)$. |
| G_i | Irradiância no plano inclinado | Taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra. |

Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2017, p. 19).

Mesmo com esses fatores de atenuação da irradiância solar, a energia proveniente do Sol tem sido utilizada cada vez mais na geração de energia elétrica. Muitas residências têm coletado esse tipo de energia a partir de painéis solares. Estes funcionam com a conversão de energia luminosa em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Os fótons da radiação solar, ao incidir numa célula fotovoltaica, a qual é composta por um material semicondutor, fornecem energia suficiente para os elétrons saírem da banda de valência para a banda de condução do material resultando no surgimento de uma tensão elétrica. Tais placas apresentam-se como uma alternativa viável para áreas de difícil acesso e têm se tornado cada vez mais economicamente viáveis. Portanto, ter uma base do valor da irradiância solar local pode auxiliar na estimativa de energia que pode ser gerada e, conseqüentemente, quais aparelhos ou processos podem ser alimentados através dessa fonte.

A irradiância incidente sobre a superfície terrestre pode atingir o máximo de 1000 W/m^2 ao meio dia solar com o céu limpo. Valores de até 1400 W/m^2 já foram observados em situações em que havia nebulosidade, o que causava o espalhamento da radiação (DGS, 2008, apud PEREIRA et al., 2017). Valores de até 1822 W/m^2 para a irradiância global horizontal já foram registrados em território brasileiro (RÜTHER et al., 2017, apud PEREIRA et al., 2017). É possível encontrar o valor da irradiância solar média de acordo com a região e

a época do ano em alguns levantamentos realizados nos últimos anos (CHIGUERU, 2000; ANEEL, 2005; PEREIRA et al., 2006, 2017; SÃO PAULO, 2018, CRESESB, 2019).

3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Nesta seção apresentamos o roteiro de dois experimentos para a determinação da irradiância solar total. O primeiro constitui a proposta inicial do experimento, o qual foi testado previamente e aplicado com os alunos. No entanto, durante o desenvolvimento da atividade experimental, algumas dificuldades foram encontradas, o que causou uma leve interferência na qualidade dos dados obtidos e, conseqüentemente, em sua análise. Tais dificuldades serão relatadas no próximo capítulo, o qual trata da aplicação do produto educacional. Após reconsiderar os conceitos e fenômenos envolvidos no experimento, realizamos algumas mudanças de foco. Como resultado, chegamos na proposta final do experimento, o qual possibilita um melhor tratamento dos dados, embora utilize praticamente os mesmos materiais da proposta inicial.

Como apresentado na revisão da literatura, algumas propostas experimentais para a obtenção da irradiância solar utiliza a variação da temperatura da água para a obtenção de dados. A utilização de água pode ser justificada pelo uso da expressão $Q = mc\Delta T$, em que m é a massa de água utilizada, c seu calor específico e ΔT a variação de temperatura do sistema. Essa equação nos fornece a quantidade de energia solar fornecida à água através de calor pela medida da variação de sua temperatura. Esta equação é definida para processos quase-estáticos, nos quais o sistema é descrito por uma sucessão de estados de equilíbrio. Nestes processos o tempo com que a temperatura, ou outro parâmetro de controle, varia de um valor para outro é muito maior que o tempo de resposta do material. Isso significa que o processo de aquecimento do sistema pode ser muito lento, dependendo do material utilizado. Tal processo funciona muito bem no caso da água.

Para agilizar a obtenção de dados, optamos por utilizar a variação da temperatura de uma chapinha metálica para a obtenção de dados. O problema que apareceu em nosso sistema é que a variação da energia interna do sistema não pode ser descrita pela equação $Q = mc\Delta T$, como no caso da água, pois no caso da chapinha metálica não temos um processo quase-estático, o aquecimento se dá muito rapidamente. Dessa forma tivemos que explorar o estado de equilíbrio final do sistema e não sua taxa de aquecimento. Para obtenção da irradiância solar

local utilizamos a lei de Stefan-Boltzmann e a aproximação de considerar o sistema como um corpo negro, abrindo portas para a abordagem de tópicos de Física Moderna.

Como a taxa de aquecimento do sistema metálico é bem maior que no caso da água, o tempo de aplicação em sala de aula torna-se mais viável. Por outro lado, é muito importante que a placa metálica esteja bem isolada termicamente em relação a objetos que possam conduzir energia através de calor, pois isso pode dificultar na obtenção do estado final de equilíbrio térmico do sistema. Nesse trabalho também propomos a utilização de termômetros infravermelhos, um recurso mais atualizado e menos perigoso em relação aos termômetros de mercúrio ou álcool costumeiramente utilizados.

Em nossa proposta, também apresentamos algumas fórmulas e manipulações matemáticas que devem ser discutidas durante o processo de desenvolvimento e análise do experimento e dos resultados. Ao utilizar a matemática contextualizada a um experimento, espera-se que a abstração possa ser gradativamente substituída pela significação, uma vez que os alunos poderão entender o que representa cada grandeza utilizada no cálculo e observá-las através dos fenômenos que o experimento envolve. A utilização da matemática, portanto, pode atuar como um agente motivador na aprendizagem, bem como familiarizar os alunos com o formalismo matemático. Esse benefício pode, inclusive, ser aplicado por extensão às próprias aulas de matemática.

3.3.1 Versão inicial do experimento: determinação da irradiância solar local através da variação da temperatura

Os materiais utilizados no desenvolvimento do experimento e seus respectivos preços estão apresentados na Tabela 3.8. No geral, os materiais são de baixo custo, sendo o termômetro infravermelho a única exceção. A chapinha metálica foi obtida através de doação de um ferrovelho e o palito de madeira pode ser improvisado com qualquer haste fina à disposição.

Os termômetros infravermelhos operam em diversos intervalos do espectro eletromagnético, sendo os mais comuns apresentados na Tabela 3.9. A marca, o modelo e as especificações técnicas do termômetro infravermelho utilizado no experimento e na estimativa de preço encontram-se no Anexo A. O intervalo de espectro de operação do termômetro utilizado é de $5 \mu m$ a $14 \mu m$. Portanto, encontra-se dentro do intervalo recomendado para a medição de temperatura da chapinha metálica utilizada no experimento, pois esta foi revestida com tinta preta fosca.

TABELA 3.8 – Materiais utilizados no experimento.

| <i>Material</i> | <i>Preço</i> |
|---|--------------|
| Chapinha metálica (1mm de espessura) | R\$ 0,50 |
| Base de material isolante (placa de isopor) | R\$ 5,00 |
| Palito de madeira (espetininho) | R\$ 0,05 |
| Frasco de tinta preta fosca | R\$ 13,00 |
| Termômetro infravermelho | R\$ 45,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

TABELA 3.9 – Espectros de medição mais comuns na operação de termômetros infravermelhos e suas aplicações, mostrando a temperatura mínima (min.).

| <i>Espectro de Medição</i> | <i>Aplicação</i> |
|--|---|
| 0,676 μm | Medição de metais fundidos (min. 1100°C) |
| 0,8 μm – 1,1 μm | Medição de vidros, metais e cerâmicas fundidos (min. 600°C) |
| 1,45 μm – 1,8 μm | Medição de metais e cerâmicas (min. 250°C) |
| 2,0 μm – 2,8 μm | Medição de metais (min. 75°C) |
| 3 μm – 5 μm | Medição de metais e cerâmicas (min. 5°C) |
| 3,43 μm | Medição de lâminas PE e PP (min. 50°C) |
| 3,9 μm | Medição em fornos (min. 75°C) |
| 5,14 μm | Medição superficial em vidros (min. 100°C) |
| 8 μm – 14 μm | Medição em superfícies não metálicas e metais revestidos (min. -40°C) |

Fonte: Lumasense Technologies (2019).

A chapinha metálica que utilizamos é composta de aço-carbono e possui dimensões de (3 x 3) cm e 1 mm de espessura. É recomendável que o tamanho da chapinha seja pequeno e a espessura a menor possível, pois isso favorece a rápida variação da temperatura do material. A chapinha deve ser pintada de preto fosco, o que permite uma melhor absorção de energia através do calor. Para que a tinta constituísse uma fina camada e, conseqüentemente, não interferisse nos resultados, utilizamos tinta spray. Caso seja necessário utilizar um pincel para a aplicação da tinta, é imprescindível tomar cuidado para que a superfície não fique irregular e com acúmulo de tinta.

Após pintada, a chapinha metálica deve ser colocada sobre uma base de material termicamente isolante. Nós utilizamos uma placa de isopor, a qual pode ser facilmente

encontrada em papelarias. Por ser isolante, a base possibilita que a variação da temperatura da chapinha metálica ocorra principalmente em decorrência da radiação solar incidente. O palito de madeira, de altura conhecida, deve ser fixado sobre a placa de isopor. Ele foi utilizado para medirmos o ângulo de incidência da radiação solar através de sua sombra projetada na placa de isopor. A figura 3.17 apresenta o conjunto experimental montado.

Figura 3.17 – Conjunto experimental da proposta inicial montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a execução do experimento, uma tabela deve ser utilizada para registrar a temperatura da chapinha metálica em função do tempo e o tamanho da sombra do palito no início e no final do experimento. Para cronometrar o tempo os alunos podem utilizar seus próprios aparelhos celulares. Para medir corretamente a temperatura, é necessário que o laser do termômetro (caso possua) incida perpendicularmente sobre a chapinha metálica. A distância dependerá das recomendações do fabricante. Em nosso caso, posicionamos o termômetro a uma distância aproximada de cinco a oito centímetros do ponto de aferição. Algumas especificações técnicas e recomendações fornecidas pelo fabricante do termômetro utilizado encontram-se no Anexo A.

Inicialmente o conjunto composto pela placa de isopor, chapinha metálica e palito de madeira, deve estar sob a sombra em equilíbrio térmico com o ambiente. A temperatura inicial da chapinha deve ser aferida e registrada. Após isso, o conjunto deve ser exposto ao Sol e o cronômetro acionado. O tamanho da sombra deve ser registrado nesse momento. A cada minuto, a temperatura da chapinha deve ser aferida e registrada na tabela. O experimento deve

ser conduzido até o momento em que a chapinha não apresente variações de temperatura, o que significa que o sistema está em equilíbrio térmico com a vizinhança. Ao final do experimento, o tamanho da sombra deve ser novamente aferido e registrado.

Para facilitar a análise da variação da temperatura com o tempo é necessário plotar um gráfico com os dados registrados na tabela. Para obtermos a irradiância solar local, chamada de potência solar local durante a abordagem com os alunos, é necessário calcular a quantidade de energia absorvida pela chapinha durante o intervalo de tempo em que a temperatura varia linearmente. Para isso assumimos que toda a radiação incidente na chapinha foi absorvida e convertida em energia térmica. É importante considerar a parte linear do gráfico para utilizarmos a equação $Q = mc\Delta T$, eq.(3.3) da seção 3.1.3, para calcularmos a quantidade de energia absorvida pela chapinha. A massa pode ser aferida através de uma balança de precisão. Caso a escola não disponha de uma, os alunos e o professor podem obter um valor aproximado através do valor da densidade ρ do material, o qual pode ser facilmente encontrado na literatura, utilizando a equação,

$$m = \rho V, \quad (3.17)$$

sendo V o volume da chapinha. Como a chapinha possui forma geométrica bem definida é fácil calcular o seu volume.

A potência de radiação é definida como o fluxo de energia absorvida (ou emitida) por uma fonte em um intervalo de tempo determinado e é dada por,

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (3.18)$$

Como consideramos o caso ideal em que toda a energia solar é convertida em energia térmica na chapinha $E = Q$, obtém-se,

$$P = mc \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.19)$$

Como queremos obter a irradiância solar I_{SL} na superfície da chapinha metálica, devemos obter a potência sobre a área A de sua superfície. Pela equação anterior tem-se,

$$I_{SL} = \frac{P}{A} = \left(\frac{mc}{A}\right) \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.20)$$

sendo m a massa da chapinha, c o calor específico do material da chapinha e $\Delta T/\Delta t$ a taxa de aquecimento da mesma. Para expressar a potência solar em W/m^2 , utilizamos as grandezas do sistema nas unidades de medida apresentadas na Tabela 3.10.

Dependendo do horário em que a atividade experimental for executada, os raios solares poderão apresentar uma inclinação com relação à superfície terrestre. Embora o valor da irradiância solar inclinada seja adequado para comparar com os valores encontrados em

algumas referências, como os atlas solarimétricos, por exemplo, o professor pode, de acordo com o planejamento da aplicação do produto educacional, obter o valor da irradiância solar perpendicular à superfície, com o objetivo de realizar uma comparação com o valor médio da incidência de radiação sobre a superfície atmosférica. Para isso, será necessário ajustar a eq.(3.20) através de algumas relações trigonométricas (MORAES, 2019; SARAIVA, OLIVEIRA FILHO & MÜLLER, 2019).

TABELA 3.10 – Unidades de medida utilizadas para as grandezas envolvidas no experimento.

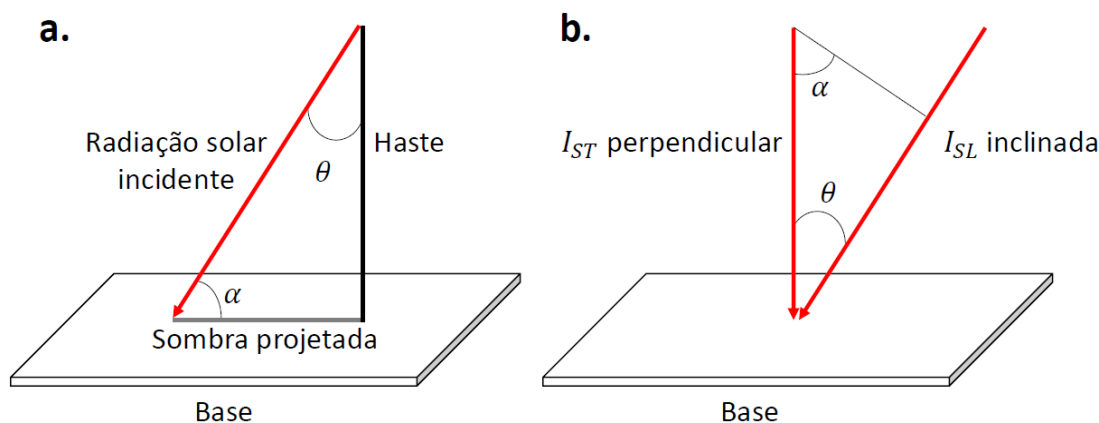
| <i>Grandeza</i> | <i>Unidade de Medida</i> |
|------------------|---|
| Massa | [g] = grama |
| Calor específico | [J/g°C] = joule por grama, por grau Celsius |
| Temperatura | [°C] = grau Celsius |
| Área | [m ²] = metro quadrado |
| Tempo | [s] = segundo |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 3.18a apresentamos uma ilustração da sombra, de comprimento S , da haste de tamanho h projetada na placa de isopor. O ângulo θ formado entre os raios solares e a haste pode ser calculado como,

$$\tan \theta = \frac{S}{h} \rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{S}{h} \right). \quad (3.21)$$

Figura 3.18 – (a) A partir da sombra da haste projetada, s , na placa de isopor é possível encontrar o ângulo θ formado entre a radiação incidente e a haste de altura h . (b) Com base no ângulo encontrado, é possível calcular a irradiância solar total I_{ST} , a qual é perpendicular à superfície.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ângulo formado entre os raios solares e a superfície terrestre também pode ser considerado e é dado por,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{h}{s} \right) \quad (3.22)$$

Na figura 3.18b mostramos que a irradiância solar local I_{SL} é uma projeção da irradiância solar total I_{ST} , ou seja, $I_{SL} = I_{ST} \cos \theta$. Utilizando a eq.(3.20) podemos escrever,

$$I_{ST} = 2 \frac{I_{SL}}{\cos \theta} = 2 \left(\frac{mc}{A \cos \theta} \right) \frac{\Delta T}{\Delta t} , \quad (3.23)$$

sendo θ dado pela eq.(3.21). Se considerarmos o ângulo α obtemos $I_{SL} = I_{ST} \sin \alpha$ de modo que,

$$I_{ST} = 2 \frac{I_{SL}}{\sin \alpha} = 2 \left(\frac{mc}{A \sin \alpha} \right) \frac{\Delta T}{\Delta t} , \quad (3.24)$$

em que α é dado pela eq.(3.22).

Note que multiplicamos os resultados das eqs.(3.23) e (3.24) por um fator 2 para o cálculo do valor da irradiância solar total. Isso é necessário porque apenas metade da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera terrestre efetivamente chega à sua superfície e conseqüentemente à chapinha metálica utilizada no experimento (PEREIRA et al., 2017). Veja maiores detalhes na seção 3.1.6.

Para obtenção de melhores resultados o experimento deve ser realizado em um dia ensolarado e de céu claro. Caso o céu apresente algumas nuvens, é aconselhável aguardar o momento em que elas não estejam obstruindo os raios solares no local em que o experimento esteja sendo realizado. Além disso, recomenda-se também que o experimento seja realizado em um horário próximo ao meio-dia, visto que nesse horário o Sol estará aproximadamente em sua altura máxima, o que permite que não ocorra projeção de sombra e que a radiação incidente seja praticamente perpendicular à superfície.

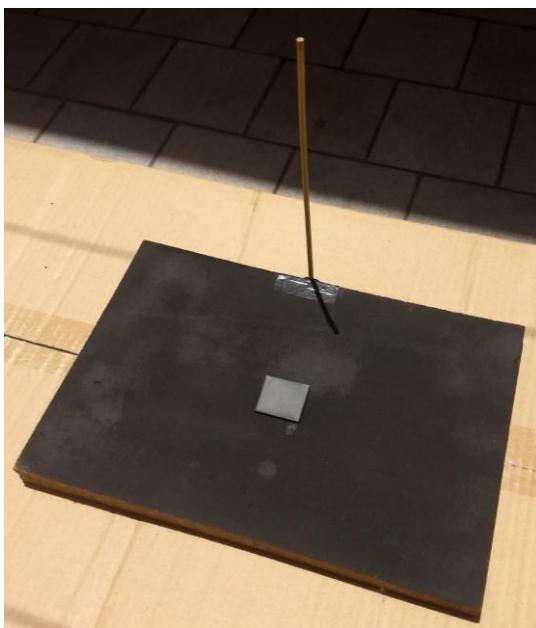
Nesta versão do experimento utilizamos a equação $Q = mc\Delta T$ para o cálculo da irradiância solar. Como já discutido no início da sessão, esta equação só pode ser utilizada em processos quase-estáticos. Isso significa que o aquecimento do sistema deve ser realizado lentamente em comparação com o tempo de relaxação, ou de resposta, do mesmo. No caso da água é possível observar uma taxa de aquecimento linear, como esperado pelas eqs.(3.23) e (3.24) em que I_{ST} varia linearmente com $\Delta T/\Delta t$. No caso da chapinha de metal utilizada observamos que este modelo é inviável pois como o metal aquece mais rapidamente que a água, por exemplo, não podemos considerar a variação de temperatura da mesma, e conseqüentemente o uso da equação $Q = mc\Delta T$, para o cálculo de I_{ST} .

Na próxima seção apresentamos as considerações que devem ser levadas em conta para a modelagem desse sistema para obtenção de erros menores.

3.3.2 Versão final do experimento: determinação da irradiância solar total através do equilíbrio térmico

O procedimento experimental adotado nesta seção é o mesmo da seção anterior. As alterações realizadas estão na mudança da base de isopor para madeira e na modelagem do sistema para a determinação da irradiância solar local. A escolha da madeira ao invés do isopor deve-se ao fato de que ela possui maior aderência com a tinta preta fosca, o que favorece o desenvolvimento do experimento. O conjunto é apresentado na figura 3.19. A haste de madeira pode ser fixada com fita adesiva.

Figura 3.19 – Conjunto experimental final, mostrando que a placa de isopor foi substituída por uma placa de madeira pintada com a mesma tinta utilizada para pintar a chapinha de metal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A execução do experimento e os procedimentos propostos na seção anterior para a obtenção dos dados são praticamente os mesmos utilizados para esta versão do experimento. Nós mudamos o passo para a aferição da temperatura de um minuto para 30 segundos, para obtermos uma curva de aquecimento mais detalhada até o equilíbrio térmico da chapinha ser atingido.

Para obtermos o valor da potência solar local, utilizamos a lei de Stefan-Boltzmann $I = \sigma T_{ef}^4$, dada pela eq.(3.15). Para utilizar esta equação precisamos considerar que a chapinha é um corpo negro em equilíbrio térmico à temperatura efetiva T_{ef} , a qual é determinada no experimento. Qualquer objeto coberto com uma camada difusa de pigmento preto, como a nossa chapinha, pode ser considerado em boa aproximação como um corpo negro, independentemente dos detalhes de sua composição. A tinta preta utilizada faz com que a chapinha se torne um excelente absorvedor de energia solar podendo converter toda essa energia em energia térmica. No equilíbrio térmico a chapinha é considerada um corpo negro à temperatura T_{ef} que emite a mesma quantidade de energia por unidade de área e por unidade de tempo que recebeu (FLUKE, 2004; MENDONÇA, 2005; CAVALCANTI, 2011; NOVO et al., 2014; HIGHER, 2018; VÓRTEX, 2018).

O caráter universal do espectro térmico de um corpo negro faz com que o uso da lei de Stefan-Boltzmann para o cálculo da irradiação solar no nosso experimento seja uma excelente aproximação para fins didáticos. Sendo assim, as únicas grandezas necessárias para o cálculo da irradiância solar local são a temperatura efetiva de equilíbrio da chapinha, que chamaremos simplesmente de T , e a constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} W/m^2K^4$. Para utilizarmos o valor da constante de Stefan-Boltzmann nas unidades apresentadas tivemos que expressar a temperatura do sistema em kelvins. A conversão de graus Celsius T_C para kelvin T é dada por,

$$T = T_C + 273. \quad (3.25)$$

Utilizando as mesmas considerações anteriores, temos pela figura 3.18.b que $I_{SL} = I_{ST} \cos \theta$, sendo $I_{SL} = \sigma T^4$, de modo que,

$$I_{ST} = 2 \frac{\sigma T^4}{\cos \theta} = 2 \frac{\sigma T^4}{\cos(\tan^{-1}(\frac{S}{h}))} \quad (3.26)$$

ou

$$I_{ST} = 2 \frac{\sigma T^4}{\sin \alpha} = 2 \frac{\sigma T^4}{\text{sen}(\tan^{-1}(\frac{h}{S}))}. \quad (3.27)$$

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO

4.1 LOCAL DE APLICAÇÃO

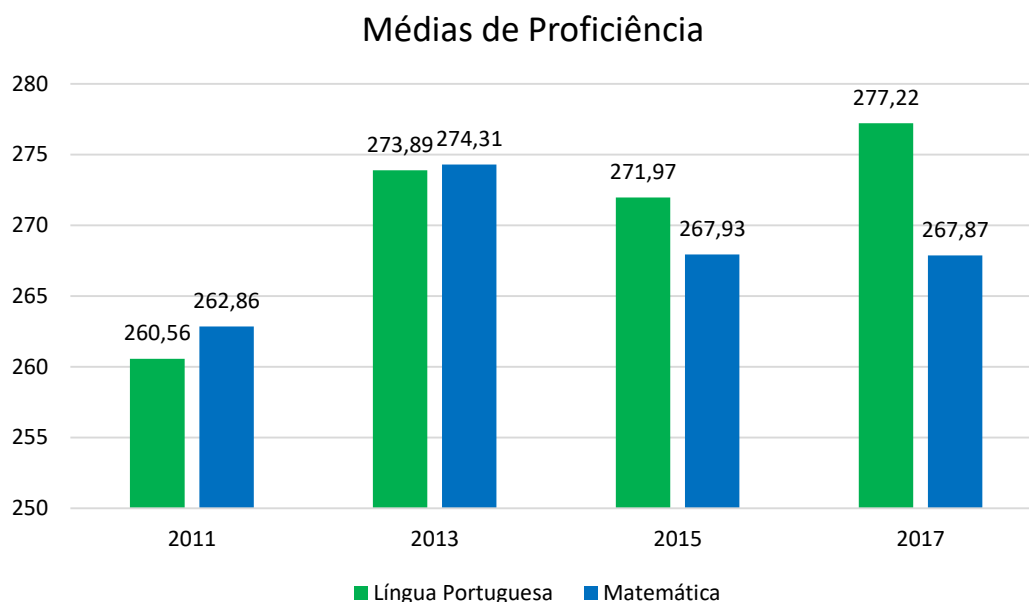
A escola onde o produto educacional foi aplicado localiza-se numa cidade do interior do estado de São Paulo e integra a rede pública de educação. A escola atende alunos do ensino médio de todo o município, o que inclui a zona rural e urbana, além de alunos de municípios vizinhos. De acordo com o projeto político pedagógico da escola, cerca de 23% dos alunos são provenientes da zona rural, dos mais diversos bairros do município. No geral, são filhos de trabalhadores das empresas da cidade, de funcionários públicos, do comércio local e da agricultura familiar, com pouca escolaridade, possuindo renda mensal entre um e três salários mínimos. A comunidade conta com poucas opções de lazer.

A escola tem apresentado crescimento em determinados aspectos das médias de proficiência na Prova Brasil, conforme apresentado na figura 4.1 (INEP, 2019). Esta prova integra o Sistema de Avaliação da Educação Básica (SAEB). Referente ao nono ano do ensino fundamental, as médias da última prova, realizada em 2017, estão acima das médias das escolas estaduais do país, do estado e do município. Já no ensino médio, as médias de proficiência da escola (310,83 em língua portuguesa e 304,86 em matemática) são as maiores da cidade (médias de 289,70 em língua portuguesa e 285,50 em matemática).

O Índice de Desenvolvimento da Educação do Estado de São Paulo (IDESP) é um indicador da qualidade das escolas que se baseia em dois critérios: o desempenho dos alunos no Sistema de Avaliação de Rendimento Escolar do Estado de São Paulo (SARESP) e fluxo

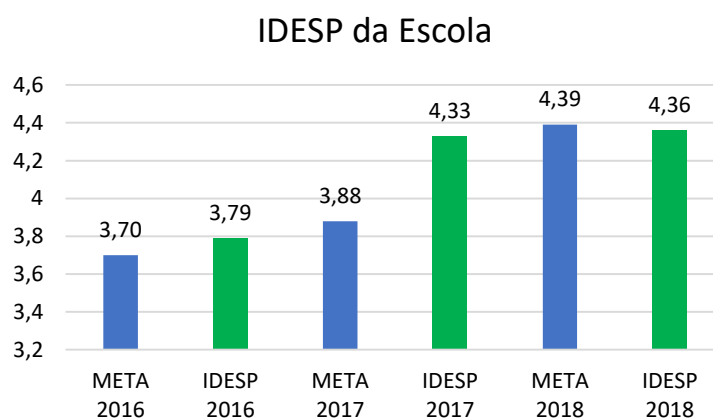
escolar. Nos últimos anos, a escola atingiu ou chegou próximo das metas estabelecidas, conforme apresentado na figura 4.2 (IDESP, 2019).

Figura 4.1 – Médias de proficiência da escola na Prova Brasil referentes ao nono ano do ensino fundamental.



Fonte: adaptado de INEP (2019).

Figura 4.2 – Série histórica de desempenho da escola no IDESP.



Fonte: adaptado de IDESP (2019).

A partir do ano de 2018 a escola passou a fazer parte do Programa de Ensino Integral (PEI). A proposta desse modelo é promover a formação integral do educando, desenvolvendo suas potencialidades em diferentes aspectos: cognitivos, afetivos e socioculturais. Com este

programa espera-se que a escola possa consolidar não apenas os conteúdos acadêmicos, mas também conteúdos socioculturais, melhoria na qualidade de vida a partir das vivências realizadas, o exercício da convivência solidária e da leitura e a interpretação do mundo em constante transformação (SÃO PAULO, 2018).

O principal diferencial desse programa é fornecer condições para que o aluno possa construir e desenvolver seu projeto de vida. Para isso, são fornecidos espaços educativos onde o aluno é capaz de desenvolver sua autonomia, uma atitude solidária e competências. Com esses objetivos, além das disciplinas da BNCC, a escola conta também com os clubes juvenis, líderes de turma, aulas de projeto de vida, acolhimento, nivelamento, disciplinas eletivas, aulas de orientação de estudos, aulas de mundo do trabalho, aulas de preparação acadêmica e aulas de atividades experimentais e laboratório através das aulas de prática de ciências.

As aulas de práticas científicas compõem uma disciplina que integra o currículo das primeiras e segundas séries do ensino médio, contando com quatro aulas semanais. Nesta disciplina, os professores possuem autonomia na construção da grade curricular, desde que esteja relacionada aos conteúdos e habilidades das disciplinas de ciências da natureza da BNCC. Nas aulas de práticas científicas, os professores das áreas de ciências da natureza têm a oportunidade de explorar e aprofundar seus conteúdos através de atividades experimentais. Embora seja esperado que as escolas de tempo integral contem com dois laboratórios para esses tipos de prática, sendo um para Física/Matemática e outro para Biologia/Química, a escola em que o produto foi aplicado ainda não contava com nenhum dos laboratórios. As atividades experimentais são comumente realizadas nos diversos espaços da escola, como sala de aula, sala de informática, pátio e quadra.

Nosso produto foi aplicado em duas turmas de segunda série do ensino médio, referidas neste trabalho como turma A e turma B, contendo 28 e 27 alunos respectivamente, em um total de 55 alunos. As turmas são compostas majoritariamente por alunos de classe média-baixa. Enquanto na turma A existe um equilíbrio entre alunos do sexo masculino e feminino (16 homens e 12 mulheres), a turma B é composta em grande parte por alunas do sexo feminino (19 mulheres e 8 homens). Como a aplicação ocorreu durante o quarto bimestre, os conteúdos de física referentes ao produto educacional já haviam sido trabalhados teoricamente com os alunos, visto que são assuntos abordados durante o primeiro semestre. Portanto, a aula inicial teve um caráter de uma breve revisão de conteúdos já vistos pelos alunos.

Optamos por apresentar a descrição da aplicação em cada turma separadamente devido ao fato de que cada classe possui suas especificidades, como ritmos de aprendizagem e nível de proficiência dos alunos. Além disso, o período das aulas em que foi trabalhado o conteúdo

teórico e a análise dos dados foi diferente para cada turma, sendo no período da manhã para a turma A e no período da tarde para a turma B. Tendo em vista que no período da tarde os alunos normalmente estão um pouco mais cansados, levando em consideração a quantidade de aulas por dia e a adaptação ao modelo de período integral, procuramos observar possíveis diferenças na participação da turma.

4.2 METODOLOGIA DA APLICAÇÃO

Nossa proposta foi aplicada em três encontros. No primeiro foram discutidas questões e problemas que envolviam o tema a ser abordado e uma apresentação dos conceitos físicos relacionados com o experimento. Um dos principais objetivos dessa aula foi saber quais eram as ideias e concepções que os alunos já possuíam com relação ao tema, principalmente aqueles conceitos concernentes à Física. Para tanto, realizamos algumas perguntas, reformulando-as quando necessário, e mediamos as respostas fornecidas. Os conceitos foram desenvolvidos para que os alunos pudessem relacionar o máximo possível do que eles já sabiam com o experimento. Este encontro teve duração de uma aula, sendo que a duração de cada aula é de 50 minutos.

O segundo encontro foi dedicado à execução do experimento. Este foi realizado em um dia ensolarado e com poucas nuvens, próximo ao horário de meio dia, visando minimizar o ângulo de incidência da radiação solar. A duração prevista era de uma aula, mas foram necessárias duas, em ambas as turmas. O terceiro e último encontro envolveu a discussão e análise dos dados através das tabelas e plotagem dos gráficos. Nessa aula os alunos tiveram que obter o valor da potência solar local através da monitoração do experimento. O aluno teve que analisar também se o valor encontrado estava de acordo com os valores disponíveis na literatura e levantar hipóteses para explicar as diferenças nos resultados, se ocorressem. Ao final, um tratamento estatístico com o cálculo da média, variância e desvio padrão da média foi realizado para avaliar a qualidade dos dados obtidos. A duração desse encontro foi de duas aulas.

Ressaltamos que, durante a abordagem do tema com os alunos, optamos por utilizar o termo potência solar ao invés de irradiância solar. Os valores finais obtidos eram referentes à radiação que incidia de maneira inclinada em relação à superfície terrestre (irradiância solar local). Embora a proposta inicial fosse converter os resultados para o valor da irradiância solar total, não houve tempo hábil para que essa atividade fosse realizada. De toda forma, os valores encontrados para a incidência inclinada de radiação são adequados para realizar a comparação

com os valores fornecidos por alguns atlas solarimétricos. Salientamos também que ao utilizarmos o termo irradiância (ou potência) solar local, nos referimos ao valor sobre a superfície terrestre, enquanto o termo irradiância (ou potência) solar total refere-se ao valor sobre a superfície atmosférica.

Em suma, a metodologia de aplicação segue um roteiro simples, compondo apenas quatro aulas. Na primeira aula realiza-se a discussão dos conteúdos e verificação dos conhecimentos prévios dos alunos, na segunda desenvolve-se o experimento e nas duas últimas realizam-se as discussões acerca dos resultados obtidos. Obviamente, este cronograma é apenas uma sugestão, de modo que o professor que tiver a intenção de replicar tal procedimento deverá levar em conta as necessidades e realidade de suas turmas, o que pode fazer com que o tempo de aplicação seja maior ou menor. O produto educacional completo, envolvendo o conteúdo de Física, o roteiro experimental e as questões propostas estão disponíveis no Apêndice A. Todo o desenvolvimento matemático necessário para a realização da propagação de erros é apresentado no Apêndice B. O registro de todas as respostas dos alunos encontra-se no Apêndice C.

4.3 PRIMEIRO ENCONTRO: DISCUSSÃO INICIAL DA SITUAÇÃO-PROBLEMA E APRESENTAÇÃO DOS CONTEÚDOS DE FÍSICA

4.3.1 Turma A

O encontro com a Turma A iniciou-se com a apresentação de três perguntas relacionadas ao tema potência solar. A primeira foi sobre as utilidades da luz solar. Os alunos falaram sobre a importância da luz do Sol na fotossíntese das plantas e o efeito estufa, mas a utilidade principal apontada por eles foi sobre a produção de energia. Ao serem questionados sobre como podemos obter energia através da luz solar, eles falaram sobre as placas solares, assunto diretamente relacionado à pergunta seguinte, sobre quais os benefícios de se utilizar um painel solar. Alguns citaram a parte econômica e um aluno comentou sobre o fato de não agredir a natureza. Com base nisso, discutimos sobre quais seriam os pontos negativos das usinas hidrelétricas.

A seguir, ao serem questionados sobre a praticidade de se usar um painel solar, alguns comentaram que deveríamos conhecer sua eficiência e seu custo. Nesse momento, foi necessário realizar um direcionamento nas respostas, através da indagação: “Se queremos

estimar quanta energia elétrica será gerada, o que é importante saber?” Nesse momento, alguns responderam que seria necessário descobrir quanta energia solar está chegando na placa. Esse foi o gatilho para o lançamento do problema: como podemos determinar o valor da energia solar que chega até nós?

Curiosamente, um aluno respondeu que poderíamos chegar nesse valor colocando uma chapinha de metal exposta ao Sol, correspondendo justamente ao experimento que seria realizado e que ainda não havia sido apresentado aos alunos. Isso mostrou que o experimento, inicialmente de verificação e com grau de liberdade entre II e III, poderia ser transformado em um experimento de investigação com grau de liberdade IV, tendo em vista que através dos questionamentos realizados pelo professor os próprios alunos levantaram hipóteses e propuseram uma ideia de trabalho a ser realizado para resolver a situação-problema apresentada.

A partir das questões introdutórias e o lançamento do problema, notamos que os alunos tinham uma boa ideia a respeito da energia solar, sua utilidade e sua relação com a energia elétrica. Em seguida procedemos com a apresentação dos conceitos físicos relacionados com o experimento. O primeiro conceito apresentado foi o de temperatura. Ao serem questionados sobre o que esta propriedade representa, muitos alunos participaram, comentando que ela está relacionada com a agitação das moléculas. Ao serem perguntados sobre qual energia estava associada ao movimento das moléculas, alguns responderam que era a cinética, mostrando que esse conceito foi bem abordado no ano anterior. Então, mostramos uma pequena chapinha metálica para os alunos, a mesma que seria utilizada no experimento, e comentamos que uma enorme quantidade de átomos, da ordem de sextilhões, compunha aquele objeto. A seguir, perguntamos aos alunos se todos estes átomos estavam parados e eles responderam que não. Depois, perguntamos se todas elas se movimentavam com a mesma rapidez, possuindo a mesma energia cinética e eles, novamente, responderam que não. Todos concordaram que seria impossível descrever a energia cinética de cada átomo, sendo necessário adotar a energia cinética “média” das moléculas. Abordamos também sobre os tipos de movimento das moléculas, translacional, rotacional e vibracional. Os alunos também concordaram que os movimentos de rotação e vibração não são capazes de transmitir energia aos átomos vizinhos, sendo o movimento de translação o responsável pelo aumento da temperatura do sistema. Nesse momento, apresentamos uma definição mais específica de temperatura, dizendo que esta é uma medida da energia cinética translacional média das moléculas que compõem uma determinada substância. Quando questionados sobre quais as unidades de medida de temperatura, alguns alunos lembraram corretamente das três principais.

Quando questionados sobre o que era calor, um aluno respondeu que era transferência de energia. Outros alunos concordaram com esta resposta. Apresentamos então a definição de calor como sendo a forma pela qual energia é transferida de um corpo a outro devido a uma diferença de temperatura. Ao serem questionados o que de fato era essa tal energia que estava sendo transferida, o mesmo aluno que havia respondido o que era calor comentou que era transferência de energia cinética ou de movimento. Após uma discussão sobre como ocorre essa transmissão de movimento, utilizando o jogo de bilhar como exemplo, foram apresentadas as unidades de medida para a quantidade de calor Q , a caloria e o joule. Como Q representa a quantidade de energia absorvida ou perdida por um sistema através de calor, é natural que ela seja expressa em calorias ou joules. É importante deixar claro para os alunos que nós estamos medindo energia e não calor.

Ao serem questionados de que maneira a energia pode ser transferida através do calor de um corpo para outro, eles responderam contato, radiação, irradiação, convecção e condução. Após esse levantamento, foram definidos que os processos corretos são condução, convecção e radiação (ou irradiação). A figura de uma panela e uma chaleira com água sobre o fogo foi apresentada e foi solicitado aos alunos que indicassem qual processo ocorria em cada caso. Muitos participaram e acertaram todas as respostas. As transferências de energia por condução e convecção foram apresentadas e definidas, citando-se alguns exemplos, como o processo de condução térmica em metais e a formação dos ventos, respectivamente. A seguir, foi enfatizada a transferência de energia por radiação. Durante as perguntas introdutórias sobre a luz solar, um aluno já havia comentado que ela é composta de ondas eletromagnéticas. Esse comentário foi retomado para realizar a definição da transferência de energia por radiação. Uma imagem com os exemplos das diversas ondas eletromagnéticas foi apresentada, discutindo-se sobre suas frequências e comprimentos de onda.

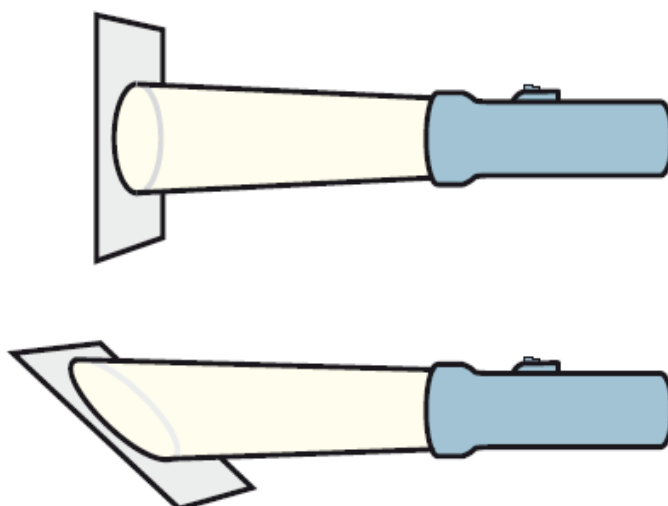
Com a transferência de energia por radiação foi bem definida, partimos para a abordagem da potência solar, definida como a taxa de energia incidente em cada metro quadrado da superfície atmosférica. Ao serem questionados se o valor da potência solar é válido para todo o planeta, os alunos concordaram que não, sendo que alguns justificaram que a atmosfera é diferente em alguns pontos e com um aluno comentando que existiam lugares menos acessíveis. Quando o professor questionou quais seriam esses lugares, três alunos comentaram que seriam os polos. Um aluno comentou que ao entrar na atmosfera, a luz iria se espalhar, outro comentou que iria se dissipar e ainda outro comentou que iria ocorrer a refração.

A partir dos comentários dos alunos, discutimos sobre os fatores que podem influenciar na atenuação do valor da radiação solar que efetivamente atinge o solo. Foram abordados os

processos de espalhamento, reflexão, absorção e a inclinação da incidência dos raios solares. Para demonstrar como esse último influencia na quantidade de radiação que atinge o solo, foram utilizadas uma folha de papel e uma lanterna, como ilustrado na figura 4.3.

Com a ajuda de um voluntário, a lanterna foi ligada e posicionada de frente com a folha, de modo que os raios luminosos incidissem perpendicularmente à sua superfície, notando-se uma região circular iluminada. Depois, a folha foi inclinada, fazendo com que a luz chegasse formando um ângulo oblíquo com a superfície da folha. A quantidade de luz emitida era a mesma, mas a área iluminada era maior, mostrando que quanto maior a inclinação dos raios solares incidentes, menor a quantidade de energia em uma determinada área. Isso ilustra o que alguns alunos comentaram sobre os lugares “menos acessíveis”.

Figura 4.3 – Demonstração da inclinação da incidência da luz solar a partir de uma lanterna e uma folha de papel.



Fonte: Hewitt (2015, p. 315).

Foi discutido que a inclinação da incidência da radiação solar pode ser levada em conta para calcular o valor da potência solar. Para determinar essa inclinação, comentamos que a sombra produzida por uma haste (o palito de espetinho, no caso) poderia fornecer essa informação. Para finalizar a discussão introdutória, tendo em vista que pretendíamos calcular o valor da energia incidente em uma chapinha metálica a partir da variação de temperatura dela, o conceito de calor específico foi retomado. Os materiais e o procedimento experimental foram então apresentados e discutidos junto aos alunos. Ao comentar sobre o termômetro infravermelho, explicamos como ocorre seu funcionamento, retomando inclusive o fato de que tudo que existe está emitindo radiação. Muitos não conheciam esse tipo de termômetro e sua

utilização despertou a curiosidade de muitos alunos. Discutimos também a justificativa do porquê utilizarmos um termômetro infravermelho e não outro conhecido, como um termômetro de coluna líquida ou termômetro digital. Os alunos foram divididos em quatro grupos e receberam um roteiro para a realização da atividade experimental.

4.3.2 Turma B

O primeiro encontro com a turma B foi realizado um dia após o primeiro encontro com a turma A. Seguindo a metodologia da aplicação, o encontro iniciou-se da mesma forma que na turma A. Quando perguntados sobre a utilidade da luz solar os alunos falaram sobre a geração de energia, aquecimento de água, fotossíntese e efeito estufa. Um aluno falou sobre fótons e uma outra aluna sobre placas fotovoltaicas. Após a segunda pergunta, sobre os benefícios da utilização de uma placa solar, alguns alunos comentaram sobre o fato de ser um tipo de energia limpa, renovável, infinita e que pode ser bastante aproveitada. Uma aluna comentou que é caro, mas a longo prazo pode compensar e citou uma aplicação, comentando sobre a plaquinha que existe em algumas calculadoras.

Ao serem questionados sobre como obtemos a energia que utilizamos hoje em dia, os alunos citaram as usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas e nucleares. Sobre as hidrelétricas, eles comentaram sobre alguns impactos como assoreamento e transposição de rios. As respostas a essas perguntas iniciais demonstraram que alguns alunos já possuíam um certo conhecimento acerca da relação entre radiação solar e geração de energia elétrica, sobre o funcionamento de placas solares e de alguns tipos de usinas. Quando questionados sobre o que precisamos saber para analisar se as placas solares são viáveis, eles citaram o custo-benefício e o local onde seria utilizada. Como o tema do experimento não apareceu em nenhuma resposta, tivemos que direcionar a discussão para chegar ao fato de que é importante saber também quanta energia solar incide sobre ela.

Ao ser lançado o problema, sobre como determinar a quantidade de energia que chega até nós, os alunos citaram que seria importante conhecer a temperatura. Após outras questões e direcionamentos, comentamos que conhecer a variação de temperatura de um sistema nos permite obter quanta energia solar foi convertida em energia térmica e, conseqüentemente, quanta energia solar incidiu sobre ele. Então, uma aluna sugeriu que utilizássemos água para isso, como nos experimentos relatados na revisão da literatura. Depois ela mudou de ideia e sugeriu utilizar algo de metal, como uma colher.

Para a abordagem dos conceitos de Física iniciamos da mesma forma que na turma A, com a discussão sobre temperatura. Vários alunos disseram que a temperatura está relacionada com o movimento ou velocidade das moléculas. A apresentação da definição de energia cinética translacional média ocorreu através do exemplo da chapinha de metal e sua enorme quantidade de átomos. Uma aluna comentou que este seria um bom objeto para ser utilizado no experimento. Quando questionados sobre qual energia está associada ao movimento, dois alunos responderam energia mecânica e cinética. Tais respostas mostram que alguns alunos possuíam certos conceitos relacionados à energia e temperatura bem fixados. Ao serem questionados, os alunos também foram capazes de citar as três principais unidades de medida de temperatura.

Quando questionados sobre o que é calor, uma aluna comentou que ele está relacionado ao que ocorre quando se coloca um corpo mais frio em contato com um corpo mais quente. Outro aluno complementou dizendo que os corpos entrariam em equilíbrio térmico. A definição de calor foi então apresentada. Quando questionados sobre métodos da transferência de energia através do calor, houve uma certa demora para o início das respostas. Então, comentamos que havia três maneiras. Apenas um aluno citou a convecção. Depois de um certo tempo, outro aluno respondeu condução e depois de mais algum tempo responderam irradiação. Apresentamos uma imagem com os três métodos de transferência de energia exemplificados em situações comuns na cozinha e solicitamos aos alunos que identificassem onde ocorria cada tipo, sendo que foram capazes de identificar corretamente cada um: condução no cabo da panela, convecção na chaleira com água e irradiação no fogo. A seguir, uma explicação sobre como ocorre cada tipo de transferência de energia foi realizada. Durante a abordagem da convecção, um aluno citou o exemplo do que ocorre com o ar-condicionado.

Quando questionados sobre o método de transferência da energia solar do Sol para a Terra, eles responderam que seria por radiação. Com o direcionamento da discussão, alguns alunos foram capazes de apontar porque não ocorreria a transferência por condução e convecção, indicando que o vácuo impediria tais processos. O conceito de potência solar foi introduzido com a questão sobre se tal valor seria o mesmo em todo o planeta. Um aluno comentou que seria diferente nos polos, outros comentaram sobre a duração do dia influenciar no valor, a interferência da atmosfera e ainda que seria diferente durante os dias chuvosos. O mesmo experimento com a lanterna, ilustrado na figura 4.1, foi utilizado para mostrar como a inclinação do planeta influencia na quantidade de raios solares incidentes. Ao finalizar a aula, apresentamos o conceito de calor específico. O roteiro do experimento foi então apresentado e discutido com a turma, a qual foi dividida em quatro grupos para a realização do experimento.

No geral, é possível notar que alguns alunos possuíam um certo conhecimento a respeito dos conceitos relacionados ao experimento, tendo em vista que o assunto já havia sido abordado no segundo bimestre. Os comentários dos alunos foram valorizados ao máximo, buscando-se chegar às definições a partir de suas respostas. No entanto, tendo em vista que foram necessárias mais perguntas adicionais e um maior direcionamento das respostas por parte do professor, concluímos que a turma B apresentou um pouco mais de dificuldades com relação à turma A. Além disso, durante a abordagem conceitual realizada nessa aula, a turma B também mostrou-se um pouco mais apática em relação à turma A. Acreditamos que isso se deve ao fato de que os conteúdos teóricos foram abordados no período da tarde, momento em que os alunos estão um pouco mais cansados devido a quantidade de aulas no dia. Além disso, tendo em vista que era o primeiro ano da escola no programa de ensino integral, os alunos ainda estavam se adaptando à quantidade de aulas por dia.

4.4 SEGUNDO ENCONTRO: EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

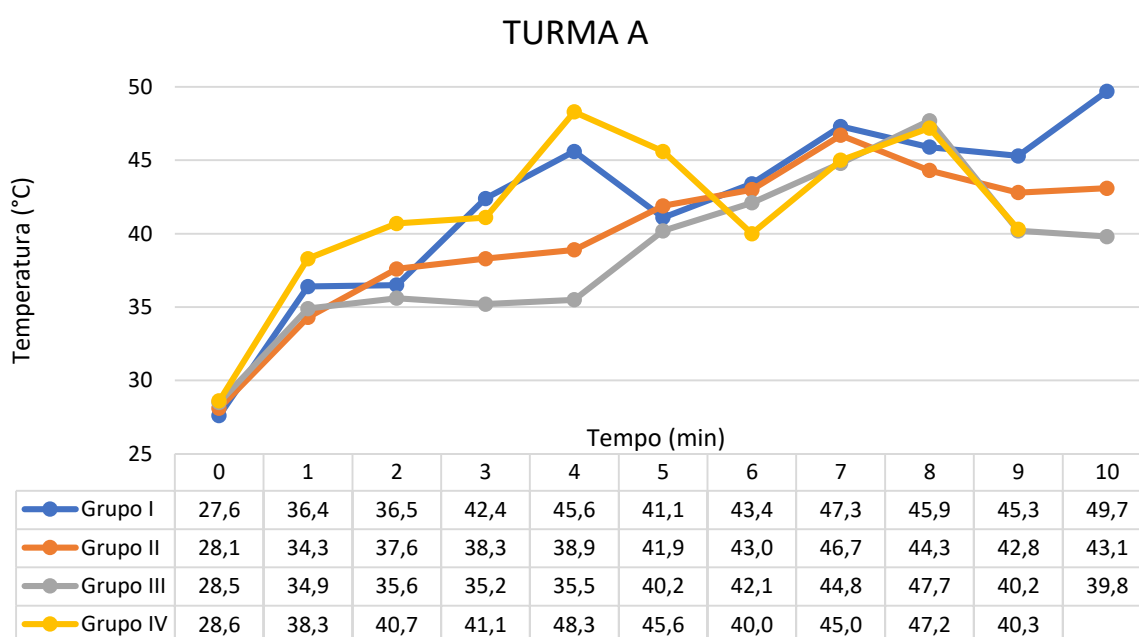
4.4.1 Turma A

O experimento foi realizado no pátio da escola em dois dias diferentes, no início de dezembro, no período da tarde. Ambos os dias estavam bem ensolarados, favorecendo o desenvolvimento do experimento. No entanto, em alguns momentos houve a passagem de algumas nuvens, o que interferiu um pouco em alguns dados obtidos. Os alunos estavam divididos em quatro grupos onde os integrantes distribuíam as tarefas de cronometrar o tempo, medir a temperatura da chapinha metálica, medir o tamanho da sombra da haste projetada na placa de isopor e registrar os dados obtidos.

Uma das dificuldades encontradas na realização do experimento foi a leitura da temperatura utilizando o termômetro infravermelho. Em alguns momentos ele travava em um determinado valor, dificultando a obtenção dos dados. Por essa razão, alguns grupos tiveram que repetir o experimento, fazendo com que o tempo previsto de uma aula acabasse se estendendo. Além disso, em alguns momentos o termômetro também apresentava uma variação muito grande de temperatura, de modo que era necessário realizar a medição diversas vezes até que o valor apontado estivesse de acordo com aqueles encontrados nos minutos anteriores. Outro fator que também pode ter influenciado na medida das temperaturas foi o posicionamento

do termômetro por parte dos alunos, os quais algumas vezes não seguiram a recomendação de mantê-lo na vertical e a uma distância de aproximadamente cinco a oito centímetros do ponto de aferição. Os dados obtidos pelos quatro grupos estão apresentados na figura 4.4.

Figura 4.4 – Temperatura em função do tempo obtido pela Turma A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

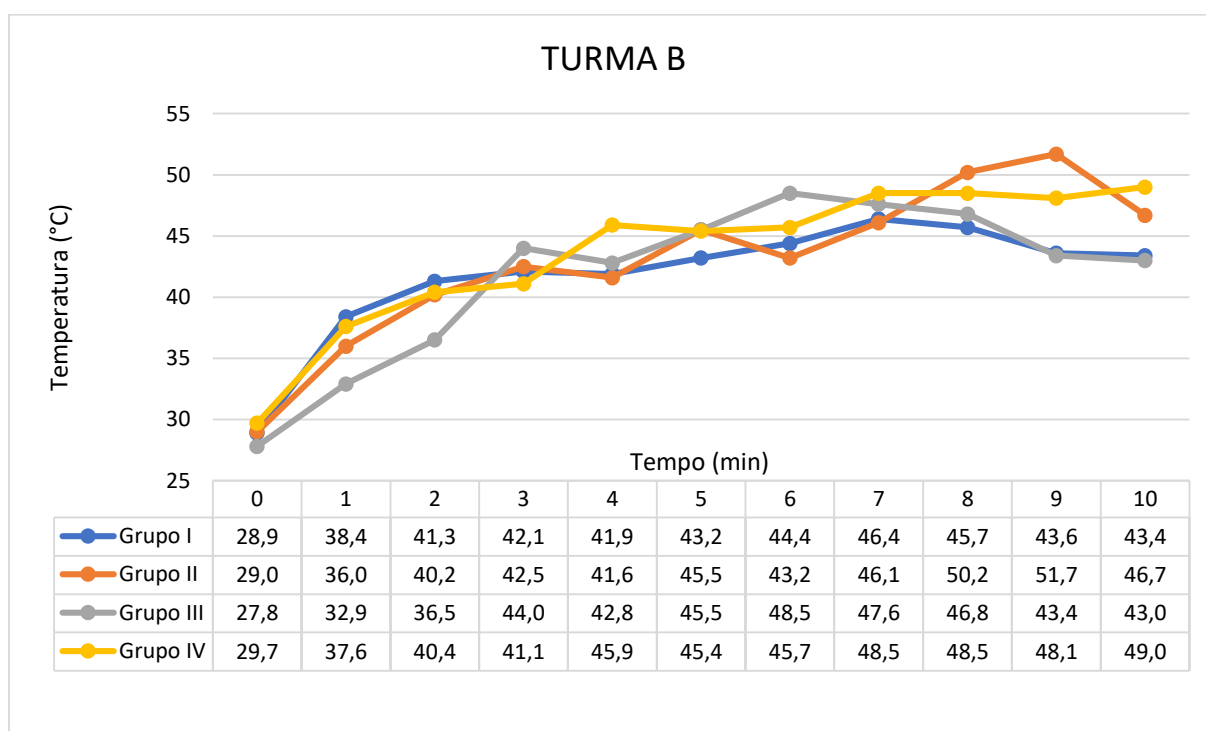
Esperava-se, a princípio, que os gráficos apresentassem uma taxa de aquecimento linear, seguindo o aspecto de uma função afim, até o momento em que a temperatura estabilizasse e passasse a apresentar um valor aproximadamente constante. No entanto, foi observado nas quatro situações que a taxa de aquecimento da chapinha metálica não apresenta comportamento linear. Além dos problemas já relatados, relacionados à passagem de nuvens e dificuldades de leitura do termômetro infravermelho durante a realização do experimento, a inércia térmica do metal é muito menor que a da água, por exemplo. Com isso, a energia fornecida pelo Sol pode ter sido suficiente para que o processo de aquecimento ocorresse de forma não-estática, em que o material não tem tempo suficiente para responder ao estímulo externo fornecido. Neste caso é possível que os pontos coletados pelos alunos sejam pontos que não refletem estados de equilíbrio térmico do sistema. Dessa forma não podemos utilizar a eq.(3.20) para calcular a irradiância solar local I_{SL} , pois ela é obtida da relação linear $Q = mc\Delta T$ válida apenas para processos quase-estáticos, caracterizados por um sucessão de estados de equilíbrio do sistema.

Uma maneira de testar essa hipótese seria aquecer o metal a uma taxa muito lenta para ver se dessa forma o comportamento linear é observado. Como não temos controle na fonte térmica do nosso experimento, dada pelo Sol, buscamos uma alternativa para a obtenção da irradiação solar total, assumindo que a chapinha se comporta como um corpo negro para utilizarmos a lei de Stefan-Boltzmann.

4.4.2 Turma B

O experimento foi realizado no início de dezembro, no período da tarde. O dia estava bem ensolarado, mas apresentava algumas nuvens. O procedimento de coleta de dados por parte dos alunos foi semelhante ao realizado pelos alunos da turma A, com os integrantes dos grupos dividindo tarefas para a coleta de dados e monitoramento do experimento. Os dados obtidos pelos quatro grupos da turma B são apresentados na figura 4.5.

Figura 4.5 – Temperatura em função do tempo obtido pela Turma B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o desenvolvimento do experimento, os alunos apresentaram algumas dificuldades com relação a aferição de temperatura com o termômetro infravermelho. Adicionalmente aos problemas técnicos apresentados pelo termômetro, algumas quedas de

temperatura foram observadas em decorrência da sombra de algumas nuvens. Assim como ocorreu com a turma A os gráficos não apresentaram crescimentos lineares. É interessante notar que a temperatura da chapinha nestes experimentos apresenta grandes oscilações, com exceção do gráfico obtido pelo grupo II. Isso ocorreu principalmente pelos problemas de leitura da temperatura com a utilização do termômetro infravermelho e pelo aparecimento de algumas nuvens durante a experimentação.

4.5 TERCEIRO ENCONTRO: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.5.1 Turma A

A aula iniciou-se com uma discussão acerca das grandezas físicas que influenciavam no cálculo da potência solar, ou seja, da quantidade de energia que atingia a plaquinha metálica a cada segundo. O primeiro item apontado foi a variação da temperatura da plaquinha. Outro aluno comentou que o tipo de material também influenciava. Ao serem questionados sobre qual grandeza estava relacionada ao material, a princípio não houve resposta. Então, perguntamos se todos os materiais apresentam o mesmo comportamento quando aquecidos. Um aluno respondeu que cada material varia a temperatura de um jeito específico. Quando questionados sobre qual grandeza estava relacionada a isso, outro aluno respondeu que é o calor específico.

Ao continuarmos a discussão foi possível notar uma certa confusão de alguns alunos com relação aos conceitos de calor específico e capacidade térmica, pois alguns alunos disseram que a massa também poderia influenciar no comportamento térmico dos materiais. Para relacionar a massa ou o tamanho da chapinha de metal com sua capacidade térmica, nós perguntamos se a quantidade de energia absorvida seria a mesma se caso a chapinha fosse maior. Um aluno comentou que não, tendo em vista que houve uma mudança de tamanho devido à maior área. Ou seja, se o objeto possui maior área consequentemente possui maior massa e com isso maior capacidade térmica. Por fim, quando questionados sobre qual outra grandeza estava envolvida no experimento, principalmente quando as temperaturas eram aferidas, alguns alunos responderam que era o tempo.

Com as cinco grandezas necessárias para o cálculo da potência solar P_S , iniciou-se uma discussão sobre quais delas seriam diretamente e quais seriam inversamente proporcionais à

energia absorvida pela placa. Novamente, retomamos o fato de que, durante a abordagem do tema com os alunos, optamos pelo termo potência solar por metro quadrado (P_S) no lugar da irradiância solar (I_S). Através das expressões dos alunos, a relação para o cálculo da irradiância solar local, dada pela eq.(3.20), obtida a partir da relação linear $Q = mc\Delta T$ foi colocada na lousa, substituindo-se I_{SL} por P_S .

Utilizando os dados obtidos por um grupo da turma B como modelo, efetuamos o cálculo na lousa como exemplo para que os alunos pudessem realizar os cálculos com base nos dados coletados pelos seus respectivos grupos. Para obtenção da taxa de aquecimento $\Delta T/\Delta t$, os alunos deveriam realizar ajustes lineares nos gráficos obtidos. Como o comportamento não foi linear, eles utilizaram o procedimento mais simples possível considerando as variações de temperatura ΔT obtidas em intervalos de tempo Δt em que ocorreu grandes variações de temperatura. Esse procedimento só poderia ser utilizado se o gráfico apresentasse uma reta perfeita. De qualquer forma conduzimos os cálculos para podermos comparar os resultados obtidos pelos grupos com os dados fornecidos pela literatura. O grupo I utilizou os dados do intervalo de tempo entre zero e quatro minutos, o grupo II entre zero e cinco minutos, o grupo III entre zero e seis minutos e o grupo IV entre zero e três minutos. Como exemplo, mostramos o cálculo desenvolvido pelos alunos do grupo I na figura 4.6.

Figura 4.6 – Cálculo da potência solar local realizado pelo grupo I da Turma A.

$$Q \Rightarrow P_S = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t}$$

$\square_{3\text{cm}} = 9\text{cm}^2$
 $m \approx 7\text{g}$
 $c = 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$
 $A = 0,0009\text{m}^2$

$$P_S = 7\text{g} \cdot 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \frac{13^\circ\text{C}}{0,0009 \cdot 240\text{s}}$$

$$P_S = 204,75 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \boxed{204,75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores obtidos para a potência solar local por metro quadrado (P_S) pelos quatro grupos da turma A são apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Potência solar local por metro quadrado (P_s) calculada pelos alunos dos grupos I, II, III e IV da Turma A utilizando a eq.(3.20), como mostrado na figura 4.6.

| GRUPO | I | II | III | IV |
|---------------------------|----------|-----------|------------|-----------|
| P_s (W/m ²) | 204,8 | 207,9 | 217,4 | 239,4 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor médio da potência solar por metro quadrado durante a primavera na cidade onde o experimento foi realizado é de $262,5 \text{ W/m}^2$ (SÃO PAULO, 2018). De acordo com outra referência, a potência solar média em dezembro para a região onde a cidade está inserida se encontra entre $218,75 \text{ W/m}^2$ e $239,59 \text{ W/m}^2$ (PEREIRA et al., 2017). Nota-se que três dos valores encontrados estão um pouco abaixo do mínimo esperado e um valor está dentro da faixa de valores esperados. No entanto, isso não significa que valores acima e abaixo dos encontrados nas referências estejam totalmente errados, visto que são valores médios. Portanto, durante esse período, houve dias com valores maiores e menores que a média apresentada. Além disso, os valores combinam bem com o valor atenuado da irradiação solar de cerca de 208 W/m^2 (UFRGS, 2019). Sendo assim, os resultados encontrados podem ser considerados razoáveis mesmo sendo obtidos a partir de um modelo que não descreve a taxa de aquecimento da chapinha metálica corretamente.

Após o cálculo da potência solar local, apresentamos na lousa os valores encontrados em algumas referências e solicitamos aos grupos que comparassem o valor que obtiveram através de seus cálculos com os valores da literatura. Caso os valores não estivessem próximos do esperado, os alunos deveriam levantar algumas hipóteses para explicar a diferença de valores e descrevê-las na folha de atividades. Os alunos argumentaram de maneira geral que a discrepância nos resultados era devido a presença de nuvens durante a realização do experimento, dificuldades na leitura da temperatura com o termômetro infravermelho, parte da luz proveniente do Sol ser refletida na superfície da chapinha, efeitos atmosféricos, entre outros. Um exemplo de resposta é apresentado na figura 4.7.

Utilizando os valores encontrados pela turma, todos os grupos calcularam a média e o desvio padrão da média. Estes foram realizados através de uma tabela de cálculos, como a mostrada na figura 4.8, onde os alunos completavam as lacunas com os valores obtidos por todos os grupos para calcularem o desvio da média, o quadrado deste desvio, a somatória dos quadrados dos desvios, o número de observações, a variância e, por fim, o desvio padrão da média. Visto que os valores utilizados na propagação envolviam todos os grupos, a atividade

foi desenvolvida em conjunto. Dessa forma, os valores encontrados foram os mesmos para todos os grupos. A figura 4.8 apresenta a tabela preenchida pelo grupo I.

Figura 4.7 – Hipóteses levantadas pelos alunos do Grupo I da Turma A para explicar a diferença no valor calculado para a potência solar local em comparação com dados da literatura.

O valor não ficou muito aproximado. As hipóteses para isso talvez seja inclinação dos raios solares, a nebulosidade, a placa ter refletido parte da energia ou então erro de medição do termômetro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.8 – Propagação de erros desenvolvido pelo grupo I da Turma A.

Média \bar{x} : $217,35 \text{ W/m}^2$

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 204,75 | -12,6 | 158,76 |
| 207,90 | -9,45 | 89,30 |
| 217,35 | 0 | 0 |
| 239,38 | 22,03 | 485,32 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 733,38 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 183,34 |
| Desvio padrão da média σ : | | 13,54 |

Valor final da potência solar local: $P_s = 217,35 \pm 13,54 \text{ W/m}^2$

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado obtido pela turma A foi de $P_s = 217 \pm 14 \text{ W/m}^2$. Cabe ressaltar que os dados foram obtidos todos no mesmo dia, embora em horários um pouco diferentes. Apesar do valor calculado estar em concordância com as referências encontradas, considerando a barra de erro obtida, vale lembrar que os cálculos da potência solar local foram realizados utilizando a eq.(3.20), a qual é obtida por uma aproximação inadequada para a modelagem do sistema.

4.5.2 Turma B

Como na Turma A, a aula teve início com uma discussão sobre quais grandezas físicas estavam envolvidas no experimento e que seriam necessárias para calcular a energia solar incidente sobre a plaquinha metálica. Em comparação com a outra turma, houve menos participações, sendo necessário reformularmos algumas vezes as perguntas, direcionando os alunos às respostas esperadas.

Como exemplo, utilizamos os dados obtidos pela turma A para calcular a potência solar local, para que cada grupo pudesse fazer os cálculos com base em seus próprios dados. Como no caso anterior, não foi realizado qualquer ajuste linear nos gráficos, os alunos consideraram o intervalo de temperatura obtido para um determinado intervalo de tempo. O grupo I utilizou os dados do intervalo de tempo entre um e quatro minutos, o grupo II entre zero e três minutos, o grupo III entre quatro e oito minutos e o grupo IV entre zero e três minutos. Como exemplo, mostramos o cálculo desenvolvido pelos alunos do grupo I na figura 4.9.

Figura 4.9 – Cálculo da potência solar local realizado pelo grupo II da Turma B.

$$\begin{aligned}
 & \square_{3\text{cm}} \quad P_s = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t} \\
 & m = 4\text{g} \\
 & c = 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \\
 & A = 9 \text{ cm}^2 = 0,0009 \text{ m}^2 \\
 & \Delta T = \frac{4 \cdot 0,486 \cdot 10,2^\circ\text{C}}{0,0009 \text{ m}^2 \cdot 180 \text{ s}} = \frac{34,7004}{0,162} \quad \boxed{P_s = 214,2 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}} \quad \boxed{P_s = 214,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}
 \end{aligned}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores obtidos para a potência solar local por metro quadrado (P_s) pelos quatro grupos da turma B são apresentados na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Potência solar local por metro quadrado (P_s) calculada pelos alunos dos grupos I, II, III e IV da Turma B utilizando a eq.(3.20), como mostrado na figura 4.9.

| GRUPO | I | II | III | IV |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| P_s (W/m ²) | 193,2 | 214,2 | 192,2 | 262,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que os valores obtidos pela turma B são mais discrepantes entre si do que os resultados obtidos pela turma A. Ao solicitarmos que os alunos discutissem as possíveis causas das diferenças observadas entre os resultados obtidos por eles e os fornecidos pela literatura eles responderam de maneira semelhante aos alunos da turma A, considerando como principal fonte de erros a presença de nuvens e dificuldades na aferição da temperatura com o termômetro infravermelho durante a realização do experimento. Veja o exemplo apresentado na figura 4.10.

Figura 4.10 – Hipóteses levantadas pelos alunos do Grupo I da Turma B para explicar a diferença no valor calculado para a potência solar local em comparação com dados da literatura.

O nosso resultado ficou um pouco mais baixo que as referências, e nós levamos em conta algumas interferências obtidas, como a presença de uma nuvem, a sombra de pessoas sobre o objeto, inclinação do termômetro entre outros fatores.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 4.11 apresenta a tabela preenchida pelo grupo I para o cálculo da média dos valores obtidos pela turma B e o respectivo desvio padrão.

Figura 4.11 – Propagação de erros desenvolvido pelo grupo I da Turma B.

▼ Média \bar{x} : 215,51 W/m²

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|--|-------------------------|---|
| 193,20 | -22,31 | 497,74 |
| 214,20 | -1,31 | 1,72 |
| 192,15 | -23,39 | 547,09 |
| 262,50 | 46,99 | 2208,60 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\Sigma(x - \bar{x})^2$: | | 3255,15 |
| Número de observações n: | | 4 |
| Variância s: | | 813,79 |
| Desvio padrão da média σ: | | 28,53 |

Valor final da potência solar local: 215,51 ± 28,53 W/m²

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado final obtido pela turma B foi de $P_S = 216 \pm 29 \text{ W/m}^2$, o qual está em excelente acordo com o resultado obtido pela turma A, $P_S = 217 \pm 14 \text{ W/m}^2$. O maior erro obtido pela turma B é devido às maiores flutuações observadas nas curvas de aquecimento em comparação com os dados obtidos pela turma A. É interessante notar que os resultados obtidos pelos oito grupos de alunos das duas turmas são consistentes, mostrando que os procedimentos experimentais realizados por eles, foram em média, bem conduzidos. O problema está na modelagem do sistema.

Na próxima seção apresentamos os resultados obtidos utilizando a aproximação de corpo negro para a chapinha metálica e o uso da lei de Stefan-Boltzmann para o cálculo da irradiância solar total.

4.6 AUTOAVALIAÇÃO E REFORMULAÇÃO DO EXPERIMENTO

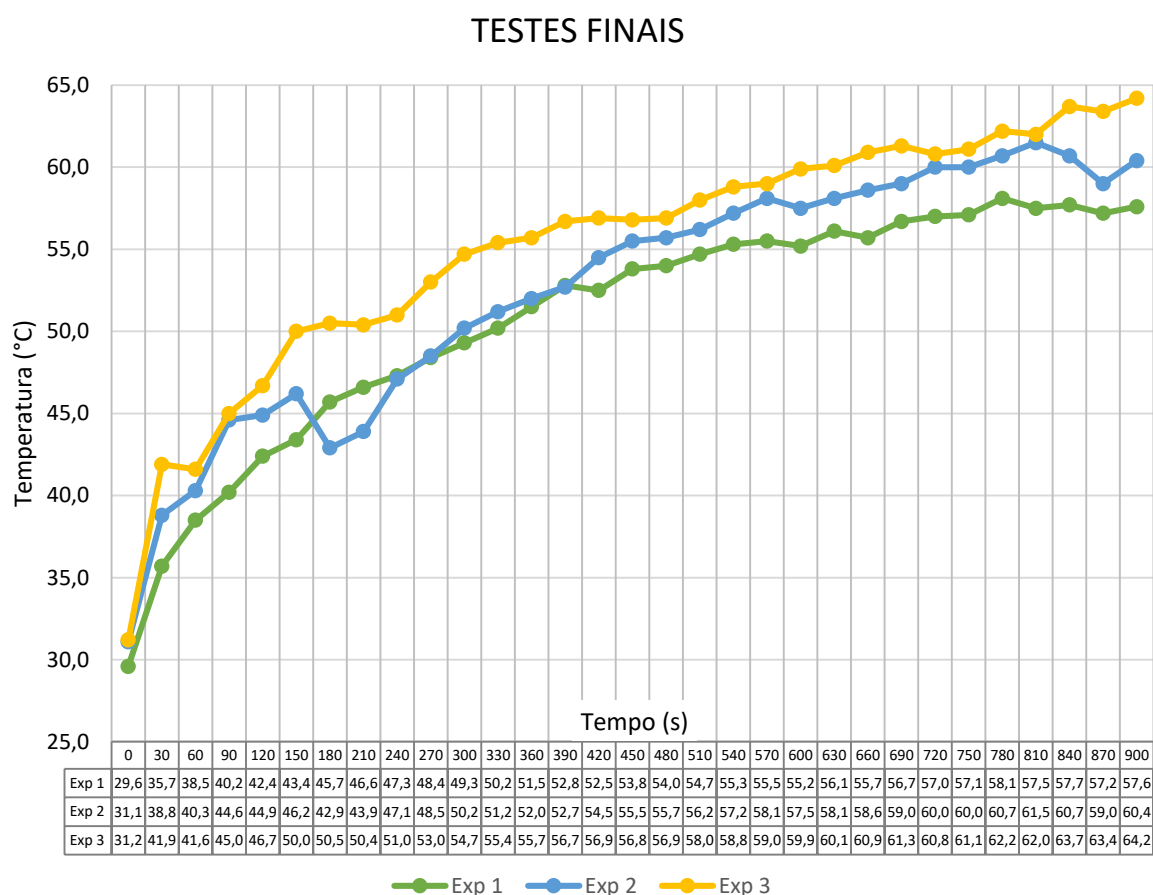
Após a realização dos experimentos e o tratamento de dados com as turmas, decidimos realizar novos testes, sem o envolvimento de alunos, para verificar os valores encontrados e analisar eventuais aprimoramentos que poderiam ser realizados. Uma das dificuldades mais perceptíveis na obtenção dos dados foram algumas leituras inesperadas apresentadas pelo termômetro infravermelho. Concluímos que um fator que poderia causar interferência era a superfície branca irregular da placa de isopor. Tal tipo de superfície reflete grande parte da radiação incidente, a qual pode interferir nas medições realizadas com o termômetro. Por essa razão, decidimos pintar a placa de isopor com a mesma tinta fosca preta usada na chapinha. No entanto, não houve aderência entre a tinta e o isopor. Sendo assim, substituímos a placa de isopor por uma chapa de madeira compensada, a qual foi pintada de preto fosco, conforme apresentado na figura 3.19. Ao utilizar o termômetro infravermelho para realizar as medições, seguindo as instruções recomendadas pelo fabricante, não enfrentamos os problemas descritos pelos alunos das turmas A e B, quando a base era constituída de isopor. Por essa razão, recomendamos a utilização de uma base de madeira ao invés de uma base de isopor.

Outro fator que influenciou a análise dos dados foram algumas temperaturas que se apresentavam como ponto fora da curva nos gráficos. Concluímos que isso ocorreu porque a temperatura foi registrada a cada minuto, constituindo um passo de tempo muito grande para observar com mais precisão e clareza as variações de temperatura. Por esse motivo, diminuimos o intervalo de tempo de medição de um minuto para 30 segundos nos novos testes realizados.

Além disso, procuramos deixar o conjunto experimental exposto ao Sol por um tempo maior, com o objetivo de garantir que o sistema entrasse em equilíbrio térmico.

Seguindo tais procedimentos três experimentos foram realizados em um dia no início de janeiro, entre 11h e 14h, horário de Brasília. Os tamanhos inicial e final da sombra projetada pelo bastão, respectivamente, foi de 10 cm e 7,6 cm para o primeiro experimento, 0,4 cm e 0,6 cm para o segundo experimento e 2,5 cm e 4,7 cm para o terceiro experimento. Os dados obtidos estão apresentados na figura 4.12. Os pontos que apresentam uma queda de temperatura são resultados da passagem de nuvens.

Figura 4.12 – Gráfico da temperatura em função do tempo obtido com os dados dos experimentos finais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos três experimentos realizados observa-se claramente que a variação da temperatura da chapinha metálica não possui comportamento linear, confirmando nossa hipótese inicial de que é inviável o tratamento teórico do sistema utilizando a equação da calorimetria $Q = mc\Delta T$,

válida para processos quase-estáticos ou de equilíbrio. No segundo experimento, a queda da temperatura aos 180 segundos ocorre devido a presença de nuvens durante a realização do mesmo. Apesar da não linearidade apresentada nos gráficos, é possível determinar a temperatura de equilíbrio alcançada pelo sistema com o passar do tempo. Esta é necessária para a determinação da irradiância solar local a partir da aproximação de corpo negro da chapinha metálica e a lei de Stefan-Boltzmann.

Pela eq.(3.15) temos que a irradiância solar local I_{SL} é obtida diretamente multiplicando-se a constante de Stefan-Boltzmann pela temperatura absoluta da chapinha elevada à quarta potência, ou seja, $I_{SL} = \sigma T^4$. No primeiro experimento, o equilíbrio térmico foi alcançado entre 780 e 900 segundos, com uma temperatura média de $57,6^{\circ}\text{C} = 330,6\text{ K}$. No segundo experimento, consideramos a temperatura média para os valores entre 720 e 900 segundos, cujo resultado é de $60,3^{\circ}\text{C} = 333,3\text{ K}$. Já no terceiro experimento, consideramos apenas a média dos três últimos valores de temperatura obtidos, entre 840 e 900 segundos, obtendo a temperatura de equilíbrio de $63,8^{\circ}\text{C} = 336,8\text{ K}$. Substituindo esses dados na eq.(3.15) obtemos os valores da irradiância solar local para os três testes finais, os quais são apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Irradiância solar local (I_{SL}) calculada para os três experimentos, Exp.1, 2 e 3, utilizando a lei de Stefan-Boltzmann dada pela eq.(3.15).

| <i>Exp.</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| I_{SL} (W/m^2) | 677,3 | 699,7 | 729,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos pela aproximação de corpo negro evidenciaram um problema com relação à modelagem do sistema e análise dos resultados conduzidas com os alunos. Os valores encontrados nas referências situam-se entre $200\text{ W}/\text{m}^2$ e $300\text{ W}/\text{m}^2$, ou seja, bem abaixo dos valores obtidos nos testes finais (PEREIRA et al., 2017; SÃO PAULO, 2018). A partir desses resultados notamos que houve um equívoco cometido durante a análise dos valores da irradiância solar encontrados na literatura. Uma das referências consideradas comenta que a rotação da Terra reduz em 75% o valor da radiação incidente sobre o topo da atmosfera (PEREIRA et al., 2017). Além disso, levando-se em consideração que a atmosfera reflete 39% da radiação e que apenas 61% é usada no aquecimento terrestre, é apresentado o valor atenuado de $208\text{ W}/\text{m}^2$ para a irradiância solar (UFRGS, 2019). Por essa razão, ao analisarmos os dados dos alunos e atingirmos resultados que se aproximassem de tal valor, os encaramos como

aceitáveis no momento. Além disso, ao consultarmos os atlas solarimétricos disponíveis, notamos que os valores também estavam entre $200 W/m^2$ e $300 W/m^2$ (CHIGUERU, 2000; ANEEL, 2005; PEREIRA et al., 2006, 2017; SÃO PAULO, 2018, CRESESEB, 2019).

No entanto, somente após a atividade com os alunos nos atentamos ao fato de que os valores encontrados em tais atlas eram valores médios diários. Isso significa que os valores indicados incluíam o horário em que o Sol não estava disponível, fato não explicitado claramente na primeira referência consultada (UFRGS, 2019). Sendo assim, ao realizarmos o experimento, principalmente quando o Sol estivesse em sua altura máxima, seria natural que encontrássemos valores maiores para a irradiância solar local. Utilizando como base as porcentagens expressas na figura 3.15, de que 50% da radiação solar atinge a superfície terrestre, e o valor de $(1360,8 \pm 0,5) W/m^2$ fornecido pelo satélite SORCE, da NASA, os valores esperados para a irradiância solar local deveriam ser próximos de $680,4 W/m^2$ (NASA, 2018). Além disso, em uma reprodução do experimento proposto por Perottoni e Zorzi (1993), foi obtido o valor final de $(767 \pm 97) W/m^2$ para a irradiância solar local inclinada, $(1080 \pm 136) W/m^2$ para a irradiância solar local perpendicular e $(1544 \pm 252) W/m^2$ para a irradiância solar total (MORAES, 2019). Portanto, os valores obtidos a partir da lei de Stefan-Boltzmann estão em excelente acordo com a literatura.

Para a realização da propagação de erros dos resultados obtidos e avaliar a qualidade deles, utilizamos a mesma tabela de cálculos fornecida aos alunos, conforme observado na Tabela 4.4. O resultado final para a irradiância solar local é de $I_{SL} = (702 \pm 22) W/m^2$ estando em excelente acordo com o resultado esperado de acordo com a literatura de $I_{SL} \approx 680,4 W/m^2$. Considerando que os valores obtidos constituem metade do valor da irradiância solar total inclinada, podemos multiplicá-los por um fator 2 e realizar a propagação de erros com o intuito de verificar a proximidade com o valor de $(1360,8 \pm 0,5) W/m^2$. Os cálculos são apresentados na Tabela 4.5. O valor final obtido foi de $(1404 \pm 43) W/m^2$, apresentando muito bom acordo com o resultado fornecido pela literatura.

Os valores obtidos acima são referentes à irradiância solar que incide de forma inclinada na superfície da chapinha metálica. Para se obter a irradiância solar local perpendicular à superfície, $I_{ST}/2$, é necessário realizar as correções trigonométricas apresentadas nas eqs.(3.26) e (3.27). Para isso levamos em conta os valores da altura da haste (h) utilizada no experimento e o tamanho da sombra projetada (S) na placa de madeira, os quais são apresentados na Tabela 4.6 juntamente com os ângulos θ e α , definidos na figura 3.18b, e o valor obtido para $I_{ST}/2$.

TABELA 4.4 – Propagação de erro considerando os três experimentos realizados para a determinação da irradiância solar local a partir da lei de Stefan-Boltzmann.

| <i>Observação (x)</i> | <i>Desvio (x - \bar{x})</i> | <i>Quadrado do desvio (x - \bar{x})²</i> |
|---|--|--|
| 677,32 | -24,89 | 619,51 |
| 699,72 | -2,49 | 6,20 |
| 729,58 | 27,37 | 749,12 |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$ | | 1374,83 |
| Número de observações <i>n</i> | | 3 |
| Variância <i>s</i> ² | | 458,28 |
| Desvio padrão da média σ | | 21,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

TABELA 4.5 – Propagação de erro dos resultados obtidos nos três experimentos para a estimativa da irradiância solar total.

| <i>Observação (x)</i> | <i>Desvio (x - \bar{x})</i> | <i>Quadrado do desvio (x - \bar{x})²</i> |
|---|--|--|
| 1354,64 | -49,77 | 2477,05 |
| 1399,44 | -4,97 | 24,70 |
| 1459,16 | 54,75 | 2997,56 |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$ | | 5499,31 |
| Número de observações <i>n</i> | | 3 |
| Variância <i>s</i> ² | | 1833,10 |
| Desvio padrão da média σ | | 42,81 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

TABELA 4.6 – Valores da altura da haste (*h*), tamanho da sombra projetada (*S*) na placa de madeira e ângulos formados em relação à normal (θ) e em relação à superfície (α) obtidos nos três experimentos, Exp.1, 2 e 3, para o cálculo da irradiância solar total $I_{ST}/2$ perpendicular à superfície da chapinha de metal, dado pela eq.(3.26) ou (3.27).

| <i>Exp.</i> | <i>S (cm)</i> | <i>h (cm)</i> | θ (°) | α (°) | <i>I_{ST}/2</i> |
|-------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|
| 1 | 7,6 | 20 | 20,8 | 69,2 | 724,57 |
| 2 | 0,6 | 20 | 1,7 | 88,3 | 700,03 |
| 3 | 4,7 | 20 | 13,2 | 76,8 | 749,45 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nesses resultados, obtivemos o valor final de $I_{ST}/2 = (725 \pm 21) W/m^2$ para a irradiância solar total perpendicular à superfície da chapinha metálica. Multiplicando os resultados por dois, encontramos o valor de $I_{ST} = (1450 \pm 42) W/m^2$ para a irradiância solar total perpendicular à superfície atmosférica. Comparando este resultado com o valor de referência $I_{ST} = (1360,8 \pm 0,5) W/m^2$, fica demonstrado que a aproximação de considerar a chapinha metálica como um corpo negro e o uso da lei de Stefan-Boltzmann para o cálculo da irradiância solar, pode apresentar resultados muito bons para serem trabalhados com os alunos em sala de aula. A discrepância entre os resultados pode ser justificada pela incidência da radiação difusa originada pelos fenômenos atmosféricos.

Além da possibilidade de abordar inúmeros tópicos de física moderna, este experimento pode ser utilizado também para demonstrar os limites de aplicação da equação da calorimetria $Q = mc\Delta T$.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

“Digo frequentemente que, quando se pode medir algo e expressá-lo em números, alguma coisa se conhece sobre ele. Quando não se pode medi-lo, quando não se pode expressá-lo em números, o conhecimento que se tem dele é estéril e insatisfatório. Ele pode até ser um início para o conhecimento, mas ainda se avançou muito pouco em direção ao estágio da ciência, seja ele qual for.” - Lord Kelvin (HEWITT, 2015, p. 3)

Partindo do princípio de que só podemos dizer que temos conhecimento de algo a partir do momento que conseguimos expressá-lo em números, desenvolvemos o experimento para a estimativa da irradiância solar total. A importância do conhecimento dessa grandeza reside no fato de que é através da energia solar que chega até nós que diversos processos naturais e tecnológicos são sustentados. Adicionalmente, procuramos tornar o experimento o mais simples possível para que seja facilmente replicável por outros professores. Abaixo apresentamos algumas conclusões a respeito da atividade experimental junto com alguns direcionamentos que podem ser realizados pelos professores que pretendem replicá-la e as considerações finais acerca do trabalho desenvolvido.

Embora nossa proposta final de experimento seja diferente da ideia inicial, consideramos sua aplicação como sendo satisfatória. Isso pode ser dito com base na participação e envolvimento dos alunos durante as aulas de apresentação do conteúdo, desenvolvimento da atividade experimental e análise dos resultados. Em todos esses momentos, as contribuições fornecidas pelos alunos no levantamento de hipóteses foram cruciais para o desenvolvimento satisfatório da sequência didática envolvendo o produto educacional, propiciando um caráter científico às atividades.

O primeiro encontro, constituído da apresentação da situação-problema e abordagem dos conceitos e conteúdos que seriam abordados pelo experimento, foi bem proveitoso no sentido de despertar em grande parte dos alunos o interesse e a disposição em aprender o tema

e tornar a atividade experimental potencialmente significativa. Através dessa apresentação, foi possível verificar as concepções prévias dos alunos sobre o assunto, bem como averiguar quais conceitos haviam sido bem consolidados nas aulas anteriores de Física. Com base nos comentários e expressões dos alunos, foi possível realizar as mediações e direcionamentos necessários com o objetivo de que eles próprios atingissem as respostas esperadas. A utilização de cada contribuição dos alunos resultou em um sentimento de valorização por parte deles.

Embora algumas dificuldades tenham sido encontradas durante o desenvolvimento da atividade experimental, sua realização auxiliou os alunos a ter contato com o método científico, a saber, encontrar um problema, testar hipóteses e, frente às dificuldades, procurar elaborar explicações e propor melhorias. Tal tipo de análise deve ser feita em parceria com os alunos, tornando-os parte da construção do conhecimento, ao invés de ser um momento centrado no professor. Quando esse tipo de trabalho é realizado, há um enriquecimento no processo de ensino-aprendizagem, principalmente no que concerne à área de ciências da natureza. A partir da análise que realizamos sobre as dificuldades encontradas, propomos algumas modificações e implementações, tornando a versão final do experimento mais simples e efetivo de ser realizado.

Tendo em vista que o tempo para a aplicação do produto educacional foi reduzido, considerando que foi realizado próximo ao final do bimestre, algumas ideias iniciais não foram colocadas em prática. No entanto, elas podem servir de sugestão para futuras replicações da atividade. Por exemplo, uma de nossas propostas era encontrar o valor da irradiância solar total (perpendicular à superfície atmosférica), realizando as correções que propusemos através de relações trigonométricas com base na medida da altura da haste e de sua sombra projetada. Para uma aplicação que conte com mais tempo disponível, tal atividade poderá ser realizada.

Um trabalho interdisciplinar pode ser desenvolvido com professores de química e biologia, abordando temas como efeito estufa, fotossíntese e o ciclo hidrológico, por exemplo. Outra atividade interessante e que também pode ser desenvolvida é a introdução de tópicos envolvendo astronomia e astrofísica. Com base na estimativa da irradiância solar total, é possível calcular aproximadamente a potência P emitida pelo Sol, através da relação

$$P = 4\pi R^2 I_{ST}, \quad (5.1)$$

sendo R o raio médio da órbita terrestre e I_{ST} a irradiância solar total estimada experimentalmente. Além disso, é possível abordar também a origem de tanta energia, introduzindo tópicos de Física nuclear e estimando a quantidade de matéria necessária para produzir tal energia a partir da equivalência massa-energia:

$$E = mc^2 \quad (5.2)$$

Outro direcionamento que pode ser dado ao experimento é o aprofundamento no estudo sobre a radiação de corpo negro, a qual constitui um dos pilares da Física moderna e cujo estudo tornou-se um marco no desenvolvimento da Física. A história da ciência envolvida por trás da época também pode ser abordada, o que enriquecerá a compreensão do tema. Geralmente, a Física moderna e contemporânea (FMC) é abordada durante o terceiro ano do ensino médio. Sendo assim, contemplar alguns tópicos referentes a FMC em momentos anteriores ao terceiro ano pode auxiliar na construção de alguns conceitos básicos necessários na compreensão dessa área da Física ao final do ensino médio. Outra sugestão é utilizar o experimento na própria terceira série como um componente da FMC.

Outra relação que pode ser estabelecida com a FMC é a abordagem do efeito fotovoltaico e o funcionamento de placas solares. Com base nos valores encontrados, no conhecimento das eficiências das placas solares e na estimativa do consumo de energia de uma residência, é possível realizar conjecturas a respeito de quanta energia elétrica pode ser gerada e, conseqüentemente, se é viável ou não para a realidade dos alunos. Visto que apresentamos sugestões que envolvem conteúdos tanto da segunda quanto da terceira série do ensino médio, nada impede que essa atividade seja realizada em conjunto por salas de diferentes séries, o que também pode enriquecer o processo de ensino-aprendizagem. Obviamente, todas essas sugestões demandam uma grande quantidade de aulas para que possam ser colocadas em prática. Assim, cabe ao professor que pretende aplicar o produto educacional analisar quais delas são possíveis de serem implementadas.

Aos professores que pretendem aplicar a atividade experimental, reiteramos a importância de que seja realizada em um dia de céu limpo, próximo ao meio-dia, para uma melhor observação da variação da temperatura. Além disso, não recomendamos que o experimento seja realizado sem o desenvolvimento de uma contextualização. Nesse sentido, acreditamos que verificar as concepções prévias dos alunos, trabalhar em cima delas e apresentar uma situação-problema é imprescindível para criar nos alunos a disposição em aprender o tema e desenvolver as atividades propostas. Se a escola dispuser de vários termômetros infravermelhos, recomenda-se também que vários grupos desenvolvam a atividade ao mesmo tempo, o que tornará a propagação de erros do experimento mais eficiente. No entanto, caso a escola não disponha, é possível adquirir ao menos um ou dois, o que já permite que os alunos desenvolvam o experimento, tendo contato com esse novo tipo de tecnologia.

Futuramente, pretendemos utilizar diferentes tipos de metais no desenvolvimento do experimento para verificar se os valores encontrados para a irradiância solar total também estão

de acordo com os valores de referência encontrados na literatura. Além disso, também pretendemos refazer o experimento utilizando um termistor ligado a uma placa Arduino. Através dele, é possível realizar a leitura da temperatura sem a necessidade de um termômetro, bastando acompanhar os dados que são disponibilizados na tela do computador. Ao utilizarmos o Arduino, é possível gravar os dados armazenados de maneira fácil e simples, reduzindo possíveis problemas relacionados ao erro humano, além de possibilitar a abordagem de conceitos de eletrônica com os alunos.

O experimento para a estimativa da irradiância solar total é uma proposta simples, porém significativa. Através dela, foi possível adquirir maior conhecimento a respeito de uma grandeza que está diretamente envolvida em nossas vidas, visto que a energia solar é a responsável pela manutenção de diversos processos que ocorrem na Terra. Através desse experimento, podemos estimar um número que, combinado a todos os outros valores que conhecemos a respeito de nossa estrela, como massa, raio, densidade, distância, luminosidade, temperaturas superficial e central, magnitude, composição química, período rotacional etc., nos permite dizer que, cada vez mais, conhecemos melhor aquele que durante tantos séculos têm despertado nosso interesse e têm sido nossa grande fonte de energia: o Sol!

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

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, v. 25, n. 2, 2003. “Disponível em:” <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v25n2/a07v25n2.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2018.

BÄCHTOLD, M. How Should Energy be Defined Throughout Schooling. Research in Science Education, v. 48, n. 2, p. 345-367, 2018.

BARTLETT, A. A. A large solar calorimeter. The Physics Teacher, v. 24, n. 8, 1986. “Disponível em:” <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2342098>. Acesso em: 29 nov. 2018.

BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. New York: Pergamon Press, 1964.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. Fundamentos da termodinâmica. Trad. Roberto de Aguiar Peixoto. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018.

BRASIL. Ministério da Educação. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2000.

CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA*, 41, Gramado, 2013. “Disponível em:” http://www.fadep.br/engenharia-eletrica/congresso/pdf/117056_1.pdf. Acesso em: 19 jan. 2019.

CARVALHO, A. M. P. As práticas experimentais no ensino de física. *In: Ensino de física*. São Paulo: Cengage Learning, 2011. p. 53-78.

CAVALCANTI, M. A. V. Análise da influência de superfícies refletivas nas perdas de calor de sistemas térmicos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CHIGUERU, T. Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO (CRESEB). Potencial solar – SunData v 3.0. “Disponível em:” <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 19 jan. 2019.

ECOLOGIA E AÇÃO (ECO.A). Vantagens e desvantagens da energia solar. “Disponível em:” <http://ecoa.org.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>. Acesso em: 29 mar. 2019.

EISBERG, R. e RESNICK, R. Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. 23ª Tiragem, Ed. CAMPUS e ELSEVIER, 1979.

FERREIRA, V. Estatística básica. Rio de Janeiro: SESES, 2015, 184 p. “Disponível em:” <https://profhubert.yolasite.com/resources/LIVRO%20PROPRIETARIO%20-%20Estatistica%20Basica.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2019.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. Lições de Física, volume 1. Trad. Adriana Válio Roque da Silva e Kaline Rabelo Coutinho. 2. ed. São Paulo: Artmed, 2008.

FLUCKE. Infrared thermometers 63/66/68: manual do usuário. 2004. “Disponível em:” http://assets.fluke.com/manuals/63_66_68umpor0200.pdf. Acesso em: 28 dez. 2018.

FRAZZOLI, J. C. F. Astrofísica de estrelas compactas como atividade complementar para o ensino médio. 2012. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GANIEL, U.; KEDEM, O. Solar energy – how much do we receive? The Physics Teacher, v. 21, n. 9, 1983. “Disponível em:” <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2341416>. Acesso em: 29 nov. 2018.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. Investigações em Ensino de Ciências, v. 10, n. 2, 2005. “Disponível em:” <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/518/315>. Acesso em: 01 dez. 2018.

GÓMEZ, J. M. R.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, n. 3, 2018. “Disponível em:” <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v40n3/1806-9126-RBEF-40-3-e3312.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2019.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016a.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna. Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016b.

HEWITT, P. G. Física conceitual. Trad. Trieste Freire Ricci. 12. ed. Porto Alegre: Booman, 2015.

HIGHER. Teoria infravermelho. “Disponível em:” <http://www.higher.com.br/biblioteca-tecnica/>. Acesso em: 31 dez. 2018.

HÜLSENDEGER, M. J. V. C.; COSTA, D. K.; CURY, H. N. Identificação de concepções de alunos de ensino médio sobre calor e temperatura. Acta Scientiae, Canoas, v. 8, n. 1, 2006. “Disponível em:” <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/acta/article/viewFile/106/99>. Acesso em: 15 jun. 2019.

ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO (IDESP). Boletim da escola. “Disponível em:” <http://idesp.edunet.sp.gov.br/Arquivos2018/903197.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA (INEP). Prova Brasil – Avaliação do Rendimento Escolar: desempenho da sua escola. “Disponível em:” <http://sistemasprovabrasil.inep.gov.br/provaBrasilResultados/view/boletimDesempenho/boletimDesempenho.seam>. Acesso em: 15 jun. 2019.

JARDIM, W. T.; GUERRA, A. Experimentos históricos e o ensino de física: agregando reflexões a partir da revisão bibliográfica da área e da história cultural da ciência. Investigações em Ensino de Ciências, v. 22, n. 3, 2017. “Disponível em:” <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/841/pdf>. Acesso em: 30 nov. 2018.

KNIJNIK, G.; SILVA, F. B. S. “O problema são as fórmulas”: um estudo sobre os sentidos atribuídos à dificuldade em aprender matemática. Cadernos de Educação, Pelotas, n. 30, 2008. “Disponível em:” <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/caduc/article/view/1758/1636>. Acesso em: 29 nov. 2018.

KÖHNLEIN, J. F. K.; PEDUZZI, S. S. Um estudo a respeito das concepções alternativas sobre calor e temperatura. Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 2, n. 3, 2002. “Disponível em:” <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4133/2698>. Acesso em: 15 jun. 2019.

LAGO, G. Pôr do sol em Palmas encanta moradores pela exuberância. “Disponível em:” <http://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2016/05/por-do-sol-em-palmas-encanta-moradores-pela-exuberancia.html>. Acesso em: 29 nov. 2018.

LUMASENSE TECHNOLOGIES. Sensoriamento de temperatura infravermelho – Pirometria. “Disponível em:” <https://www.lumasenseinc.com/BR/products/techoverview/our->

technologies/irtemp-pyrometry/infrared-temperature-sensing-pyrometry.html. Acesso em: 15 jun. 2019.

MACAGNAN, M. H. Introdução à radiação solar. “Disponível em:” http://professor.unisinos.br/mhmac/Energia%20Solar%20Termica/Apostila_nova_ver_2010_full.pdf. Acesso em: 19 jan. 2019.

MENDONÇA, L. M. B. M. Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

MORAES, M. B. S. A. Determinação da constante solar por meio de um “calorímetro” com gelo. “Disponível em:” http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008_02/Beatriz/experimento.htm. Acesso em: 19 jan. 2019.

MOREIRA, A. C. S.; PENIDO, M. C. M. Sobre as propostas de utilização das atividades experimentais no ensino de física. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS*, 7, Florianópolis, 2009. “Disponível em:” <http://posgrad.fae.ufmg.br/posgrad/viiienpec/pdfs/814.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2018.

MUTLAQ, J. Star colors and temperatures. “Disponível em:” https://docs.kde.org/trunk5/en/extragear-edu/kstars/star_colors.png. Acesso em: 12 jan. 2019.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Hubble Gazes at Stars of the Large Magellanic Cloud. “Disponível em:” https://www.nasa.gov/sites/default/files/styles/full_width_feature/public/thumbnails/image/hubble_friday_06242016.jpg. Acesso em: 12 jan. 2019.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Solar radiation. “Disponível em:” <https://atmospheres.gsfc.nasa.gov/climate/?section=136>. Acesso em: 03 dez. 2018.

NOVO, M. M. M. et al. Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. *Cerâmica*, São Paulo, v. 60, n. 353, 2014. “Disponível em:” <http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n353/04.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2018.

NUSSENSVEIG, H. M. Curso de física básica 2: fluidos, oscilações e ondas, calor. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. Astronomia e astrofísica. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. Lei de Wien. “Disponível em:” <http://astro.if.ufrgs.br/rad/rad/rad.htm#wien>. Acesso em: 10 jan. 2019.

OLIVEIRA, J. R. S. Contribuições e abordagens das atividades experimentais no ensino de ciências: reunindo elementos para a prática docente. Acta Scientiae, Canoas, v. 12, n. 1, 2010. “Disponível em:” <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/acta/article/view/31/28>. Acesso em: 29 nov. 2018.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006. “Disponível em:” http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf. Acesso em: 04 dez. 2018.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. “Disponível em:” http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf. Acesso em: 14 jan. 2019.

PEROTTONI C. A.; ZORZI J. E. Determinação da constante solar por meio de um “calorímetro” com gelo. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 10, n. 2, 1993. “Disponível em:” <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7292/14929>. Acesso em: 29 nov. 2018.

PHYSICS EDUCATION TECHNOLOGY (PhET). Radiação do corpo negro. “Disponível em:” https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html. Acesso em: 08 jan. 2019.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Currículo do Estado de São Paulo: Ciências da Natureza e suas tecnologias. 1. ed. atual. São Paulo: SE, 2012. 152 p.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Diretrizes do Programa Ensino Integral. “Disponível em:” <http://www.educacao.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/342.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2018.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Material de apoio ao currículo do Estado de São Paulo: caderno do professor; física, ensino médio, 2ª série. v. 1. São Paulo: SE, 2014a.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Material de apoio ao currículo do Estado de São Paulo: caderno do aluno; física, ensino médio, 2ª série. v. 1. São Paulo: SE, 2014b.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Matriz de avaliação processual: biologia, física e química, ciências da natureza. São Paulo: SE, 2016, 64 p.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia. Subsecretaria de Energias Renováveis. Energia solar paulista: levantamento do potencial. “Disponível em:” http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalicev2/intranet/BiblioVirtual/renovaveis/atlas_energia_solar.pdf. Acesso em: 04 dez. 2018.

SARAIVA, M. F. O.; FRAQUELLI, H. A. Medida da constante solar. “Disponível em:” http://www.if.ufrgs.br/~fatima/trabalhos/Roteiro_Constante_Solar.htm. Acesso em: 29 nov. 2018.

SARAIVA, M. F. O.; OLIVEIRA FILHO, K. S.; MÜLLER, A. M. Movimento anual do Sol e estações do ano. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula3-141.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2019.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros, volume 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. Trad. Paulo Machado Mors. 6. ed. São Paulo: LTC, 2009.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Escola Superior de Acricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Engenharia de Biosistemas. Micrometeorologia da radiação I: revisão. “Disponível em:” https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1765618/mod_resource/content/1/Aula2_Micro_RadiaoI.pdf. Acesso em: 04 dez. 2018.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Instituto de Física. Tabela de calor específico de várias substâncias. “Disponível em:” <http://fep.if.usp.br/~profis/experimentando/diurno/downloads/Tabela%20de%20Calor%20Especifico%20de%20Varias%20Substancias.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR). Departamento de Física. Radiação solar incidente. “Disponível em:” <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>. Acesso em 04 dez. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). Instituto de Física. Experimento de determinação da constante solar. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/oei/exp/fsol.htm>. Acesso em: 29 nov. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). Instituto de Física. Radiação. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aularad.htm>. Acesso em: 02 dez. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). Instituto de Física. Insolação solar. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/insolacao.htm>. Acesso em: 15 jun. 2019.

VIEIRA, S. Introdução à bioestatística. Rio de Janeiro, Elsevier, 2011, 345 p. “Disponível em:” https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/M%C3%A9todos%20Est%C3%A1tisticos/Bioestatistica_-_Introducao_a_Bioestatistica_-_Sonia_Vieira_-_4_ed.pdf. Acesso em: 05 dez. 2018.

VÓRTEX. Tabela de emissividade. “Disponível em:” <http://www.vortex.com.br/p/11-tabela-de-emissividade>. Acesso em: 28 dez. 2018.

WIKIMEDIA COMMONS. Corpo negro. “Disponível em:” https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Corpo_negro.svg. Acesso em: 01 jan. 2019.

WIKIMEDIA COMMONS. Solar spectrum. “Disponível em:” https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Solar_Spectrum.png. Acesso em: 01 jan. 2019.

WIKIMEDIA COMMONS. Wien's law. “Disponível em:” https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Wiens_law.svg. Acesso em: 09 jan. 2019.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Sears and Zemansky's University Physics: with modern physics. 13. ed. San Francisco: Pearson, 2012.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física II Sears e Zemansky: termodinâmica e ondas. Trad. Daniel Vieira. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2015.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física IV Sears e Zemansky: ótica e física moderna. Trad. Daniel Vieira. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

Apêndice A

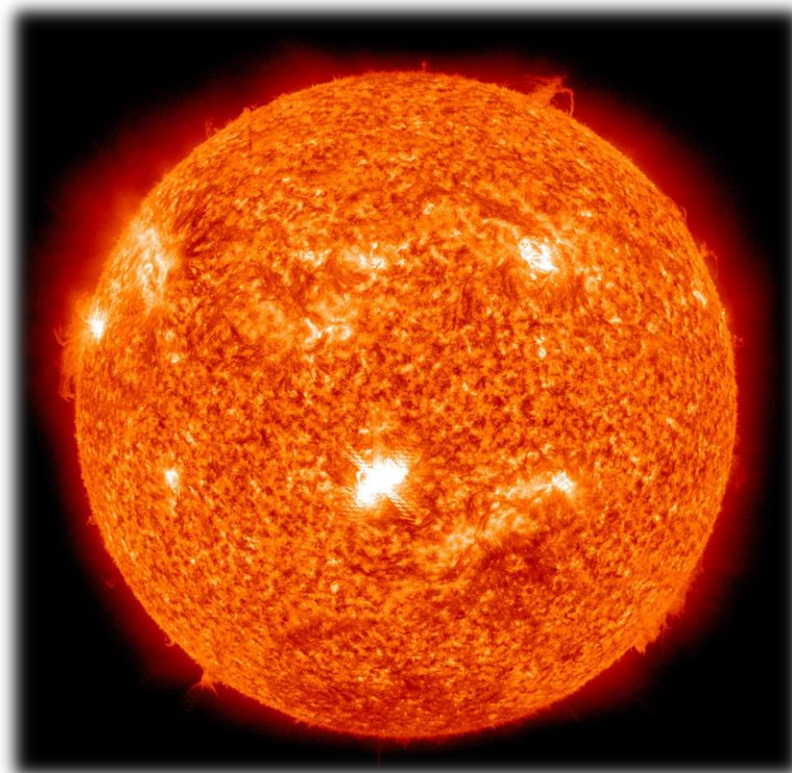
PRODUTO EDUCACIONAL

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

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

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Experimento para a Estimativa da Irradiância Solar Total:
Uma Abordagem para o Ensino Médio



©NASA

T. N. P. Gomes e J. A. Souza

UFSCar – Sorocaba

Maio de 2019

Prefácio

Nosso produto educacional consiste de um experimento para a estimativa da irradiância solar total. A aplicação de um experimento na ausência de contextualização e problematização torna a atividade pouco eficiente no que diz respeito ao processo de ensino-aprendizagem. Sendo assim, recomendamos ao professor que dedique algumas aulas para a introdução dos conceitos e problemas que serão tratados pelo experimento.

Na primeira seção apresentamos uma introdução que aborda a grandiosidade e importância de nossa estrela, o Sol, além da importância das medidas e métodos para a obtenção de dados no desenvolvimento da ciência. Na seção seguinte apresentamos um texto com o conteúdo de física que pode ser abordado através do produto educacional e que pode servir de base para a abordagem do conteúdo a ser realizada no primeiro encontro com os alunos. Salvo outra indicação de referência, o texto está baseado em algumas obras recorrentes no estudo de Física a nível superior e transposta a um nível compreensível para alunos do ensino médio (BAZAROV, 1964; NUSSENSVEIG, 2005; TIPLER & MOSCA, 2009; HEWITT, 2015; YOUNG & FREEDMAN, 2015, 2016; HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 2016a, 2016b).

Apresentamos também um roteiro do experimento para a estimativa da irradiância solar total, contendo os materiais necessários e os procedimentos envolvidos na montagem do conjunto experimental. Adicionalmente, abordamos sobre a metodologia sugerida para a aplicação do produto educacional, a qual necessita de quatro a seis aulas. O professor deve avaliar a quantidade adequada de acordo com a realidade e necessidade da turma. Na sequência apresentamos as atividades que podem ser desenvolvidas na análise e tratamento estatístico dos dados obtidos através do experimento e os conteúdos que podem ser tratados adicionalmente, em uma aplicação mais aprofundada do experimento. Após as referências, encontra-se a folha de atividades que pode ser disponibilizada aos alunos na aplicação do produto educacional.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para
thiagonpgomes@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, maio de 2019.

Sumário

| | | |
|-------------|---|------------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 92 |
| 2. | CONTEÚDO DE FÍSICA..... | 94 |
| 2.1. | Temperatura..... | 94 |
| 2.2. | Calor..... | 96 |
| 2.3. | Transferência de energia através do calor..... | 100 |
| 2.3.1. | Condução..... | 100 |
| 2.3.2. | Convecção..... | 101 |
| 2.3.3. | Radiação..... | 103 |
| 2.3.3.1. | <i>Emissão de radiação.....</i> | <i>105</i> |
| 2.3.3.2. | <i>Absorção de radiação.....</i> | <i>108</i> |
| 2.4. | Radiação de corpo negro..... | 109 |
| 2.5. | Irradiância solar..... | 111 |
| 3. | METODOLOGIA DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL..... | 119 |
| 3.1. | Primeiro encontro: problematização do tema e abordagem dos conceitos físicos envolvidos na atividade experimental..... | 119 |
| 3.2. | Segundo encontro: desenvolvimento da atividade experimental..... | 121 |
| 3.3. | Terceiro encontro: estimativa da irradiância solar total e propagação de erros..... | 121 |
| 4. | ROTEIRO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL..... | 122 |
| 5. | ANÁLISE DOS DADOS DO EXPERIMENTO..... | 123 |
| 6. | SUGESTÕES DE TEMAS QUE PODEM SER ABORDADOS APÓS A APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL..... | 126 |
| 7. | REFERÊNCIAS..... | 128 |
| 8. | FOLHA DE ATIVIDADES..... | 130 |

1. INTRODUÇÃO

O Sol é a estrela mais próxima de nós. Embora esteja a cerca de 150 milhões de quilômetros de distância, o que equivale a aproximadamente uma unidade astronômica, ele é nossa maior fonte de energia e é responsável por uma enorme quantidade de processos químicos, biológicos e físicos na Terra, o que permite a manutenção da vida no planeta. Além disso, sua energia influencia diretamente na atmosfera e clima terrestre ao longo do tempo (GÓMEZ et al., 2018).

Embora a energia solar não seja renovável, podemos considerá-la inesgotável, considerando a escala de tempo da vida da estrela e dos seres humanos. O Sol é uma estrela comum, de tamanho médio, cuja energia é produzida em decorrência de reações termonucleares que ocorrem em seu interior. Mais precisamente, ela ‘origina-se’ da fusão de átomos de hidrogênio, que compõem cerca de 75% da massa solar, resultando em átomos de hélio, os quais constituem cerca de 25% do restante da massa. A cada segundo, o Sol converte 4,3 milhões de toneladas de matéria em energia, emitindo-a a uma taxa de $3,86 \times 10^{26} W$, valor que tem se mantido aproximadamente constante há alguns bilhões de anos (PEREIRA et al., 2017). No entanto, uma pequena fração desse valor efetivamente chega até a Terra.

Hoje, sabemos que nosso planeta recebe do Sol cerca de $1360,8 W/m^2$ na superfície atmosférica. Tal valor sofre uma variação de 0,3% no decorrer do ciclo solar, que dura 11 anos. Esse valor de energia é equivalente à queima de 2×10^{20} galões de gasolina a cada minuto, compatível a mais de dez milhões de vezes a produção anual de petróleo do planeta (OLIVEIRA FILHO & SARAIVA, 2004). Processos atmosféricos atenuam mais ainda o valor da radiação solar que incide sobre a superfície da Terra. Mesmo assim, a quantidade é suficiente para manter processos dinâmicos, químicos e térmicos, sejam eles naturais ou tecnológicos.

Entre os processos naturais sustentados pelo Sol e que estão comumente em contato conosco estão a dinâmica dos oceanos e da atmosfera (ventos e correntes oceânicas), o ciclo hidrológico (evaporação e precipitação) e a fotossíntese (produção de biomassa). Entre os processos tecnológicos podemos citar a climatização de ambientes, a geração de eletricidade e o aquecimento solar. De fato, as últimas décadas têm propiciado um grande avanço no que diz respeito a utilização da energia solar para fins térmicos em residências e indústrias, além da geração fotovoltaica de energia (PEREIRA et al., 2017).

Desde o início da história da humanidade, o Sol, as demais estrelas, a Lua e a nossa própria Terra intrigaram os seres humanos. Quais seriam os tamanhos de tais astros? A que distâncias estariam de nosso planeta? Aliás, a Terra é plana ou esférica? Qual é o seu tamanho? As medidas são um indicativo de boa ciência. O quanto sabemos sobre alguma coisa depende diretamente de quão bem conseguimos medi-la. Isso foi exposto de modo claro e direto pelo matemático e físico britânico Lord Kelvin (HEWITT, 2015). Por muito tempo, ficamos sem uma resposta exata, envolvendo números, referente às perguntas acima. Por essa razão, não podíamos dizer que conhecíamos bem o Sol, as estrelas, a Lua e a Terra. Mas, com o tempo, esse cenário passou a mudar.

Em 235 a.C., o geógrafo e matemático grego Eratóstenes de Cirene mediu o tamanho da Terra, propondo que seu formato fosse esférico. Utilizando a sombra de uma estaca e relações trigonométricas, ele obteve o valor de 40.000 km (equivalente a 250.000 estádios em unidades de medida da época). O valor aceito hoje, mais de dois milênios depois, é de 40.075 km, o que significa uma diferença de apenas aproximadamente 0,2 %, algo realmente incrível. Cerca de cinco anos antes, por volta de 240 a.C., o astrônomo e matemático grego Aristarco de Samos assistiu a um eclipse lunar e usou tal fenômeno para comparar os tamanhos da Lua e da Terra. Utilizando uma regra de três simples, ele estimou que a Lua possuía um tamanho de 3,5 vezes menor que o da Terra. Com base nos valores que temos hoje, é possível calcular que Aristarco “errou” em aproximadamente 5% (HEWITT, 2015).

Ainda nos tempos antes de Cristo, os gregos antigos utilizaram um raciocínio geométrico (semelhança de triângulos) e uma moeda para medir a distância da Lua em relação à Terra. Ao compararmos o valor que temos hoje com o que foi previsto há mais de dois milênios, a discrepância é de apenas cerca de 4%. Com base nas mesmas relações, Aristarco resolveu medir a distância da Terra ao Sol, utilizando novamente teoremas trigonométricos. Ele estimou que o Sol estivesse a uma distância 20 vezes maior do que a Lua está da Terra, sendo que, na realidade, ele está a uma distância 400 vezes maior. Essa divergência ocorreu devido a medida do ângulo formado entre as linhas de visão para o Sol e para a Lua, a qual é difícil de se obter sem um teodolito moderno, indisponível na época. Aristarco estimou um ângulo de 87° , sendo que na realidade ele vale $89,8^\circ$, quase um ângulo reto (HEWITT, 2015).

Conhecendo a distância do Sol em relação à Terra, e utilizando as mesmas relações estabelecidas para se obter a medida do tamanho da Lua, era possível estimar também o

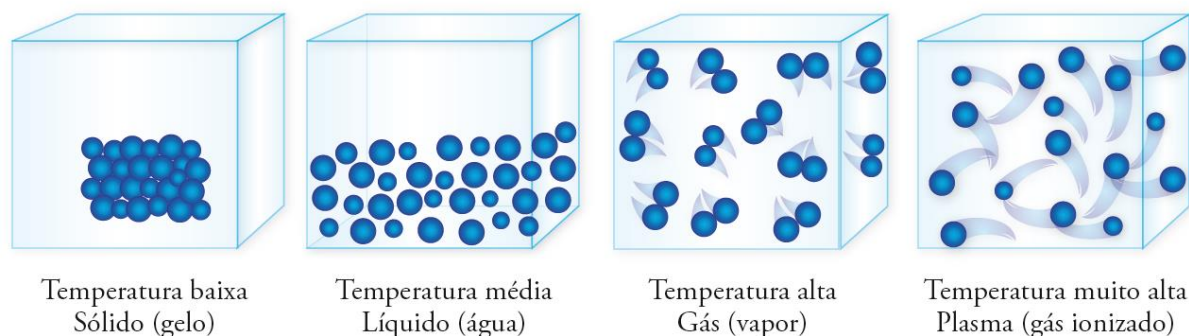
tamanho do Sol. Todas essas medidas foram realizadas poucos séculos antes de Cristo. Portanto, apenas a partir desse momento o ser humano poderia dizer que começava a possuir um certo conhecimento acerca do Sol, da Terra e da Lua, visto que passamos a conseguir expressá-los em números. Embora os métodos utilizados por essas pessoas do passado pudessem ser complexos em sua época, hoje eles podem ser considerados simples e é possível até mesmo abordá-los em sala de aula.

Embasado na grandiosidade e importância de nossa estrela, o Sol, e no fato de que é possível conhecê-lo cada vez mais através de métodos simples, procuramos desenvolver um experimento capaz de nos ajudar a estimar o valor da irradiância solar, ou seja, a quantidade de energia emitida pelo Sol que chega até nós.

2. CONTEÚDO DE FÍSICA

2.1 Temperatura

Toda a matéria ordinária que existe no universo, chamada de matéria bariônica, independentemente de seu estado físico, é composta por átomos e moléculas que estão em constante movimento aleatório. Em decorrência disso, eles possuem o que chamamos de energia cinética. Quando obtemos o valor da energia cinética média de todos os átomos que compõem um determinado objeto, obtemos o valor de uma grandeza física que chamamos de temperatura, simbolizada nesse trabalho pela letra T , conforme ilustrado na figura A.1. Por que dizemos energia cinética média? Um pequeno pedaço de ferro com cerca de 50 g, por exemplo, possui uma quantidade de átomos da ordem de sextilhões. Obviamente, existe uma ínfima possibilidade de que todos eles estejam movimentando-se na mesma velocidade. No entanto, a situação mais recorrente é o movimento dos átomos em diferentes velocidades, resultando em diferentes valores de energia cinética para cada átomo. Seria extremamente difícil descrevermos a gama de valores diferentes encontrados para tal situação. Por isso, costumamos utilizar a média desses valores e traduzi-los como algo chamado temperatura.

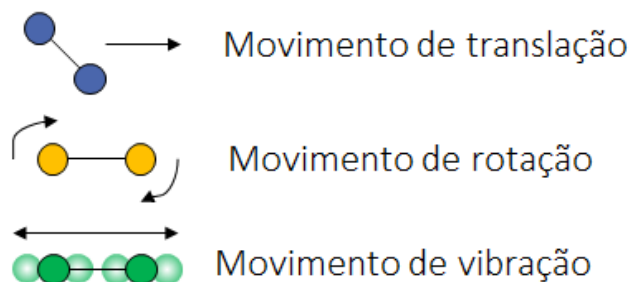
Figura A.1 – Substâncias a diferentes temperaturas.

Fonte: São Paulo (2014, p. 9).

Quanto ao tipo de movimento que os átomos podem realizar, existe o de translação (movimento de um lugar a outro), o de rotação e o de vibração, conforme observado na figura A.2. No entanto, o movimento que efetivamente contribui para a alteração da temperatura de uma substância é o de translação. Os fornos de micro-ondas, por exemplo, emitem ondas capazes de fazer as moléculas de água do alimento oscilar, invertendo suas orientações. Isso, de fato, produz um grande movimento rotacional. No entanto, se esse movimento não for comunicado às moléculas vizinhas, suas energias cinéticas não aumentarão e, conseqüentemente, o alimento não esquentará. Portanto, oscilar ou vibrar em torno de uma posição fixa não altera a temperatura do alimento. Mas, quando as moléculas passam a se mover de um lugar a outro, elas ricocheteiam nas moléculas vizinhas, causando um aumento em suas energias cinéticas e, conseqüentemente, aumentando a temperatura do alimento.

Portanto, podemos resumir a descrição da temperatura como sendo uma medida da energia cinética translacional média das moléculas que compõem uma determinada substância. As unidades de medida mais utilizadas para ela são as escalas Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) e Kelvin (K), sendo esta última a unidade padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI).

Figura A.2 – As partículas da matéria em geral se movem das mais variadas maneiras. Elas se movem de um lugar para outro, giram e vibram de um lado para outro. Todos esses modos de movimento, mais a energia potencial, contribuem para a energia total de uma substância. A temperatura, entretanto, é definida em relação à energia do movimento de translação.



Fonte: adaptado de Hewitt (2015, p. 287).

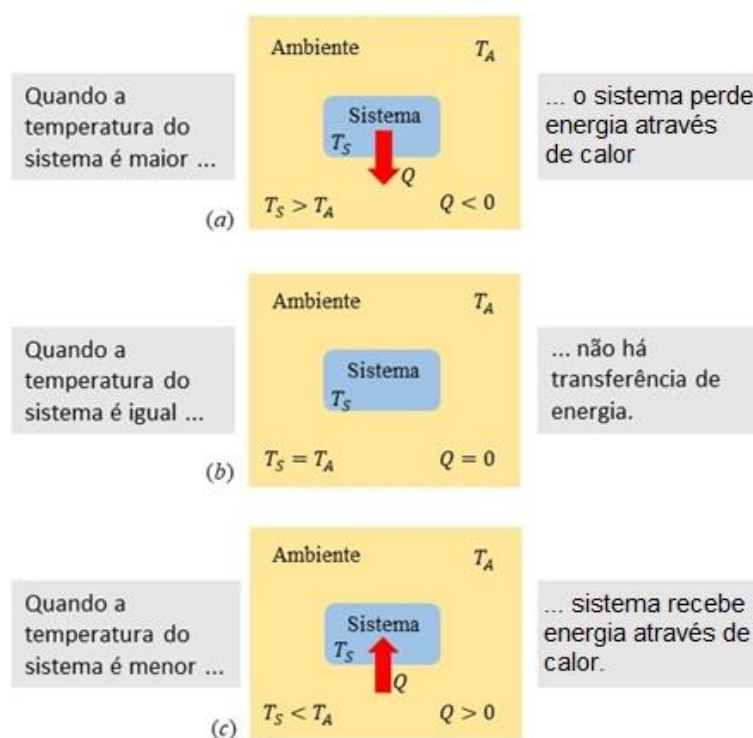
2.2 Calor

Ao encostarmos a mão em uma tigela de vidro que acabou de sair do forno, energia será transferida à nossa mão, visto que a tigela está mais quente que a mão. Em contraste, ao encostarmos a mão em uma latinha que estava dentro da geladeira, ocorrerá o processo inverso. Energia será transferida de nossa mão para a latinha. O sentido da transferência espontânea de energia é sempre do objeto com maior temperatura para o objeto de menor temperatura. Essa transferência permanece ocorrendo enquanto houver uma diferença de temperatura entre dois objetos próximos, ou entre algum sistema e o ambiente, até o momento em que os dois atinjam a mesma temperatura e alcancem o que chamamos de equilíbrio térmico, conforme observado na figura A.3. Tal transferência de energia é chamada de calor, simbolizada nesse trabalho pela letra Q .

O que representa a energia que está sendo transferida? Como já abordado, a temperatura é uma medida da energia cinética translacional média das moléculas. Quando objetos estão a diferentes temperaturas, os átomos que os compõem estão movimentando-se a diferentes velocidades médias e, ao entrar em contato, é natural que aquele objeto onde os átomos estão mais rápidos transfiram movimento aos átomos mais lentos do objeto que está a uma temperatura menor. Podemos comparar isso com um jogo de bilhar. Ao acertarmos a bola branca com o taco, fazemos com que ela passe a movimentar-se com uma certa velocidade e adquira uma certa quantidade de energia cinética. Ao colidir com uma das bolas coloridas, a bola branca transfere parte de seu movimento. Nesse processo, a bola branca perde velocidade

e, conseqüentemente, energia, enquanto a bola colorida ganha velocidade e, conseqüentemente, energia. Deveras, um belo caso da conservação da energia! Portanto, a energia transferida de um objeto a outro devido a uma diferença de temperatura é, na realidade, uma transferência de movimento, ou energia cinética, entre os átomos e moléculas que os compõem.

Figura A.3 – Se a temperatura de um sistema é maior que a temperatura do ambiente, como em (a), certa quantidade Q de energia é perdida pelo sistema através de calor para o ambiente para que o equilíbrio térmico (b) seja restabelecido. (c) Se a temperatura do sistema é menor que a temperatura do ambiente, certa quantidade de energia é absorvida pelo sistema através de calor para que o equilíbrio térmico seja restabelecido.



Fonte: Adaptado de Halliday, Resnick e Walker (2016a, p. 430).

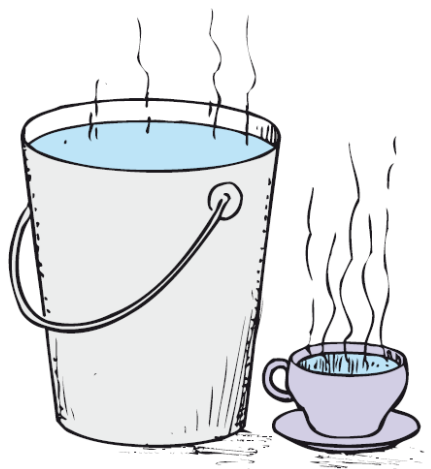
É importante frisar que os objetos não possuem calor, mas sim temperatura. Calor é a forma pela qual energia é transferida de um objeto para outro devido a diferença de temperatura entre eles. Além disso, calor não deve ser confundido com energia interna, a qual é a soma de todas as energias cinéticas e potenciais presentes no interior de uma substância. De fato, ao analisarmos minuciosamente um objeto, poderemos encontrar uma enorme gama de energias em sua constituição: a energia cinética translacional das moléculas, energia cinética rotacional, energia potencial de ligação, energia potencial em decorrência das forças entre as moléculas,

etc. Ao invés de realizarmos o duro trabalho de discriminarmos cada uma delas, simplesmente utilizamos o termo energia interna para descrever todas elas. Diferentemente da energia interna, ou energia térmica, o calor não constitui uma propriedade dos objetos.

A transferência de energia através de calor pode resultar na alteração dos valores de energia interna, ou temperatura, do objeto. Mas quando a transferência de energia ocorre e não há variação na energia interna, isso significa que está ocorrendo uma transição de fase. Por exemplo, quando 1 g de gelo a -50°C é colocado em um recipiente sobre um fogão para esquentar, um termômetro apresentará um gradual aumento na temperatura. No entanto, ao chegar a 0°C , a energia interna se estabiliza, embora energia continue sendo transferida. Nesse caso, ao invés de tornar-se mais quente, o gelo começa a fundir. Apenas quando todo o gelo é derretido a temperatura volta a subir.

Vale ressaltar também que a transferência de energia através do calor não ocorre do objeto com mais energia interna para outro com menos energia interna. Um balde cheio de água a temperatura ambiente possui mais energia interna que uma xícara com água fervendo (Figura A.4). No entanto, a água da xícara possui maior energia cinética média molecular, ou seja, maior temperatura, e por essa razão, transferirá energia para a água a temperatura ambiente que está no balde.

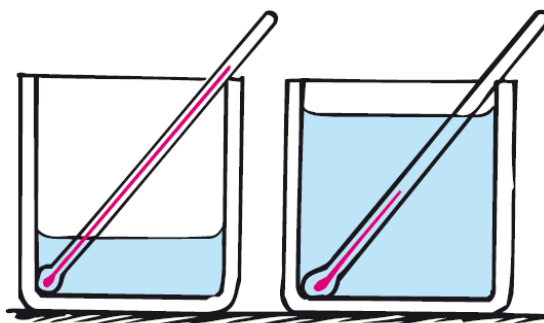
Figura A.4 – Existe mais energia cinética molecular em um recipiente cheio de água morna do que em uma pequena xícara de chá cheia de água a uma temperatura maior.



Fonte: Hewitt (2015, p. 287).

Além disso, a quantidade de energia transferida também depende da quantidade das substâncias envolvidas. Por exemplo, ao colocarmos dois recipientes sobre dois fogareiros idênticos, sendo que um recipiente possui 100 ml de água e outro possui 50 ml de água, obviamente o recipiente com menos água apresentará uma maior variação em sua temperatura, embora ambos recebam a mesma quantidade de energia (Figura A.5).

Figura A.5 – Embora uma mesma quantidade de energia tenha sido transferida através de calor para os dois recipientes, a temperatura cresce mais no recipiente com menor quantidade de água.



Fogão quente

Fonte: Hewitt (2015, p. 288).

A quantidade de energia transferida a um corpo através do método calor é usualmente chamada de quantidade de calor Q e sua unidade é expressa naturalmente, de acordo com o SI, por joule (J). Há também uma unidade bastante utilizada no mundo todo chamada de caloria (cal), definida como a quantidade de energia transferida através de calor necessária para aumentar a temperatura de um grama de água em um grau Celsius, mais especificamente, de $14,5^{\circ}\text{C}$ para $15,5^{\circ}\text{C}$. Quando nos referimos a uma grande quantidade de calorias, costumamos utilizar seu derivado quilocaloria (kcal), costumeiramente encontrada em tabelas de informações nutricionais dos alimentos. A equivalência entre as duas unidades de energia é dada pelo equivalente mecânico do calor, expresso quantitativamente pela seguinte relação:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J} \quad (\text{A.1})$$

2.3 Transferência de energia através do calor

2.3.1 Condução

Ao segurarmos um garfo de metal com alguma coisa sobre o fogo, aos poucos ele se tornará quente demais para que possamos continuar segurando-o. O processo de calor inicia-se pelas pontas do garfo e é transmitido ao longo de todo o material até chegar aos nossos dedos. Isso ocorre porque o fogo fornece energia para que os átomos presentes na ponta do garfo oscilem com uma velocidade maior, aumentando suas energias cinéticas e, conseqüentemente, sua temperatura. Em decorrência disso, os átomos e elétrons livres passam a colidir com as partículas vizinhas, e assim sucessivamente, até chegar a outra extremidade, onde estão os dedos. Tal situação, principalmente o movimento dos elétrons livres, é a responsável pelo aumento da temperatura do garfo. Esse modo de transferência de calor é chamado de condução e ocorre mais facilmente em materiais no estado sólido.

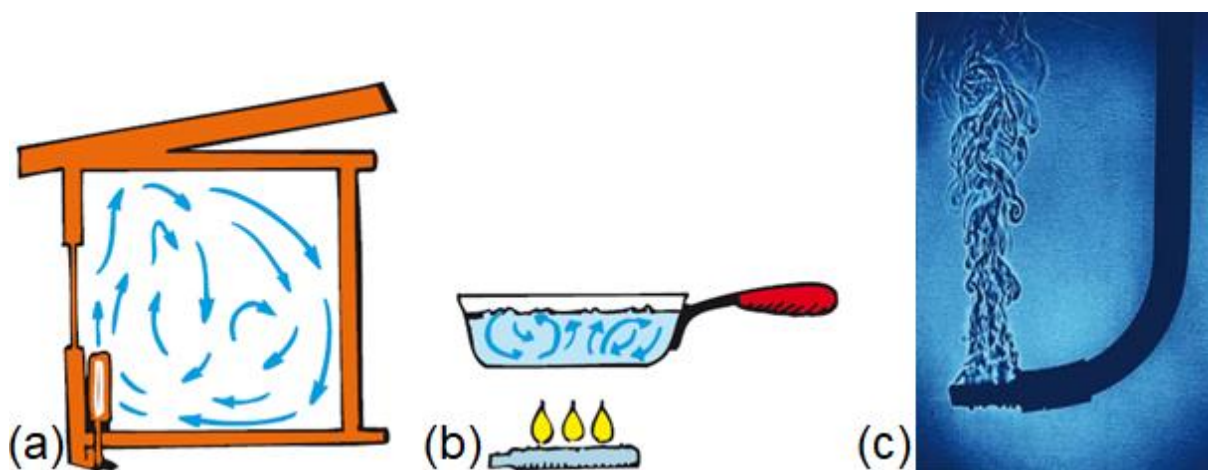
O que define se um material será um bom ou mau condutor de calor é sua estrutura atômica ou molecular. Ele é considerado um bom condutor quando um ou mais elétrons da camada mais externa dos átomos estão “fracamente” ligados ao átomo. Isso possibilita que eles se tornem livres para colidir com outros átomos e elétrons e, assim, transferir energia. Isso ocorre especialmente em metais, como prata e cobre, por exemplo. Em contraste, materiais como madeira, plástico, papel e isopor, são maus condutores de calor. Isso ocorre porque os elétrons da camada mais externa dos átomos que compõem esse material estão mais “fortemente” ligados ao átomo e não possuem liberdade de vagar pelo objeto, transferindo energia para suas vizinhanças. Tais materiais são chamados de isolantes. Por essa razão, costumamos utilizar cabos desses materiais para revestir superfícies metálicas que entram em contato com o fogo.

Resumindo, a transferência de energia por condução pode ser definida como a transferência de energia por meio de colisões eletrônicas e moleculares no interior das substâncias. Ela ocorre especialmente em materiais sólidos. A maior parte dos líquidos e gases são maus condutores de energia através de calor.

2.3.2 Convecção

Geralmente, líquidos e gases transferem energia térmica através de um processo chamado convecção. Este ocorre devido ao movimento do próprio fluido. Enquanto a condução trata da transferência de energia em decorrência do movimento de partículas atômicas, a convecção envolve o movimento de grandes massas de líquidos e gases, ou seja, um grande conjunto de átomos e moléculas. Por exemplo, ao colocarmos uma panela com líquido sobre o fogo, o líquido localizado ao fundo esquentará mais rápido. Em decorrência do aumento da rapidez dessas moléculas, elas passarão a afastar-se uma das outras, criando uma região de menor densidade. Isso faz com que exista uma força de empuxo que empurra o fluido quente e menos denso para cima, enquanto o fluido frio e mais denso desce. Essa circulação de fluido, chamada de correntes de convecção, permitem que o fluido aumente sua temperatura como um todo (Figura A.6).

Figura A.6 – (a) Correntes de convecção no ar. (b) Correntes de convecção em um líquido. (c) Um aquecedor, localizado na ponta de um tubo em “J” submerso em água, gera correntes de convecção, reveladas pelas sombras (causadas pelas reflexões sofridas pela luz na água a diferentes temperaturas).

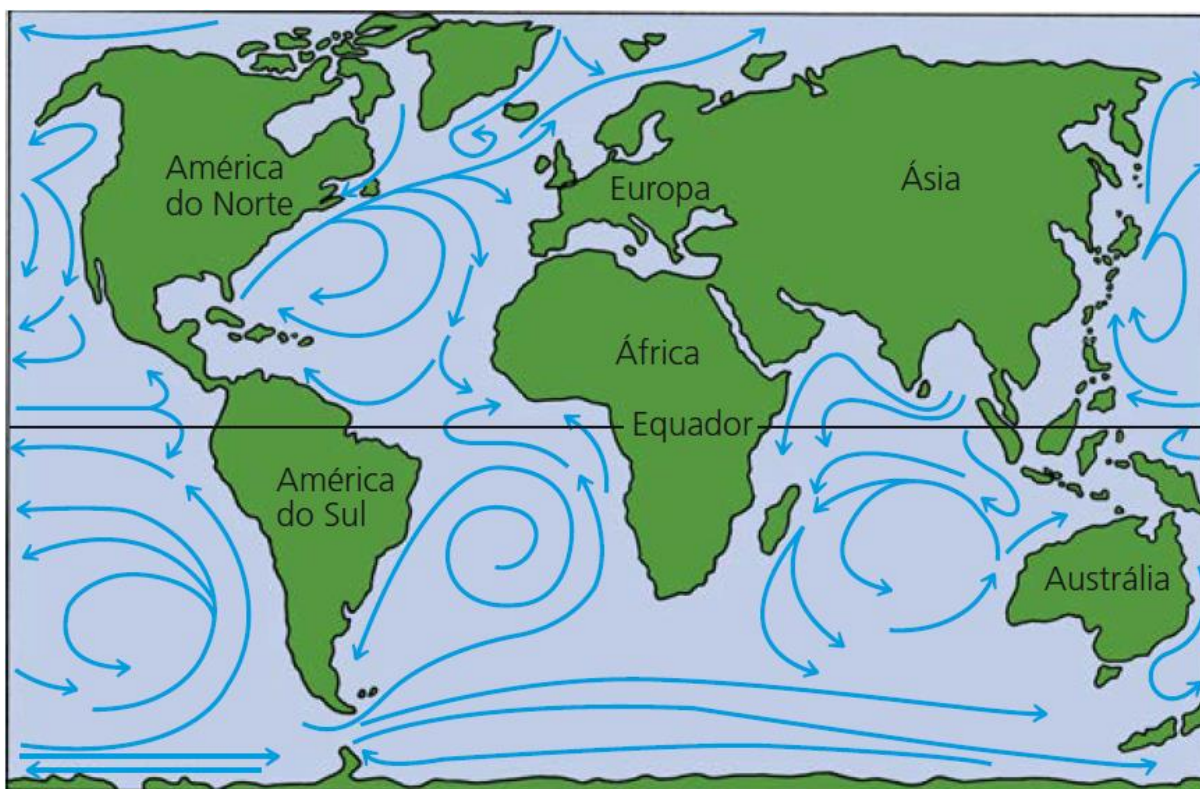


Fonte: Hewitt (2015, p. 305, 306).

As correntes de convecção ocorrem, por exemplo, na atmosfera. Elas causam os ventos quando regiões da superfície terrestre apresentam diferentes temperaturas. Elas ocorrem também nos oceanos (Figura A.7). Um clássico exemplo ocorre na praia em um dia de Sol. Como a água possui um calor específico muito maior que o da areia, ela demora para esquentar,

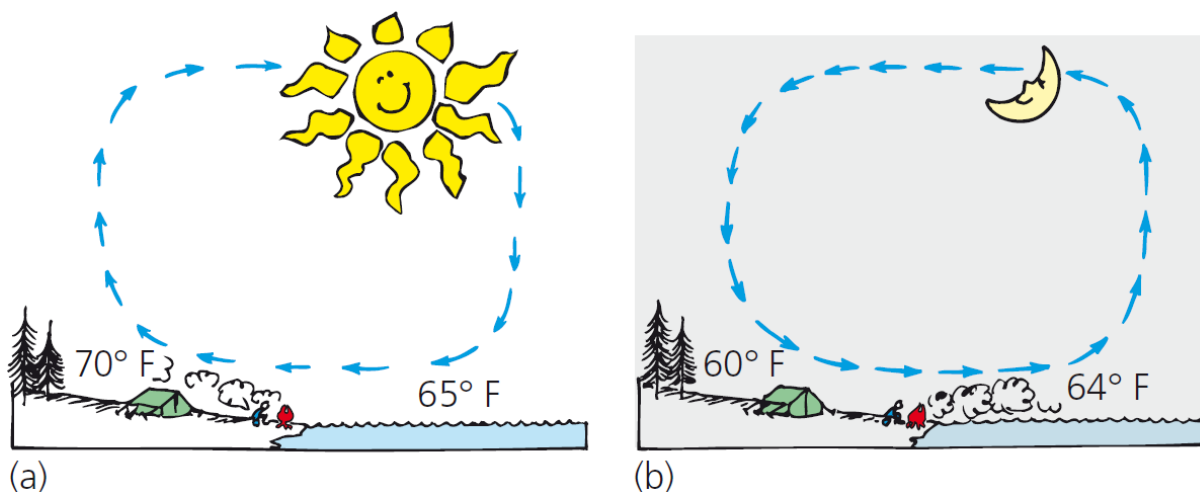
enquanto a areia esquenta rapidamente. Isso faz com que o ar sobre a areia fique mais quente que o ar sobre a água. Enquanto o ar quente sobre a areia se eleva, o ar mais frio sobre a água passa a escoar e ocupar seu lugar. O resultado é a brisa marítima da água em direção ao solo. À noite, acontece o processo inverso. A água está mais quente que a areia, fazendo com que a brisa marítima ocorra do solo em direção à água (Figura A.8).

Figura A.7 – Muitas correntes oceânicas, mostradas em azul, distribuem a energia térmica proveniente das regiões equatoriais mais quentes para as regiões polares, mais frias.



Fonte: Hewitt (2015, p. 291).

Figura A.8 – As correntes de convecção geradas pelo aquecimento desigual da terra e da água. (a) Durante o dia, o ar aquecido próximo ao solo se eleva e o ar mais frio logo acima da água se move a fim de substituí-lo. (b) Durante a noite, o sentido do fluxo do ar se inverte, porque nesse período a água está mais quente do que a terra.



Fonte: Hewitt (2015, p. 306).

Em suma, podemos definir a convecção como a transferência de energia que ocorre em um líquido ou gás em decorrência das correntes que surgem no interior da substância aquecida. Enquanto o fluido move, transporta consigo a energia.

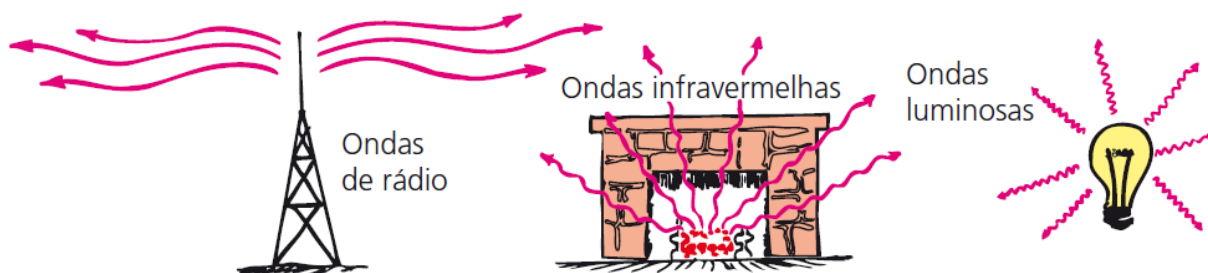
2.3.3 Radiação

Todos podemos sentir a energia que o Sol emite em direção à Terra. Tal transferência de energia não pode ocorrer por condução, pois o ar presente na atmosfera é um mau condutor de energia térmica. A transferência também não poderia ocorrer por convecção pois, para que ela tenha início, a superfície terrestre já deveria estar aquecida, o que não acontece pelo fato de não ter ocorrido a condução. Além disso, o vácuo entre o Sol e a atmosfera terrestre impedem a transferência de energia por condução e convecção, uma vez que seria necessário um meio material para que elas ocorressem. Portanto, a energia só pode ser transmitida de outra maneira: a radiação.

A energia transferida através da radiação também é chamada de energia radiante e apresenta-se na forma de ondas eletromagnéticas. Elas incluem as ondas de rádio, as micro-ondas, as ondas infravermelhas, a luz visível, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama,

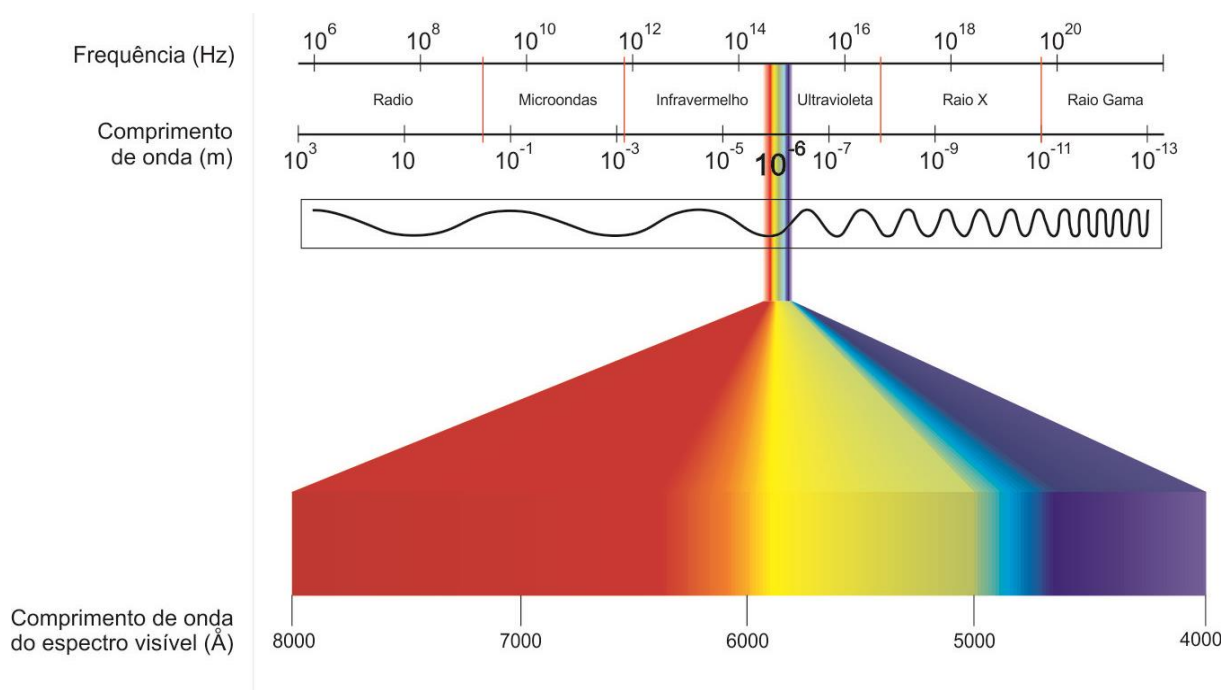
apresentadas na figura A.9. A classificação apresentada está em ordem decrescente com relação aos seus comprimentos de onda, conforme observada na figura A.10.

Figura A.9 – Exemplos de ondas eletromagnéticas.



Fonte: Hewitt (2015, p. 307).

Figura A.10 – Espectro eletromagnético.



Fonte: IF-UFRGS. Radiação. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aularad.htm>.

Acesso em: 02 dez. 2018.

As ondas infravermelhas apresentam comprimentos de onda mais longos que o da luz visível, enquanto as ondas ultravioletas possuem comprimentos de onda mais curtos. O comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência da radiação eletromagnética, a qual representa a taxa de vibração de uma onda. Elétrons em vibração emitem ondas eletromagnéticas, e sua frequência depende da taxa de oscilação de tais elétrons. Ao interagir com os átomos que compõem um objeto, as ondas eletromagnéticas aumentam suas energias cinéticas e, conseqüentemente, sua temperatura.

A relação entre o comprimento da onda λ , a frequência f e a velocidade da onda v é dada por

$$v = \lambda f \quad (\text{A.2})$$

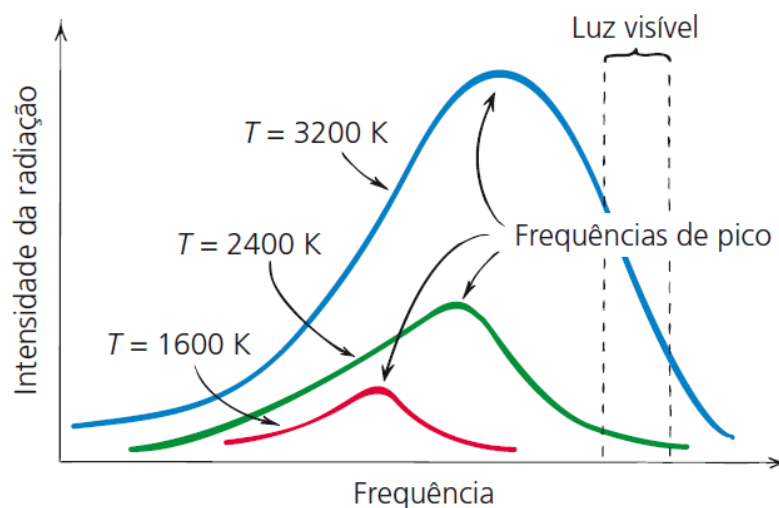
Quando estamos analisando a luz, a velocidade v é substituída pela velocidade da luz c e a eq.(A.2) é modificada, resultando em

$$c = \lambda f \quad (\text{A.3})$$

2.3.3.1 Emissão de radiação

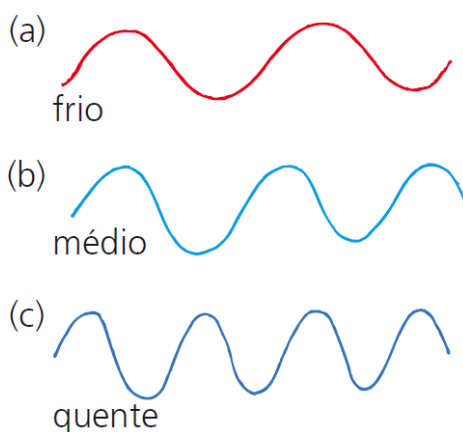
Todas as substâncias, a qualquer temperatura, emitem energia radiante. A frequência máxima da radiação emitida é diretamente proporcional à temperatura absoluta do objeto emissor, conforme observado nas figuras A.11 e A.12. Quando a temperatura de um objeto atinge determinado valor, ele passa a emitir radiação na faixa da luz visível: a 500°C , por exemplo, emitirá ondas na faixa da luz vermelha; a cerca de 5000°C emitirá ondas na faixa de todas as cores do espectro, nos parecendo branco. O mesmo princípio vale para as estrelas: estrelas azuis são mais quentes que as brancas, que são mais quentes que as vermelhas. Como a superfície solar apresenta alta temperatura em comparação com os padrões terrestres (cerca de 5500°C), ele emite radiação de alta frequência, sendo boa parte na faixa da luz visível do espectro eletromagnético, conforme apresentado na figura A.13. Como a superfície terrestre apresenta uma temperatura menor em comparação com a solar, ela emite radiação de baixa frequência, na faixa das ondas infravermelhas.

Figura A.11 – A temperatura é diretamente proporcional à frequência da radiação emitida.



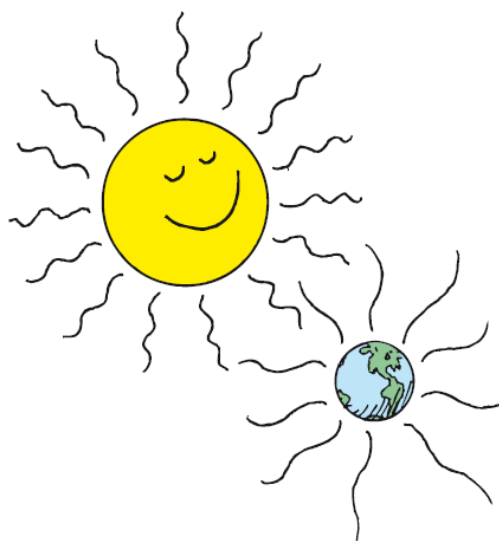
Fonte: Hewitt (2015, p. 308).

Figura A.12 – (a) Uma fonte a uma temperatura baixa (fonte fria) emite fundamentalmente frequências baixas, ou seja, em longos comprimentos de onda. (b) Uma fonte a uma temperatura média emite principalmente frequências médias, ou comprimentos de onda médios. (c) Uma fonte a uma temperatura muito alta (fonte quente) emite principalmente em frequências altas, ou comprimentos de onda curtos.



Fonte: Hewitt (2015, p. 308).

Figura A.13 – Tanto o Sol como a Terra emitem a mesma espécie de energia radiante. O brilho do Sol é visível ao olho humano; o da Terra é formado por ondas mais longas e, assim, não é visível ao olho humano.



Fonte: Hewitt (2015, p. 308).

A radiação solar tem origem em reações nucleares que ocorrem em seu interior, assim como ocorre com a radiação terrestre. Objetos a temperatura ambiente emitem ondas infravermelhas de baixa frequência, conforme apresentado na figura A.14. Quando as ondas infravermelhas entram em contato com nossa pele, temos a sensação de aquecimento. Por essa razão ela é chamada de radiação térmica. Termômetros infravermelhos funcionam com base na radiação térmica emitida por algum objeto. Basta apontar o aparelho para o objeto que desejamos aferir a temperatura e ele identificará a temperatura com base na radiação que ele emite.

Figura A.14 – Imagem em infravermelho com falsa cor revelando a radiação emitida por várias partes do corpo humano. A emissão mais forte (partes avermelhadas do rosto) vem das áreas mais quentes, ao passo que, por outro lado, há muito poucas emissões vindo da garrafa de bebida gelada.



Fonte: Young e Freedman (2016, p. 225).

2.3.3.2 Absorção de radiação

Ao mesmo tempo em que emitem radiação, os objetos também a absorvem. Bons emissores são também bons absorvedores e vice-versa. Se algo absorve mais energia do que emite, sua temperatura aumenta. O que define se um objeto será emissor ou absorvedor de radiação é a temperatura do ambiente ao seu redor, valendo o princípio de que a energia térmica é transferida através de calor de uma substância a maior temperatura para uma de menor temperatura. Podemos, por exemplo, colocar um líquido quente em dois recipientes, sendo que um possui uma superfície preta enquanto o outro possui uma superfície branca ou espelhada (Figura A.15). A água do recipiente escuro esfriará mais rápido. O mesmo princípio ocorre quando colocamos água fria nos recipientes e os expomos ao Sol. A água do recipiente escuro esquentará primeiro. Portanto, qualquer objeto que emita facilmente energia radiante, também a absorverá facilmente.

Figura A.15 – Se os recipientes são preenchidos com água quente (ou fria), o que é pintado de preto esfria (ou aquece) primeiro.



Fonte: Hewitt (2015, p. 309).

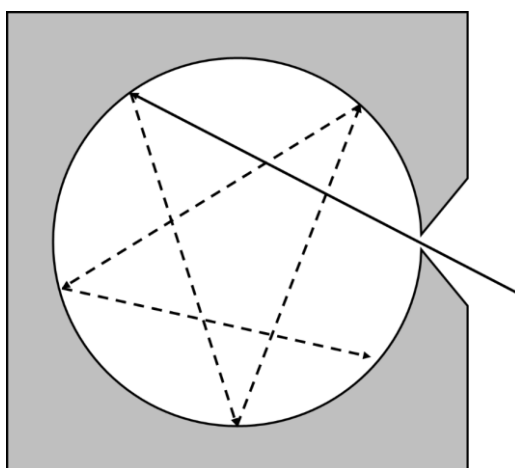
2.4 Radiação de corpo negro

No início do século XX discutia-se muito acerca de um problema envolvendo a radiação térmica emitida por um corpo negro, definido pelo físico alemão Gustav Kirchhoff como um corpo que absorve toda a radiação que sobre ele incide e possui emissividade igual a 1, sendo, portanto, um emissor perfeito. Tal objeto é chamado de corpo negro porque, ao ser iluminado, nos pareceria totalmente negro, visto que não refletiria luz alguma (OLIVEIRA FILHO & SARAIVA, 2004). No entanto, um corpo negro ideal inexistente na natureza, tal qual uma superfície inclinada sem atrito e uma corda sem massa alguma, mas sua idealização e conceitos envolvidos possuem algumas utilidades, visto que suas características são possíveis de serem descritas e calculadas teoricamente. Podemos conceber um corpo negro ideal, de maneira aproximada, como um recipiente oco com um orifício, conforme apresentado na figura A.16.

A radiação que incide pelo furo é absorvida pelas paredes da caixa, tornando-se um absorvedor perfeito. Quando a caixa é aquecida, os átomos das paredes internas passam a oscilar (ou seja, possui energia térmica que, em última análise, trata-se de energia cinética) e passam a emitir radiação eletromagnética, ou seja, radiação térmica. A luz que emana do orifício constitui-se uma radiação de corpo negro praticamente ideal. Como o furo é suficientemente pequeno, a fração da radiação que escapa do recipiente é muito pequena e incapaz de alterar a radiação presente no interior do recipiente. A radiação emitida é constituída de diversos

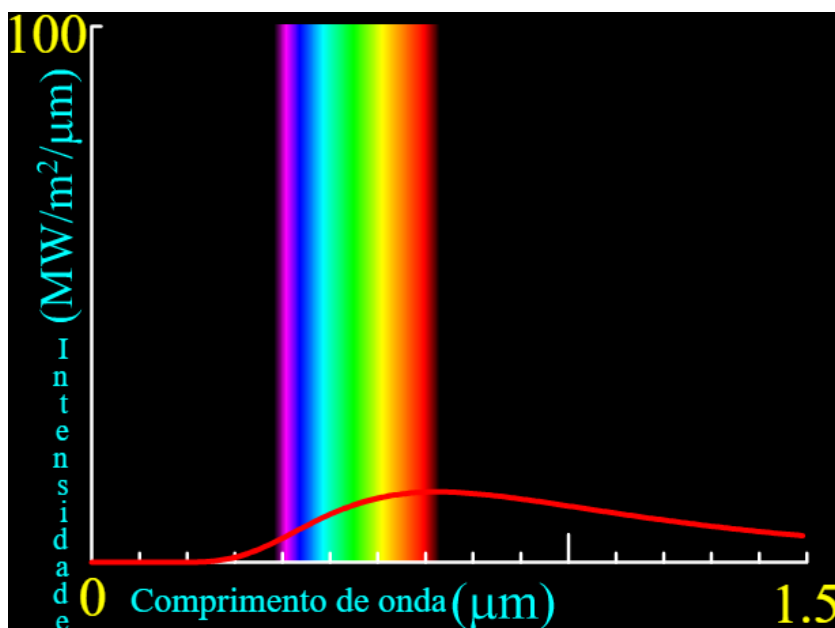
comprimentos de onda, produzindo um espectro contínuo, ao contrário do espectro de linhas emitido por um gás, conforme apresentado na figura A.17.

Figura A.16 – Um orifício em uma cavidade se aproxima de um corpo negro ideal. A radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair dela antes de ser completamente absorvida. A radiação emitida pelo orifício (não mostrada) é, portanto, característica da temperatura das paredes da cavidade.



Fonte: adaptado de Tipler e Mosca (2009, p. 685).

Figura A.17 – Espectro contínuo da radiação térmica emitida por um corpo negro a 4000 K.



Fonte: PhET. Radiação do corpo negro. “Disponível em:” https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html. Acesso em: 08 jan. 2019.

A intensidade I (potência por unidade de área) da radiação emitida por um corpo negro pode ser descrita pela lei de Stefan-Boltzmann (obtida através da lei de Planck da radiação de corpo negro):

$$I = \sigma T^4 \quad (\text{A.4})$$

onde T é a temperatura absoluta do corpo negro e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é:

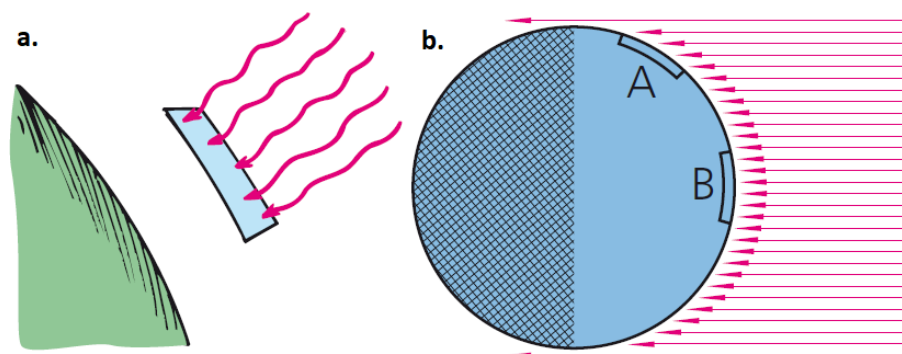
$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \quad (\text{A.5})$$

2.5 Irradiância solar

Ao ficarmos expostos à luz solar, nos sentimos mais aquecidos. Isso não ocorre principalmente pelo fato de que o Sol é quente, pois sua temperatura superficial é comparável a chama de certos instrumentos de solda. Essa sensação térmica ocorre pelo fato de que o Sol é extremamente grande. Por essa razão, ele emite grandes quantidades de energia. No entanto, apenas menos de uma parte em um bilhão dessa energia chega até a Terra. De acordo com o Monitoramento de Irradiância Total (TIM – *Total Irradiance Monitor*), do Experimento de Radiação Solar e Clima (SORCE – *Solar Radiation and Climate Experiment*), o valor da radiação solar que atinge perpendicularmente cada metro quadrado da superfície da atmosfera terrestre, a cada segundo, é de $(1360,8 \pm 0,5) \text{ J}$ e é indevidamente chamada de constante solar, visto que esse valor apresentou alterações nos últimos anos (NASA, 2018). Um termo mais apropriado seria irradiância solar total (Figura A.18a). Ao convertermos esse valor em termos de potência, obtemos, aproximadamente, $1,36 \text{ kW}$ por metro quadrado ($1,36 \text{ kW/m}^2$).

O espectro da radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre encontra-se em um intervalo de comprimento de onda entre $0,2 \mu\text{m}$ até $25 \mu\text{m}$. A distribuição espectral dessa radiação é apresentada na Tabela A.1. Aproximadamente metade da irradiância solar encontra-se na região da luz visível e quase a mesma quantidade na região do infravermelho (MACAGNAN, 2019).

Figura A.18 – (a) Radiação solar incidente sobre a superfície atmosférica. (b) Ângulo de incidência dos raios solares sobre a Terra.



Fonte: adaptado de Hewitt (2015, p. 314-315).

TABELA A.1 – Divisão do espectro solar em bandas de cores e regiões de energia.

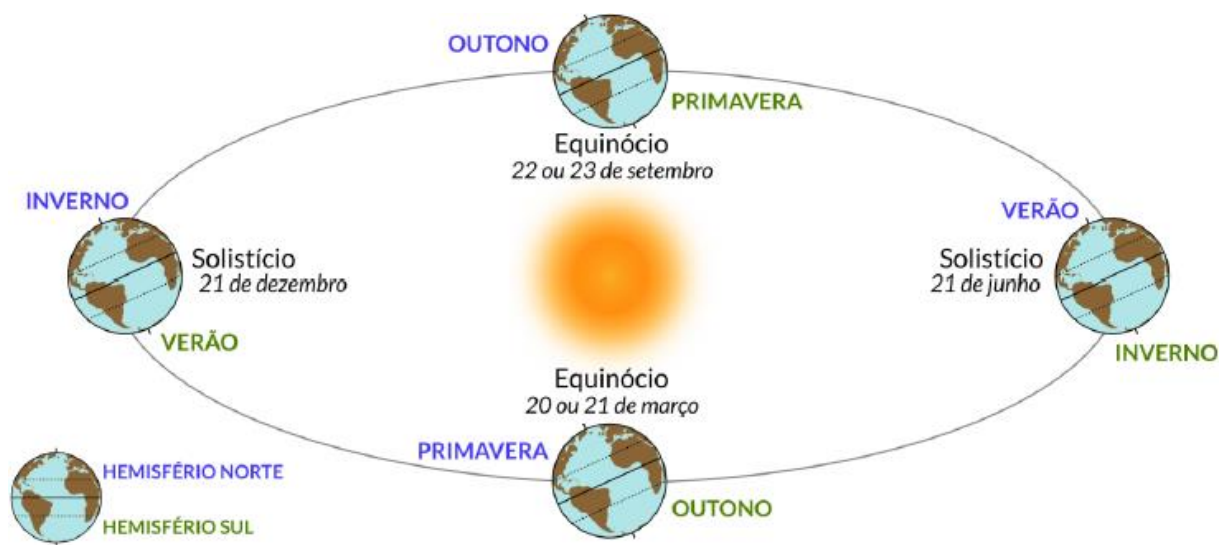
| <i>Cor</i> | <i>Comprimento de onda (μm)</i> | <i>Irradiância (W/m^2)</i> | <i>Porcentagem da irradiância total</i> |
|---------------|---|---|---|
| Violeta | 0,390 – 0,455 | 108,85 | 7,96 |
| Azul | 0,455 – 0,492 | 73,63 | 5,39 |
| Verde | 0,492 – 0,577 | 160,00 | 11,70 |
| Amarelo | 0,577 – 0,597 | 35,97 | 2,63 |
| Laranja | 0,597 – 0,622 | 43,14 | 3,16 |
| Vermelho | 0,622 – 0,770 | 212,82 | 15,57 |
| Ultravioleta | < 0,4 | 109,81 | 8,03 |
| Visível | 0,390 – 0,770 | 634,40 | 46,4 |
| Infravermelho | > 0,770 | 634,40 | 46,4 |

Fonte: MACAGNAN (2019, p. 12).

Alguns fatores astronômicos causam variação no valor da irradiância solar sobre nosso planeta, fazendo com que seu valor não seja uma constante (PEREIRA et al., 2017). Um dos fatores é a posição relativa entre a Terra e o Sol. Ao longo de um período de 365,25 dias de translação, a distância entre os dois astros varia entre $1,47 \times 10^8 \text{ km}$ e $1,52 \times 10^8 \text{ km}$. Além disso, a quantidade de energia incidente em um determinado ponto e a duração do dia variam em função do ciclo anual e ciclo diário. O primeiro ocorre em consequência da inclinação do

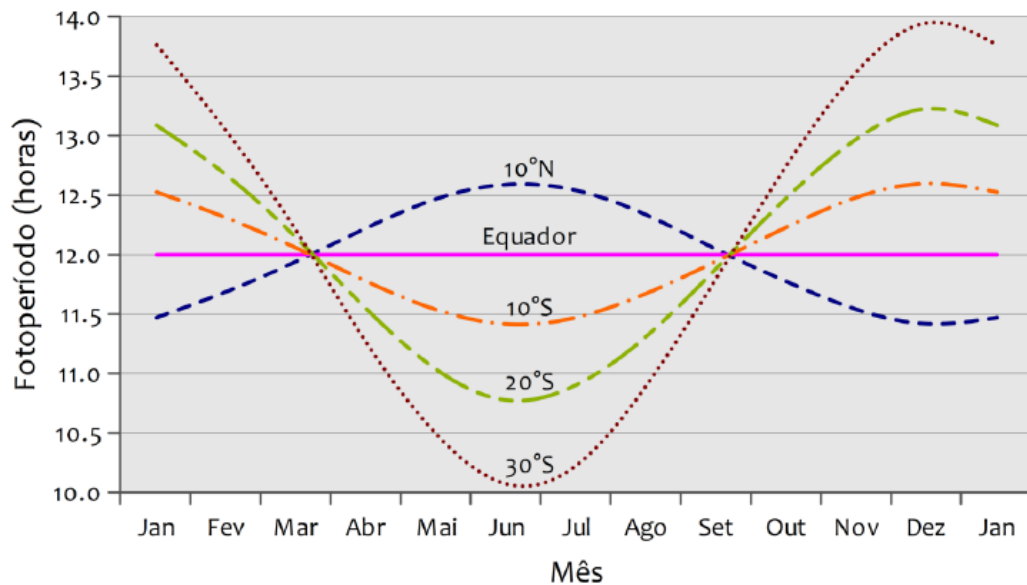
eixo de rotação terrestre em $23,45^\circ$ em relação ao plano orbital. Em decorrência dessa inclinação, há a ocorrência das estações do ano que, juntamente com a latitude, interferem na duração do dia (Figuras A.18b, A.19 e A.20).

Figura A.19 – A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia. O Sol está posicionado sobre a linha dos Trópicos de Câncer e de Capricórnio nos dias de solstício e posicionado sobre o Equador nos equinócios.



Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

Figura A.20 – Variação da duração do dia ao longo do ano em função da latitude.



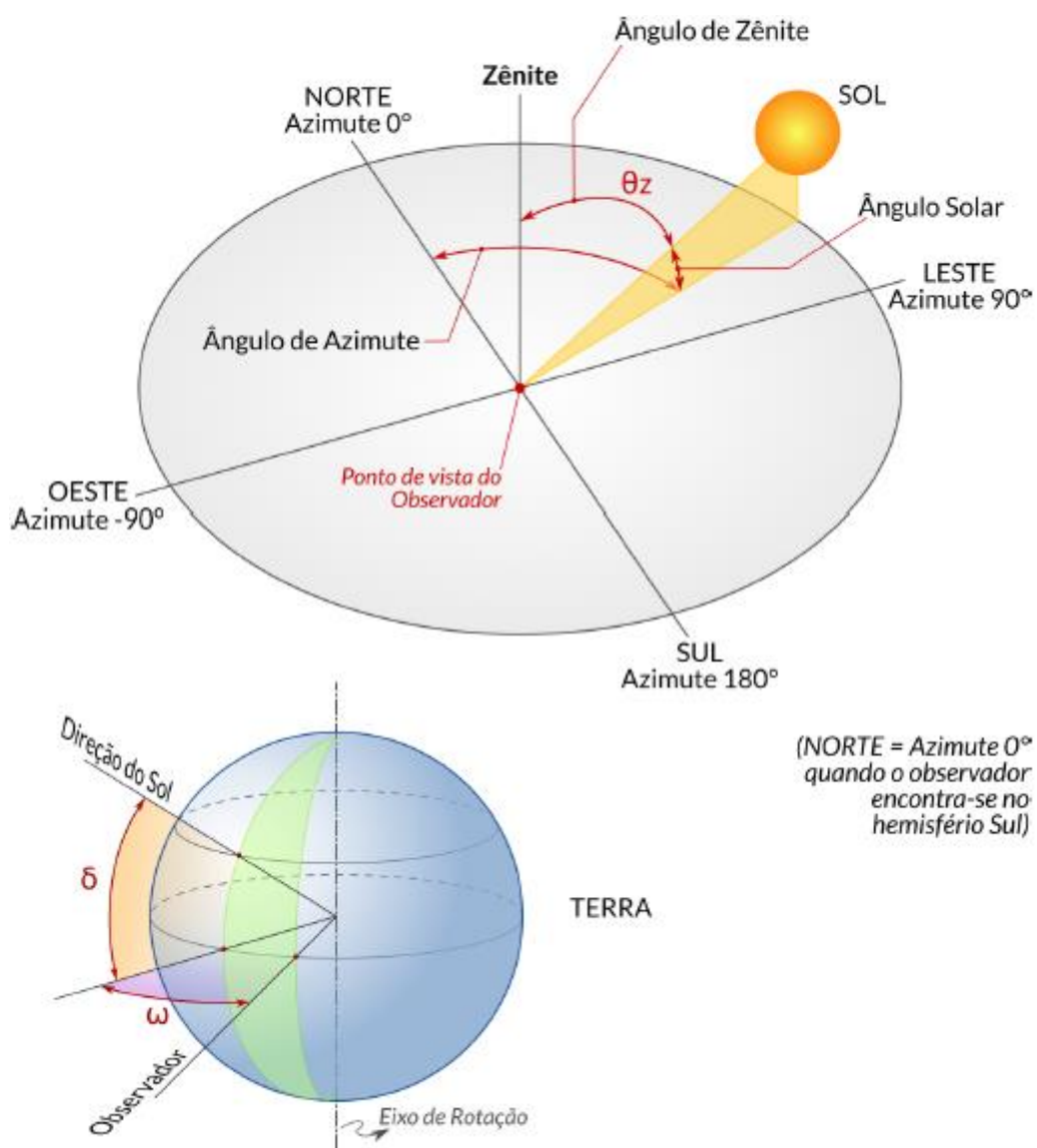
Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

O movimento de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo causa uma variabilidade diária no valor da radiação solar incidente sobre o planeta. Para a descrição dessa variabilidade, são utilizados alguns ângulos. A declinação solar, representada por δ , é o ângulo formado entre a inclinação do plano equatorial terrestre e a linha da direção Sol-Terra, a qual varia entre $-23^{\circ} 27'$ e $+23^{\circ} 27'$ durante o ano. Convencionou-se que o valor é negativo quando a linha da direção Sol-Terra se encontra sobre o hemisfério sul. Há também o ângulo horário solar, simbolizado por ω , que representa o deslocamento angular do movimento aparente do Sol em decorrência da rotação do planeta, variando entre -180° e $+180^{\circ}$. Cada hora corresponde a cerca de 15° e, conforme adotado por convenção, é positivo pela manhã, negativo pela tarde e assume o valor de zero quando ao meio-dia.

O ângulo zenital solar, simbolizado por θ_z , é o ângulo formado entre a vertical do ponto onde se realiza a observação e a direção da linha formada entre o ponto de observação e o Sol. Tal valor pode ser estimado através de outros valores, como o da latitude local φ , declinação solar δ e ângulo horário solar ω (CAMPOS & ALCANTARA, 2013, MACAGNAN, 2019). Caso o Sol esteja no horizonte, no momento da nascente ou poente, o ângulo zenital é igual a 90° . Por último, há o ângulo azimutal solar, formado entre o meridiano do observador e a linha de projeção da direção do Sol no plano horizontal, variando entre -180° e $+180^{\circ}$. Por convenção, o ângulo é positivo no sentido horário a partir da direção do norte geográfico no ponto do meridiano local. A Figura A.21 apresenta todos os ângulos supracitados.

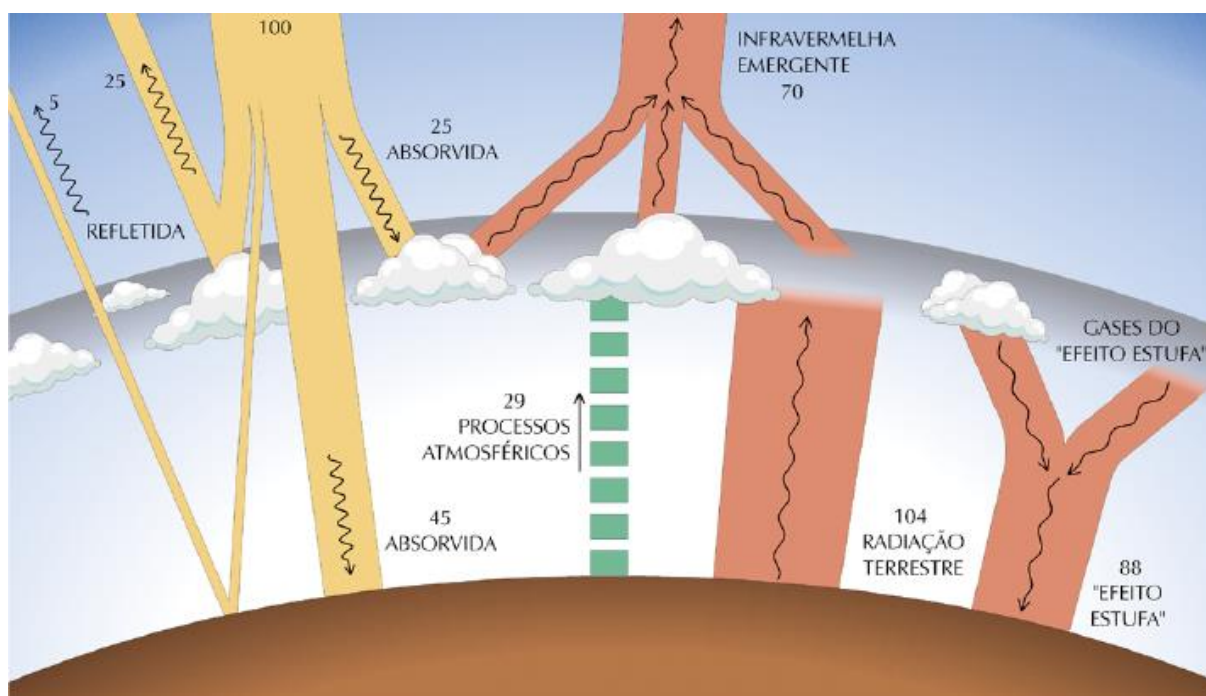
Além dos fatores que influenciam no valor da irradiação solar que atinge o topo da atmosfera, existem diversos fatores físicos que atenuam a intensidade do valor que atravessa toda a camada de gases aerossóis (particulados) que a compõem (PEREIRA et al., 2017; UFPR, 2018; USP 2018). Os diferentes comprimentos de onda emitidos pelo Sol interagem de maneiras diferentes com cada um desses constituintes, sofrendo fenômenos como absorção e espalhamento, por exemplo. Desconsiderando o vapor d'água, a parte seca da atmosfera é composta por 99% de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), e apenas 1% por argônio (Ar) e outros gases. Apesar de sua baixa concentração, há também os chamados gases-traço, como o dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), entre outros, que também cumprem um papel importante na interação com a radiação. A Figura A.22 apresenta os principais processos envolvidos na radiação que incide sobre a atmosfera terrestre.

Figura A.21 – Ângulos notáveis na solarimetria.



Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

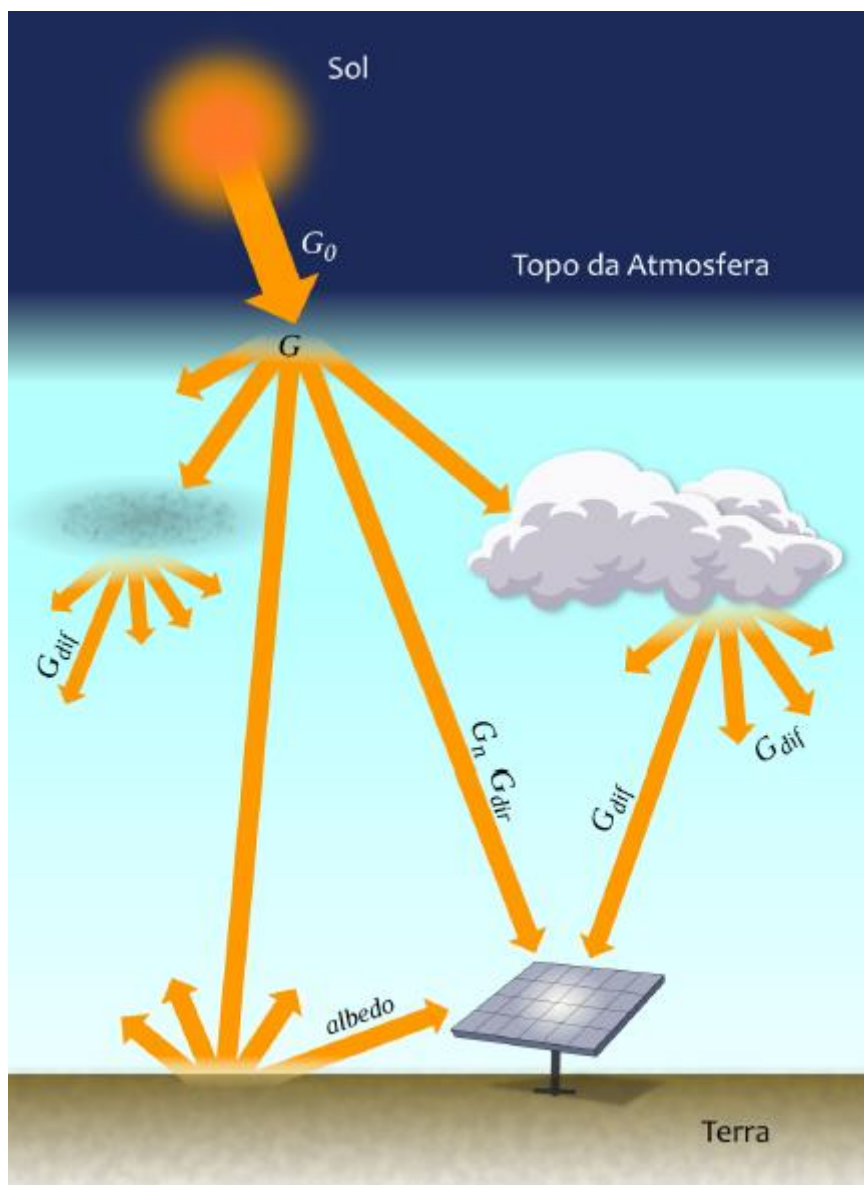
Figura A.22 – Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Os valores numéricos representam a fração de energia em cada processo radiativo na atmosfera.



Fonte: Pereira et al. (2017, p. 17).

O processo de espalhamento é causado pelos gases e partículas em suspensão na atmosfera. A absorção é causada pelas moléculas de vapor d'água, oxigênio (O_2), ozônio (O_3) e dióxido de carbono (CO_2). Tais processos atenuam o valor que efetivamente atinge a superfície terrestre, fazendo com que o valor da irradiância solar possa ser reduzido pela metade. As nuvens também produzem espalhamento da radiação solar, devido às suas propriedades óticas.

A irradiância solar, medida em watts por metro quadrado (W/m^2), incidente sobre a superfície terrestre é composta por duas componentes: a direta e a difusa. A irradiância direta representa a radiação que não sofreu os processos atmosféricos de atenuação. A irradiância difusa é composta por todas as radiações provenientes das demais direções, surgindo a partir dos processos ocorridos na atmosfera. A Figura A.23 apresenta os componentes da irradiância solar.

Figura A.23 – Componentes da irradiância solar.

Fonte: Pereira et al. (2017, p. 19).

A Tabela A.2 apresenta o significado dos componentes da irradiância solar abordados na Figura A.23.

TABELA 2 – Componentes da irradiância solar.

| <i>Símbolo</i> | <i>Nome</i> | <i>Significado</i> |
|----------------|--------------------------------|---|
| G_0 | Irradiância extraterrestre | Taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera. |
| G_n | Irradiância direta normal | Taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície. |
| G_{dif} | Irradiância difusa horizontal | Taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos. |
| G_{dir} | Irradiância direta horizontal | Taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre G_n e o cosseno de θ_z . |
| G | Irradiância global horizontal | Taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. É dada pela soma $G = G_{dif} + G_{dir}$ ou $G = G_{dif} + G_n \cos(\theta_z)$. |
| G_i | Irradiância no plano inclinado | Taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra. |

Fonte: adaptado de Pereira et al. (2017, p. 19).

Mesmo com esses fatores de atenuação da irradiância solar, a energia proveniente do Sol tem sido utilizada cada vez mais na geração de energia elétrica. Muitas residências têm coletado esse tipo de energia a partir de painéis solares. Os painéis solares funcionam com a conversão de energia luminosa em energia elétrica e têm base no efeito fotovoltaico. Os fótons da radiação solar, ao entrar em contato com o material da placa, fornecem energia suficiente para alguns elétrons escaparem dos átomos e adquirirem liberdade de movimento e constituir uma corrente elétrica. Tais placas apresentam-se como uma alternativa viável para áreas de difícil acesso e têm se tornado cada vez mais economicamente viáveis. Portanto, ter uma base do valor da irradiância solar local pode auxiliar na estimativa de energia que pode ser gerada e, conseqüentemente, inferir quais aparelhos ou processos podem ser alimentados através dessa fonte.

A irradiância incidente sobre a superfície terrestre pode atingir o máximo de 1000 W/m^2 ao meio dia solar com o céu limpo. Valores de até 1400 W/m^2 já foram observados em situações em que havia nebulosidade, o que causava o espalhamento da radiação (DGS, 2008, apud PEREIRA et al., 2017). Valores de até 1822 W/m^2 para a irradiância global horizontal já foram registrados em território brasileiro (RÜTHER et al., 2017, apud PEREIRA et al., 2017). É possível encontrar o valor da irradiância solar média de acordo com a região e a época do ano em alguns levantamentos realizados nos últimos anos (CHIGUERU, 2000; ANEEL, 2005; PEREIRA et al., 2006, 2017; SÃO PAULO, 2018, CRESESB, 2019).

3. METODOLOGIA DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

3.1 Primeiro encontro: problematização do tema e abordagem dos conceitos físicos envolvidos na atividade experimental

Tempo previsto: uma ou duas aulas de 50 minutos cada.

O primeiro encontro tem por objetivo despertar nos alunos a curiosidade em estudar o tema e verificar as concepções que eles já possuem a respeito do conteúdo a ser abordado pelo experimento. Para atingir o primeiro objetivo, recomendamos que a aula inicie com algumas perguntas que direcionem o assunto ao problema a ser analisado, como por exemplo: para quais finalidades podemos utilizar a luz solar? Quais os benefícios de se utilizar um painel solar? O que é necessário sabermos para decidir se um painel solar tem utilidade prática ou não para nossa realidade?

Recomendamos que tais perguntas não sejam expostas todas de uma vez, mas sim apresentadas uma a uma, concedendo naturalidade no decorrer da discussão. Por exemplo, após a primeira pergunta sobre quais utilizações podemos fazer da luz solar, certamente haverá alguma resposta relacionada à geração de energia e utilização de painéis solares. Assim, a pergunta seguinte pode ser naturalmente feita, cujas respostas podem levar à terceira pergunta. Esse momento não deve ser desenvolvido de maneira apressada. O professor deve dar tempo para que o maior número possível de alunos se expresse, levando em consideração cada

contribuição. O professor pode até ir anotando as respostas na lousa. A valorização das expressões dos alunos é um fator que contribui na tentativa de despertar o interesse dos mesmos.

Uma das respostas esperadas para a terceira pergunta é a de que precisamos conhecer a quantidade de energia solar que chega até nosso planeta. Tal resposta nos leva à pergunta final e que consiste na problematização do tema: como podemos determinar o valor da radiação solar que chega até nós? Uma das respostas esperadas é que utilizemos a quantidade de calor e a variação de temperatura de algum objeto para determinar o valor da energia solar incidente. Caso tal resposta surja, pode-se pedir sugestões de procedimentos experimentais que poderiam nos ajudar nesse sentido. No entanto, caso essa resposta não seja atingida, mesmo após direcionamentos realizados pelo professor, isso não constitui um problema para a sequência do desenvolvimento da aula.

Após as perguntas introdutórias e a problematização, uma abordagem sobre os conteúdos envolvidos na atividade experimental deve ser realizada. Visto que o experimento se relaciona com a transferência de energia por irradiação, sugerimos que a utilização do experimento e da sequência aqui apresentada ocorra após a abordagem prévia dos conceitos envolvendo temperatura e calor. Sendo assim, tais temas não serão conteúdos novos, sendo necessária apenas uma revisão dos conceitos e verificação de quais conhecimentos os alunos conseguiram consolidar. Os únicos temas novos a serem introduzidos serão a radiação de corpo negro e a irradiância (ou potência) solar. Salientamos a importância de que ocorra uma discussão conceitual de qualidade, o que é vital para a compreensão do experimento proposto.

Para que as concepções prévias dos alunos sejam verificadas, sugerimos que o professor utilize o máximo de perguntas possível. Por exemplo: o que é temperatura? O que faz um objeto ser mais quente que outro? De que modo a temperatura está relacionada com os átomos e moléculas que constituem uma substância? Quais as unidades de medida de temperatura? O que é calor? Qual a relação entre calor e energia? Quais suas unidades de medida? De que modos a energia pode ser transferida através do calor? Perguntas como essas, com o bom direcionamento e mediação do professor, são capazes de propiciar um bom envolvimento dos alunos e, através de suas respostas, verificar quais conceitos estão bem estabelecidos. É com base no que os alunos já sabem que o professor deve direcionar a discussão e as atividades, aprofundando tais conhecimentos.

A problematização e contextualização inicial servem para despertar nos alunos o interesse em aprender significativamente e, conseqüentemente, tornar o experimento um material instrucional potencialmente significativo. O professor deve optar pelo método que achar mais adequado para a abordagem dos conteúdos, como aula expositiva ou apresentação de slides, por exemplo. Por fim, após a apresentação dos conteúdos, o roteiro da atividade experimental que será desenvolvida no segundo encontro deve ser apresentado aos alunos.

3.2 Segundo encontro: desenvolvimento da atividade experimental

Tempo previsto: uma ou duas aulas de 50 minutos cada.

Para a realização da atividade experimental, recomendamos que a turma seja dividida em grupos. Cada grupo deve receber uma folha com as atividades a serem desenvolvidas no segundo e terceiro encontro. Um modelo com as atividades pode ser encontrado na última seção desse apêndice. Recomendamos que o experimento seja desenvolvido em um dia de céu limpo, próximo ao meio-dia. Dentro dos grupos, cada aluno poderá ficar responsável por uma função específica diferente, como aferir a temperatura, registrar os dados em uma tabela, medir o tamanho da sombra, cronometrar o tempo, etc. Dependendo da quantidade de termômetros infravermelhos disponíveis e de fatores que interfiram na qualidade dos dados, como nuvens passageiras e utilização incorreta do termômetro, esse encontro pode apresentar uma duração maior de acordo com as necessidades e dificuldades encontradas pelos grupos.

3.3 Terceiro encontro: estimativa da irradiância solar total e propagação de erros

Tempo previsto: duas aulas de 50 minutos cada.

O objetivo do terceiro encontro é retomar os conceitos físicos envolvidos no desenvolvimento do experimento, discuti-los com os alunos e realizar os cálculos necessários para a obtenção da irradiância solar total. Para isso, utilizaremos a lei de Stefan-Boltzmann (baseada na lei de Planck da radiação de um corpo negro) e algumas correções trigonométricas para determinarmos o valor da radiação que incide perpendicularmente sobre a superfície atmosférica, comparando o valor obtido com os indicados em determinadas referências.

4. ROTEIRO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Os materiais necessários para o desenvolvimento do experimento são os seguintes:

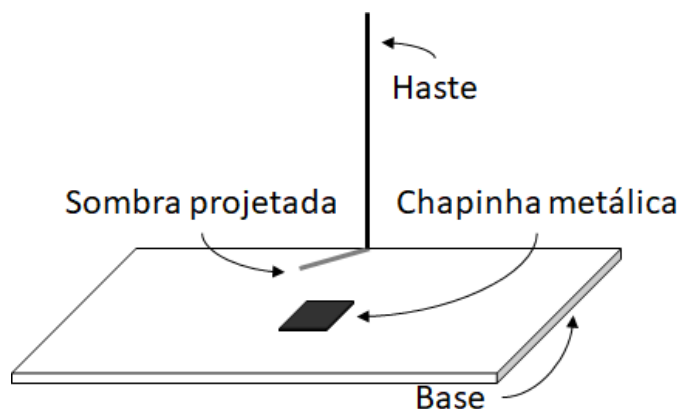
- Chapinha metálica;
- Base de madeira;
- Haste;
- Tinta spray preta fosca;
- Fita adesiva;
- Termômetro infravermelho;
- Régua;
- Cronômetro.

Observações:

Recomendamos que a chapinha metálica tenha as dimensões de (3x3) cm e espessura de 1 mm. A espessura deve ser mínima para propiciar uma melhor absorção de energia através do calor. Um bom material para ser utilizado é o aço-carbono e tal peça pode ser facilmente obtida em um ferro-velho. Para a confecção da base de madeira recomendamos o compensado, o qual também pode ser obtido através de doação. Palitos de madeira, comumente utilizados como espetinhos, atuam bem como haste para o experimento.

Montagem do experimento:

A chapinha e a base devem ser pintadas de preto fosco. Ao pintar a chapinha, devem ser realizados movimentos contínuos para evitar o acúmulo de tinta sobre o material. Isso é necessário para que a tinta constitua apenas uma fina camada sobre o metal. A haste de altura conhecida deve ser fixada na lateral da base com uma fita adesiva. A Figura 24 apresenta um esquema da montagem do conjunto experimental.

Figura A.24 – Esquema do conjunto experimental montado.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Procedimentos:

Inicialmente, o conjunto experimental deve estar sob uma sombra, para que entre em equilíbrio térmico com o ambiente. Utilizando um termômetro infravermelho, a temperatura da chapinha deve ser aferida e registrada em uma tabela. A seguir, o conjunto deve ser exposto ao Sol e o cronômetro disparado. Novas medidas da temperatura devem ser tomadas a cada 30 segundos, sendo registradas na tabela. Tal procedimento deve prosseguir até o momento em que a chapinha não apresente grandes variações de temperatura, atingindo aproximadamente o equilíbrio térmico. Para uma leitura precisa da temperatura, recomendamos que o laser do termômetro infravermelho, caso possua, esteja incidindo perpendicularmente sobre a chapinha, a uma distância de cinco a oito centímetros (ou outra altura recomendada pelo fabricante).

5. ANÁLISE DOS DADOS DO EXPERIMENTO

Após a realização do experimento, sugerimos que os dados registrados na tabela (tempo e temperatura) sejam transpostos para um gráfico, com o objetivo de facilitar a observação da variação da temperatura e o momento em que a chapinha alcança o equilíbrio térmico. Isso pode ser realizado manualmente, utilizando papel quadriculado ou milimetrado, ou por meio de um computador, através de editores de planilhas.

Para calcular a irradiância solar local, utilizamos uma adaptação da lei de Stefan-Boltzmann:

$$I_{SL} = \sigma T^4 \quad (\text{A.6})$$

onde I é a irradiância solar, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura da chapinha quando atinge o equilíbrio térmico. Ressaltamos que para realizar o cálculo, a temperatura deve ser expressa em kelvins. Para realizar a conversão, utilizamos a fórmula:

$$T = T_C + 273 \quad (\text{A.7})$$

sendo T a temperatura em kelvins e T_C a temperatura em Celsius. O valor a ser adotado para a constante de Stefan-Boltzmann deve ser:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \quad (\text{A.8})$$

O resultado final da eq.(A.6) apresenta a irradiância solar local inclinada (I_{SL}), ou seja, a radiação que incide formando um determinado ângulo em relação à superfície terrestre. Como estamos interessados em estimar o valor da irradiância solar total (I_{ST}), cujo valor representa a radiação que incide perpendicularmente à superfície atmosférica, devemos realizar algumas correções no cálculo. Isso pode ser feito inserindo componentes trigonométricas no cálculo, as quais estão baseadas nos ângulos que a radiação forma com a superfície (α) ou com a reta normal em relação à superfície (θ).

A figura A.25a apresenta a sombra que a haste projetará sobre a base de madeira. Com base nos tamanhos da haste h e da sombra S , é possível calcular o ângulo formado entre a radiação solar e a haste através da relação

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{S}{h} \right) \quad (\text{A.9})$$

ou o ângulo formado entre a radiação solar e a superfície terrestre através da relação

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{h}{S} \right) \quad (\text{A.10})$$

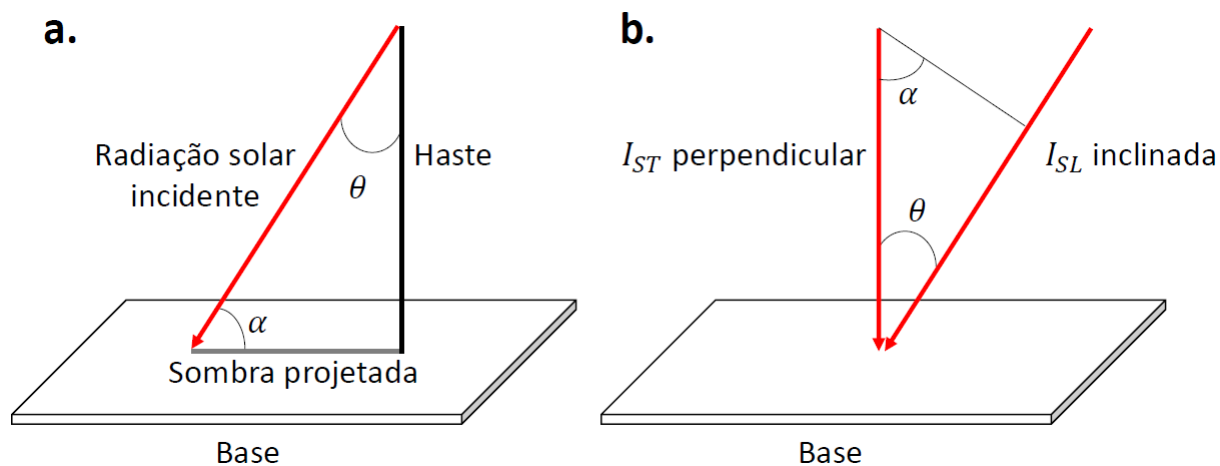
A figura A.25b apresenta a relação entre a irradiância solar local I_{SL} (inclinada) e a irradiância solar total I_{ST} (perpendicular), a qual pode ser obtida através dos ângulos calculados por meio das eqs.(A.9) e (A.10), utilizando as relações

$$I_{ST} = \frac{I_{SL}}{\cos \theta} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\cos \theta} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\cos(\tan^{-1}(\frac{S}{h}))} \quad (\text{A.11})$$

ou

$$I_{ST} = \frac{I_{SL}}{\sin \alpha} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\sin \alpha} = \frac{\sigma \cdot T^4}{\sin(\tan^{-1}(\frac{h}{S}))} \quad (\text{A.12})$$

Figura A.25 – (a) A partir da sombra projetada é possível encontrar o ângulo formado entre a radiação incidente e a haste. (b) Com base no ângulo encontrado, é possível calcular a irradiância solar perpendicular à superfície.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Levando em consideração que metade da irradiação solar que atinge o topo da atmosfera efetivamente chega à superfície terrestre, é necessário multiplicar o resultado obtido através das eqs.(A.11) e (A.12) por dois para se obter o valor final da irradiância solar total (PEREIRA *et al.*, 2017). Ressaltamos que os resultados obtidos através das equações acima são equivalentes. Desse modo, o professor pode optar por uma das duas no desenvolvimento da atividade, sendo desnecessária a resolução dos dois cálculos ao mesmo tempo. Além disso, caso o professor ache conveniente, poderá resolver a equação por partes ao invés de utilizar a equação inteira. A respeito do tamanho da sombra, deve-se utilizar o tamanho aferido quando a chapinha atingiu o equilíbrio térmico, ou seja, nos momentos finais do experimento.

A última atividade, relacionada à propagação de erros, pode ser realizada por todos os grupos em conjunto, cada um utilizando os resultados obtidos pelos outros. Inicialmente, a média aritmética dos valores encontrados deve ser calculada. A seguir, para calcular o desvio, a variância e o desvio padrão da média, sugerimos a utilização de uma tabela baseada no modelo abaixo (Tabela A.3).

Ao final da atividade, o resultado da irradiância solar total será representada por $\bar{x} + \sigma$, onde \bar{x} representa a média aritmética dos valores obtidos pelos grupos e σ representa o desvio padrão da média. O resultado deve ser comparado com o valor aceito para a irradiância solar total de $(1360,8 \pm 0,5) W/m^2$ (NASA, 2018). Caso haja discrepância entre o valor encontrado e o fornecido pela literatura, deve-se levantar hipóteses que justifiquem tal diferença. Uma

descrição completa sobre os cálculos envolvidos na propagação de erros é apresentada no Apêndice B desta dissertação.

TABELA A.3 – Modelo de tabela para a propagação de erros e obtenção do desvio padrão.

| <i>Observação</i> (x_i) | <i>Desvio</i> ($x_i - \bar{x}$) | <i>Quadrado do desvio</i> $(x_i - \bar{x})^2$ |
|---|-----------------------------------|---|
| x_1 | $x_1 - \bar{x}$ | $(x_1 - \bar{x})^2$ |
| x_2 | $x_2 - \bar{x}$ | $(x_2 - \bar{x})^2$ |
| \vdots | \vdots | \vdots |
| x_n | $x_n - \bar{x}$ | $(x_n - \bar{x})^2$ |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x_i - \bar{x})^2$ | | $(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2$ |
| Número de observações n | | n |
| Variância s^2 | | $\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}$ |
| Desvio padrão da média σ | | $\sqrt{s^2}$ |

Fonte: Elaborado pelos autores.

6. SUGESTÕES DE TEMAS QUE PODEM SER ABORDADOS APÓS A APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Para complementar a aplicação deste produto educacional alguns temas podem ser adicionalmente abordados. Uma sugestão é a realização de um trabalho interdisciplinar com professores de química e biologia, abordando temas como efeito estufa, fotossíntese e o ciclo hidrológico, por exemplo. Outra atividade interessante e que também pode ser desenvolvida é a introdução de tópicos envolvendo astronomia e astrofísica. Com base na estimativa da irradiância solar total, é possível calcular aproximadamente a potência P emitida pelo Sol, através da relação

$$P = 4\pi R^2 I_{ST} \quad (\text{A.13})$$

onde R é o raio médio da órbita terrestre e I_{ST} é a irradiância solar total estimada experimentalmente. Além disso, é possível abordar também a origem de tanta energia, introduzindo tópicos de Física nuclear e estimando a quantidade de matéria necessária para produzir tal energia a partir da equivalência massa-energia:

$$E = mc^2 \quad (\text{A.14})$$

Outro direcionamento que pode ser dado ao experimento é o aprofundamento no estudo sobre a radiação de corpo negro, a qual constitui um dos pilares da Física moderna e cujo estudo tornou-se um marco no desenvolvimento da Física. A história da ciência envolvida por trás da época também pode ser abordada, o que enriquecerá a compreensão do tema. Geralmente, a Física moderna e contemporânea (FMC) é abordada durante o terceiro ano do ensino médio. Sendo assim, contemplar alguns tópicos referentes a FMC em momentos anteriores ao terceiro ano pode auxiliar na construção de alguns conceitos básicos necessários na compreensão dessa área da Física ao final do ensino médio. Outra sugestão é utilizar o experimento na própria terceira série como um componente da FMC.

Outra relação que pode ser estabelecida com a FMC é a abordagem do efeito fotovoltaico e o funcionamento de placas solares. Com base nos valores encontrados, no conhecimento das eficiências das placas solares e na estimativa do consumo de energia de uma residência, é possível realizar conjecturas a respeito de quanta energia elétrica pode ser gerada e, conseqüentemente, se é viável ou não para a realidade dos alunos. Visto que apresentamos sugestões que envolvem conteúdos tanto da segunda quanto da terceira série do ensino médio, nada impede que essa atividade seja realizada em conjunto por turmas de diferentes séries, o que também pode enriquecer o processo de ensino-aprendizagem. Obviamente, todas essas sugestões demandam uma grande quantidade de aulas para que possam ser colocadas em prática. Assim, cabe ao professor que pretende aplicar o produto educacional analisar quais delas são possíveis de serem implementadas.

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

BAZAROV, I. P. Thermodynamics. Translated by F. Immirzi. Pergamon Press: New York, 1964.

CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA*, 41, Gramado, 2013. “Disponível em:” http://www.fadep.br/engenharia-eletrica/congresso/pdf/117056_1.pdf. Acesso em: 19 jan. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO (CRESESB). Potencial solar – SunData v 3.0. “Disponível em:” <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 19 jan. 2019.

CHIGUERU, T. Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016a.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna. Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016b.

HEWITT, P. G. Física conceitual. Trad. Trieste Freire Ricci. 12. ed. Porto Alegre: Booman, 2015.

MACAGNAN, M. H. Introdução à radiação solar. “Disponível em:” http://professor.unisinos.br/mhmac/Energia%20Solar%20Termica/Apostila_nova_ver_2010_full.pdf. Acesso em: 19 jan. 2019.

MOREIRA, M. A. Unidades de ensino potencialmente significativas – UEPS. “Disponível em:” <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2018.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Solar radiation. “Disponível em:” <https://atmospheres.gsfc.nasa.gov/climate/?section=136>. Acesso em: 03 dez. 2018.

NUSSENSVEIG, H. M. Curso de física básica 2: fluidos, oscilações e ondas, calor. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. Astronomia e astrofísica. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. “Disponível em:” http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf. Acesso em: 14 jan. 2019.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006. “Disponível em:” http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf. Acesso em: 04 dez. 2018.

PHYSICS EDUCATION TECHNOLOGY (PhET). Radiação do corpo negro. “Disponível em:” https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html. Acesso em: 08 jan. 2019.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. Material de apoio ao currículo do Estado de São Paulo: caderno do aluno; física, ensino médio, 2ª série. v. 1. São Paulo: SE, 2014.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia. Subsecretaria de Energias Renováveis. Energia solar paulista: levantamento do potencial. “Disponível em:” http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalicev2/intranet/BiblioVirtual/renovaveis/atlas_energia_solar.pdf. Acesso em: 04 dez. 2018.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros, volume 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. Trad. Paulo Machado Mors. 6. ed. São Paulo: LTC, 2009.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Escola Superior de Acricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Engenharia de Biosistemas. Micrometeorologia da radiação I: revisão. “Disponível em:” https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1765618/mod_resource/content/1/Aula2_Micro_RadiacaoI.pdf. Acesso em: 04 dez. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR). Departamento de Física. Radiação solar incidente. “Disponível em:” <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>. Acesso em 04 dez. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). Instituto de Física. Radiação. “Disponível em:” <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aularad.htm>. Acesso em: 02 dez. 2018.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física II Sears e Zemansky: termodinâmica e ondas. Trad. Daniel Vieira. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2015.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física IV Sears e Zemansky: ótica e física moderna. Trad. Daniel Vieira. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

8. FOLHA DE ATIVIDADES

IRRADIÂNCIA SOLAR

Situação-problema: Como determinar o valor da radiação solar que chega até nós?

Introdução:

A radiação solar tem sido utilizada cada vez mais na geração de energia elétrica. Muitas residências têm coletado esse tipo de energia a partir de painéis solares, que funcionam com base no efeito fotovoltaico. Quando os fótons da radiação solar entram em contato com o material da placa, fornecem energia suficiente para alguns elétrons escaparem dos átomos e adquirirem liberdade de movimento, gerando corrente elétrica. Tais placas apresentam-se como uma alternativa viável para áreas de difícil acesso e têm se tornado cada vez mais economicamente viáveis. Ter uma base do valor da irradiância (ou potência) local pode auxiliar na estimativa da energia que pode ser gerada através desse processo e onde podemos utilizá-la de modo prático em nossas residências.

Informações adicionais:

De acordo com o satélite *SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment)*, da NASA, o valor da radiação solar que atinge perpendicularmente cada metro quadrado da superfície da atmosfera terrestre, a cada segundo, é de $(1360,8 \pm 0,5) J$. Convertendo esse valor em termos de potência, obtemos aproximadamente $1,36 kW$ por metro quadrado ($1,36 kW/m^2$). Essa é a taxa de energia solar que recebemos na superfície atmosférica. No entanto, o valor que atinge a superfície terrestre é bem menor. Isso é causado por alguns fenômenos atmosféricos, como espalhamento, reflexão e absorção, e pela inclinação da incidência dos raios solares. Devido a esses fatores, a potência solar varia de local para local.

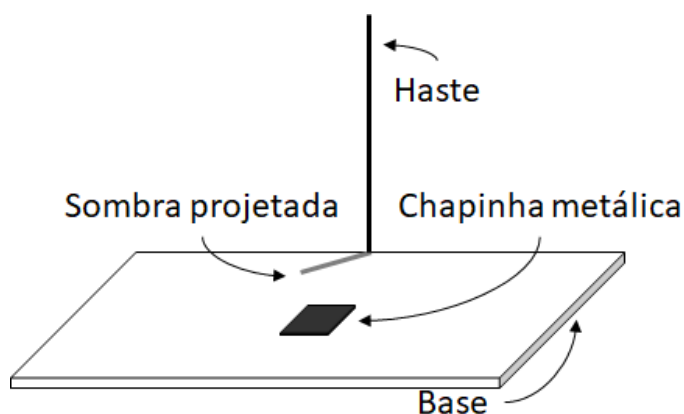
Atividade experimental:

Materiais necessários:

Chapinha metálica, base de madeira, haste, tinta spray preta fosca, fita adesiva, termômetro infravermelho, régua e cronômetro.

Procedimento para a montagem do conjunto experimental:

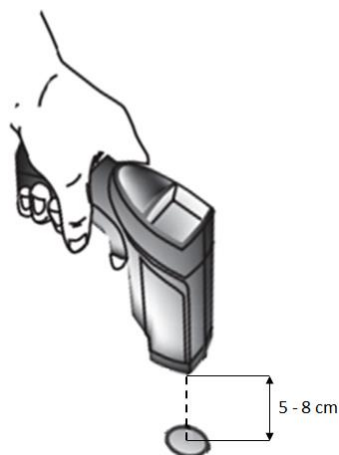
- Pinte a base de madeira e a chapinha metálica de preto fosco. **ATENÇÃO:** ao pintar a chapinha, utilize movimentos contínuos para evitar o acúmulo de tinta sobre o metal.
- Fixe a haste na lateral da base com fita adesiva.
- Ao final, o conjunto deve ficar como ilustrado na figura abaixo.



Procedimentos para o desenvolvimento do experimento:

- Inicialmente, deixe o conjunto sob a sombra, para que entre em equilíbrio térmico com o ambiente.
- Meça a temperatura da chapinha sob a sombra e anote ao lado do tempo zero na tabela disponível na questão 1 dessa folha de atividades.
- Coloque o conjunto sob o Sol e dispare o cronômetro.
- Verifique a temperatura a cada 30 segundos e registre os valores do tempo e temperatura na tabela.
- prossiga com a atividade experimental até que a chapinha não apresente grandes variações de temperatura, atingindo o equilíbrio térmico.
- Ao finalizar o experimento, anote a altura da haste e o tamanho da sombra projetada.

Observação: Ao utilizar o termômetro, posicione o sensor perpendicularmente à superfície, a uma distância de 5 a 8 centímetros, como mostra a figura a seguir.



Atividades propostas:

1. Registre na tabela abaixo os valores do tempo e da temperatura da chapinha. Ao final do experimento, anote a altura da haste e o tamanho da sombra projetada.

| Tempo | Temperatura | Tempo | Temperatura |
|--------------|--------------------|--------------|--------------------|
| 0 | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Altura da haste: _____

Tamanho da sombra: _____

2. Com os dados registrados na tabela, construa um gráfico da temperatura em função do tempo. Anexe o gráfico no espaço abaixo.

3. Ao adotarmos a chapinha como sendo um corpo negro, quando ela atinge o equilíbrio térmico significa que a radiação que está emitindo é igual à radiação que está incidindo sobre ela. Ou seja, a radiação emitida é igual à radiação solar. Para determinarmos a intensidade dessa radiação, utilizaremos uma adaptação da lei de Stefan-Boltzmann:

$$I = \sigma T^4$$

onde I é a irradiância solar, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura da chapinha quando atinge o equilíbrio térmico. Para realizar o cálculo, a temperatura deve ser expressa em kelvins. Para realizar a conversão, utilize a fórmula:

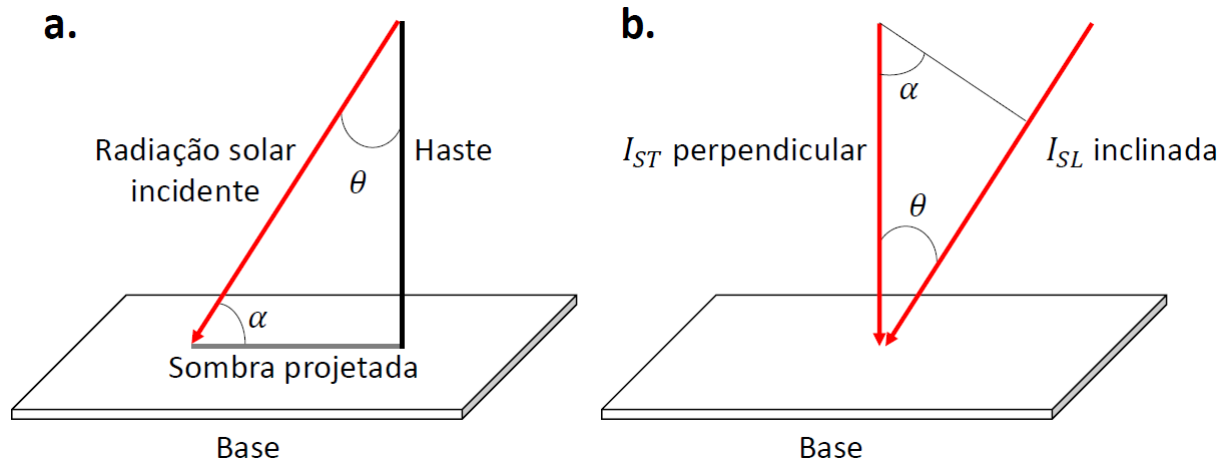
$$T = T_C + 273$$

sendo T a temperatura em kelvins e T_C a temperatura em Celsius. O valor a ser adotado para a constante de Stefan-Boltzmann deve ser:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Utilize o espaço abaixo para desenvolver seus cálculos.

4. Para estimarmos a irradiância solar total, I_{ST} , precisamos calcular a radiação que incide perpendicularmente sobre a chapinha. No entanto, durante o experimento, a radiação incide na superfície do material formando um determinado ângulo, como mostra a figura abaixo.



Para determinarmos os ângulos θ e α , utilizamos a altura da haste h e o tamanho da sombra S projetada através das seguintes relações:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{S}{h}\right)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h}{S}\right)$$

Utilizando as relações existentes no triângulo retângulo, podemos calcular a irradiância solar perpendicular através das seguintes relações:

$$I_{ST} = \frac{I}{\cos \theta}$$

$$I_{ST} = \frac{I}{\sin \alpha}$$

Escolha um dos ângulos para trabalhar e registre seus cálculos no espaço abaixo.

Como a atmosfera reduz em até 50% a irradiação solar incidente na superfície da atmosfera, multiplique o resultado obtido para I_{ST} por dois e registre a seguir:

Irradiância solar total I_{ST} : _____

5. Para realizar a propagação de erros, calcule a média dos valores encontrados para I_{ST} por todos os grupos e registre abaixo.

Média (\bar{x}) dos valores da I_{ST} : _____

6. Seguindo as instruções do professor, preencha a tabela abaixo para obtermos o valor final para a estimativa da irradiação solar total encontrada pela turma.

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|--|-------------------------|---|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | |
| Número de observações n: | | |
| Variância s^2: | | |
| Desvio padrão da média σ: | | |

Valor final da estimativa da irradiação solar total: _____

7. Como vimos na introdução, o valor aceito para a irradiação solar total é de $(1360,8 \pm 0,5) W/m^2$. Compare esse valor com o resultado que a turma encontrou. Os resultados estão

próximos? Caso haja discrepância nos valores, quais hipóteses poderiam justificá-la? Registre as respostas do grupo abaixo.

Apêndice B

PROPAGAÇÃO DE ERROS

Para a realização da propagação de erros dos dados obtidos experimentalmente, utilizamos os conceitos de média, desvio da média, variância e desvio padrão da média, os quais são abordados a seguir. Para facilitar o tratamento matemático com os alunos, elaboramos uma tabela que deve ser preenchida com os valores encontrados. O material disponível nessa seção foi baseado e adaptado em dois livros de estatística básica (VIEIRA, 2011; FERREIRA, 2015).

1. MÉDIA ARITMÉTICA

A média aritmética, comumente chamada apenas de média, trata-se da medida de tendência central mais conhecida e nos deparamos com sua ocorrência em diversas situações do cotidiano. Por exemplo: o tempo médio de espera em uma fila de banco é de 30 minutos, a média final de um aluno na disciplina de Física é 8,2, a taxa média de juros em operações de crédito para o financiamento de uma casa é 7,6%, etc.

Para calcularmos a média aritmética de um conjunto de dados é necessário somar todos os valores e dividir pelo total de dados contidos no conjunto. Podemos formalizar matematicamente essa definição através da expressão

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{B.1})$$

onde \bar{x} representa a média (lê-se ‘x barra’), $\sum_{i=1}^n x_i$ representa a somatória de um número de observações n ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), x_1 representa o primeiro valor obtido, x_2 representa o segundo valor e assim sucessivamente até x_n , o qual representa o n -ésimo valor observado.

2. DESVIO MÉDIO

Em estatística, o desvio d_i é definido como a distância entre qualquer observação x_i do conjunto de dados em relação à média aritmética \bar{x} do conjunto, ou seja:

$$d_i = x_i - \bar{x}. \quad (\text{B.2})$$

Automaticamente raciocinamos que se os valores dos desvios são pequenos, os valores das observações concentram-se em torno da média, tornando pequena a variabilidade dos dados. Em contrapartida, caso os valores dos desvios sejam grandes, isso significaria que os valores das observações estão dispersos em relação a média, fazendo com que a variabilidade dos dados seja grande.

Dentre as propriedades que a média aritmética possui, podemos destacar a de que a soma dos desvios da média d_i é sempre zero, ou seja:

$$\sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0. \quad (\text{B.3})$$

Os desvios são obtidos tomando-se a diferença entre o valor observado e a média aritmética calculada. Para qualquer conjunto de dados, a somatória dos desvios será sempre igual a zero. Portanto, utilizar a somatória dos desvios como uma medida de dispersão não é prático. Para evitar esse problema, podemos adotar a somatória dos valores absolutos dos desvios, ou seja:

$$\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|. \quad (\text{B.4})$$

Porém, a utilização do total obtido através da eq.(B.4) pode causar alguns problemas de interpretação caso estejamos comparando um conjunto de dados com uma quantidade diferente de observações. Sendo assim, é prático utilizarmos o desvio médio d_m através da fórmula

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (\text{B.5})$$

Podemos definir o desvio médio, portanto, como a média dos valores absolutos dos desvios em relação a média.

3. VARIÂNCIA

A utilização do módulo no desvio médio torna difícil o estudo de suas propriedades. Por essa razão, utilizamos uma medida que faz uso do quadrado dos desvios em relação a média, a

variância amostral s^2 , a qual trata-se de uma medida de dispersão que pode ser calculada através da fórmula:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{B.6})$$

O termo $n - 1$ no denominador refere-se aos graus de liberdade relacionados a variância. Uma fórmula alternativa para o cálculo da variância é dada por:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{n-1}, \quad (\text{B.7})$$

onde x_i^2 refere-se à soma de cada valor observado ao quadrado, $(\sum x_i)^2$ representa o quadrado da soma de todos os valores observados e n corresponde ao número total de observações contidas no conjunto de dados.

Apesar da fórmula alternativa aparente ser mais complicada, o cálculo da variância é realizado através de um menor número de operações aritméticas. Tendo em vista que a variância abrange os quadrados dos desvios, sua unidade de medida é a mesma que a dos valores das observações, porém, elevada ao quadrado. Por exemplo, se a grandeza for o tempo e a unidade de medida for minuto, a variância será dada em min^2 . Caso a grandeza seja massa e sua unidade de medida seja quilograma, a variância será expressa em kg^2 .

4. DESVIO PADRÃO

Ao utilizarmos unidades de medida elevadas ao quadrado para representar a variância, sua interpretação pode tornar-se um pouco difícil. Se desejamos obter uma medida de variabilidade expressa na mesma unidade dos valores do conjunto de dados, precisamos extrair a raiz quadrada da variância. Ao fazermos isso, encontraremos o desvio padrão σ , dado pela fórmula:

$$\sigma = \sqrt{s^2} \quad (\text{B.8})$$

Algumas conclusões acerca do desvio padrão podem ser obtidas. A primeira é de que se trata de uma medida de variação de todos os valores do conjunto de dados a partir da média aritmética. Seu valor é maior ou menor que zero, sendo igual a zero apenas no caso em que todos os valores do conjunto forem iguais. Caso os valores do conjunto sejam próximos, o desvio padrão será pequeno, enquanto valores muito dispersos resultarão em um desvio padrão grande. Caso valores discrepantes sejam incluídos no conjunto, o desvio padrão poderá variar

drasticamente. Outra conclusão é que a unidade de medida do desvio padrão é a mesma dos valores que compõem o conjunto de dados. Por fim, utilizamos o desvio padrão para comparar a variabilidade de dois conjuntos de dados diferentes apenas se as medidas forem aproximadamente iguais e as unidades de medida dos dois conjuntos forem as mesmas.

5. SINTETIZANDO O DESVIO PADRÃO ATRAVÉS DE UMA TABELA

Tendo em vista que as fórmulas apresentadas podem não ser práticas para a abordagem com os alunos, propomos uma tabela de fácil preenchimento para a obtenção do desvio padrão (Tabela B.1).

TABELA B.1 – Modelo de tabela para a propagação de erros e obtenção do desvio padrão.

| <i>Observação</i> (x_i) | <i>Desvio</i> ($x_i - \bar{x}$) | <i>Quadrado do desvio</i> $(x_i - \bar{x})^2$ |
|---|-----------------------------------|---|
| x_1 | $x_1 - \bar{x}$ | $(x_1 - \bar{x})^2$ |
| x_2 | $x_2 - \bar{x}$ | $(x_2 - \bar{x})^2$ |
| \vdots | \vdots | \vdots |
| x_n | $x_n - \bar{x}$ | $(x_n - \bar{x})^2$ |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x_i - \bar{x})^2$ | | $(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2$ |
| Número de observações n | | n |
| Variância s^2 | | $\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}$ |
| Desvio padrão da média σ | | $\sqrt{s^2}$ |

Fonte: Elaborado pelos autores.

A primeira coluna deve ser preenchida com os valores das observações obtidas. Na segunda coluna devem ser inseridos os valores dos desvios, obtidos através da diferença entre o valor da observação e a média aritmética previamente calculada. A terceira coluna deve ser preenchida com o quadrado dos valores obtidos na segunda coluna, a saber, dos desvios. A

seguir, o aluno deve realizar a soma dos quadrados dos desvios, anotar a quantidade de observações que compõem o conjunto de dados, dividir ambos os valores respectivamente para obter a variância e, por fim, extrair a raiz do valor encontrado para determinar o desvio padrão da média. Ressaltamos que, na abordagem com os alunos, não utilizamos o denominador $n - 1$ para o cálculo da variância.

Apêndice C

REGISTRO DAS RESPOSTAS DOS ALUNOS

Nesse apêndice encontram-se na íntegra as atividades desenvolvidas pelos alunos durante o terceiro encontro, ordenadas em turmas A e B, grupos I, II, III e IV, respectivamente.

| | |
|------------------------------------|--------------------|
| GRUPO: (X) I () II () III () IV | TURMA: (X) A () B |
| ALUNOS: | |
| | |
| | |

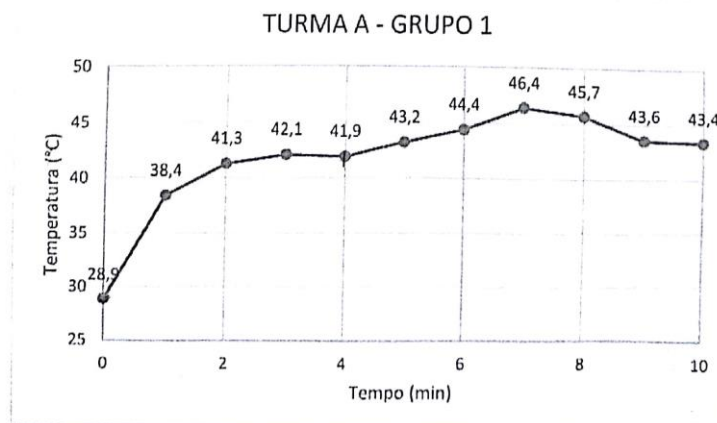
Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 28,9 |
| 1 | 38,4 |
| 2 | 41,3 |
| 3 | 42,1 |
| 4 | 41,9 |
| 5 | 43,2 |
| 6 | 44,4 |
| 7 | 46,4 |
| 8 | 45,7 |
| 9 | 43,6 |
| 10 | 43,4 |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 6,5.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 7,5.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$Q \Rightarrow P_s = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t}$$

$$\square_{3\text{cm}} = 9\text{cm}^2$$

$$m \approx 7\text{g}$$

$$c = 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$A = 0,0009\text{m}^2$$

$$P_s = 7\text{g} \cdot 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \frac{13^\circ\text{C}}{0,0009 \cdot 240\text{s}}$$

$$P_s = 204,75 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \boxed{204,75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

O valor não ficou muito aproximado. As hipóteses para isso talvez seja inclinação dos raios solares, a nebulosidade, a placa ter refletido parte da energia ou então erro de medição do termômetro.

Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : $217,35 \text{ W/m}^2$

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 204,75 | - 12,6 | 158,76 |
| 207,90 | - 9,45 | 89,30 |
| 217,35 | 0 | 0 |
| 239,38 | 22,03 | 485,32 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 733,38 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 183,34 |
| Desvio padrão da média σ : | | 13,54 |

Valor final da potência solar local: $P_s = 217,35 \pm 13,54 \text{ W/m}^2$

GRUPO: () I II () III () IV TURMA: A () B

ALUNOS:

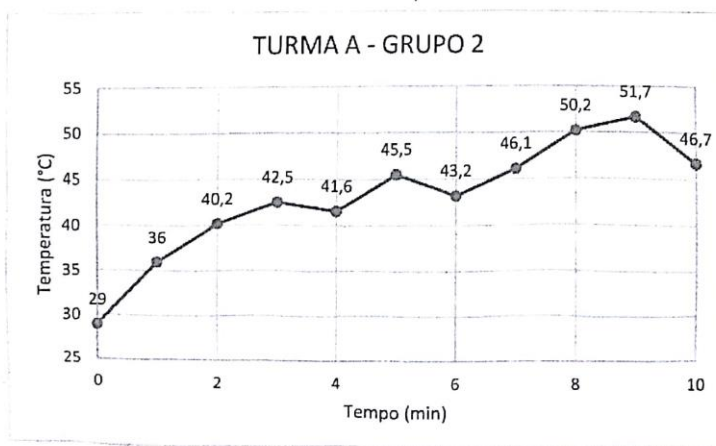
Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 29 |
| 1 | 36 |
| 2 | 40,2 |
| 3 | 42,5 |
| 4 | 41,6 |
| 5 | 45,5 |
| 6 | 43,2 |
| 7 | 46,1 |
| 8 | 50,2 |
| 9 | 51,7 |
| 10 | 46,7 |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 7.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 7,2.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



Jhonatan

Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$E_s = \frac{7g \cdot 0,486 \frac{J}{gC} \cdot 16,5}{0,0009 m^2 \cdot 300s}$$

$$E_s = \frac{56,133}{0,0009 \cdot 300}$$

$$P_s = 207,9 \frac{W}{m^2}$$

$$m = 7g$$

$$C = 0,846 \frac{J}{gC}$$

$$A = 0,0009 m^2$$

$$\frac{60}{\times 5} = \frac{300}{300}$$

$$\Delta T = 21,5$$

455

43,7

Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

Ele não chegou na meta por ter alguns fatores que poderiam ter influenciado, como: o ter, o termômetro, a nuvens e a placa podendo ser um refletor de luz.

Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : 217,36 W/m²

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 209,75 | -12,6 | 158,76 |
| 207,90 | -9,45 | 89,30 |
| 217,35 | 0 | 0 |
| 239,38 | 22,03 | 485,32 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 733,38 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 183,34 |
| Desvio padrão da média σ : | | 13,54 |

Valor final da potência solar local: $P_s = 217,35 \pm 13,54 \text{ W/m}^2$

GRUPO: () I () II III () IV TURMA: A () B

ALUNOS:

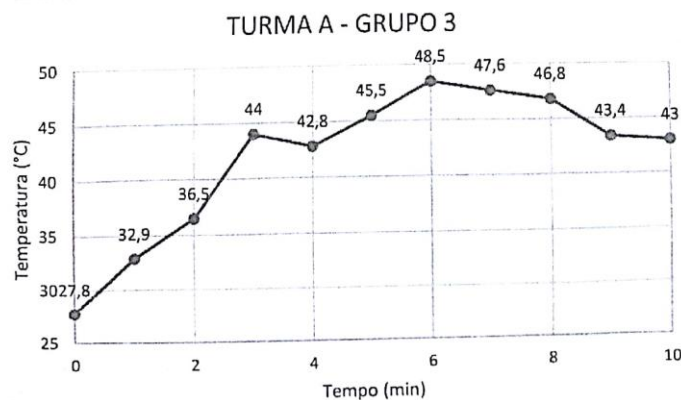
Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 27,8 |
| 1 | 32,9 |
| 2 | 36,5 |
| 3 | 44 |
| 4 | 42,8 |
| 5 | 45,5 |
| 6 | 48,5 |
| 7 | 47,6 |
| 8 | 46,8 |
| 9 | 43,4 |
| 10 | 43 |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 7 cm.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 7,5 cm.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$P_{\theta} = \frac{M \cdot c \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t}$$

$$P_s = \frac{7,0 \cdot 0,486 \cdot 2,07^{\circ}\text{C}}{9^{\circ}\text{C} \cdot 0,0009 \text{ m}^2 \cdot 360\text{s}} = \frac{217,35 \text{ J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$P_s = 217,35 \text{ W/m}^2$$

Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

1) Devido do ruído entraria na frente do sol, a grade quimica não absorveria toda a temperatura e algumas vezes refletiria uma parte da energia, e daí com o ruído e a leitura do termômetro não estaria correta.

Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : $217,35 \text{ W/m}^2$

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 204,75 | -12,60 | 158,76 |
| 207,90 | -9,45 | 89,30 |
| 217,35 | 0 | 0 |
| 239,38 | 22,03 | 485,32 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 733,38 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 183,34 |
| Desvio padrão da média σ : | | 13,54 |

Valor final da potência solar local: $PS = 217,35 \pm 13,54 \text{ W/m}^2$

| | |
|--|--|
| GRUPO: () I () II () III <input checked="" type="checkbox"/> IV | TURMA: <input checked="" type="checkbox"/> A () B |
| ALUNOS: | |
| | |
| | |

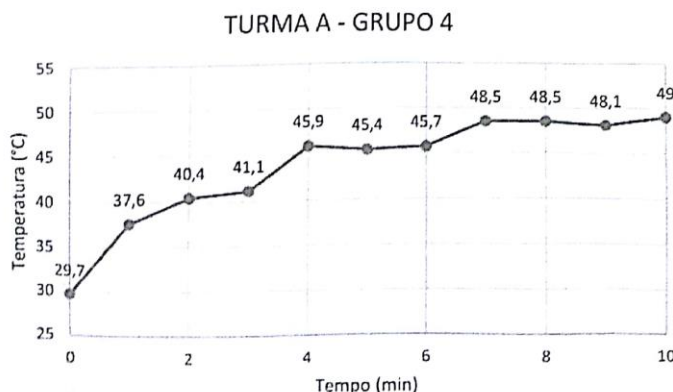
Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 29,7 °C |
| 1 | 37,6 °C |
| 2 | 40,4 °C |
| 3 | 41,1 °C |
| 4 | 45,9 °C |
| 5 | 45,4 °C |
| 6 | 45,7 °C |
| 7 | 48,5 °C |
| 8 | 48,5 °C |
| 9 | 48,1 °C |
| 10 | 49,0 °C |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 8 cm.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 9,1 cm.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$P_s = 7 \text{ kg} \cdot 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \cdot \frac{11,4^\circ\text{C}}{0,0003 \text{ m}^2 \cdot 180 \text{ s}} = \frac{38,78}{0,162} = 239,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

Sim, levando em consideração que os valores oficiais são médios, as contas para o cálculo dessa média podem ter dados maiores e menores. Além disso, existem fatores que podem ter influenciado os valores e temperatura dos experimentos, como por exemplo: a nebulosidade (interferência das nuvens na frente do Sol), inclinação dos raios solares perante a Terra, uma possível reflexão da placa de metal para com os raios, uma margem de erro do termômetro e até mesmo a influência do vento, "roubando" o calor da placa, mesmo que minimamente.

Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : 217,35 W/m²

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 204,75 | -12,60 | 158,76 |
| 207,90 | -9,45 | 89,30 |
| 217,35 | 0 | 0 |
| 239,38 | 22,03 | 485,32 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 733,38 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 183,34 |
| Desvio padrão da média σ : | | 13,54 |

Valor final da potência solar local: 217,35 \pm 13,54 W/m²

GRUPO: (x) I () II () III () IV TURMA: () A (x) B

ALUNOS:

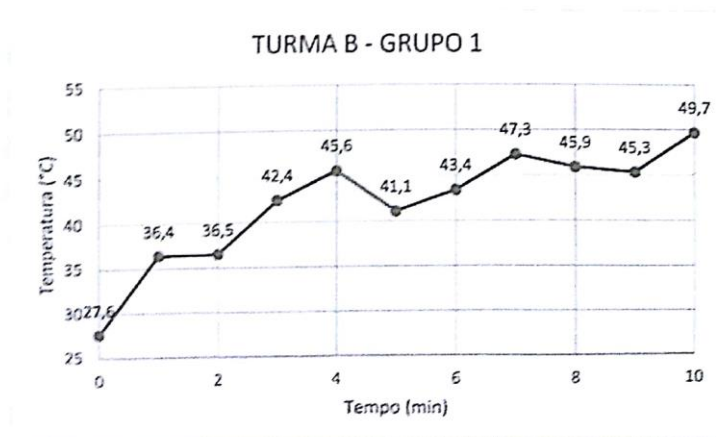
① Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 27,6 |
| 1 | 36,4 |
| 2 | 36,5 |
| 3 | 42,4 |
| 4 | 45,6 |
| 5 | 41,1 |
| 6 | 43,4 |
| 7 | 47,3 |
| 8 | 45,9 |
| 9 | 45,3 |
| 10 | 49,7 |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 1,4.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 2.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



- ② Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$P_s = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t} = \frac{7g \cdot 0,486J/g \cdot 9,2^\circ C}{0,0009m^2 \cdot 9 \cdot 180s} = \frac{31,2984}{0,162} = 193,2 \frac{J}{m \cdot s}$$

$$P_s = 193,2 \frac{W}{m^2}$$

$m = 7g$
 $c = 0,486 \frac{J}{g \cdot ^\circ C}$
 $A = 9cm^2 = 0,0009m^2$
 $\Delta T = 9,2^\circ C$
 $\Delta t = 3min = 180s$

- ③ Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

O nosso resultado ficou um pouco mais baixo que as referências, e isso levamos em conta algumas interferências obtidas, como a sombra de uma árvore, a sombra de pessoas sobre o objeto, inclinação do termômetro entre outros fatores.

- ④ Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : 215,51 W/m²

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 193,20 | -22,31 | 497,74 |
| 214,20 | -1,31 | 1,72 |
| 192,15 | -23,39 | 547,09 |
| 262,50 | 46,99 | 2208,60 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 3255,15 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 813,79 |
| Desvio padrão da média σ : | | 28,53 |

Valor final da potência solar local: 215,51 ± 28,53 W/m²

GRUPO: () I (X) II () III () IV TURMA: () A (X) B

ALUNOS:

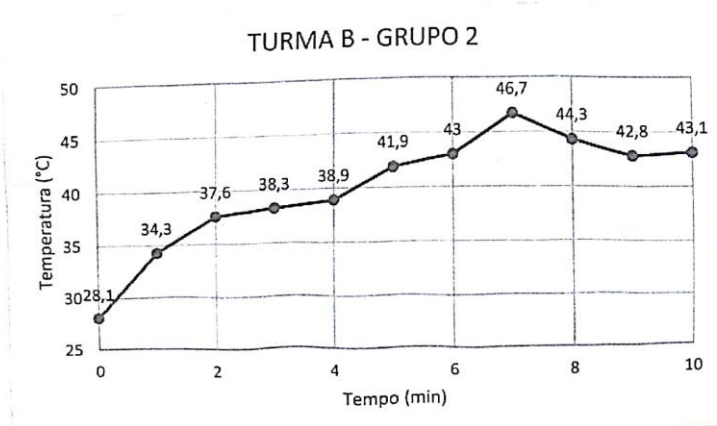
① Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 28,1 |
| 1 | 34,3 |
| 2 | 37,6 |
| 3 | 38,3 |
| 4 | 38,9 |
| 5 | 41,9 |
| 6 | 43 |
| 7 | 46,7 |
| 8 | 44,3 |
| 9 | 42,8 |
| 10 | 43,1 |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 28,1

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 43,1

Gráfico da temperatura em função do tempo:



② Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$P_s = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t}$$

$m = 9 \text{ g}$
 $c = 0,486 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}}$
 $A = 9 \text{ cm}^2 = 0,0009 \text{ m}^2$

$$\Delta T = \frac{9 \cdot 0,486 \cdot 10,2^\circ\text{C}}{0,0009 \text{ m}^2 \cdot 9 \cdot 180 \text{ s}} = \frac{34,7004}{0,162}$$

$P_s = 214,2 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

$P_s = 214,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

③ Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

São diversos fatores que podem interferir no resultado obtido, o valor resultante de nosso experimento ocasionou aproximadamente ao valor dado como referência, dentre esses fatores que pode ocasionar uma alteração no resultado é a ventos, inclinação, nuvens, poeiras, absorção e Reflexão do material.

- ④ Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : _____

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 193,20 | -22,31 | 498,94 |
| 214,20 | -1,31 | 1,72 |
| 192,15 | -23,39 | 547,09 |
| 262,50 | 46,99 | 2208,60 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 3255,15 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 813,79 |
| Desvio padrão da média σ : | | 28,53 |

Valor final da potência solar local: $215,51 \pm 28,53 \text{ W/m}^2$

| | |
|--|--|
| GRUPO: () I () II <input checked="" type="checkbox"/> III () IV | TURMA: () A <input checked="" type="checkbox"/> B |
| ALUNOS: | |
| | |
| | |

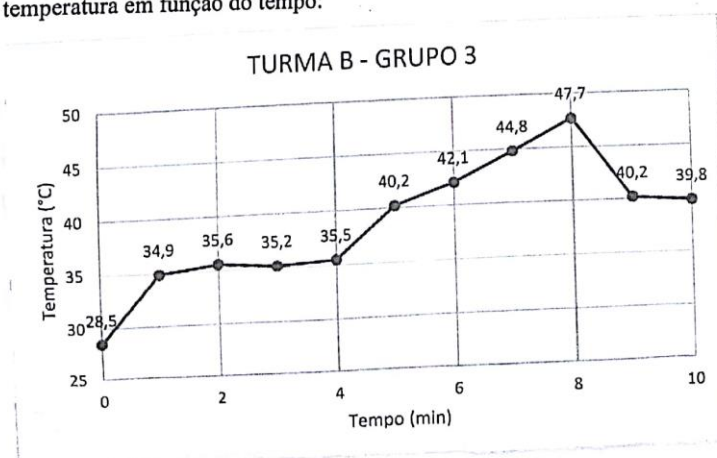
① Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 28,5 |
| 1 | 34,9 |
| 2 | 35,6 |
| 3 | 35,2 |
| 4 | 35,5 |
| 5 | 40,2 |
| 6 | 42,1 |
| 7 | 44,8 |
| 8 | 47,7 |
| 9 | 40,2 |
| 10 | 39,8 |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 2,5 cm.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 3 cm.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



2) Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

$$P_s = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t}$$

$$m = \rho \cdot A \cdot \Delta x$$

$$c = 0,486 \frac{J}{g \cdot ^\circ C}$$

$$A = 9 \text{ cm}^2 = 0,0009 \text{ m}^2$$

$$P_s = \frac{78 \cdot 0,486 \cdot 12,2^\circ C}{0,0009 \text{ m}^2 \cdot 240 \text{ s}}$$

$$192,35 \frac{J}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$P_s = 192,35 \frac{W}{\text{m}^2}$$

3) Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

Ficou baixo, pois o objeto não absorve toda energia, e também o objeto reflete a luz, as nuvens podem e a umidificação podem interferir, até mesmo o termômetro por não ser preciso

④ Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : _____

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 193,20 | -22,33 | 498,72 |
| 234,20 | -21,33 | 455,12 |
| 192,15 | -23,39 | 547,09 |
| 262,50 | -46,99 | 2198,86 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\sum(x - \bar{x})^2$: | | 3255,79 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 813,95 |
| Desvio padrão da média σ : | | 28,53 |

Valor final da potência solar local: $235,53 \pm 28,53 \text{ W/m}^2$

\rightarrow somatória $\rightarrow 3255,79$
 \rightarrow nº de obs $\rightarrow 4$
 \rightarrow variável $\rightarrow 813,95$
 $28,53$

GRUPO: () I () II () III IV TURMA: () A B

ALUNOS:

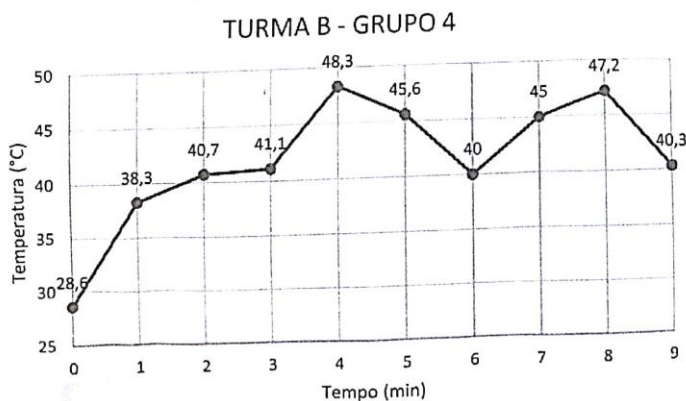
① Utilize a tabela abaixo para registrar as temperaturas da chapinha de metal a cada minuto. Anote também o tamanho da sombra projetada pelo palito ao início e ao final do experimento.

| Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|-------------|------------------|
| 0 | 28,6 |
| 1 | 38,3 |
| 2 | 40,7 |
| 3 | 41,1 |
| 4 | 48,3 |
| 5 | 45,6 |
| 6 | 40 |
| 7 | 45 |
| 8 | 47,2 |
| 9 | 40,3 |
| 10 | |

Tamanho da sombra no início do experimento (cm): 3 cm.

Tamanho da sombra no final do experimento (cm): 6 cm.

Gráfico da temperatura em função do tempo:



- ② Utilize a equação demonstrada na lousa para determinar a potência solar local de acordo com os dados de seu experimento. Para isso, defina os valores da variação do tempo e da variação da temperatura identificando no gráfico qual intervalo melhor corresponde a uma função do 1º grau.

Determinação da potência solar

$$P_s = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t}{A \cdot \Delta t}$$

$$m = 7g$$

$$c = 0,486 \frac{J}{g \cdot ^\circ C}$$

$$A = 9 \text{ cm}^2 = 0,0009 \text{ m}^2$$

$$\Delta t = 82,5^\circ C$$

$$\Delta t = 180 \text{ s}$$

$$P_s = \frac{7g \cdot 0,486 \frac{J}{g \cdot ^\circ C} \cdot 82,5^\circ C}{0,0009 \text{ m}^2 \cdot 180 \text{ s}} = 42,525$$

$$42,525 \cdot 0,0009 = 44,250 \cdot 180 \text{ s}$$

$$262,5 \text{ W/m}^2$$

- ③ Compare esse valor com os resultados encontrados em alguns atlas de energia solar disponíveis. O resultado ficou próximo ao esperado? Caso não tenha ficado, quais hipóteses poderiam explicar esse fato?

Os valores de acordo com o Atlas de Estado de SP, os valores estão entre $247,2 - 262,5 \text{ W/m}^2$ (no verão) o de meu grupo, deu exatos $262,5 \text{ W/m}^2$ porém os dados poderiam variar, em função do ambiente, sombra da nuvem, método de medida e uma série de fatores que poderiam alterar o resultado.
 observação: a placa poderia refletir partes da radiação.

④ Utilizando os resultados mais próximos dos que são apresentados nos atlas, calcule a média, a variância e o desvio padrão da média dos valores encontrados.

Média \bar{x} : 215,51 W/m²

| Observação x | Desvio $x - \bar{x}$ | Quadrado do desvio $(x - \bar{x})^2$ |
|---|-------------------------|---|
| 163,90 | -22,31 | 497,74 |
| 214,90 | -1,31 | 1,72 |
| 192,15 | -23,39 | 547,09 |
| 262,50 | 46,99 | 2,208,60 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | 3.222,15 |
| Somatória dos quadrados dos desvios $\Sigma(x - \bar{x})^2$: | | 3955,15 |
| Número de observações n : | | 4 |
| Variância s : | | 813,79 |
| Desvio padrão da média σ : | | \approx 28,53 W/m ² |

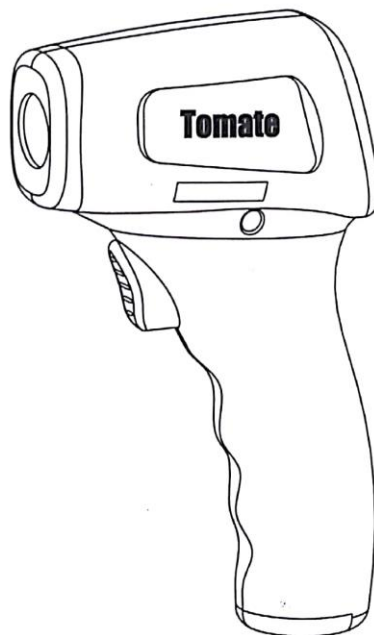
Valor final da potência solar local: 215,51 + 28,53 W/m²

$$3955,15 \div 4 = 988,7875$$

Anexo A

EXCERTOS DO MANUAL DE INSTRUÇÕES DO TERMÔMETRO INFRAVERMELHO

Manual de instruções



MT-9002

Tomate

1. Introdução & classificação

Este é um Termômetro aplicável a medição de testa. A temperatura do termômetro mede o corpo através da recolha de radiação de calor que emitem pela testa. É simplesmente operacional, higienico e de alta precisão. Os usuários podem obter leitura precisa dentro de um segundo por um toque. Este Termômetro é amplamente utilizado em escolas, hospitais e para uso doméstico.

Este termômetro também é capaz de medir a temperatura do objeto variando de 0°C -118°C. Ela nos empregados no domínio da agricultura, indústria, alimentos, indústria petroquímica, etc.

Este termômetro é classificada como um dispositivo médico classe II, classificado como internamente - Equipamentos de força e dispositivo de aplicação de tipo B. Água índice de protecção é: IPX0. É proibido utilizar este termómetro de gás natural ou gás inflamável mistura anestésica de ar e oxigênio ou óxido nitroso. Este é uma equipamento operação contínua. É classificado como um II pela UE.

2. Princípio de trabalho

Qualquer objeto pode gerar certa proporção de energia radiante infravermelho de acordo com a sua própria temperatura. A energia radiante e a sua distribuição wavelenngth são submetidos a sua temperatura superficial. Com base neste princípio, este termômetro é projetado para detectar a radiação infravermelha em 5 ~ 14um pela alta sensor infravermelho precisa feita na Alemanha. Ao adotar este sensor de alta qualidade além de cálculo especial e calibration, este termômetro é capaz de tomar a temperatura do corpo precisa.

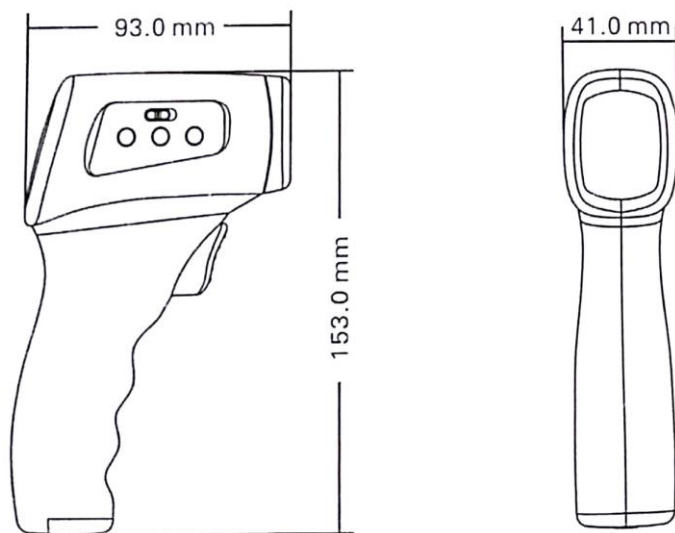
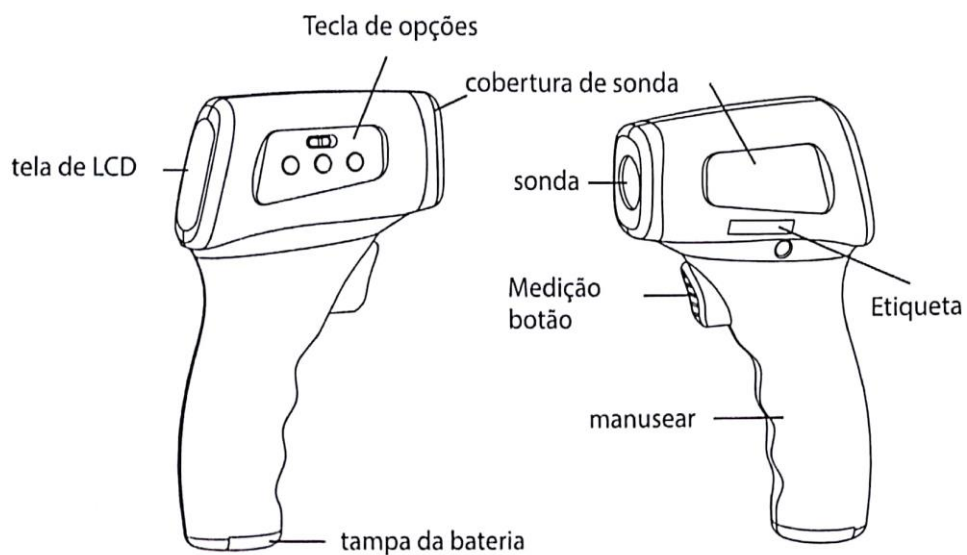
3. Características

Grande LCD com iluminação;
C / F lendo disponível;
Desligar automático.

4. Parâmetros técnicos

| | | |
|--------------------------------|--|-----------------------------------|
| Método de medição | Measurement method | |
| Distância efetiva | 5cm~8cm | |
| | Corpo humano | 35.5°C~42.9°C (85.9°F~109.2°F) |
| | Objeto | 0°C~118°C (32°F~244°F) |
| Precisão | Corpo humano | ± 0.2°C/0.4°C |
| | Objeto | ± 1.0°F/1.8F |
| Resolução | 0.1°C/°F | |
| Condição de trabalho | 10°C~40°C (50°F~104°F) RH < 90% Sem condensação | |
| condição de armazenamento | -25°C~55°C (-13°F~131°F) RH < 90% Sem condensação | |
| Fonte de energia | d.c 3V 2 AA Bateria alcalina | |
| Consumo de energia | Quando desligado <10uW | |
| | Quando a medição <30mW | |
| indicador de nível de potência | Indicação de nível de baixa potência | |
| Memória | recuperação automática da última leitura | |
| Exibição | visor LCD retroiluminado | |
| escala de leitura | Celsius ou Fahrenheit | |
| Desligar automático | IN 30 segundos | |
| dimensões | 93mm x 153mm x 41mm | |
| Peso líquido | 125g | |
| Padrões | EN60601-1, EN12470-5, ASTM 1965-98 | |

5. Ilustração



9. Medição

9.1 Temperatura corporal

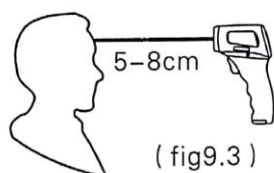
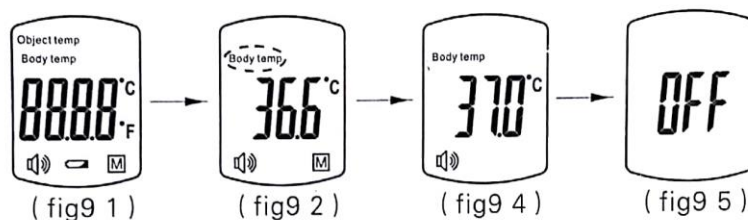
Botão de medição Presse ligar termômetro e ele exibe a tela de inicialização (fig.9.1). Após POST e dois bipes, ele irá mostrar o valor da última leitura e estar pronto para a medição (fig.9.2).

Certifique-se o termômetro está em modo de corpo.

Mantenha distância em 5cm a 8cm do sobrelhas superior para a prova (fig.9.3). Pressione o botão de medição e quando se dá uma medida "beep" está terminada e valor será exibido (fig.9.4).

Se o valor de medição é superior a valor de alarme (valor de incumprimento é de 38°C), dá "Beep. bip. bip" como indicação.

Após a medição, se o termômetro está ocioso em 30 segundos, ele irá mostrar "OFF" (fig.9.5) e dá um "bip" e fechar de automaticamente.



Aviso prévio:

1. Mantenha a cavidade do sensor e sonda limpa antes e após o uso.
2. Para garantir a precisão da medição, recomenda-se iniciar a medição depois de dez minutos ao realizar o termômetro para um novo ambiente.
3. Aguarde 10 minutos para medir a temperatura do corpo depois de medir temperatura extremamente alta ou objetos em temperaturas extremamente baixas.
4. Espere durante 5 minutos para iniciar a medição quando um alvo de medição (objecto ou humana) é de um ambiente com enorme diferença de temperatura.
5. Brisa, água, transpiração, cosmético na testa pode afetar a medição. Não medir a temperatura corporal em 30 minutos após o exercício, banho ou refeições.

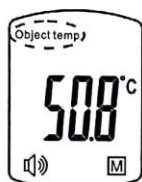
9.2 Temperatura do objeto

Pressione o botão medições para ligar o termômetro (fig.9.6).

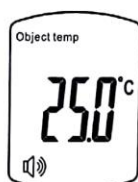
Certifique-se o termômetro está em modo de objeto.

Mantenha distância vertical de 5cm a 8cm do objeto a sonda de medição. Pressione o botão de medição e quando se dá uma medida "beep" está terminada e valor será exibido (fig.9.7)

Após a medição, se o termômetro está ocioso em 30 segundos, ele irá mostrar "OFF" (fig.9.8) e dá um "bip" e desligar automaticamente.



(fig 9.6)



(fig 9.7)



(fig 9.8)

Aviso prévio:

1. O valor sob esta modalidade é a temperatura da superfície objeto em vez de temperatura central.

2. A emissividade infrared incumprimento é de 0,95. A leitura será desviado da temperatura real de acordo com emissividade dirreferent. Para examople, a leitura em aço inoxidável será obviamente menor do que a temperatura real. Seja cauteloso PARA QUEIMADURAS.

9.3 Superior a faixa de medição

Modo de corpo:

Quando o valor de medição é inferior a 35.5°C, ele exibe Lo (fig.9.9) ang dá "beep. bip. bip. bip".

Quando Valis medição é maior do que 42.0°C, ele exibe Hi (fig9.10) e dá "beep. bip. bip. bip".

Modo de objeto::

Quando o valor measurement é inferior a 0°C, é displat para Lo (fig9.11) e dá "beep. bip. bip. bip"

Quando Valis medição é maior do que 118.0°C, ele exibe Hi (fig9.12) e dá "beep. bip. bip. bip".