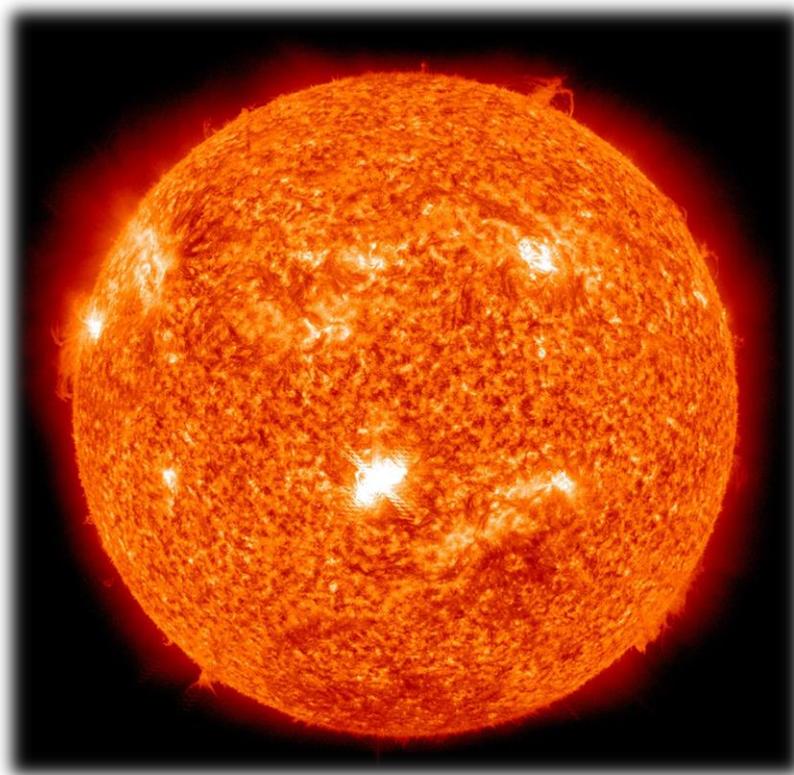


Experimento para a Estimativa da Irradiância Solar

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.....	4
2.	CONTEÚDO DE FÍSICA	6
2.1.	Temperatura	6
2.2.	Calor	8
2.3.	Transferência de energia através do calor	11
2.3.1.	Condução.....	11
2.3.2.	Convecção	12
2.3.3.	Radiação	14
2.3.3.1.	<i>Emissão de radiação</i>	<i>16</i>
2.3.3.2.	<i>Absorção de radiação</i>	<i>19</i>
2.4.	Radiação de corpo negro	19
2.5.	Irradiância solar	21
3.	METODOLOGIA DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	29
3.1.	Primeiro encontro: problematização do tema e abordagem dos conceitos físicos envolvidos na atividade experimental	29
3.2.	Segundo encontro: desenvolvimento da atividade experimental	31
3.3.	Terceiro encontro: estimativa da irradiância solar total e propagação de erros	31
4.	ROTEIRO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL	32
5.	ANÁLISE DOS DADOS DO EXPERIMENTO	33
6.	SUGESTÕES DE TEMAS QUE PODEM SER ABORDADOS APÓS A APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	36
7.	REFERÊNCIAS	38
8.	FOLHA DE ATIVIDADES	40

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

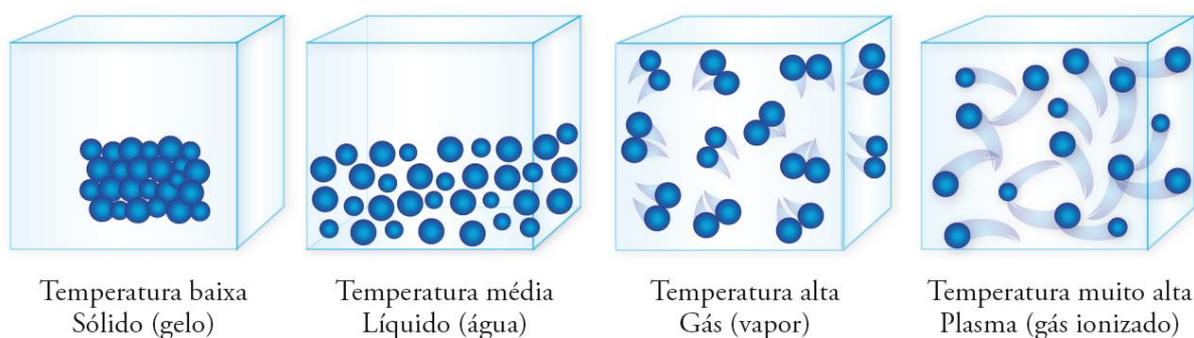
2.1 Temperatura

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 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.

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 2. No entanto, o movimento que efetivamente contribui para a alteração da

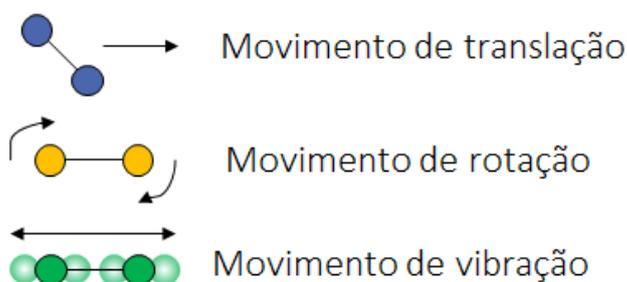
temperatura de uma substância é o de translação. Os fornos de micro-ondas, por exemplo, emitem ondas capazes de fazer as moléculas de água do alimento oscilar, invertendo suas orientações. Isso, de fato, produz um grande movimento rotacional. No entanto, se esse movimento não for comunicado às moléculas 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.

Figura 1 – Substâncias a diferentes temperaturas.



Fonte: São Paulo (2014, p. 9).

Figura 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).

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

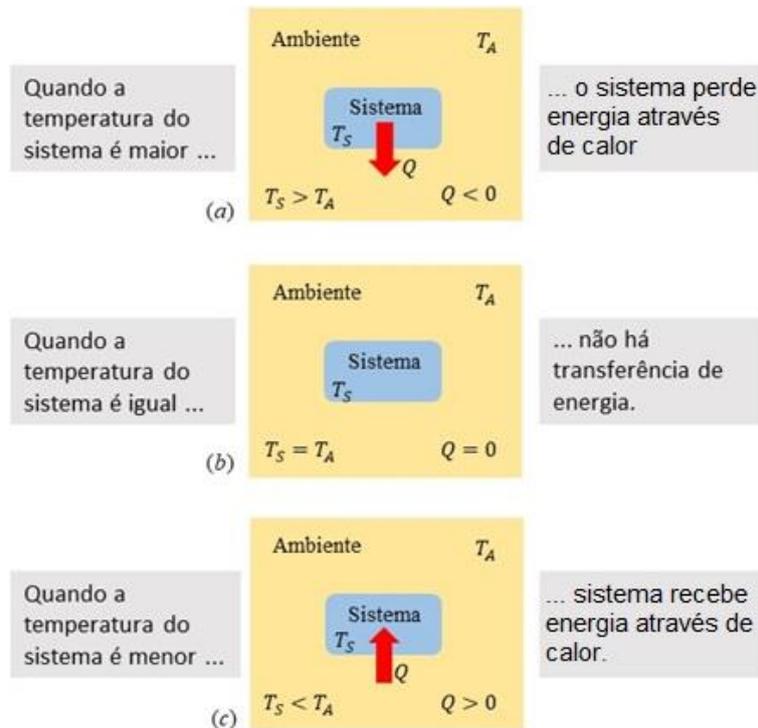
substância. As unidades de medida mais utilizadas para ela são as escalas Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) e Kelvin (K), sendo esta última a unidade padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI).

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 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 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).

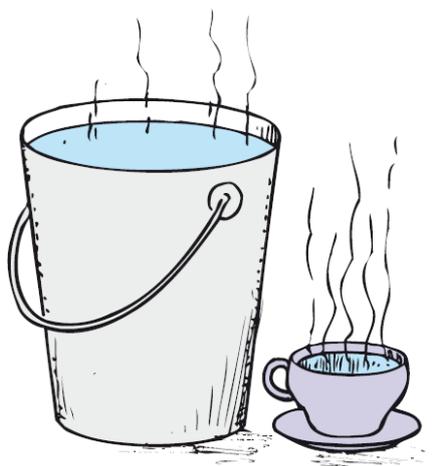
É importante frisar que os objetos não possuem calor, mas sim temperatura. Calor é a forma pela qual energia é transferida de um objeto para outro devido a diferença de temperatura entre eles. Além disso, calor não deve ser confundido com energia interna, a qual é a soma de todas as energias cinéticas 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 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.

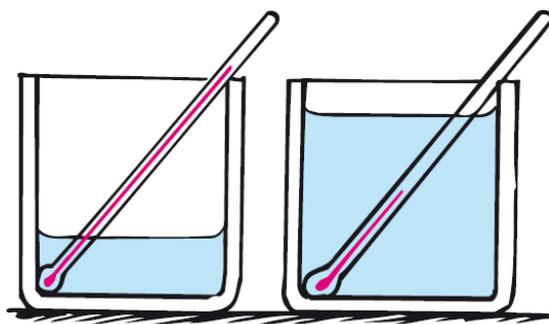
Figura 4 – Existe mais energia cinética molecular em um recipiente cheio de água morna do que em uma pequena xícara de chá cheia de água a uma temperatura maior.



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 5).

Figura 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:

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

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.

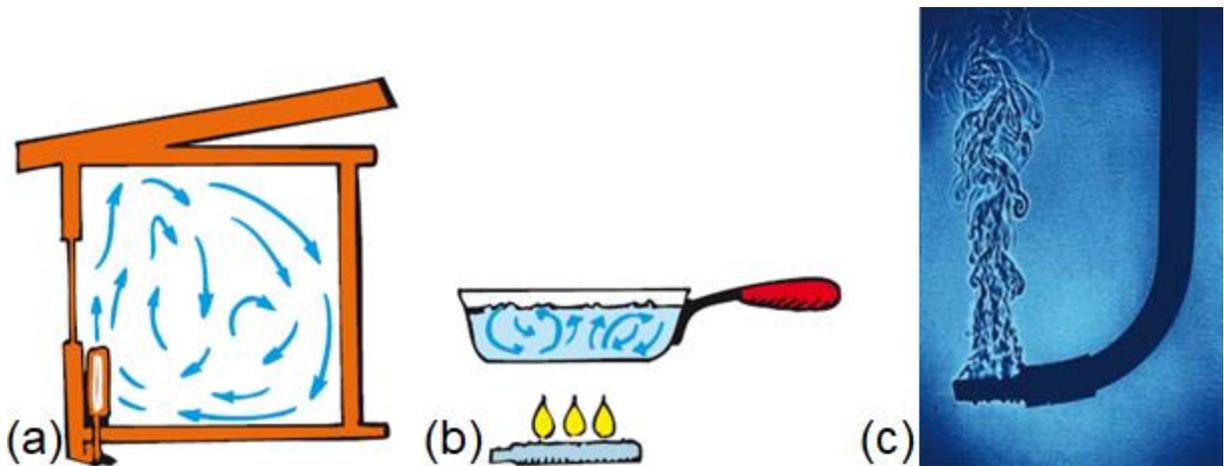
O que define se um material será um bom ou mau condutor de calor é sua estrutura atômica ou molecular. Ele é considerado um bom condutor quando um ou mais elétrons da camada mais externa dos átomos estão “fracamente” ligados ao átomo. Isso possibilita que eles se tornem livres para colidir com outros 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 umas 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).

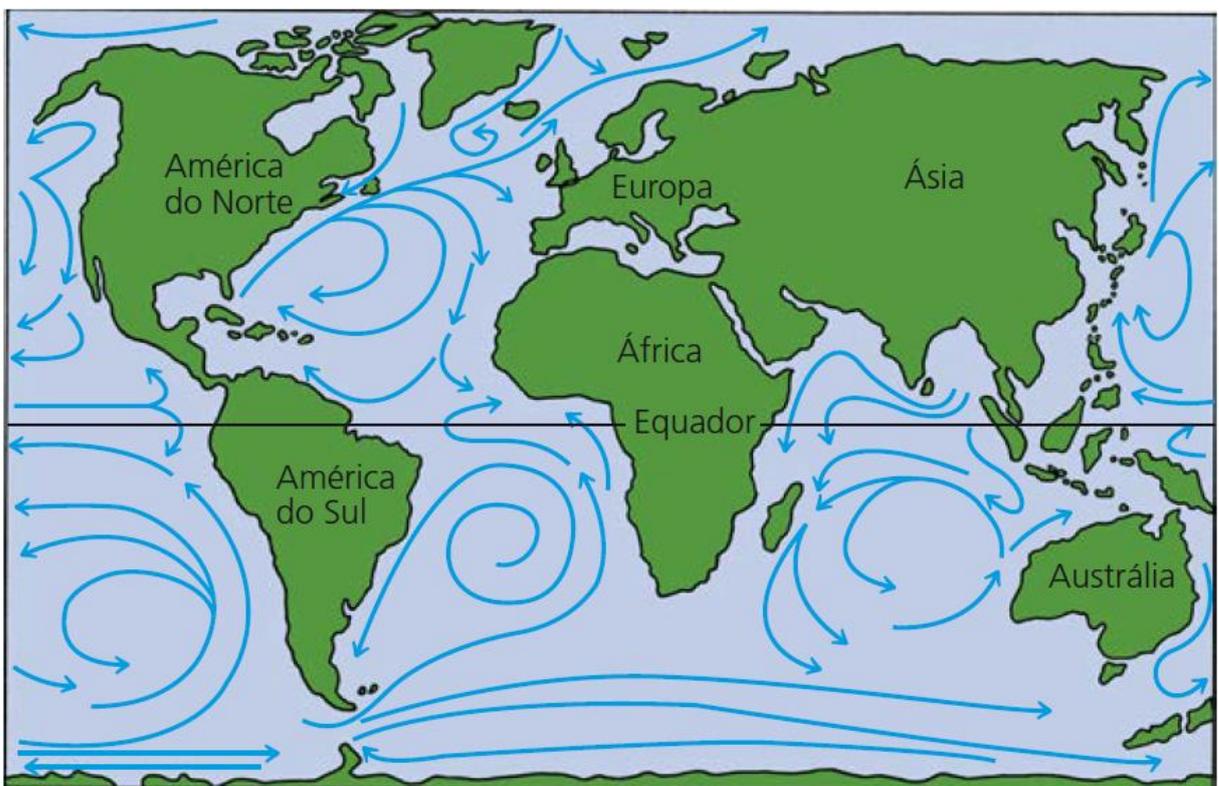
Figura 6 – (a) Correntes de convecção no ar. (b) Correntes de convecção em um líquido. (c) Um aquecedor, localizado na ponta de um tubo em “J” submerso em água, gera correntes de convecção, reveladas pelas sombras (causadas pelas reflexões sofridas pela luz na água a diferentes temperaturas).



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 7).

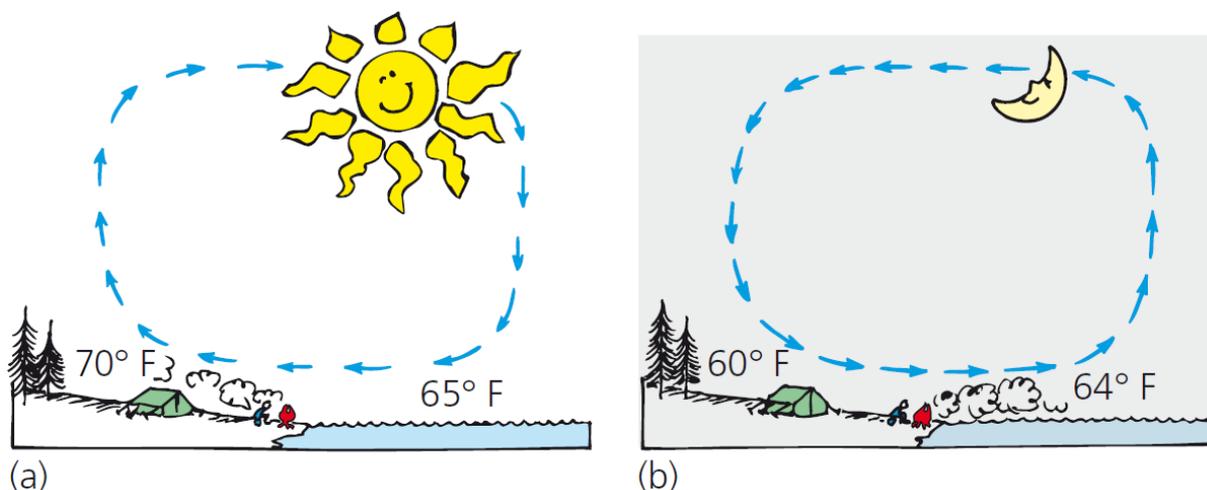
Figura 7 – Muitas correntes oceânicas, mostradas em azul, distribuem a energia térmica proveniente das regiões equatoriais mais quentes para as regiões polares, mais frias.



Fonte: Hewitt (2015, p. 291).

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 8).

Figura 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.

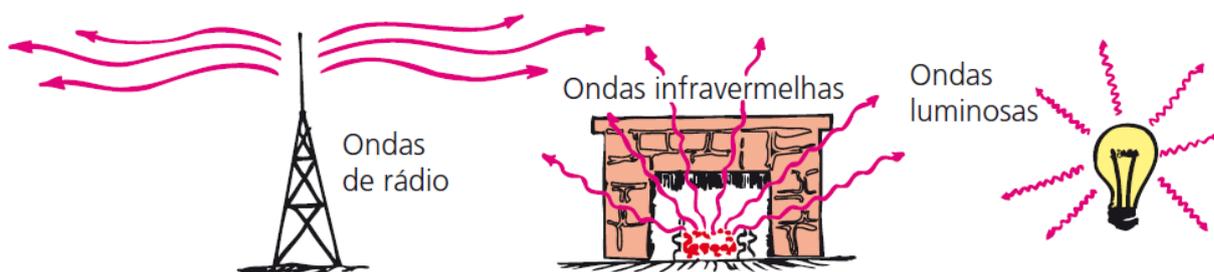
2.3.3 Radiação

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.

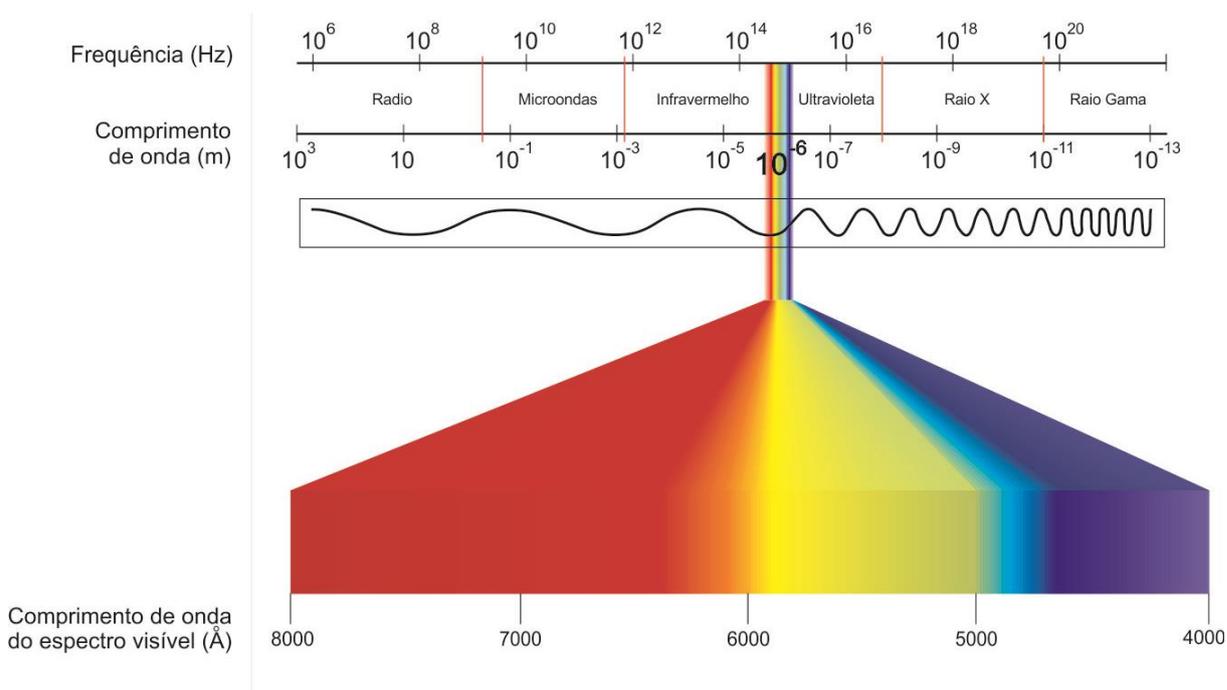
A energia transferida através da radiação também é chamada de energia radiante e apresenta-se na forma de ondas eletromagnéticas. Elas incluem as ondas de rádio, as micro-ondas, as ondas infravermelhas, a luz visível, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama, apresentadas na figura 9. A classificação apresentada está em ordem decrescente com relação aos seus comprimentos de onda, conforme observada na figura 10.

Figura 9 – Exemplos de ondas eletromagnéticas.



Fonte: Hewitt (2015, p. 307).

Figura 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

$$v = \lambda f \quad (2)$$

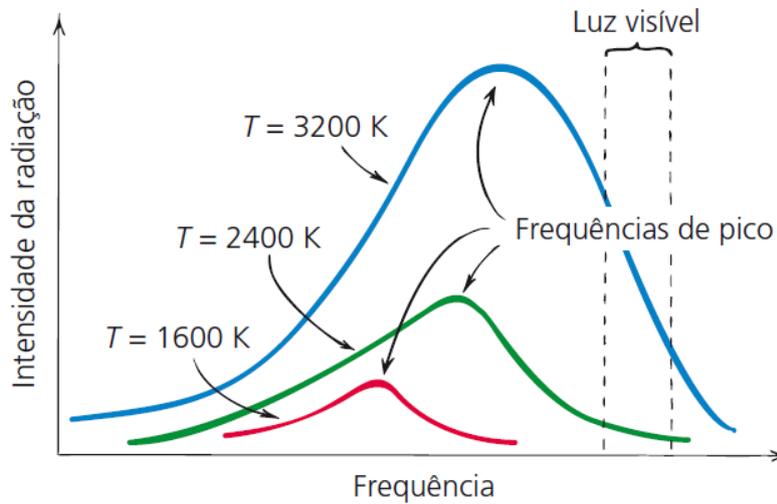
Quando estamos analisando a luz, a velocidade v é substituída pela velocidade da luz c e a eq.(2) é modificada, resultando em

$$c = \lambda f \quad (3)$$

2.3.3.1 Emissão de radiação

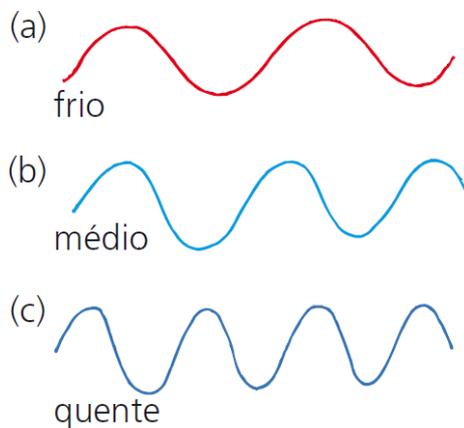
Todas as substâncias, a qualquer temperatura, emitem energia radiante. A frequência máxima da radiação emitida é diretamente proporcional à temperatura absoluta do objeto emissor, conforme observado nas figuras 11 e 12. Quando a temperatura de um objeto atinge determinado valor, ele passa a emitir radiação 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 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 11 – A temperatura é diretamente proporcional à frequência da radiação emitida.



Fonte: Hewitt (2015, p. 308).

Figura 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.

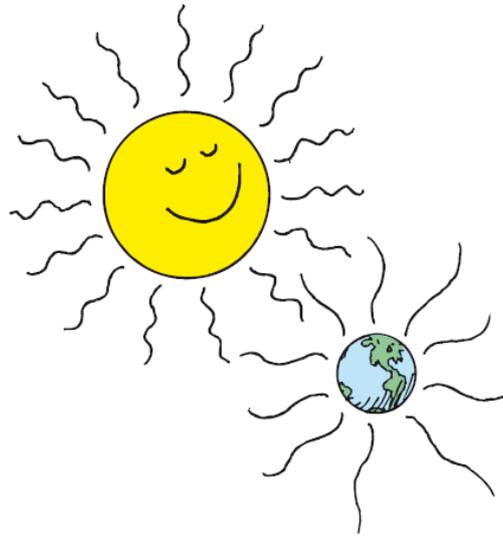


Fonte: Hewitt (2015, p. 308).

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 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

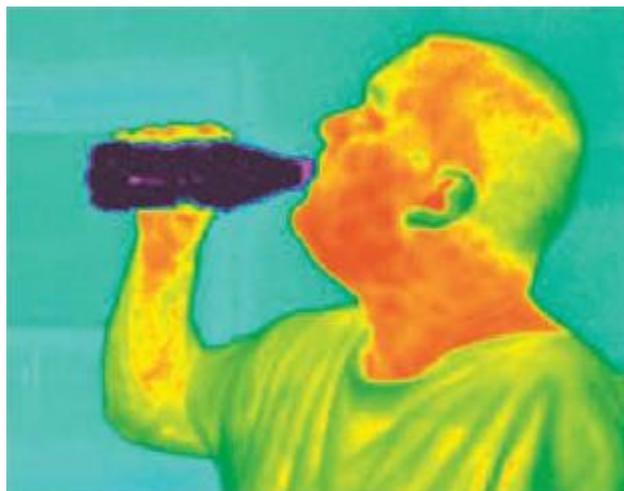
apontar o aparelho para o objeto que desejamos aferir a temperatura e ele identificará a temperatura com base na radiação que ele emite.

Figura 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).

Figura 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 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).

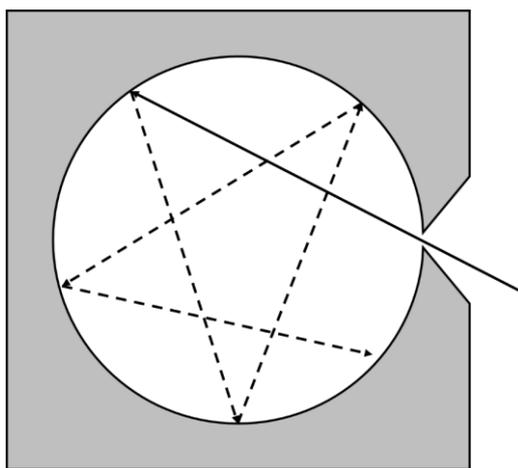
2.4 Radiação de corpo negro

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 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, possuem 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 17.

Figura 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).

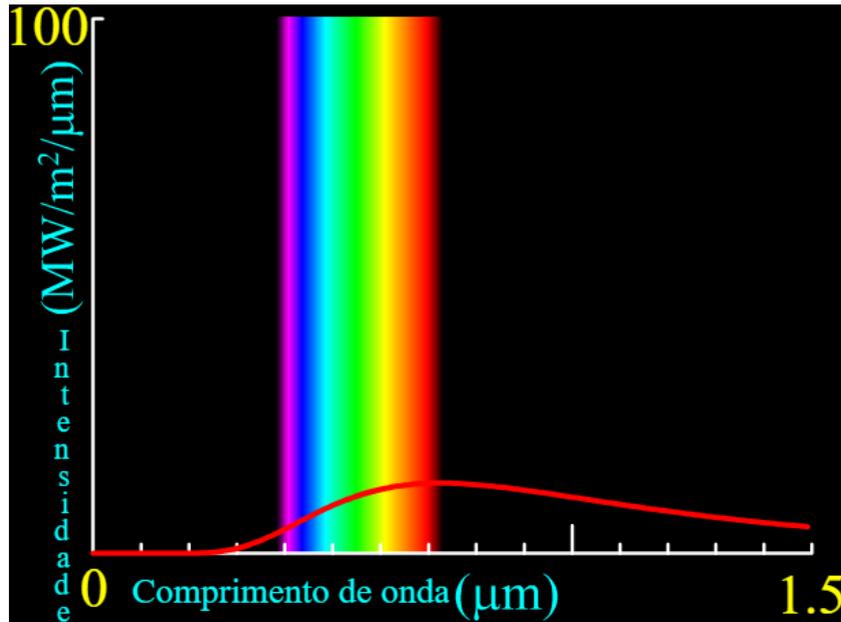
A intensidade I (potência por unidade de área) da radiação emitida por um corpo negro pode ser descrita pela lei de Stefan-Boltzmann (obtida através da lei de Planck da radiação de corpo negro):

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

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

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

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



Fonte: PhET. Radiação do corpo negro. “Disponível em:”

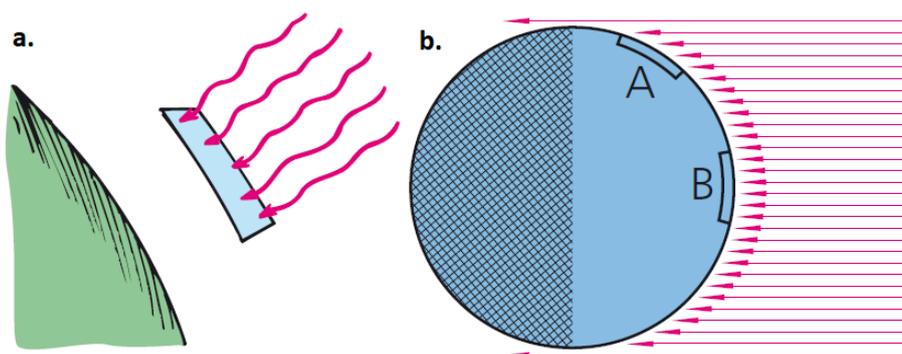
https://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_pt.html. Acesso em: 08 jan. 2019.

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 ($1,36 \text{ kW/m}^2$).

Figura 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).

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 1. Aproximadamente metade da irradiância solar encontra-se na região da luz visível e quase a mesma quantidade na região do infravermelho (MACAGNAN, 2019).

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 18b, 19 e 20).

TABELA 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

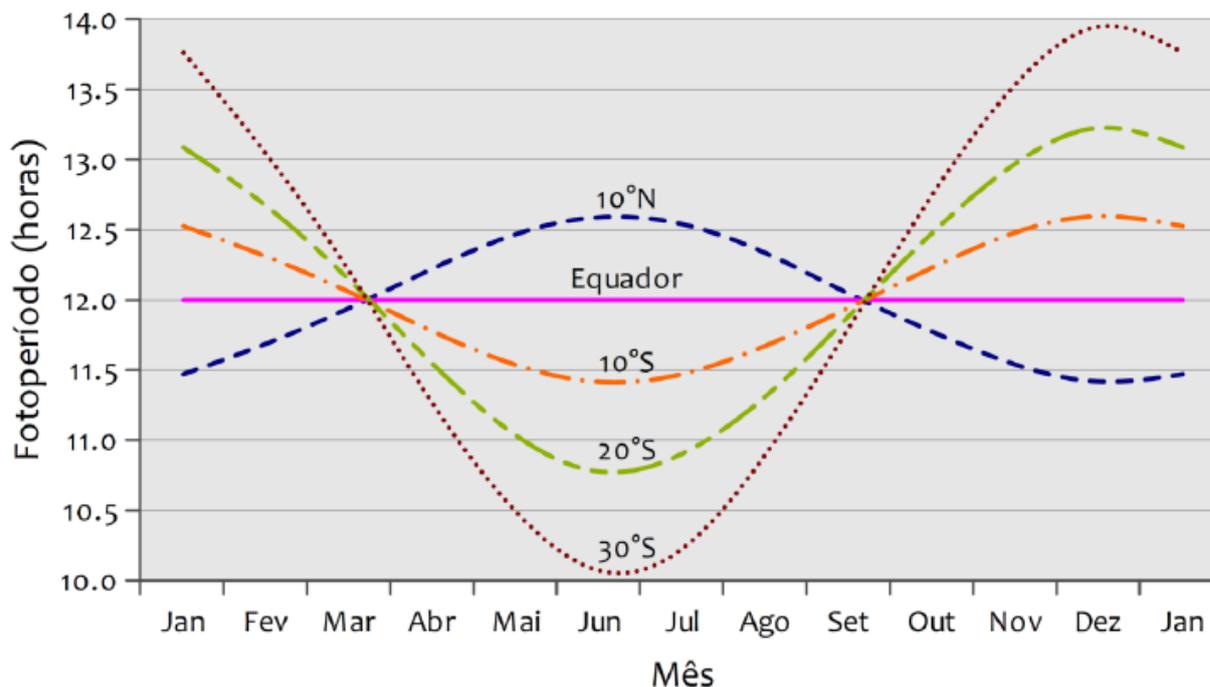
Fonte: MACAGNAN (2019, p. 12).

Figura 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 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

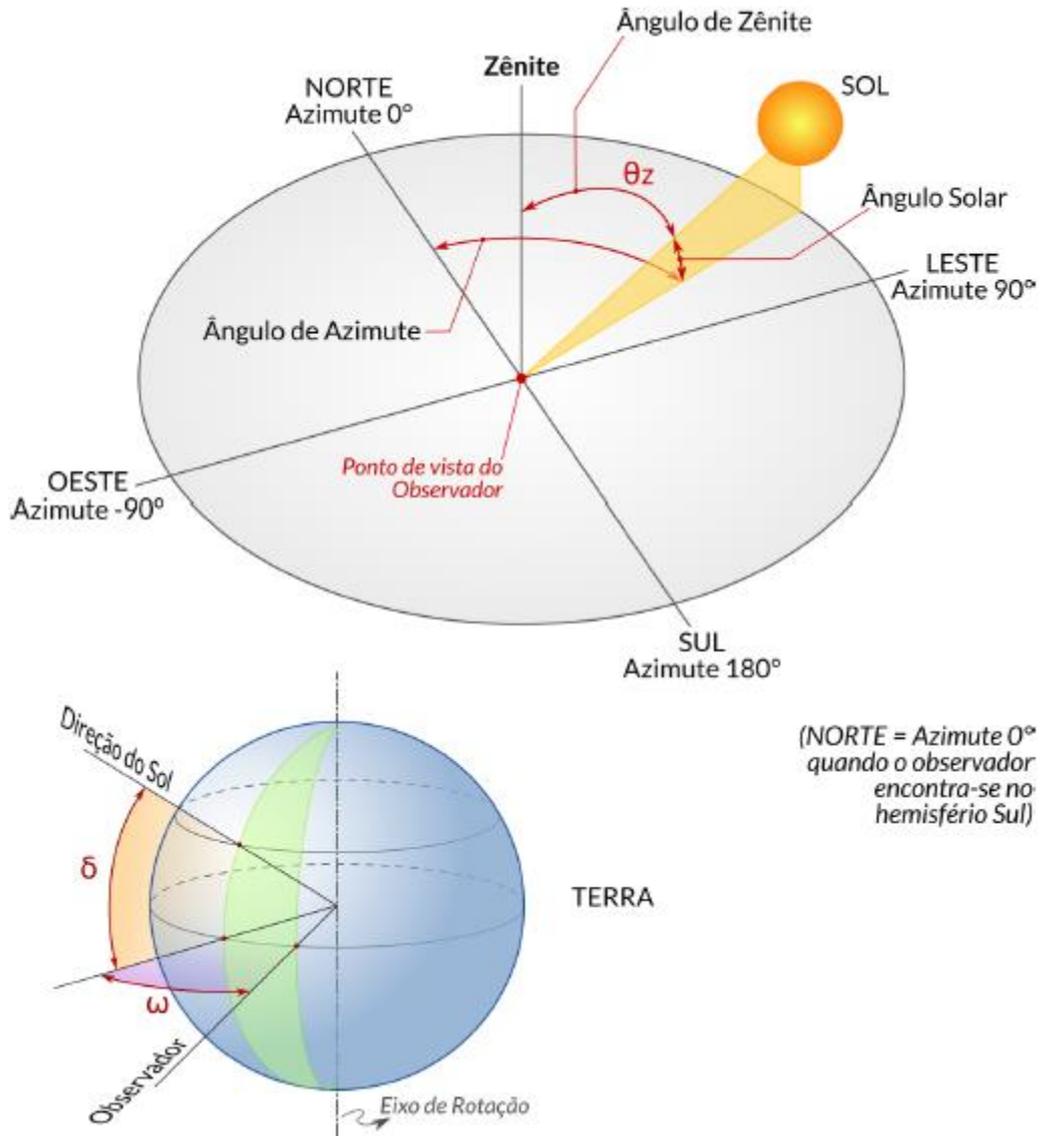
no plano horizontal, variando entre -180° e $+180^\circ$. Por convenção, o ângulo é positivo no sentido horário a partir da direção do norte geográfico no ponto do meridiano local. A Figura 21 apresenta todos os ângulos supracitados.

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 22 apresenta os principais processos envolvidos na radiação que incide sobre a atmosfera terrestre.

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.

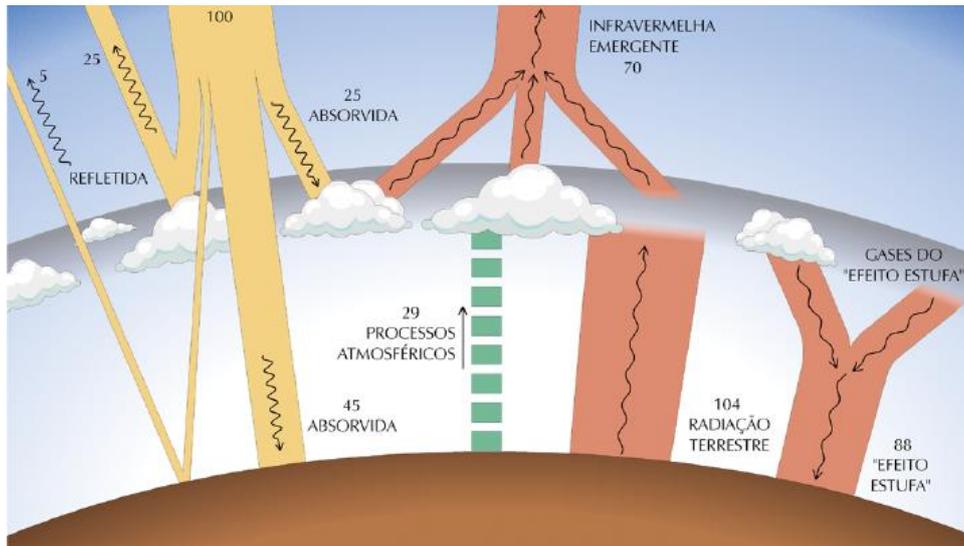
A irradiância solar, medida em watts por metro quadrado (W/m^2), incidente sobre a superfície terrestre é composta por duas componentes: a direta e a difusa. A irradiância direta representa a radiação que não sofreu os processos atmosféricos de atenuação. A irradiância difusa é composta por todas as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

Figura 21 – Ângulos notáveis na solarimetria.



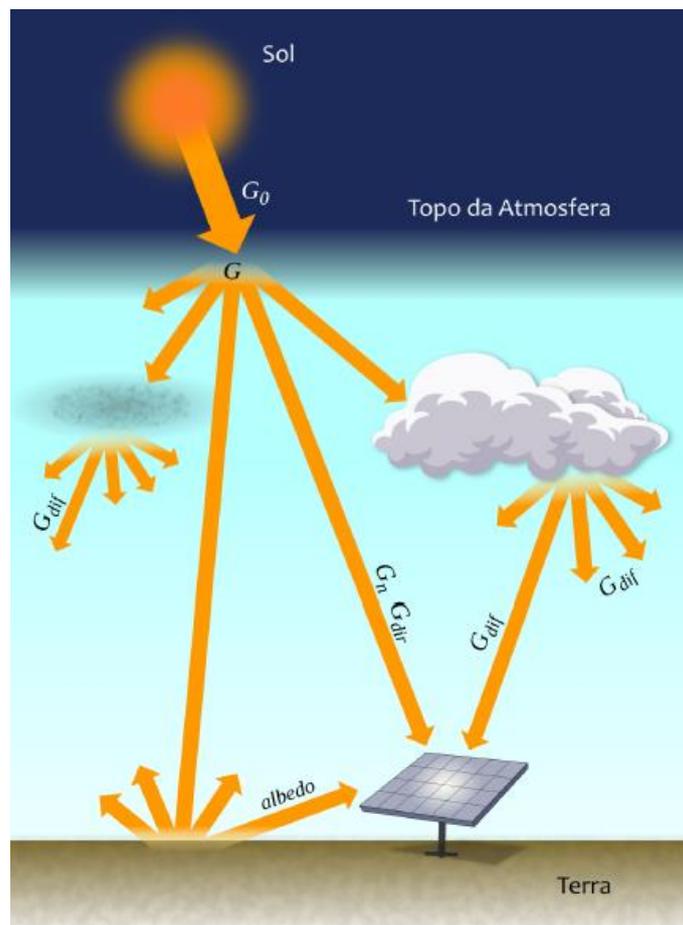
Fonte: Pereira et al. (2017, p. 16).

Figura 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).

Figura 23 – Componentes da irradiância solar.



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

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

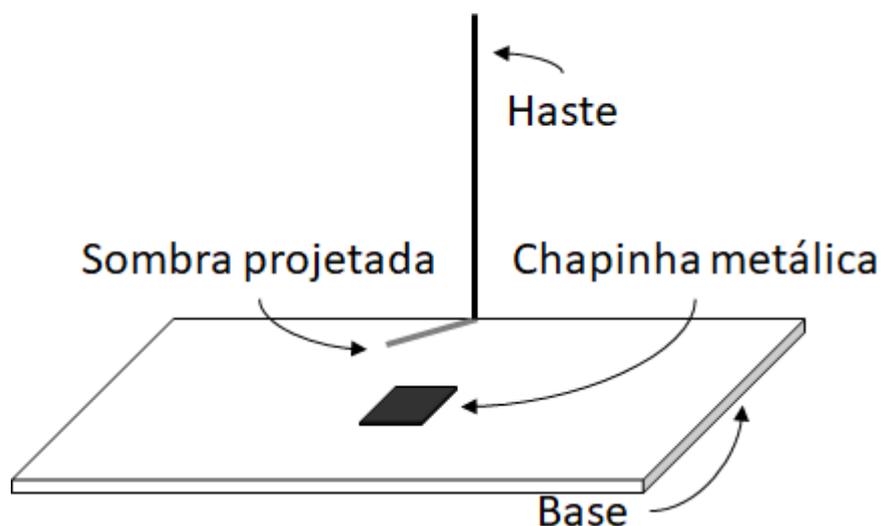
Observações:

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 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, utilizaremos uma adaptação da lei de Stefan-Boltzmann:

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

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:

$$T = T_C + 273 \quad (7)$$

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:

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

O resultado final da eq.(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 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

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

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

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

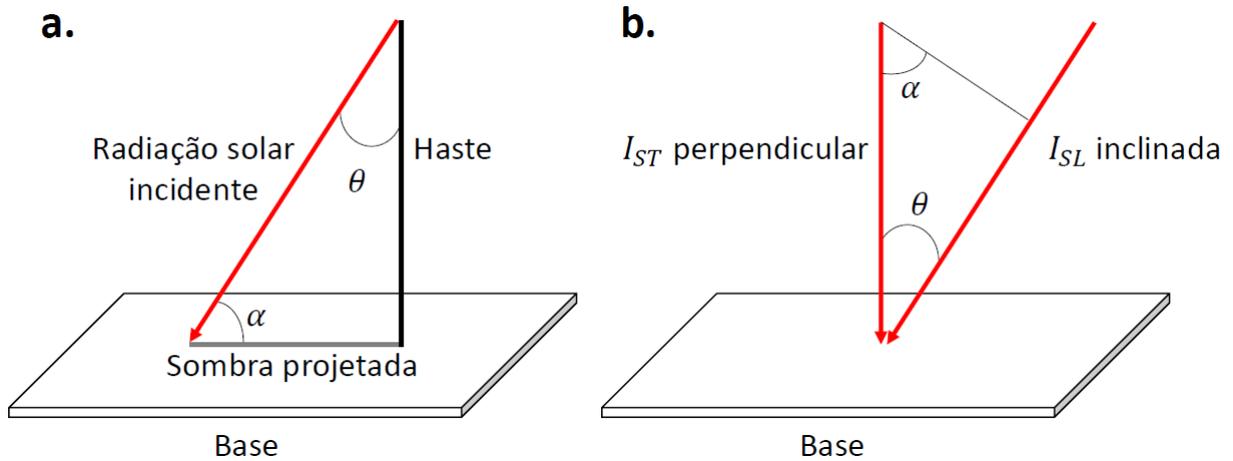
A figura 25b apresenta a relação entre a irradiância solar local I_{SL} (inclinada) e a irradiância solar total I_{ST} (perpendicular), a qual pode ser obtida através dos ângulos calculados por meio das eqs.(9) e (10), utilizando as relações

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

ou

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

Figura 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.(11) e (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 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 referentes ao experimento apresentado neste produto educacional é apresentada em (GOMES, 2019).

TABELA 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 + ... + ($x_n - \bar{x}$) 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

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

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:

$$E = mc^2 \quad (14)$$

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 (CRESEB). 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.

GOMES, T. N. P. 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, Sorocaba, 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.

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.

NUSENSVEIG, 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/portalsev2/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.

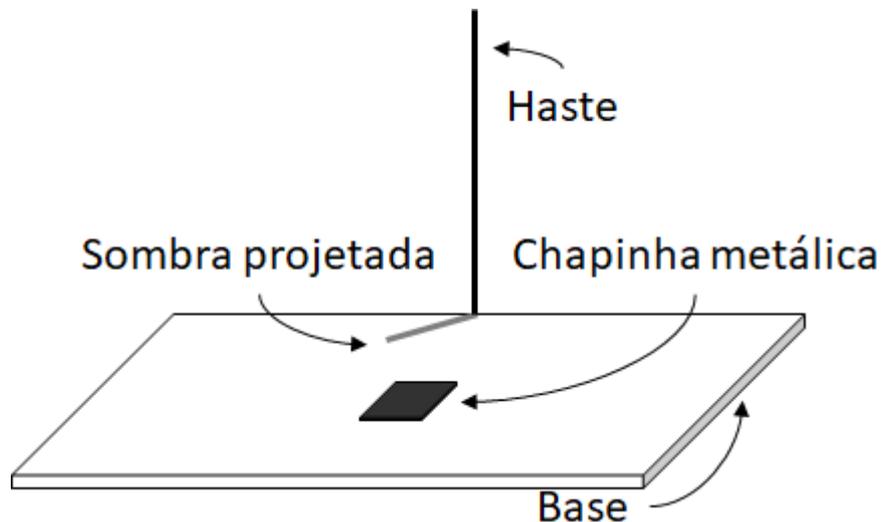
Atividade experimental:

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:

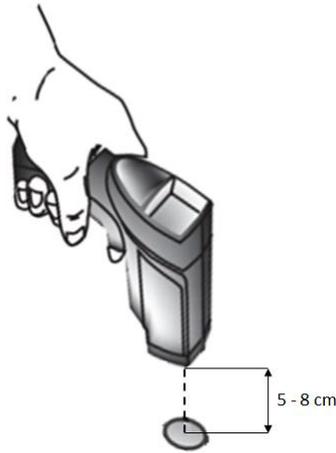
- Pinte a base de madeira e a chapinha metálica de preto fosco. ATENÇÃO: ao pintar a chapinha, utilize movimentos contínuos para evitar o acúmulo de tinta sobre o metal.
- Fixe a haste na lateral da base com fita adesiva.
- Ao final, o conjunto deve ficar como ilustrado na figura abaixo.



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:

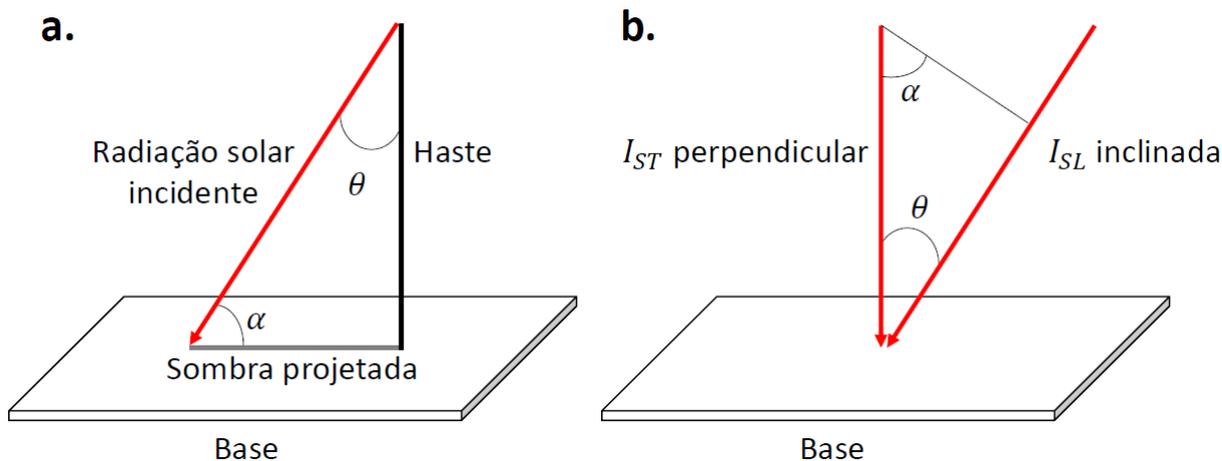
$$T = T_C + 273$$

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 irradiância 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 irradiância solar total: _____

7. Como vimos na introdução, o valor aceito para a irradiância 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.