



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

EFEITO ESTUFA NA EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS

Luan Gomes Souza

Marta Feijó Barroso

Material instrucional associado à dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

Introdução

Caro(a) professor(a),

Neste breve texto apresenta-se a sequência didática inspirada na metodologia da Aprendizagem Baseada em Equipes (*Team-Based Learning*) e Ensino sob medida (*Just-in-time Teaching*). Toda a atividade foi planejada para aplicação na turma correspondente ao último módulo da Educação de Jovens e Adultos (EJA), a fim de abordar os conceitos físicos associados ao tema Efeito Estufa. Na elaboração da atividade, foram consideradas as discussões apresentadas por outros professores e pesquisadores em relação ao tipo de metodologia a ser utilizado na EJA.

Todo o material que aqui se encontra é disponibilizado para colegas professores que desejem utilizá-lo em sala de aula bem como, adaptá-lo para novas propostas. Aqui podem ser encontrados:

- Roteiro de atividade experimental da aula piloto;
- Teste de Preparação Individual (TPI);
- Materiais em formato de apostila, contendo os conceitos principais sobre o tema.
- Problemas para aula de Resolução de Problemas em Equipes (RPE);

É possível encontrar a ordem de atividades desenvolvidas por aula na Tabela 1. A sequência didática foi aplicada ao longo de um bimestre escolar corrido contendo 1 aula semanal de 40 minutos. Caso a sequência seja utilizada em turmas com quantidade e(ou) duração de aulas diferentes, recomenda-se ampliar o tempo gasto na discussão dos materiais propostos das aulas 4 a 7, podendo também o professor privilegiar um dos tópicos que seja mais significativo para o seu grupo de estudantes.

Todas as atividades devem ser desenvolvidas durante o tempo de aula. A aula piloto foi realizada no Laboratório de Física da escola, porém sua aplicação não fica restrita apenas nesses espaços. Por possuir materiais simples é possível ser realizada na sala de aula convencional.

Para a aula 2 não foram utilizadas tarefas de leitura prévias, como as empregadas nas atividades de Ensino sob medida. O objetivo era adaptar uma maneira confortável e dinâmica para os estudantes participarem da atividade. Dessa maneira, foram utilizados vídeos disponíveis em plataformas digitais como será descrito em sua seção específica adiante.

Tabela 1: Organização das atividades desenvolvidas em cada aula. As aulas possuem um tempo igual a 40 minutos corridos.

| | Atividade desenvolvida |
|---------------|--|
| Aula 1 | Aula piloto |
| Aula 2 | Aplicação do TPI |
| Aula 3 | Discutindo o TPI + Sistema Climático Terrestre |
| Aula 4 | Estimando a Temperatura da Terra |
| Aula 5 | |
| Aula 6 | Explorando o Efeito Estufa |
| Aula 7 | |
| Aula 8 | Aula de RPE |

As respostas do TPI devem ser recebidas pelo professor e utilizadas para preparar uma breve discussão. Recomenda-se que as respostas sejam reproduzidas em sala como forma de exemplo, de maneira anônima para que não haja constrangimento.

As aulas que seguem são explicações acerca dos tópicos principais para compreensão do fenômeno de Efeito Estufa. Para a aplicação desse material pelo autor, foram elaboradas apresentações em formato de transparências que, em seguida, foram disponibilizadas para os estudantes. As apostilas para essas aulas que são encontradas a seguir, foram descritas para os estudantes como um “para saber mais”, ou seja, as apostilas entregues a classe servem como um aprofundamento dos debates, fazendo com que a aula não fique restrita a discussão de um texto prévio.

Durante a atividade de RPE, todas as equipes receberam os mesmos problemas, onde após discutirem uma solução, deveriam apresentá-las aos seus colegas de classe de maneira breve, para que críticas e/ou sugestões pudessem ser dadas.

Sumário

| | |
|---|----|
| Atividade Piloto | 4 |
| Teste de Preparação Individual | 6 |
| Materiais Instrucionais | 11 |
| Material 1 – Sistema Climático Terrestre | 12 |
| Material 2 – Estimando a Temperatura da Terra | 14 |
| Material 3 – Explorando o Efeito Estufa | 21 |
| Problemas para Resolução em Equipes | 28 |
| Cartões de Recurso | 33 |

Atividade Piloto

A atividade de abertura para essa sequência didática tem como proposta que os estudantes alcancem os objetivos de,

- Refletir sobre suas concepções de temperatura e calor; e
- Contribuir com suas ideias em uma breve atividade experimental demonstrativa.

Para que essa tarefa seja realizada com maior clareza, apresentamos a seguir os materiais utilizados, indicando onde é possível obtê-los, e os procedimentos metodológicos que podem ser adotados pelo docente frente à turma. Vale ressaltar que, ao longo da apresentação dos procedimentos, algumas questões em destaque são sugeridas para fomentar as discussões com a turma.

Na demonstração experimental são necessários os seguintes materiais:

- 5 placas de madeira (dimensões sugeridas: 10 cm x 10 cm).
- 5 placas de alumínio (dimensões sugeridas: 10 cm x 10 cm).
- 1 Termômetro Infravermelho.
- Cubos de gelo.

As placas de madeira e alumínio podem ser obtidas em lojas que trabalhem com os respectivos materiais. Não é necessário dispor de algum valor em dinheiro para obtê-las uma vez que esses estabelecimentos possuem uma quantidade de material já utilizado, destinado ao descarte. Os termômetros de infravermelho podem ser obtidos em diversas lojas de varejo em uma faixa de preço entre R\$ 35,00 e R\$ 50,00. A escolha de termômetros desse tipo é justificada por dois fatores: não necessitar de contato físico com os outros materiais envolvidos no experimento, o que aproxima o sistema como isolado de trocas de calor externo; e a facilidade na medição da grandeza temperatura.

Toda a atividade descrita a seguir foi desenvolvida em sala de aula e está organizada para ter duração de 1 tempo de aula, equivalente a 40 minutos corridos, em uma turma do último módulo da EJA. As questões sugeridas para discutir esse experimento podem ser impressas e distribuídas aos estudantes, para que possam acompanhar e fazer anotações pessoais.

Procedimentos

Iniciamos essa aula fazendo um breve sorteio de 5 estudantes que serão, num primeiro momento, os experimentadores. Esse sorteio pode ser feito de diferentes maneiras – a tradicional (papéis com os números) ou um site genérico de sorteio numérico.

Cada um dos estudantes sorteados deve segurar em uma das mãos uma placa de cada material (madeira e alumínio); assim cada um terá consigo um par de placas. Feito isso, provoque uma discussão com perguntas como as exemplificadas:

| | |
|-------------------|--|
| Professor: | Como vocês descreveriam as temperaturas das placas? |
| Professor: | Vocês são capazes de estimar um valor de temperatura para cada uma das placas? |

Após ouvir e registrar as respostas dos estudantes, utilize o termômetro infravermelho para medir a temperatura de cada um dos pares de placas que se encontram com os estudantes.

O intuito aqui é perceber se há contraste entre as respostas das perguntas acima e o valor marcado pelo termômetro. Nesse momento deve ser introduzido o mecanismo de **sensação térmica** que o corpo humano possui e discutir se o tato permite medir com alguma precisão a temperatura dos objetos.

Finalizada essa etapa, peça para que os estudantes se organizem em grupos à sua escolha. Observe que a quantidade de grupos deve coincidir com a quantidade de pares de placas disponíveis. Coloque sobre a mesa de cada grupo as placas e sobre elas alguns cubos de gelo. Peça aos estudantes que observem o derretimento do gelo sobre as placas; um intervalo de 30 segundos é suficiente para notarmos o efeito desejado.

A discussão deve ser orientada por perguntas como as exemplificadas:

| | |
|-------------------|---|
| Professor: | O gelo sobre as placas derrete com a mesma rapidez? (Se sua resposta foi “não”, diga sobre qual placa o derretimento é mais rápido) |
| Professor: | Coloque agora um cubo de gelo sobre sua mão, e compare com a rapidez de derretimento das placas. |
| Professor: | Com base nas suas observações, caso haja uma diferença entre a rapidez de derretimento, o que poderia provocar esse efeito? |

A atividade piloto se encerra com a discussão envolvendo a diferença entre dois conceitos: temperatura e condutividade térmica dos materiais.

Teste de Preparação Individual

O teste de preparação individual deve ser precedido pela exibição de dois vídeos disponíveis na plataforma *YouTube*. As informações sobre eles estão na Tabela 2.

Tabela 2. Informações sobre os vídeos utilizados previamente à aplicação do TPI.

| | | |
|----------------|---|---|
| Vídeo 1 | <i>What is the GreenhouseEffect?</i> (O que é o Efeito Estufa?) | |
| | Autor: | NASA Space Place |
| | Disponível em: | https://www.youtube.com/watch?v=SN5-DnOHQmE&t=5s |
| Vídeo 2 | Você sabe a diferença entre EFEITO ESTUFA, AQUECIMENTO GLOBAL e MUDANÇA CLIMÁTICA | |
| | Autor: | Instituto de Física da USP |
| | Disponível em: | https://www.youtube.com/watch?v=RKQZrDcxUXA&t=24s |

O vídeo 1 é encontrado apenas na versão em inglês, contudo a tradução automática¹ fornecida pela própria plataforma é suficiente para obter uma boa compreensão das informações. Como os estudantes não terão acesso prévio aos vídeos, é recomendado que haja mais de uma reprodução durante a aula.

Para o caso da aplicação deste trabalho, foram separados três momentos de exibição, com intervalos de 10 minutos entre si que eram feitas junto a resolução do TPI pelos estudantes. Dessa forma a dinâmica da aula fica descrita conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Dinâmica adotada na aula, relacionando o tempo gasto para realização de cada atividade.

| Tempo decorrido | O que é feito? |
|------------------------|---|
| 5 minutos | Explicação da atividade + distribuição do TPI |
| 15 minutos | 1ª exibição dos vídeos |
| 25 minutos | 2ª exibição dos vídeos |
| 35 minutos | 3ª exibição dos vídeos |
| 40 minutos | Finalização da atividade |

¹ Nos reprodutores de vídeo do *YouTube*, especificamente a versão mais atual, conta com um ícone representado pelas letras CC (*Closed Caption*); basta clicar sobre esse ícone e a tradução automática aparecerá.

Teste de Preparação Individual – Questionário

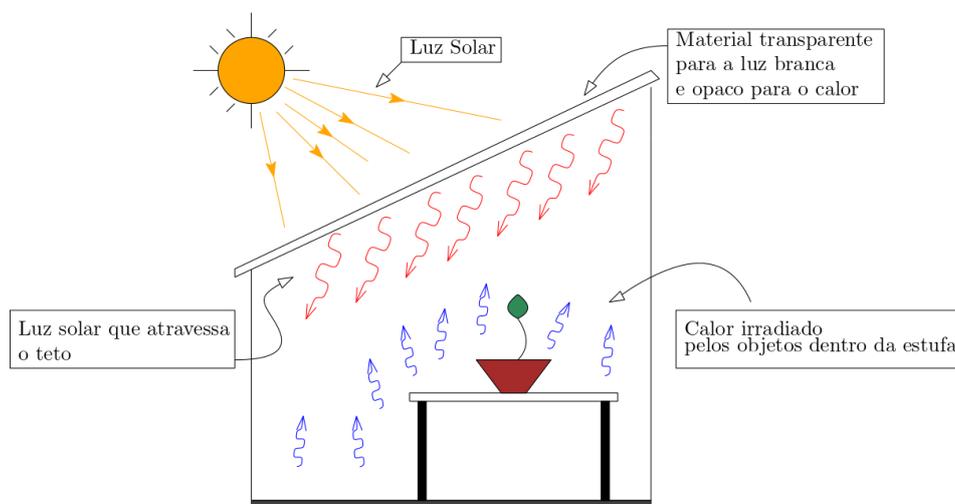
Questão 1: Você gostou dos vídeos apresentados?

Sim Não

Questão 2: Ao assistir os vídeos você encontrou alguma dificuldade em compreender os assuntos abordados?

Questão 3: O que nos vídeos mais te chamou atenção?

Questão 4: A ilustração abaixo mostra esquematicamente o funcionamento de uma estufa de flores.



Marque as afirmativas que você julga verdadeiras.

- Como o material na parte superior da estufa é opaco para o calor, a temperatura dentro da estufa é menor que sua temperatura fora dela.
- Parte da luz que atravessa a estufa é absorvida pelos objetos na parte de dentro, e reemitida na forma de calor.
- O ar dentro da estufa se aquece porque o calor do Sol é absorvido pelos objetos em seu interior e, depois, redistribuído por todo o seu volume.
- A estufa absorve calor do Sol, aprisionando-o em seu interior, ocasionando um aumento em sua temperatura interna.

Questão 5: Três pequenos produtores agrícolas desejam construir estufas em suas propriedades. Cada um deles reside em uma região diferente do Brasil; na tabela a seguir encontram-se algumas características dessas regiões.

| Produtor | Região | Clima | Irradiação Solar (u.E.) | Umidade Relativa | Precipitação |
|-----------|--------------|----------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| João | Norte | Tropical | 5642 | 90% | Abaixo da média |
| Francisco | Nordeste | Semi-árido | 5880 | 50% | Abaixo da média |
| Carlos | Centro-Oeste | Tropical úmido | 5700 | 20% | Média |

u.E.: unidades de Energia

Dados obtidos em REIS, Neville V. B. dos. Construção de estufas para produção de hortaliças nas Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Brasília: Embrapa, 2005.

Qual dos produtores terá uma estufa mais eficiente?

- João
- Francisco
- Carlos

Qual dos fatores apresentados na tabela acima tem maior influência na eficiência de uma estufa?
(Marque mais de um, se julgar necessário.)

- Região
- Irradiação Solar
- Clima
- Precipitação
- Umidade Relativa

Explique rapidamente os motivos para sua(s) escolha(s).

Questão 6:

Medindo a temperatura da Lua

“Nosso vizinho mais próximo tem uma variedade surpreendentemente ampla de temperaturas em sua superfície. [...] Durante o dia, sua temperatura próxima ao equador atinge algo próximo de 120°C , enquanto a noite, a temperatura cai para os congelantes -130°C . [...]” Adaptado de www.lunar.gsfc.nasa.gov Por ser um astro tão próximo a Terra, a Lua recebe uma quantidade de energia semelhante ao nosso planeta. Contudo, a temperatura média na superfície da Terra é de 18°C . Isso significa que existe algum fator natural que auxilia nosso planeta a manter a temperatura mais agradável do que na Lua.

A seguir estão listados alguns fatores presentes no nosso planeta. Marque aquele responsável por essa grande diferença em relação a Lua.

- Presença de oceanos.
- Presença de nuvens.
- Presença de atmosfera.
- Presença de gases de efeito estufa.
- Presença de atividade humana.

Questão 7: Observe a charge abaixo:



Fonte: <http://geografia.hi7.co/charges-cartuns-e-desenhos-sobre-meio-ambiente-56c3cde54656c.html>

De acordo com as informações discutidas nos vídeos, e sua compreensão do assunto abordado, podemos afirmar que o Efeito Estufa é um fenômeno:

- natural, porém intensificado pela ação humana.
- natural, sem ser afetado pelas ações humanas em sociedade.
- artificial, provocado por interferências humanas diretas sobre o meio ambiente.
- recente, não havendo registros de sua existência em épocas geológicas antigas.

Materiais Instrucionais

Material 1 – Sistema Climático Terrestre

Tempo e Clima

O uso de termos como clima e tempo (meteorológico) são bem difundidos em nosso cotidiano. É comum, por exemplo, olharmos o que a meteorologia diz sobre o tempo de um final de semana em que temos uma viagem planejada, ou como é o clima de uma região que pretendemos visitar. Embora os termos clima e tempo sejam intimamente relacionados, eles possuem um significado diferente.

Tempo

É o estado momentâneo em que está a atmosfera de um determinado lugar. Para determiná-lo, necessitamos medir grandezas como temperatura, umidade, precipitação, pressão atmosférica, nebulosidade, ventos e outras. O problema é que o comportamento de todas, juntas, é complicado (os cientistas chamam de “não linear”). O que isso significa? Bom, pense nelas como ingredientes culinários. Toda vez que mudamos a quantidade dos ingredientes e os misturamos, obtemos resultados diferentes. Por esta razão, o desempenho de uma previsão de tempo, em geral, decai após uma semana.

Clima

Já o clima trata de uma estatística do tempo ao longo de um grande período, uma média que varia lentamente por meses, anos ou mais. O clima de uma região é afetado pela latitude, altitude, vegetação, proximidade de grandes corpos de água e de gelo, entre outros.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), para caracterizar o clima de uma região é recomendada a utilização de dados meteorológicos de pelo menos 30 anos. O Quadro 1 indica onde pode-se obter informação adicional sobre o tema.

| |
|---|
| Para ilustrar melhor a diferença entre esses dois conceitos: |
| What's the difference between weather and climate? “Qual a diferença entre tempo e clima?” |
| Canal: NASA ClimateChange |
| Link: https://www.youtube.com/watch?v=vH298zSCQzY |
| Leitura recomendada: |
| O que é tempo, clima e sistema climático? |
| Link: https://cienciaclima.com.br/tempo-clima-e-sistema-climatico/ |

Quadro 1. Diferença entre tempo e clima

Sistema Climático Terrestre

O sistema climático do nosso planeta é composto por alguns componentes que estão em constante interação.

- A Atmosfera, composta pelo ar seco e vapor de água, com aproximados 100 quilômetros de espessura.
- O Oceano, cobrindo cerca de 70% da superfície terrestre e, com uma profundidade média de 4 quilômetros.
- Camadas de gelo e neve, normalmente encontradas nos polos, compõem a Criosfera.
- A Biosfera, contendo todos os seres vivos tanto na terra, quanto no mar.
- Por fim, a Litosfera, que representa a parte sólida do planeta, como os continentes.

Esses componentes interagem entre si basicamente por trocas energéticas; como isso funciona? A fonte de energia principal da Terra é o Sol. Essa energia é afetada pela presença de gases, aerossóis e nuvens na atmosfera. Dessa forma, a composição de elementos que formam a atmosfera afeta o aquecimento e o resfriamento do planeta, alterando a circulação do ar e o movimento dos mares, o que impacta diretamente a biosfera e a Criosfera. A Figura 1 pode ser usada como ilustração dessas interações.

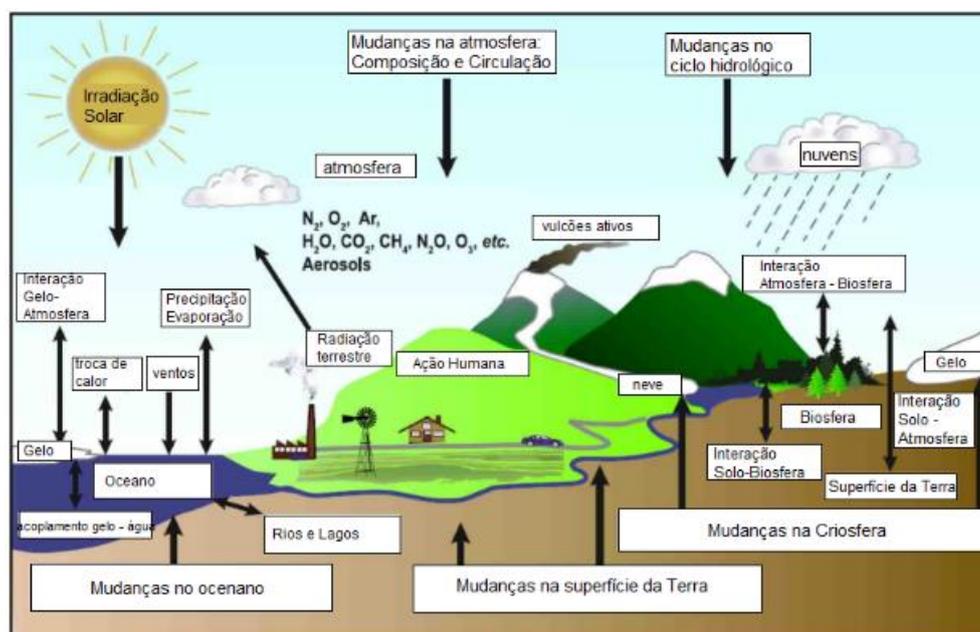


Figura 1. Esquema ilustrativo dos componentes do sistema climático terrestre e suas interações. (Fonte: Traduzido de SCHMITTNER, A. Introduction to Climate Science. Oregon: Oregon State University, 2020, versão do autor)

A ação humana impacta diretamente o sistema climático do planeta, pelo aumento da produção de gases estufa, aerossóis, e pelo uso pouco adequado da terra.

Material 2 – Estimando a Temperatura da Terra

Quando desejamos estimar a temperatura de algum objeto, intuitivamente aproximamos a palma de nossa mão, e conseguimos concluir se ele está quente ou frio em relação ao nosso corpo. Se precisarmos saber o valor de a temperatura, podemos utilizar um termômetro de farmácia, por exemplo. Esses procedimentos são bem úteis quando lidamos com situações do nosso cotidiano.

Contudo, agora vamos dar um novo passo: o que fazer, se quisermos saber qual a temperatura do planeta Terra? Usar instrumentos convencionais não mais ajudarão nessa tarefa, o que pode dar a impressão de que é impossível responder essa pergunta. Entretanto, há uma solução na qual, com algumas informações e conceitos físicos, conseguimos encontrar uma resposta. Nos tópicos subsequentes vamos responder algumas perguntas que, ao final, ajudarão a determinar de fato qual é a temperatura do nosso planeta.

Pergunta 1: *Quais as fontes de energia que aquecem o planeta Terra?*

O principal fornecedor de energia para a Terra é o Sol (figura 2). Em sua totalidade a energia que o Sol emana é calor, na forma de luz. Há uma segunda fonte de calor cuja origem é o próprio planeta Terra, conhecida como energia Geotérmica. Produzido no núcleo do planeta, o calor geotérmico é uma fonte bem primitiva, que acompanha o planeta desde sua formação.

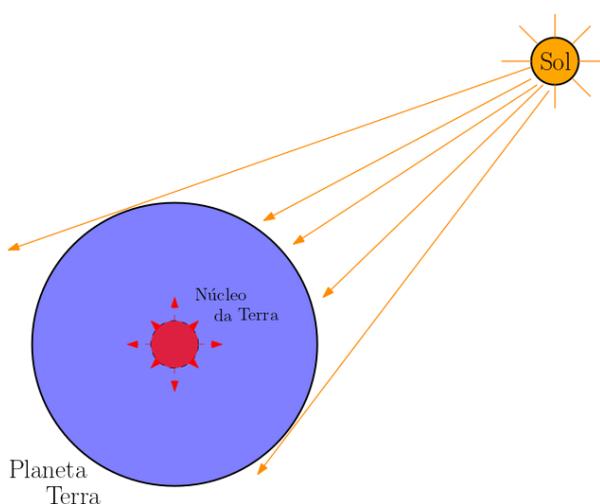


Figura 2: Fontes de energia na forma de calor do planeta Terra. A principal fonte é a estrela do nosso sistema solar, o Sol, responsável por iluminar e aquecer não só a Terra, mas outros planetas próximos. Uma fonte secundária vem do núcleo do nosso planeta; essa energia é conhecida como Geotérmica. Um comparativo mostra que a energia proveniente do Sol é ordens de grandeza maior que a do núcleo, por esta razão, não levaremos em conta a energia Geotérmica no desenvolvimento do problema. (Imagem produzida pelo autor)

Em termos numéricos, a energia proveniente do Sol é equivalente a aproximadamente 1361 W/m^2 .

Mas o que esse valor significa? Imagine que você tenha em mãos uma bacia de 1 metro comprimento por 1 metro de largura, totalizando uma área de 1 metro quadrado (1 m^2), como na figura 3. Ao deixá-la exposta ao Sol, você irá observar que, com o passar do tempo marcado pelo relógio, a água terá aumentado de temperatura. O valor de energia que o Sol forneceu à essa porção de água, para que ela pudesse aquecer foi de 1361 unidades a cada segundo.

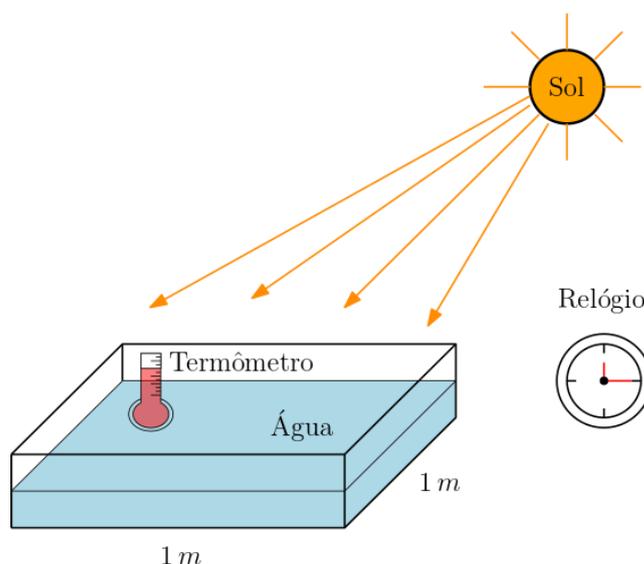


Figura 1: Esquema ilustrativo da quantidade de energia emitida pelo Sol. Essa ilustração pode ser realizada através de uma atividade experimental. Mas atenção, ao fazer isso torna-se necessário fazer algumas correções de latitude e ângulos de incidência dos raios solares. (Imagem produzida pelo autor)

Já a energia geotérmica é da ordem de $0,1 \text{ W/m}^2$. Esse valor é muito menor se comparado com a energia proveniente do Sol, e por essa razão ele não irá influenciar no desenvolvimento do problema.

Pergunta 2: *Como ocorre a interação energética entre a Terra e o Sol?*

Existem algumas maneiras de transmitir energia sob forma de calor. A que descreve a interação entre Terra e Sol é a Radiação ou irradiação térmica. De maneira objetiva, quando um corpo qualquer está à uma certa temperatura, ele passa a emitir energia térmica na forma de luz. Dependendo do valor de temperatura atingido, esse corpo pode: derreter, ao alcançar seu ponto de fusão; aquecer o ambiente emitindo radiação infravermelha; ou emitir luz visível através do brilho. Informações adicionais podem ser encontradas no material apresentado no Quadro 2.

| Sugestão de vídeo experimental | |
|--------------------------------|---|
| Canal: | Física na Prática |
| Título: | Transferência de Calor: Radiação |
| Link: | https://www.youtube.com/watch?v=xbaejX3j1z8 |

Quadro 2. Sobre transferência de calor.

A irradiação térmica não é apenas importante para recebermos a energia proveniente do Sol, mas também para manter a temperatura do planeta estável. O que queremos dizer com isso? Se o planeta Terra apenas recebesse, constantemente, a energia do Sol, seu comportamento seria apenas aumentar de temperatura cada vez mais. Entretanto, sabemos que esse fenômeno não acontece, o que significa dizer que, na mesma medida que recebemos energia, também perdemos energia, o que é ilustrado na Figura 4.

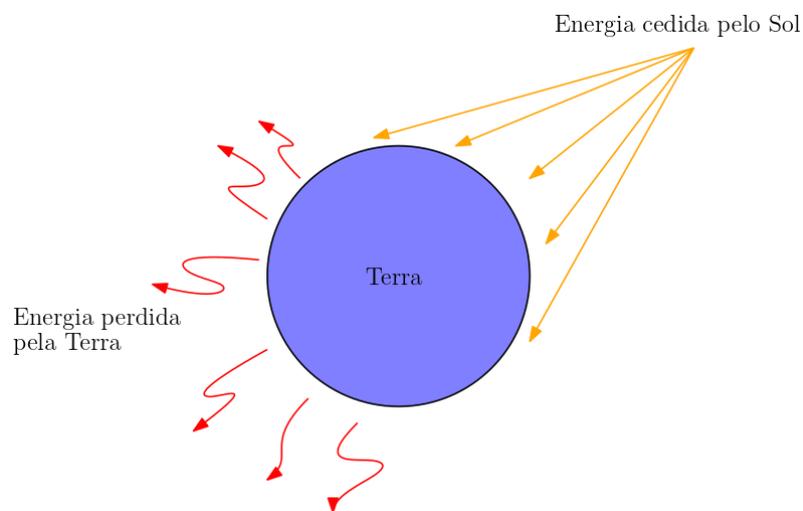


Figura 2. A energia que a Terra absorve deve ser perdida a uma mesma taxa. Caso contrário, a temperatura do planeta iria aumentar cada vez mais. (Imagem produzida pelo autor)

Esse é o principal mecanismo que devemos considerar quando desejamos estimar a temperatura do planeta. Esse mecanismo é chamado de Balanço Energético da Terra, e pode ser escrito através da igualdade

$$E_{Sol} = E_{Terra}$$

onde E_{Sol} representa a quantidade de energia absorvida do Sol, e E_{Terra} representa a quantidade de energia que o planeta, por sua vez, emite em direção ao espaço.

Pergunta 3: Qual a quantidade de energia que a Terra absorve do Sol (E_{Sol})?

Como já comentado, a fonte principal de energia térmica da Terra é o Sol, cujo valor é de aproximadamente 1361 unidades de energia a cada segundo incidindo sobre unidade de área. Mas que área seria essa? Se você pensou na área do planeta, está quase lá! Observe a figura 5.a; nela os raios solares irradiados atingem apenas a parte frontal do planeta, que está de frente para o Sol, ou seja, para um observador olhando para os dois corpos, haverá uma região iluminada e uma não iluminada, como mostra a figura 5.b.

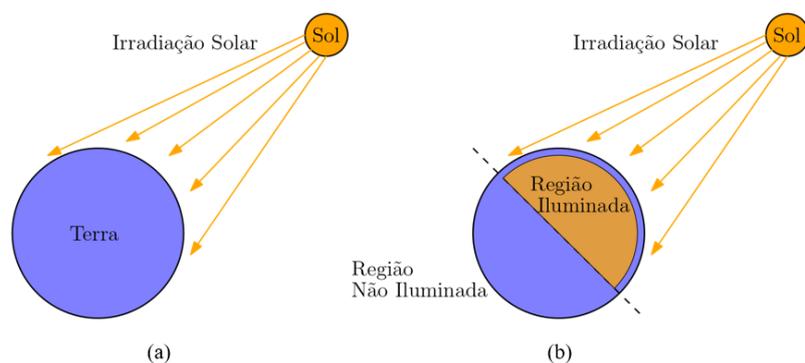


Figura 3: (a) Irradiação solar sobre a superfície do planeta; nela vemos que os raios solares não atingem todas as partes do planeta simultaneamente. (b) A consequência disso é que sempre irá haver uma região iluminada, que pode ser entendida como o período diurno para os países daquela parte, e uma região não iluminada, que representaria o período noturno para o resto dos países.
(Imagem produzida pelo autor)

Agora, um observador no Sol, ao olhar para a face iluminada da Terra, o que ele observaria? Um círculo! A área desse círculo é aquela que recebe a energia cedida pelo Sol, como na figura 6.

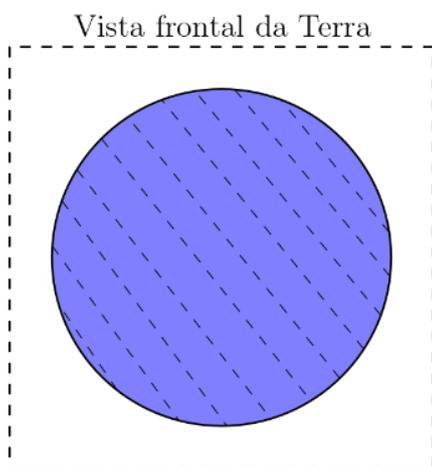


Figura 4: Essa ilustração representa a visão de um observador colocado no Sol ao olhar para a Terra. A figura que ele irá observar é uma visão frontal do planeta, representada por uma circunferência. (Imagem produzida pelo autor)

É importante ressaltar que embora apenas uma face da Terra receba a luz do Sol, o planeta como um todo é aquecido. Essa porção de área irradiada representa apenas $\frac{1}{4}$ do total da área da superfície da Terra.

Como o planeta possui um movimento de rotação em torno do seu próprio eixo, o total de energia solar absorvida pelo planeta será a quarta parte da energia irradiada sobre a área iluminada. Assim,

$$\text{Energia Solar Absorvida} = \frac{1361}{4} = 340,25 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Como todo sistema real, a absorção de energia pela Terra possui perdas. Elas ocorrem basicamente por reflexão que a luz do Sol sofre na superfície do planeta, na atmosfera ou nas nuvens, como esquematizado na figura 7. Essa quantidade refletida de energia recebe o nome de albedo.

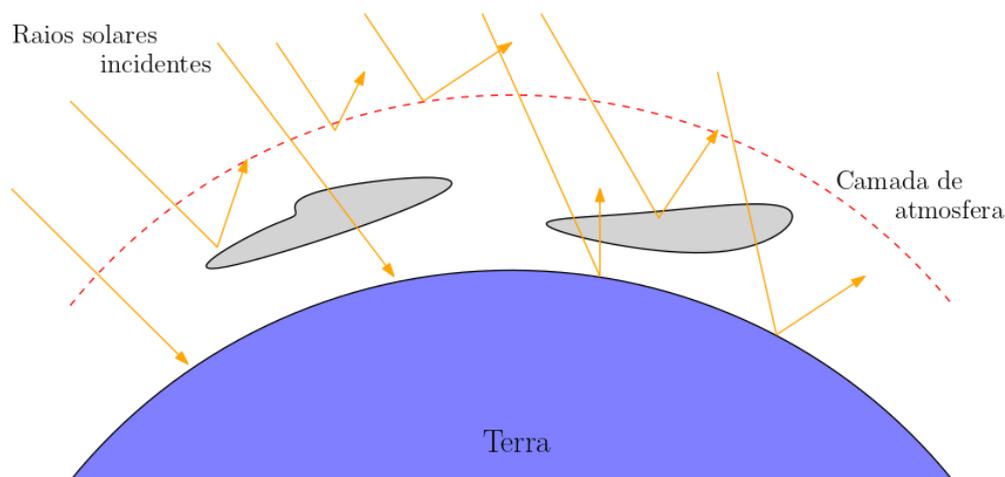


Figura 5. Perdas de energia por reflexão (albedo). Nesse esquema vemos as possibilidades de reflexão da luz: na superfície do próprio planeta; na atmosfera, representada pela linha pontilhada; e nas nuvens. Lembra-se que também há uma parcela que consegue ser absorvida pela superfície.
(Imagem produzida pelo autor)

O albedo sempre será descrito como uma porcentagem do total de energia refletida que chega do Sol. Em geral, para nosso planeta, a perda devido ao albedo corresponde cerca de 30%, ou seja, apenas 70% da energia é de fato absorvida pela Terra.

Desse modo, a quantidade de energia que a Terra absorve será:

$$E_{\text{Sol}} = \text{Energia Solar Absorvida} \times \text{Perdas pelo Albedo}$$

$$E_{\text{Sol}} = 340,25 \times 0,7$$

$$E_{\text{Sol}} = 238,175 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Pergunta 4: Qual a quantidade de energia emitida pela Terra (E_{Terra})?

Uma vez totalmente aquecida, a Terra necessita liberar energia novamente; caso contrário, ela não pararia de esquentar. A maneira pela qual o planeta emite de volta para o espaço a radiação na forma de calor ocorre de forma gradual. O calor é mais intenso próximo a superfície e vai se dissipando em direção ao espaço, como mostrado na figura 8.

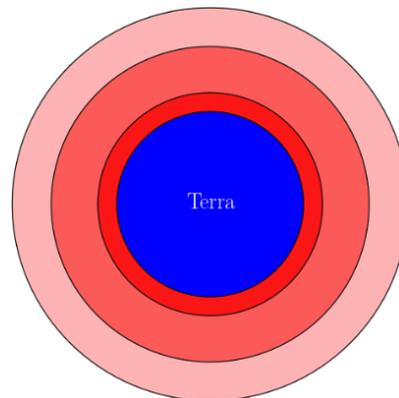


Figura 6: Calor irradiado pela Terra. A energia emanada é mais intensa nas proximidades da superfície do planeta e decai conforme segue em direção ao espaço. (Imagem produzida pelo autor)

Para determinar a quantidade de energia que um corpo aquecido irradia, é necessário que utilizemos uma importante lei física, formulado no final do século 19, pelos físicos Jozef Stefan e Ludwig Boltzmann. Essa lei diz que a energia irradiada de um corpo é proporcional à quarta potencial da temperatura em que ele se encontra.

$$\text{Radiação Emitida} = \sigma \times T^4$$

onde T representa a temperatura na qual o corpo se encontra e a letra grega σ (leia *sigma*) é uma constante que indica a proporcionalidade entre a radiação emitida e a temperatura. Por ser uma constante, possui um valor fixo igual a

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

Podemos agora escrever a energia emitida pela Terra (E_{Terra}) como:

$$\begin{aligned} E_{Terra} &= && \text{Radiação Emitida} \\ E_{Sol} &= && \sigma \times T^4 \end{aligned}$$

Pergunta 5: *Qual a temperatura do planeta Terra?*

Para responder nossa principal questão, devemos resolver o Balanço Energético da Terra, utilizando os resultados encontrados nas duas perguntas anteriores.

$$E_{Sol} = E_{Terra}$$
$$238,175 = \sigma \times T^4$$

Basta agora inserir o valor de σ e resolver para T . Ao fazer isso, obtemos que a temperatura do planeta Terra é de,

$$T = (255 K) \text{ ou } (-18^\circ C)$$

Esse valor sugere que a Terra é um planeta excessivamente frio. Entretanto, não é o que acontece na prática, e a média de temperatura do planeta gira em torno de $+15^\circ C$, muito mais quente do que calculado.

Essa conclusão esboça uma nova questão sobre a veracidade do nosso modelo. O que explica essa diferença de temperatura? E a resposta está em um dos componentes do nosso sistema climático, a atmosfera.

Material 3 – Explorando o Efeito Estufa

A maneira na qual determinamos o valor da temperatura do nosso planeta foi primeiro elaborado em meados do século 19, por Joseph Fourier. Na época, Fourier já havia notado que seus resultados teóricos não condiziam com as observações. Dessa forma, ele especulou que a atmosfera poderia ter um papel importante na determinação da temperatura do planeta, e hoje sabemos que ele tinha razão.

Para criarmos uma linha de raciocínio, vamos observar dados de planetas vizinhos, em comparação ao nosso. A seguir, na Tabela 4, observamos os dados astronômicos de Mercúrio, Vênus e Marte, além da Terra.

Tabela 4. Dados astronômicos de alguns planetas do Sistema Solar.

| | Mercúrio | Vênus | Terra | Marte |
|---------------------------------|----------|--------|--------|-------|
| Diâmetro (km) | 4.879 | 12.104 | 12.756 | 6.792 |
| Distância do Sol (milhão de km) | 57,9 | 108,2 | 149,6 | 228,0 |
| Irradiação Solar | 9082,7 | 2061,3 | 1361,0 | 586,2 |
| Albedo | 0,06 | 0,77 | 0,3 | 0,25 |

Ao traçar uma lógica, dado o parâmetro Distância do Sol, não é estranho dizer que o planeta de maior temperatura seria aquele mais próximo da estrela. Logo, teríamos Mercúrio como o mais quente entre todos. Contudo, se utilizarmos o raciocínio adotado nas aulas anteriores para determinar a temperatura dos outros planetas, obteríamos os resultados indicados na Tabela 5.

Tabela 5. Cálculo, segundo o modelo apresentado, da temperatura estimada para os planetas.

| | Mercúrio | Vênus | Terra | Marte |
|---------------------------|----------|-------|-------|-------|
| Temperatura estimada (°C) | 167,0 | -59,3 | -18,0 | -63,2 |

Em uma primeira análise, o que nos chama atenção é o fato de que Vênus seria mais fria que a Terra. A justificativa, seguindo o modelo que adotamos, é que as perdas por albedo são maiores, ou seja, uma quantidade menor de luz solar consegue alcançar a superfície do planeta. Contudo, esses resultados não condizem com a realidade. As temperaturas para esses planetas estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6. As temperaturas dos planetas.

| | Mercúrio | Vênus | Terra | Marte |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|
| Temperatura real (°C) | 167,0 | 464,0 | 15,0 | -63,0 |

Para Mercúrio e Marte, as temperaturas estimadas e medidas são bem próximas, porém para Vênus e Terra, os valores são bem discrepantes. Vênus é absurdamente mais quente que todos os outros, e a explicação disso está justamente na composição de sua atmosfera.

Um planeta que possui uma atmosfera substancial, ou seja, espessa e com uma quantidade elevada de determinados gases, tem facilidade em absorver uma porcentagem da energia irradiada pelo planeta, antes que ela alcance o espaço exterior. A Tabela 7 apresenta alguns dados da atmosfera dos planetas.

Tabela 7. A composição atmosférica dos planetas.

| | Mercúrio | Vênus | Terra | Marte |
|----------------------------|---|---|--|--|
| Pressão atmosférica (u.p.) | $0,005 \times 10^{-12}$ | 92 | 1 | 0,0064 |
| Composição Atmosférica | Hélio (42%) Sódio (42%) Oxigênio (15%) Outros (1%) | CO_2 (96%) Nitrogênio (3%) Argônio (0,007%) | Nitrogênio (78,08%) Oxigênio (20,95%) Argônio (0,93%) CO_2 (0,037%) Ozônio (0,000006%) | CO_2 (95,32%) Nitrogênio (2,7%) Argônio (1,6%) |
| u.p.: Unidades de Pressão | | | | |

Observando os valores de Pressão Atmosférica, vemos que Vênus tem uma atmosfera mais massiva que os demais planetas, seguido pela Terra. Isso implica que, embora Vênus não esteja tão próximo do Sol, sua atmosfera, somada à presença de determinados gases, absorve grande parte da radiação emitida pela superfície do planeta, produzindo uma espécie de cobertor que aumenta sua temperatura. Essas condições e suas consequências são o que conhecemos como Efeito Estufa.

O Efeito Estufa na Terra...

O modelo elaborado para o Balanço Energético da Terra está expresso na Figura 9.

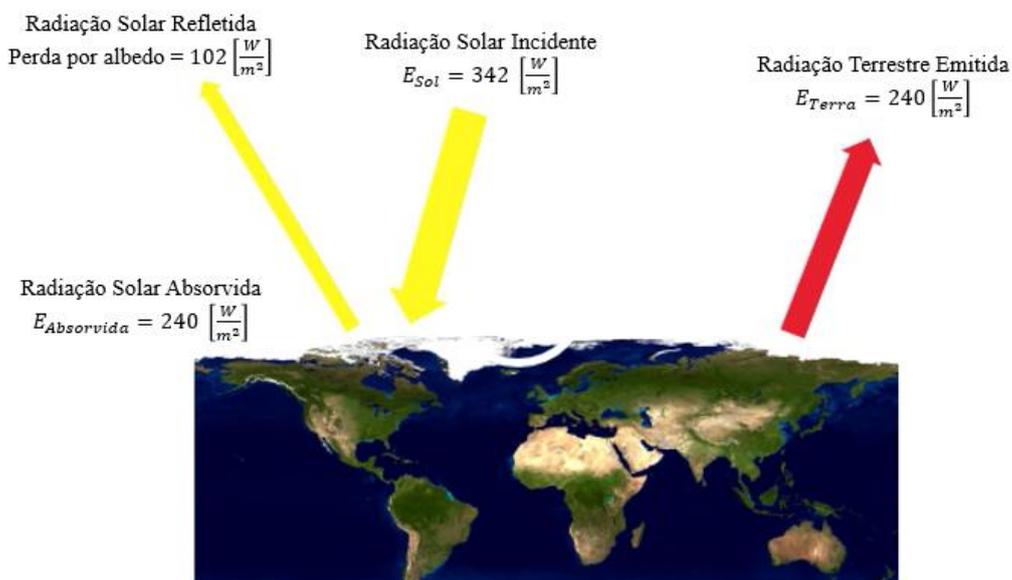


Figura 9. Modelo simplificado para o balanço energético do planeta Terra. *Introduction to Climate Science. Oregon: Oregon State University, 2020, versão do autor).*

Nele observamos a quantidade de energia solar incidente no planeta (342 W/m^2) e sua porcentagem refletida (102 W/m^2) devido ao albedo, totalizando uma quantidade de 240 W/m^2 de energia a ser absorvida. Em contrapartida, a Terra deveria irradiar uma quantidade equivalente, para que sua temperatura fosse de -15°C em média.

Contudo, como já discutido, o que experimentamos é bem diferente. Dessa forma devemos adaptar o Balanço Energético da Terra, para levar em conta os efeitos da atmosfera. Para isso, a Figura 10 nos mostra o Balanço Energético real para o planeta Terra.

O que vemos na realidade é que a atmosfera não apenas reflete parte da energia, mas também absorve. Portanto, o montante energético absorvido pela Terra está indicado na Tabela 7.

Tabela 7. A composição atmosférica dos planetas.

| | |
|---|---------------------|
| Energia Solar Total chegando no planeta | 342 W/m^2 |
| Absorção na entrada da atmosfera | -67 W/m^2 |

| | | |
|--|------------------------|-------------|
| Albedo | Reflexão na atmosfera | $-77 W/m^2$ |
| | Reflexão na superfície | $-30 W/m^2$ |
| Saldo de energia Solar absorvida pelo planeta | | $168 W/m^2$ |

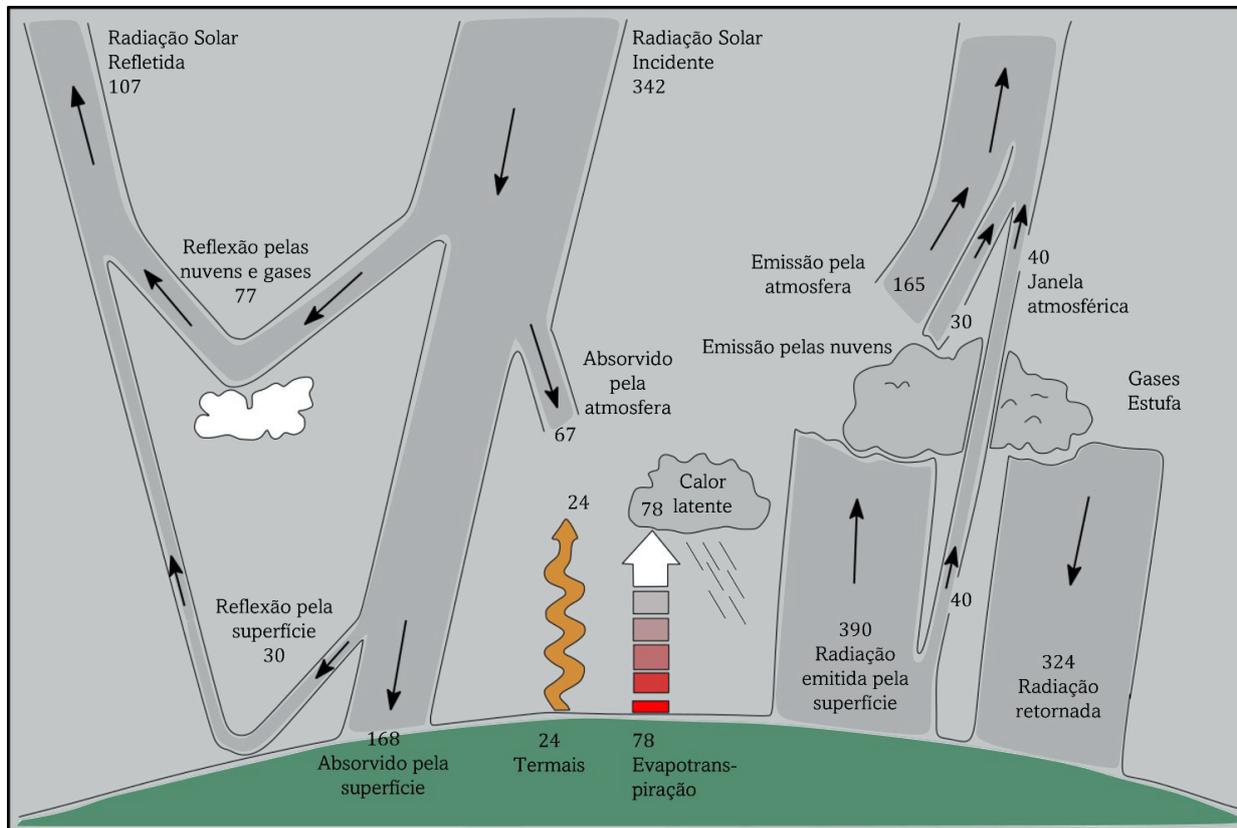


Figura 10. Modelo do balanço de energia real. (Imagem produzida pelo autor)

Ao observarmos para energia emitida pelo planeta, temos o montante energético da Tabela 8.

Tabela 8. Montante energético da Terra.

| | | |
|--|-----------|--------------|
| Energia emitida pela superfície | | $390 W/m^2$ |
| Absorção na saída da atmosfera | | $-350 W/m^2$ |
| Emissões | Atmosfera | $165 W/m^2$ |
| | Nuvens | $30 W/m^2$ |
| Saldo de energia Solar emitida pelo planeta | | $235 W/m^2$ |

Vamos analisar um pouco as informações presentes na Tabela 8. Uma grande parcela da energia emitida pela Terra é absorvida pela atmosfera em seu caminho de saída ao espaço; a pequena

quantidade de 40 W/m^2 é chamada de janela atmosférica. Além da superfície do planeta, as nuvens e a própria atmosfera reemitem energia, porém o que mais nos chama atenção é a grande quantidade de energia reemitida para baixo, ocasionada pelo que chamamos de Gases de Efeito Estufa, que é quase o dobro da energia absorvida do Sol.

Devido à presença desses gases, o cálculo da temperatura média da Terra necessita de uma ligeira correção, onde adicionaremos um fator associado a intensidade de energia que esses gases são capazes de reemitir na direção da superfície do planeta.

Assim, escrevemos:

$$\begin{aligned} \text{Energia emitida pela Terra} &= \text{Radiação emitida} \times \text{Efeito Estufa} \\ &= \sigma \times T^4 \times (1 - G) \end{aligned}$$

O fator $(1 - G)$ é a correção que necessitamos implementar na nossa equação, onde G representa a intensidade do efeito estufa. Para a Terra estima-se $G = 0,4$, e ele depende diretamente da composição da atmosfera. Por fim, o novo valor de temperatura considerando o fator de correção do Efeito Estufa é de:

$$T = (289 \text{ K}) \text{ ou } (16^\circ \text{C})$$

Esse valor de temperatura é bem próximo da média de nosso planeta. É importante ressaltar que o valor de G está contido entre 0 e 1, onde 0 representa ausência de Efeito Estufa, e 1 representa a intensidade máxima do efeito.

Gases de Efeito Estufa

Os principais gases responsáveis pelo Efeito Estufa, e que estão presentes na atmosfera da Terra, são:

- Vapor de água (H_2O);
- Dióxido de Carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido Nitroso (N_2O)
- Ozônio (O_3)

Tais gases tem a propriedade de serem ativos radioativamente à energia emitida pela Terra. Ou seja, eles absorvem a energia vinda da superfície, e a reemitem de volta em todas as direções.

Mas não se engane, o Efeito Estufa não é maléfico para o planeta! Ele é um importante fenômeno natural cuja finalidade é manter o planeta aquecido, evitando a perda de energia para o espaço. A discussão relevante é a intensificação desse efeito. E como ela é possível? Alterando a composição atmosférica, ou seja, emitindo mais gases de efeito estufa. Vamos ilustrar essa discussão utilizando como exemplo o dióxido de carbono (CO_2).

O CO_2 contribui em aproximadamente 20% no Efeito Estufa, além de ser um gás não condensável, ou seja, possui a capacidade de se estabelecer por muitos anos na atmosfera. Medições feitas em cilindros de gelo extraídos da Antártica e Groelândia mostram que o CO_2 está diretamente ligado com as eras glaciais na qual o planeta passou, como mostra a Figura 11.

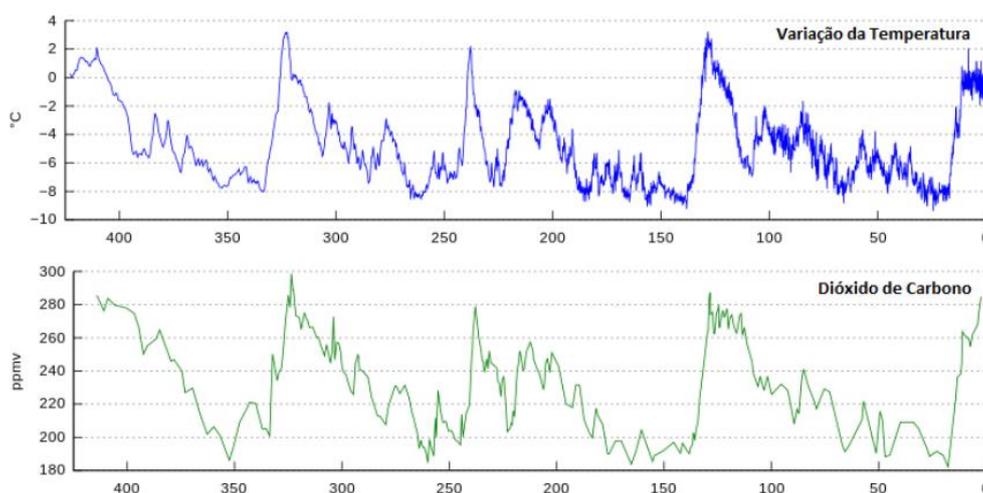


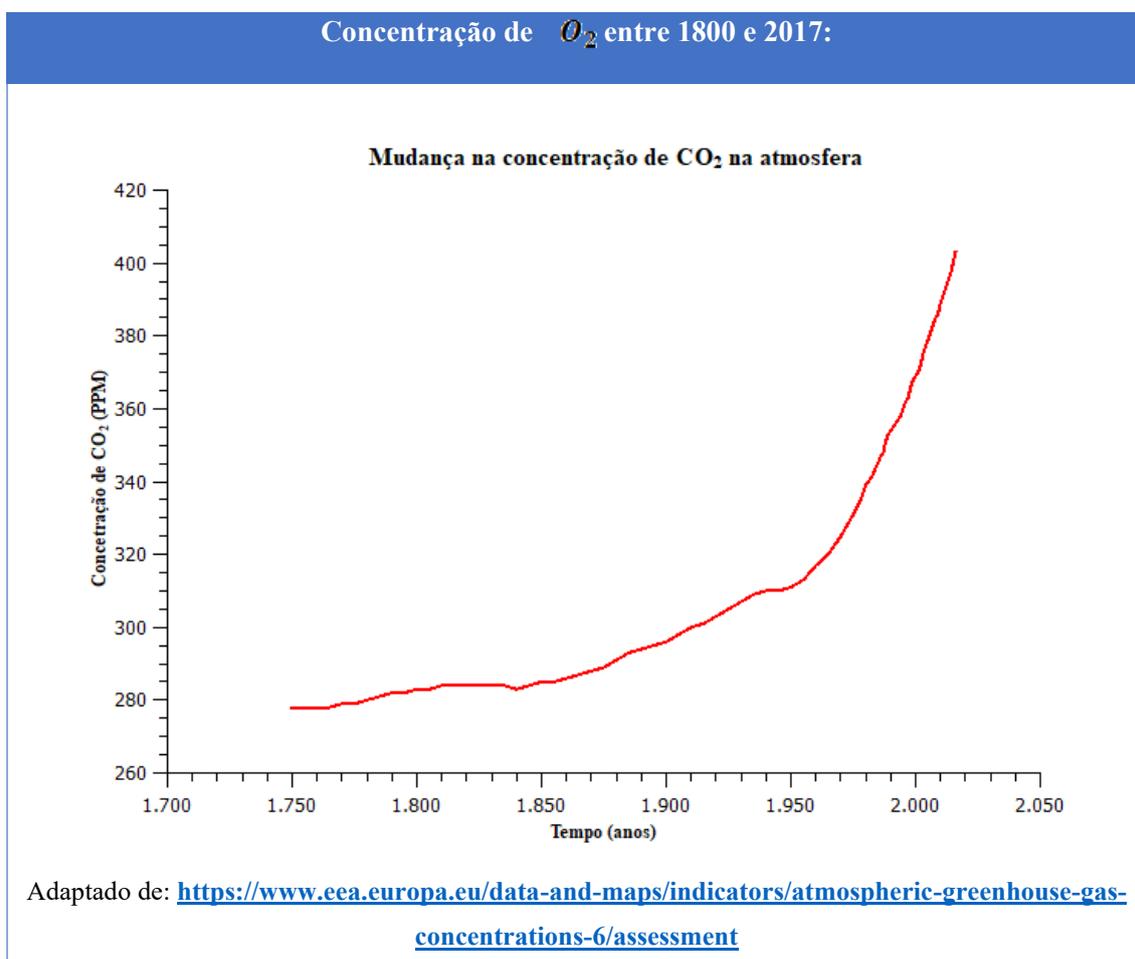
Figura 11. Relação entre a variação de temperatura da Terra em comparação a quantidade de dióxido de carbono ao longo dos anos. (Adaptado de [File:Vostok Petit data.svg - Wikimedia Commons](#))

Como observado acima, uma maior concentração de CO_2 implica num aumento da temperatura, assim como sua diminuição implica numa menor temperatura. É interessante perceber que durante o período expresso no gráfico a concentração de CO_2 na atmosfera não ultrapassou 300 ppm (partes por milhão), porém medições do observatório da NASA mostram que a concentração de CO_2 é de pouco mais de 410 ppm, que são os maiores em 650.000 anos.

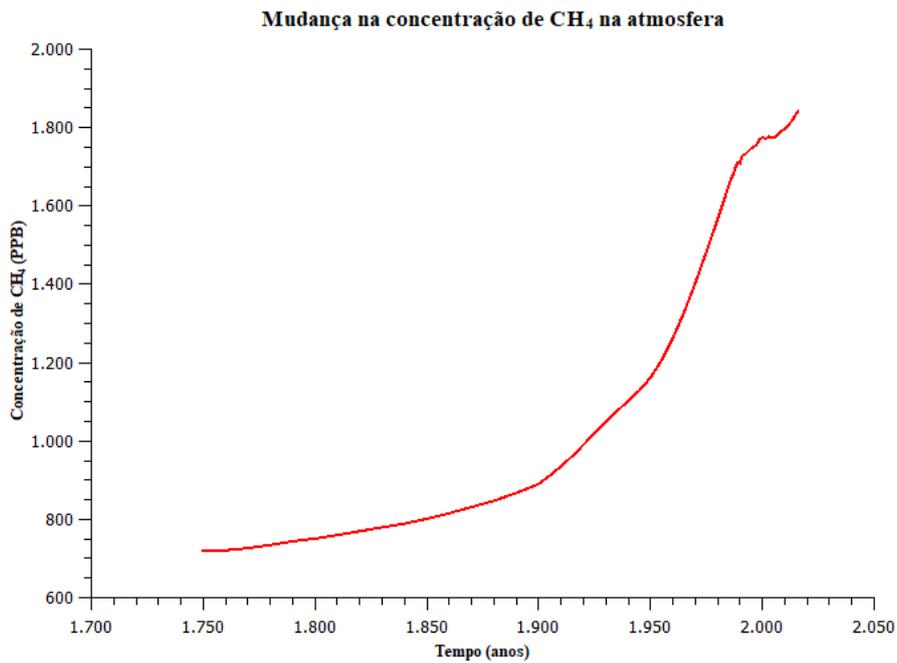
Diferentemente do dióxido de carbono, o vapor de água é um gás responsável por quase 50% do efeito estufa, e é condensável, ou seja, sua quantidade na atmosfera por ser regulada. Toda quantidade excedente de vapor de água lançada na atmosfera pode levar à formação de nuvens e chuva. Isso indica que exceder a concentração de H_2O não é suficiente para elevar a temperatura do planeta, diferentemente dos outros gases de efeito estufa. O papel do vapor de água no Efeito Estufa é o seu mecanismo de retroalimentação, ou seja, amplificação do fenômeno.

Mas o que isso quer dizer? Por exemplo, um ligeiro aumento de temperatura, causado pelo aumento de CO_2 , faz com que a atmosfera comporte mais vapor de água. Este por seu mecanismo intensifica ainda mais temperatura.

A partir da Revolução Industrial, é observada uma mudança significativa na composição da atmosfera, em especial na concentração de gases de efeito estufa. Nas Figuras 12, vamos observar a mudança na concentração de CO_2 em partes por milhão (*ppm*), e CH_4 e N_2O ambos em partes por bilhão (*ppb*).

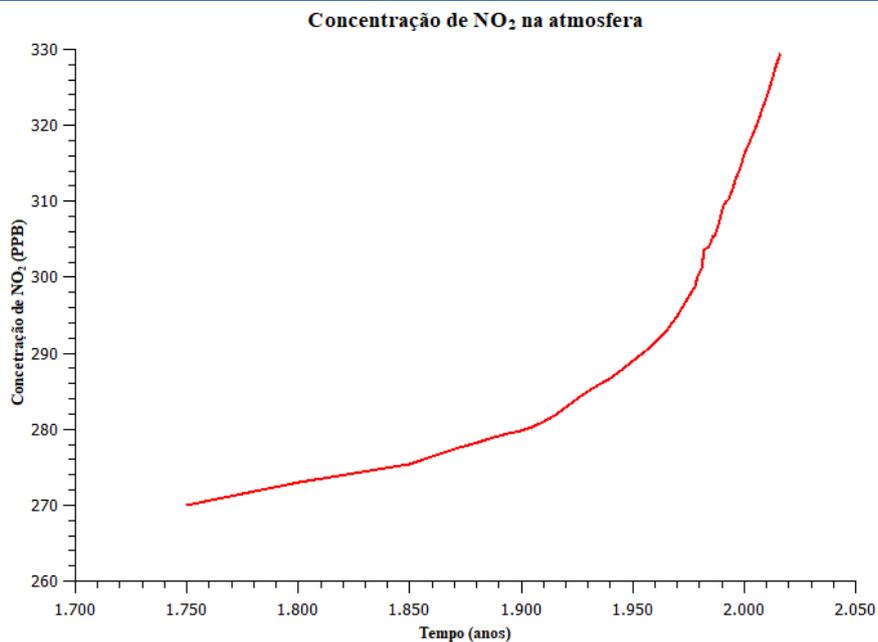


Concentração de H_4 entre 1800 e 2017:



Adaptado de: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment>

Concentração de N_2O entre 1800 e 2017:



Adaptado de: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment>

Figura 12. Mudança na concentração de CO_2 em partes por milhão (ppm), e CH_4 e N_2O ambos em partes por bilhão (ppb). As fontes são indicadas.

Problemas para Resolução em Equipes

Aqui são descritos os problemas desenvolvidos para a aula de resolução de problemas em equipe.

Foi idealizado um experimento caseiro com o objetivo de estudar a influência que a presença de dióxido de carbono (CO_2), tem na temperatura de um ambiente. O ambiente em questão é o interior de uma garrafa *pet* transparente de 600mL onde, em sua tampa, foi fixado um termômetro graduado de zero (0) à cem (100) graus celsius. Uma lâmpada de 60 watts de potência, atarraxada no soquete de um abajur, foi colocada a 10cm da garrafa para servir como fonte de luz e calor. O fundo da garrafa foi coberto por uma camada de tinta preta.

O esquema final do experimento está representado na Figura 13 a seguir.

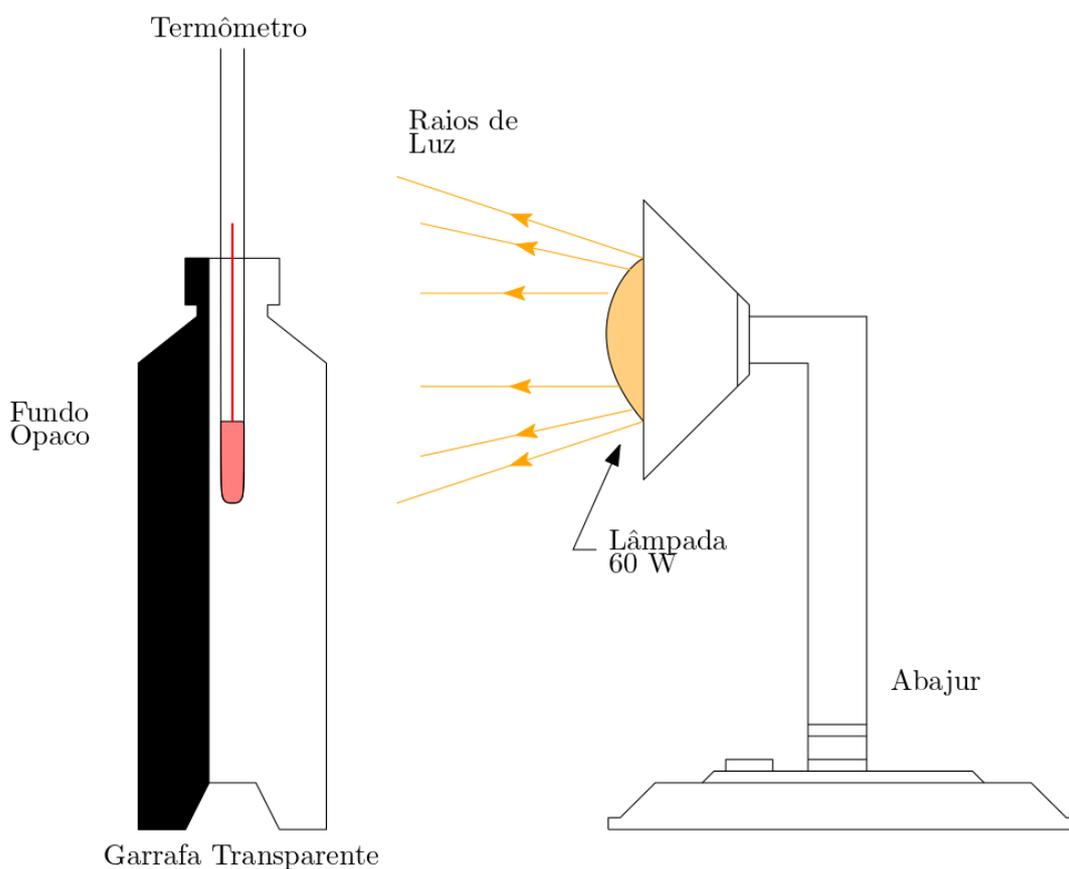
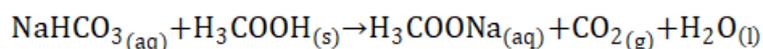


Figura 13. Esquema do experimento.

Para visualizar os efeitos do dióxido de carbono, propomos um teste comparativo entre a temperatura do ar no interior da garrafa antes e depois de ser inserido o gás, durante um intervalo de tempo igual a 5 minutos após a lâmpada ser ligada.

Dois vídeos foram feitos demonstrando o comportamento da temperatura no interior da garrafa com e sem a presença do dióxido de carbono, que podem ser encontrados no Ambiente Virtual de Aprendizagem (AVA), na página da turma de vocês².

O dióxido de carbono foi produzido pela mistura de 25mL vinagre (H₃COOH), o ácido acético diluído, e 5g de bicarbonato de sódio (NaHCO₃), colocados no interior da garrafa. Ao entrarem em contato, ocorre a formação dióxido de carbono (CO₂), além de acetato de sódio em solução e água, como descrito na reação a seguir:



Sabendo dessas informações, analisando os vídeos e, utilizando todas as discussões feitas em aula, pensem e discutam sobre os problemas a seguir, anotando ao final suas ideias.

² O vídeo pode ser visualizado em https://www.if.ufrj.br/~marta/videos/50mLAcidoAcetico_EvolucaoTemperatura_2023.mp4

Problema 1 – O que acontece com a temperatura?

Vocês devem encontrar uma explicação do porquê o comportamento da temperatura no interior da garrafa ser diferente após a inserção de CO_2 .

No **Cartão de Recurso: *Mudança de Temperatura ao longo do tempo***, vocês encontrarão as informações sobre os dados coletados através dos vídeos.

Utilizem os conceitos que aprendemos durante as aulas, como os que estão listados a seguir:

| Energia Absorvida | Calor | Albedo | Radiação |
|------------------------|-----------------|-------------|------------|
| Gases de Efeito Estufa | Energia Emitida | Temperatura | Equilíbrio |
| Atmosfera | | | |

O que foi feito...

No espaço a seguir, relatem as conclusões que a equipe teve para solucionar o Problema 1. Esta página deve ser entregue para o professor ao fim da aula.

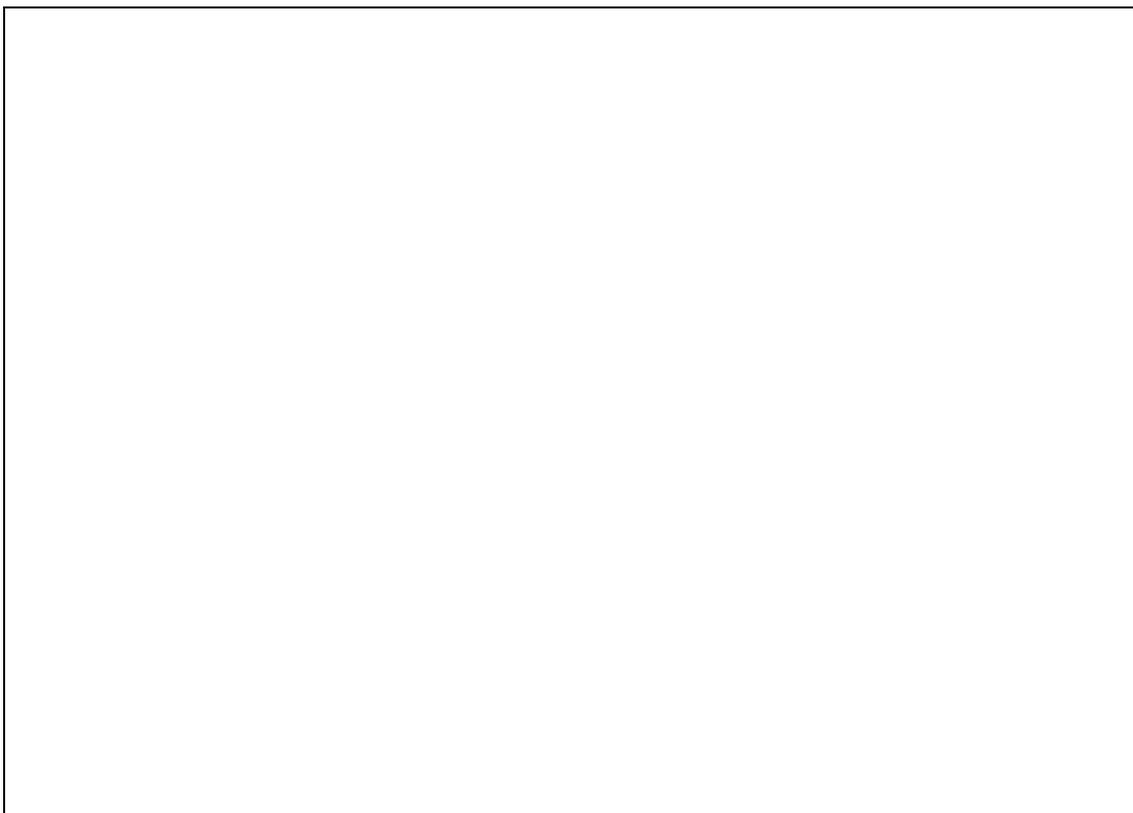
Problema 2 – O Balanço de Energia

Agora como deve ser o balanço energético desse experimento? No espaço a seguir, façam um desenho que representaria o comportamento da energia envolvida entre a lâmpada, a garrafa e o CO_2 .

Use o **Cartão de Recurso: *Balanço de Energia da Terra***, e o **Cartão de Recurso: *Esquema do Experimento***, para ajudar nas suas ideias.

O que foi feito...

No espaço a seguir, façam o desenho que solucionaria o Problema 2. Esta página deve ser entregue para o professor ao fim da aula.



Cartões de Recurso

Cartão de Recurso

Mudança de temperatura ao longo do tempo

Comportamento da Temperatura - Sem a presença de CO_2

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura (graus celsius) | 23,5 | 25,0 | 26,0 | 27,0 | 28,0 | 29,5 | 30,0 | 30,5 | 30,5 | 31,0 | 31,0 | 31,0 |
| Tempo (segundos) | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 210 | 240 | 270 | 300 |

Comportamento da Temperatura - Com a presença de CO_2

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura (graus celsius) | 24,0 | 24,9 | 26,5 | 28,5 | 29,0 | 30,0 | 30,5 | 30,5 | 31,5 | 31,5 | 31,5 | 32,0 | 32,0 |
| Tempo (segundos) | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 210 | 240 | 270 | 300 | 300 |

Cartão de Recurso

Balanco de energia da Terra

O **balanco de energia** da Terra ilustra as quantidades de energia que **entram** no nosso planeta, sendo absorvidas pela superfície ou não, e as quantidades de energia que são **emitidas** pelo planeta.

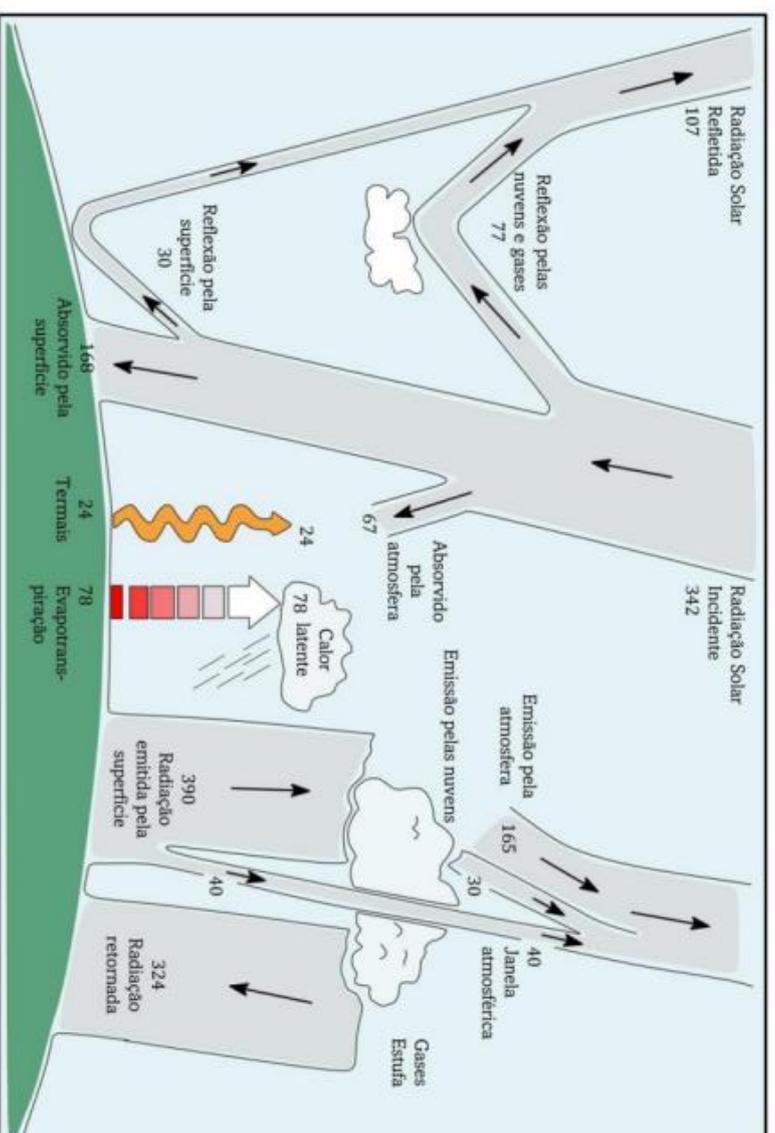
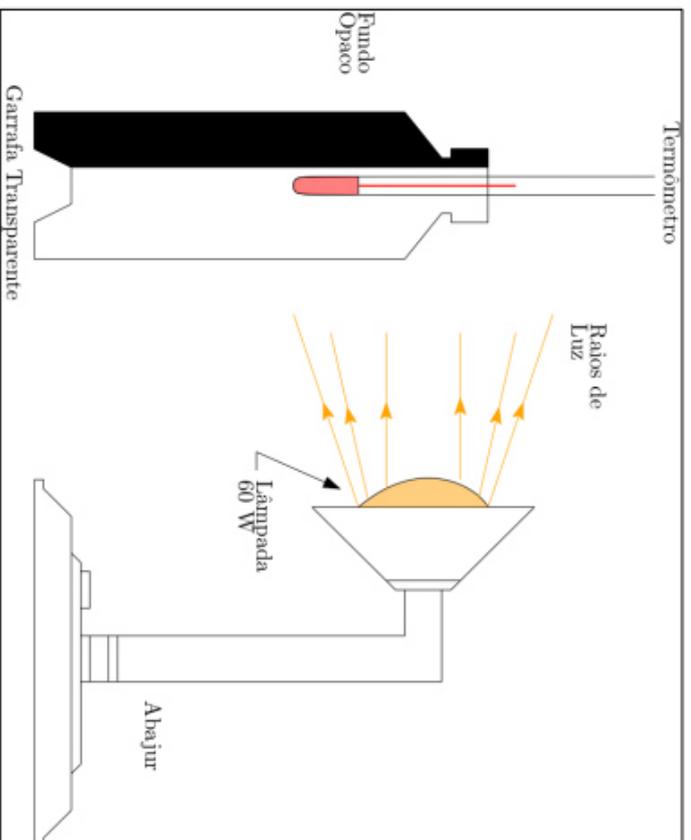


Imagem produzida pelo autor.

Cartão de Recurso

Esquema do experimento

Sem a presença de dióxido de carbono (CO_2)



Com a presença de dióxido de carbono (CO_2)

