

O “Efeito Estufa” na Sala de Aula: um experimento de baixo custo para demonstrar a absorção de radiação infravermelha por gases estufa como o dióxido de carbono⁺

Alexandre Luis Junges¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Campus Litoral Norte
Tramandaí – RS

Alexandre José Bühler¹

Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha

Neusa Teresinha Massoni¹

Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Álisson Francisco Schneider Siebeneichler¹

Licenciando em Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre – RS

Resumo

Efeito estufa e aquecimento global constituem tópicos complexos cuja compreensão requer o domínio de diversos conceitos e propriedades físicas. O mecanismo do efeito estufa está diretamente relacionado ao papel de gases estufa, como o CO₂, em absorver radiação infravermelha emitida pela Terra e, desse modo, interferir no balanço de energia da Terra. A fim de contribuir na discussão do fenômeno do efeito estufa em sala de aula, assumimos que o uso de experimentos para demonstrar a propriedade de absorção de radiação infravermelha por gases estufa apresenta forte potencial educativo. Neste trabalho, é apresentado um experimento de baixo custo e de fácil realização em sala de aula para demonstrar a absorção de radiação infravermelha pelo principal gás, não condensável, de efeito estufa da atmosfera terrestre, o dióxido de carbono (CO₂).

⁺ The "Greenhouse Effect" in the Classroom: a low cost experiment to demonstrate the absorption of infrared radiation by greenhouse gases like carbon dioxide

* *Recebido: outubro de 2019.
Aceito: abril de 2020.*

¹ E-mails: alexandre.junges@ufrgs.br; alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br; neusa.massoni@ufrgs.br; asfrankbill@hotmail.com

Palavras-chave: *Efeito Estufa; Aquecimento Global; Gases de Efeito Estufa; Dióxido de Carbono; Radiação Infravermelha.*

Abstract

Greenhouse effect and global warming are complex topics whose understanding requires mastery of various concepts and physical properties. The mechanism of the greenhouse effect is directly related to the role of greenhouse gases, like CO₂, in absorbing infrared radiation emitted by the Earth and, thus, interfere in the Earth energy balance. In order to contribute to the discussion of the phenomenon of the greenhouse effect in the classroom, we assume that the use of experiments to demonstrate the absorption of infrared radiation by greenhouse gases presents strong educational potential. In this work we present a low cost and easy to perform classroom experiment to demonstrate the absorption of infrared radiation by the main non-condensable greenhouse gas of the Earth's atmosphere, carbon dioxide (CO₂).

Keywords: *Greenhouse Effect; Global Warming; Greenhouse Gases; Carbon Dioxide; Infrared Radiation.*

I. Introdução

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera planetária devido a presença de gases como o dióxido de carbono, vapor d'água e metano que possuem a propriedade de serem transparentes à radiação visível proveniente do Sol, mas parcialmente opacos à radiação infravermelha emitida pela superfície planetária. Assim, parte da radiação infravermelha (calor) emitida pela superfície do planeta é absorvida e reemitida em todas as direções pelos gases estufa, inibindo a perda de infravermelho para o espaço e deixando a baixa troposfera mais quente (BARRY; CHORLEY, 2013; CHRISTOPHERSON, 2012, GOODY; WALKER, 1996).

São exemplos paradigmáticos o efeito estufa que ocorre no planeta Vênus e na nossa Terra. Em ambos os planetas, a temperatura média observada na superfície é consideravelmente mais alta do que seria sem a presença dos gases estufa. O forte efeito estufa de Vênus é responsável por um aumento de cerca de 500 graus na temperatura média da sua superfície. Já na Terra, embora o efeito estufa seja bem menor, ele é responsável por elevar a temperatura média da superfície de cerca de -18°C (255 K) (temperatura efetiva da Terra sem a presença de gases estufa) para 15°C (288 K) (temperatura média observada).

Vemos, assim, que o efeito estufa natural é um fenômeno essencial para a manutenção de temperaturas apropriadas para o desenvolvimento da vida no nosso planeta.

Recentemente o fenômeno do efeito estufa tem recebido uma atenção crescente em face da preocupação com o aquecimento global. Este último, muito provavelmente causado pela intensificação do efeito estufa devido às emissões humanas de gases estufa como o dióxido de carbono, resultante da queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2013). Contudo, apesar do interesse pelo tema, ainda existe uma lacuna de conhecimento entre a população sobre o mecanismo do efeito estufa e, de modo especial, o papel dos gases de efeito estufa nesse processo.

Pesquisas tem demonstrado que alunos em diversos níveis (ensino fundamental, médio e graduação), inclusive professores formados e em formação, apresentam diversos erros conceituais ou concepções alternativas no que tange a temática do efeito estufa e aquecimento global (ARSLAN; CIGDEMOGLU; MOSELEY, 2012; RATINEN, 2013; NIEBERT; GROENGIESSER, 2014).

Ao mesmo tempo, em meios midiáticos, especialmente na internet e nas redes sociais, é comum encontrarmos desinformações, bem como a disseminação de visões pseudocientíficas sobre o tema. Assim, por exemplo, podemos encontrar declarações que negam a própria existência do efeito estufa, ou ainda, que gases estufa, como o CO_2 , não absorvem radiação infravermelha². Tais declarações pseudocientíficas aproveitam-se da falta de conhecimento do leigo sobre o tema, criando um ambiente de dúvida e incerteza sobre a existência e urgência da problemática do aquecimento global (JUNGES; MASSONI, 2018).

Diante disso, o ensino de Física parece ter um papel a desempenhar no que tange a discussão e inserção da temática do efeito estufa e aquecimento global na sala de aula. De fato, sem perder de vista a importância da dimensão sociocientífica do tema, explorada em abordagens CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente) (ALBE; GOMBERT, 2018), é importante que se discuta a dimensão dos conteúdos conceituais relacionados ao tema, seja na escola básica como na formação de professores. Em especial, visando a aprendizagem do aluno sobre as propriedades físicas dos gases estufa e o reconhecimento do potencial desses gases em interferir no balanço de energia da Terra por meio da intensificação do efeito estufa.

Alinhada à preocupação com a inserção de conteúdos conceituais, o emprego de atividades experimentais em sala de aula apresenta-se como valioso recurso didático para discutir a temática do efeito estufa em sala de aula (BESSON; DE AMBROSIS; MASCHERETTI, 2010; BORGES, 2002). Assim, tendo em vista a propriedade dos gases estufa, como o CO_2 , em absorver radiação infravermelha, surgiu entre os autores uma indagação: seria possível implementar um experimento de baixo custo capaz de demonstrar a absorção de radiação infravermelha pelo CO_2 ?

Como é sabido, a área de estudo conhecida como espectroscopia no infravermelho (ou espectroscopia vibracional) permite, entre diversas outras aplicações, identificar gases que

² Para uma avaliação crítica dessas visões pseudocientíficas pode-se consultar <<https://skepticalscience.com/>>.

absorvem radiação infravermelha, o que pode ser feito por meio do espectro de infravermelho (um gráfico de intensidade versus comprimento de onda) medido para determinada amostra de gás (SMITH, 1999; ATKINS, 2012). Contudo, quando consideramos a questão da demonstração experimental da absorção de radiação infravermelha pelos gases estufa na sala de aula, nos deparamos com uma dificuldade imediata. Apesar da espectroscopia no infravermelho ser uma ciência bem estabelecida, medidas espectroscópicas envolvem aparelhos (espectrômetros) com custos elevados que dificultam a sua aquisição e, conseqüentemente, a realização de experimentos de espectroscopia em sala de aula.

De fato, diversos trabalhos da literatura, inclusive de ensino de ciências, têm buscado contornar essa dificuldade, apresentando propostas variadas de experimentos didáticos que exemplificam a capacidade de absorção de radiação infravermelha por gases estufa como o dióxido de carbono (BUXTON, 2010; BESSON; DE AMBROSIS; MASCHERETT, 2014; KANEKO; MONJUSHIRO, 2010; WANGONER; LIU; TOBIN, 2010; BERTÒ; VOLPE; GRATTON, 2014). A exceção de Kaneko, e Monjushiro (2010), esses trabalhos analisam o comportamento térmico de reservatórios (com e sem CO₂) expostos a uma fonte de radiação externa, medindo a temperatura dentro dos reservatórios e visando demonstrar que um reservatório com CO₂ atinge temperaturas mais altas do que aquele sem CO₂.

A proposta do presente artigo é distinta desses trabalhos, pois não faz uso de medições de temperatura dentro de reservatórios. Assim, para detectar a absorção de radiação infravermelha pelo CO₂, é empregado um sensor de temperatura de infravermelho sem contato externo à célula de gás (Figura 3). Dessa forma, a presente proposta não é alvo das objeções envolvendo o debate feito nos artigos de Wangoner, Liu & Tobin (2010) e Bertò, Volpe, & Gratton (2014)³.

Por fim, observamos que não se trata de um experimento de espectroscopia, mas de uma forma de observar ou “visualizar” a propriedade do dióxido de carbono em absorver radiação infravermelha. Como será descrito nas próximas seções, empregamos uma montagem experimental de baixo custo e que pode ser considerada de fácil implementação em sala de aula. Antes de descrever o experimento realizado, iniciaremos com uma breve introdução ao mecanismo do efeito estufa e o papel do CO₂ nesse processo.

II. Efeito estufa, CO₂ e a radiação infravermelha

Historicamente, o cientista francês Jean Baptiste Fourier (1768-1830) foi, possivelmente, o primeiro a tornar o conceito de *temperatura planetária* um objeto de estudo da ciência e a especular sobre o papel da atmosfera na manutenção da temperatura dos

³ A montagem que apresentamos (com sensor externo à célula de gás) lembra a montagem de Kaneko e Monjushiro (2010), embora esses autores façam uso do fenômeno fotoacústico que não empregamos aqui. Uma outra proposta que também lembra a montagem que apresentamos no presente artigo pode ser encontrada em <<http://www.demoex.ch/?Produkte>>. De fato, esses trabalhos, junto com o experimento histórico de John Tyndall (1820-1893), serviram de inspiração para o desenvolvimento do presente trabalho.

planetas (FLEMING, 1998; PIERREHUMBERT, 2004; WEART, 2008). Em 1824, num artigo apresentado a *Académie Royale des Sciences* em Paris, Fourier escreveu “[...] a temperatura (da Terra) pode ser aumentada pela interposição da atmosfera, porque o calor no estado de luz encontra menos resistência em penetrar o ar, do que em repassar pelo ar quando convertido em calor não luminoso” (FOURIER, 1824 apud FLEMING, 1998, p. 61)⁴.

Contudo, os mecanismos envolvidos, que tornam a atmosfera mais opaca à radiação de infravermelho do que à luz visível, eram desconhecidos na época de Fourier. Um passo importante na elucidação desse mecanismo foi dado pelo engenheiro inglês John Tyndall (1820-1893). Em 1859, utilizando-se de seu recém-construído espectrofotômetro, Tyndall concluiu que gases como o dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O) exibiam propriedades de absorção da radiação infravermelha, enquanto que o oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) não exibiam as mesmas propriedades (FLEMING, 1998, p.70).

Foram necessárias várias décadas, até meados do século XX, para que a ciência da espectroscopia se desenvolvesse e uma compreensão satisfatória das propriedades dos gases de efeito estufa fosse possível (FLEMING, 1998; SMITH, 1999; ATKINS, 2012). Ao mesmo tempo, no campo da Física da atmosfera, o mecanismo do efeito estufa só começou a ser compreendido de forma satisfatória com os trabalhos de cientistas como Gilbert Plass e Syukuro Manabe nas décadas de 1950 e 1960 (WEART, 2008). Atualmente sabemos que os principais gases de efeito estufa da atmosfera terrestre são o vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), CFCs e ozônio (O_3) (BARRY; CHORLEY, 2013)⁵.

Gases de efeito estufa como o CO_2 têm a propriedade de serem ativos radioativamente (absorvem ou emitem radiação) na faixa de comprimentos de onda do infravermelho (cerca de $1\ \mu\text{m}$ a $100\ \mu\text{m}$). Quando a molécula de dióxido de carbono interage com a radiação infravermelha as suas ligações químicas podem vibrar de acordo com diferentes modos de vibração. O CO_2 , sendo uma molécula linear triatômica apresenta quatro modos normais de vibração denominados: estiramento simétrico, estiramento assimétrico e dois modos de deformação angular representados na Fig. 1⁶.

⁴ A formulação exposta na passagem de Fourier é precursora do que veio a ser conhecido por “efeito estufa” e em termos modernos podemos reescrevê-lo da seguinte forma: a radiação proveniente do Sol (composta por uma pequena parcela de ultravioleta, e aproximadamente quantidades iguais de luz visível e infravermelho, de comprimento de onda curto) atinge com facilidade a superfície da Terra, mas a radiação infravermelha (de comprimento de onda longo) emitida pela Terra para o espaço encontra “dificuldade” em atravessar a atmosfera.

⁵ Com respeito à compreensão do mecanismo do efeito estufa, dados de satélites indicam que o vapor d'água é responsável por 50% do efeito estufa da Terra, as nuvens contribuem com 25%, o CO_2 com 20% e os demais gases estufa com 5% (LACIS *et al.*, 2010, p.357). Contudo, é importante notar que o mecanismo do efeito estufa é controlado pelos gases não condensáveis (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, etc.). O vapor d'água é um o gás de efeito estufa condensável e por essa razão constitui um mecanismo de retroalimentação (*feedback*) e não uma forçante climática como é o caso dos demais gases estufa (Ibid).

⁶ O modo de deformação angular (ν_2) apresenta duas orientações possíveis: a vibração no plano da página indicada na Fig. 1 e a vibração para fora do plano da página.

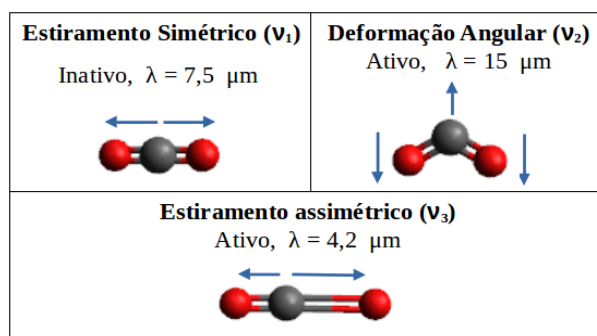


Fig. 1 – Os modos normais de vibração do CO_2 .

Para que a molécula possa absorver radiação é necessário que durante a vibração ocorra uma mudança no momento de dipolo da molécula (SMITH, 1999; ATKINS, 2012). Dentre os modos de vibração apresentados na Fig. 1, apenas os modos de estiramento assimétrico ($4,2 \mu\text{m}$) e deformação angular ($15 \mu\text{m}$) absorvem radiação. Isso ocorre porque no modo de vibração simétrico ($7,5 \mu\text{m}$) (com estiramento e compressão simétrica da molécula) o momento de dipolo permanece nulo, pois os átomos de oxigênio mantêm-se simetricamente posicionados em relação ao carbono. Portanto, esse modo é inativo, ou seja, não absorve radiação. Contudo, nos modos de vibração assimétrico e deformação angular, ocorre uma mudança periódica do momento de dipolo da molécula durante a vibração, logo estes dois modos são ativos e absorvem radiação infravermelha. Na página da Universidade de Liverpool (LIVERPOOL, 2019) podem ser encontrados *gifs* animados para os modos de vibração de diversas moléculas, entre elas o dióxido de carbono⁷.

Para cada modo de vibração ocorre a absorção de radiação de um comprimento de onda particular. Como indica a Fig. 1, o modo de estiramento assimétrico absorve radiação infravermelha com comprimento de onda de $4,2 \mu\text{m}$, enquanto que o modo de deformação angular absorve radiação com comprimento de onda de $15 \mu\text{m}$. Estas são as chamadas bandas de absorção e podem ser visualizadas no espectro do infravermelho para o dióxido de carbono⁸.

São justamente estas bandas de absorção de $4,2 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$ que tornam o CO_2 um gás de efeito estufa na atmosfera terrestre. Isso ocorre porque estas bandas estão na faixa de comprimentos de onda do infravermelho em que a Terra emite radiação de volta para o espaço. Ou seja, a Terra com uma temperatura média de $15 \text{ }^\circ\text{C}$, ou 288 Kelvin, tem seu pico

⁷ Uma animação que simula a interação entre diferentes tipos de radiação com diferentes gases pode ser consultada em <https://phet.colorado.edu/sims/html/molecules-and-light/latest/molecules-and-light_pt_BR.html>.

⁸ O espectro do infravermelho da molécula de CO_2 medido pode ser visualizado em <<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC>>. Neste link você poderá selecionar o comprimento de onda em micrômetros para uma melhor visualização do espectro.

de emissão (conforme a lei de Wien) em torno de 10 μm como indicado na Figura 2, o que faz com que a absorção de radiação de 15 μm seja particularmente intensa.

Na Fig. 2 a curva azul (Modelo) indica o espectro de emissão da Terra vista do espaço com as respectivas bandas de absorção atmosféricas, inclusive a absorção devido ao CO_2 na faixa de 15 μm . O modelo, disponibilizado pela Universidade de Chicago, simula a situação em que um instrumento (sensor) de satélite localizado a 70 km de altitude recebe a radiação emitida pela Terra gerando o espectro de emissão da Terra na faixa do infravermelho⁹.

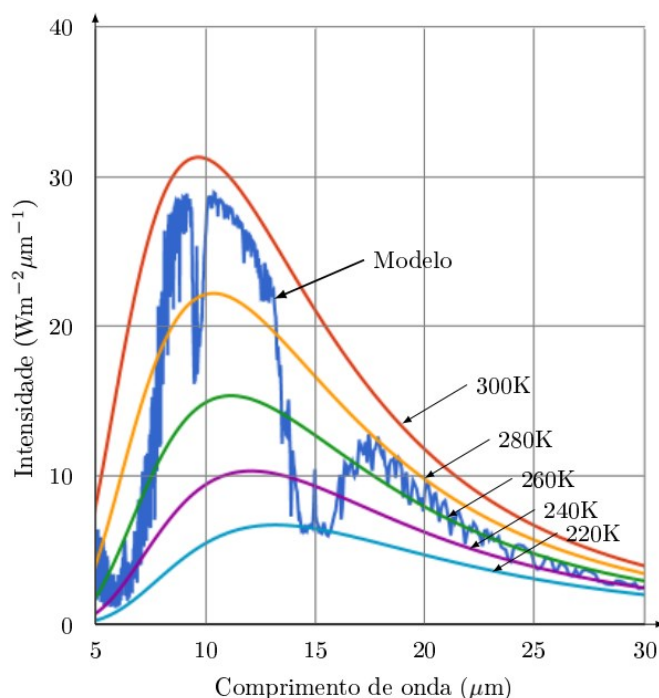


Fig. 2 – Emissão e absorção de radiação infravermelha na atmosfera terrestre¹⁰.

Pode-se notar que parte da radiação emitida na faixa de comprimentos de onda de 15 μm é retida pela atmosfera, não alcançando o espaço exterior. Além disso, a banda de absorção de 15 μm toca a linha de 220 K de temperatura, evidenciando que a radiação captada pelo instrumento do satélite é proveniente das altas altitudes da atmosfera, onde a temperatura é 220 K e não da superfície. Por fim, podemos comparar simulações como esta com dados de satélites reais¹¹ e, dessa forma, constatar que o CO_2 atmosférico absorve e reemite a radiação

⁹ Para fazer uma simulação pode-se acessar <<http://climatemodels.uchicago.edu/modtran/>>.

¹⁰ A figura foi obtida a partir do modelo Modtran <<http://climatemodels.uchicago.edu/modtran/>> com autorização do professor David Archer da Universidade de Chicago.

¹¹ Para um comparativo entre o modelo e os dados de satélites pode-se acessar <<http://climatemodels.uchicago.edu/modtran/modtran.doc.html>>.

infravermelha emitida pela superfície da Terra, constituindo evidência direta da existência do efeito estufa¹².

Essa breve explicação fornece uma ideia inicial do mecanismo do efeito estufa. Consideramos que para as finalidades do presente artigo ela forneça elementos suficientes para o entendimento do papel do CO₂ no mecanismo do efeito estufa e para a interpretação do experimento realizado e que passaremos a descrever agora.

III. Materiais e equipamentos

Para a montagem e realização do experimento aqui apresentado que visa demonstrar a absorção de radiação infravermelha pelo CO₂ foram usados os seguintes materiais:

- lâmpada de infravermelho (cerâmica de 100 W)
- sensor de temperatura infravermelho sem contato (MLX90614)
- arduíno UNO
- lata de um (1) litro (material latão)
- filme plástico de polietileno (PE)
- garrafa plástica (PET) de 1,5 ou 2 litros
- dióxido de carbono produzido por reação de vinagre e bicarbonato de sódio ou gelo

seco

- válvula de bloqueio de engate rápido pneumático 8 mm
- conector de engate rápido pneumático 8 mm
- mangueira pneumática 8 mm x 600 mm
- bomba de ar de bicicleta
- suporte para lâmpada
- suporte de madeira para o reservatório e o sensor.

IV. Montagem e Procedimento Experimental

Como já indicado, a montagem experimental que iremos descrever pretende constituir-se de uma alternativa de baixo custo a ser reproduzida em sala de aula para demonstrar a absorção de radiação infravermelha pelo dióxido de carbono (CO₂). É importante observar que não se trata de um espectrômetro, ou de um experimento de espectroscopia em que é gerado um espectro de infravermelho, mas apenas de uma maneira de “visualizar/demonstrar” a absorção da radiação infravermelha pelo CO₂.

A Fig. 3 apresenta a montagem experimental para a realização do experimento. De modo geral, o experimento faz uso de uma lâmpada de infravermelho¹³ e um sensor de

¹² Para uma explicação adicional sobre o papel dos gases estufa no espectro de emissão da Terra medido por satélites em órbita da Terra pode-se acessar <https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt_05/>.

¹³ Essa é uma lâmpada de cerâmica que emite infravermelho longo utilizada no aquecimento de répteis, podendo ser encontrada por preços variados em lojas Pet Shop ou pela internet.

temperatura de infravermelho sem contato. Interposta entre a lâmpada e o sensor encontra-se uma célula de gás onde será inserido o dióxido de carbono. Inicialmente, a temperatura medida pelo sensor é resultante da intensidade da radiação da lâmpada que atinge o sensor após atravessar a célula de gás contendo apenas ar ambiente. É, então, inserido o dióxido de carbono na célula de gás no intuito de detectar uma diminuição da temperatura medida pelo sensor. Isso é esperado, uma vez que o CO_2 dentro da célula de gás absorve parte da radiação emitida pela lâmpada, de modo que haverá uma diminuição da intensidade da radiação que atinge o sensor.

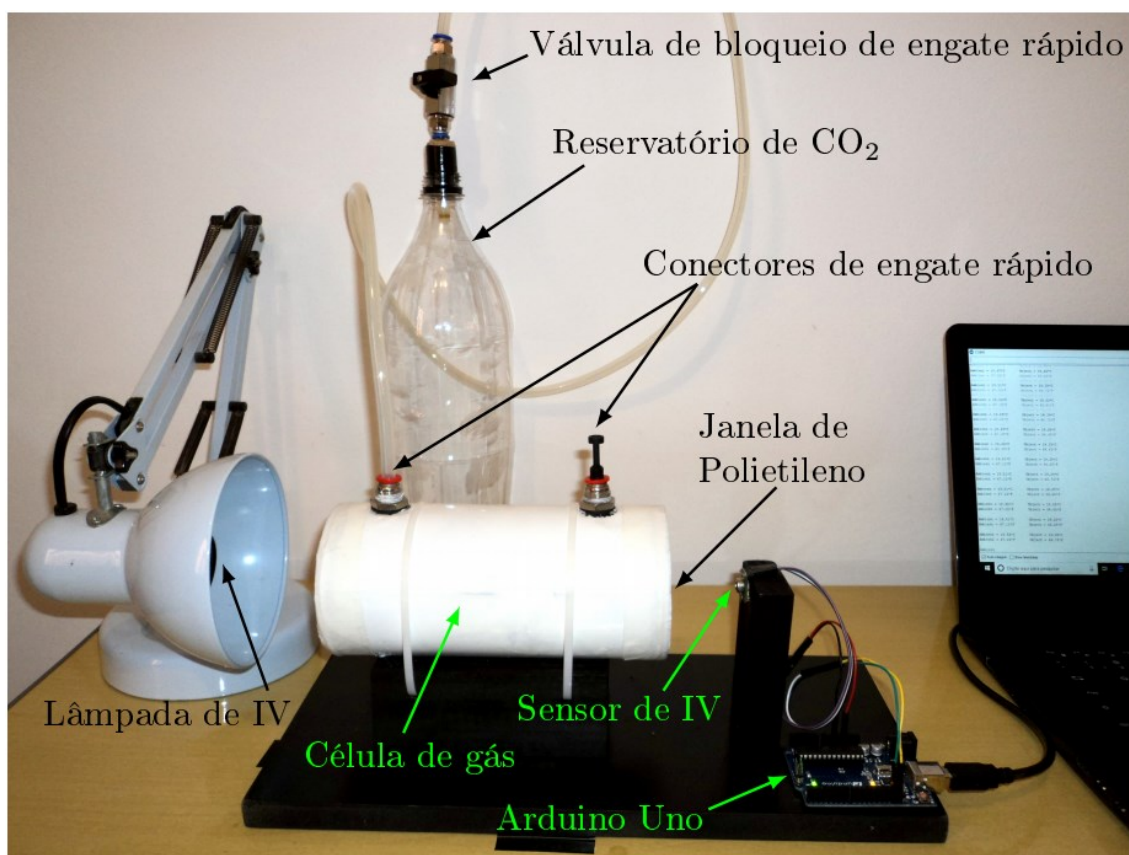


Fig. 3 – Montagem do Aparato Experimental.

Conforme indicado na montagem da Fig. 3, optamos por uma célula de gás de um (1) litro (7 cm de diâmetro por 15 cm de comprimento). A posição da lâmpada encontra-se a 7 cm da janela de polietileno da célula de gás e a posição do sensor 4 cm da mesma. Consideramos que variações quanto ao tamanho da célula de gás (lata de um litro) e pequenas variações quanto à distância de posicionamento da lâmpada e do sensor não devam afetar de forma crucial o experimento.

Na preparação da célula de gás, em primeiro lugar, deve-se remover completamente as laterais da lata de um (1) litro com um abridor de latas. Em seguida são feitas duas aberturas na parte superior do reservatório que permitirão a adição e expulsão do gás (CO_2).

Como indicado na Fig. 3, empregamos dois conectores pneumáticos de engate rápido que permitem uma fácil conexão e vedação das aberturas.

O passo seguinte é fechar as laterais da lata com material de alta transmitância no infravermelho, para funcionar como janelas transparentes à radiação infravermelha. Uma forma simples e barata de fazê-lo é utilizando uma janela de polietileno, uma vez que a curva de transmitância do polietileno é tal que permite a passagem de infravermelho sem afetar significativamente a intensidade da radiação emitida pela lâmpada (CATALYSIS, 2019). Assim, para a janela de polietileno empregamos um filme plástico de polietileno, adquirível em papelarias, o qual foi ajustado na abertura lateral da célula de gás com auxílio de um elástico e fita adesiva.

O sensor de temperatura MLX90614 (DIGIKEY, 2019) foi implementado utilizando um microcontrolador Arduíno Uno acoplado a um computador. Esta implementação é bastante simples e existem vários tutoriais na internet que ensinam como fazê-la¹⁴. Após conectar o sensor ao Arduíno basta importar na IDE¹⁵ do Arduíno a biblioteca correspondente ao respectivo sensor, por exemplo, a biblioteca *Adafruit MLX90614*¹⁶. Uma vez feita essa montagem, a intensidade da radiação infravermelha recebida pelo sensor é convertida em dados de temperatura que são exibidos na tela do computador¹⁷ em intervalos sucessivos de tempo que podem ser definidos no código de programação na IDE do Arduíno. Em nosso experimento, as medidas de temperatura foram registradas em intervalos sucessivos de 0,5 segundos.

A amostra de gás de dióxido de carbono pode ser adquirida de duas formas: (1) pelo uso de gelo seco; (2) por uma reação química de vinagre com bicarbonato de sódio. No primeiro caso, o gelo seco (sólido) foi inserido na garrafa pet (reservatório de CO₂) que foi, então, tampada com auxílio de uma rolha até ocorrer a sublimação total do gelo seco. A rolha está acoplada à “válvula de bloqueio de engate rápido” (Fig. 3) que permite a conexão com a mangueira pneumática (8 mm x 80 mm) a ser conectada aos “conectores de engate rápido” da célula de gás. No segundo caso, a reação química de bicarbonato de sódio e vinagre foi feita dentro da garrafa pet que novamente foi tampada pela rolha acoplada à válvula de bloqueio de engate rápido. O uso da válvula de bloqueio é importante, pois permite que o gás gerado, na sublimação do gelo seco ou na reação química, fique contido dentro da garrafa, podendo ser liberado apenas no momento da realização do experimento, ou seja, quando procedemos à adição do CO₂ na célula de gás (Fig. 3).

¹⁴ Veja, por exemplo: <<http://miliohm.com/non-contact-temperature-sensor-mlx90614-arduino-tutorial/>>.

¹⁵ <<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>

¹⁶ <<https://www.arduinelibraries.info/libraries/adafruit-mlx90614-library>>.

¹⁷ Isso é feito pela opção *tools /serial monitor* da IDE do arduino. Para demonstrações em tempo real, pode-se optar pela opção *tools/serial plotter*. Quando há interesse em salvar os dados coletados para posterior análise gráfica a opção *tools/serial monitor* é a adequada.

O procedimento experimental inicia com a célula de gás contendo apenas ar ambiente. Após ligar a lâmpada, a radiação infravermelha atravessa a primeira janela de polietileno, percorre o caminho ótico pelo interior da célula de gás, atravessa a segunda janela de polietileno e atinge o sensor de temperatura no lado oposto, iniciando a coleta dos dados de temperatura. Esperamos alguns minutos até a temperatura estabilizar. Então, conectamos a mangueira do “reservatório de CO₂” à célula de gás por meio da mangueira pneumática (Fig. 3) e lentamente adicionamos o dióxido de carbono à célula de gás. Do ponto de vista teórico, a adição de dióxido de carbono implica em absorção de radiação dentro da célula, reduzindo a intensidade de radiação que alcança o sensor de temperatura no lado oposto. Assim, como já apontado, espera-se detectar uma redução da temperatura medida pelo sensor, demonstrando o poder de absorção do dióxido de carbono.

Para o correto funcionamento do experimento, isto é, para detectar o efeito esperado, além da janela de polietileno já descrita, deve-se atentar para a escolha do tipo de fonte emissora (lâmpada) e do sensor de infravermelho. Em primeiro lugar, tanto a fonte emissora (lâmpada de infravermelho) como o sensor de infravermelho devem operar na faixa de comprimentos de onda em que o CO₂ absorve radiação, ou seja, em torno de 4 µm a 15 µm. De modo geral, lâmpadas de infravermelho (como a lâmpada de cerâmica utilizada no aquecimento de répteis) emitem radiação num amplo espectro de comprimentos de onda (do infravermelho curto ao longo), de modo que abarcam esse espectro de radiação. Por sua vez, a escolha do sensor MLX90614 é apropriada. Conforme especificações técnicas, este é um sensor que cobre a faixa de comprimentos de onda de 5,5 µm a 14 µm, sendo capaz de medir a temperatura de objetos entre - 70 °C e 380 °C com incerteza de medida de +/- 0,5°C (DIGIKEY, 2019).

V. Resultados e discussões

Os resultados obtidos com a realização do experimento mostraram-se bastante satisfatórios, seja utilizando gelo seco, seja empregando a reação química de bicarbonato com vinagre para produção de CO₂. Os dados apresentados no gráfico da temperatura em função do tempo da Fig. 4 foram obtidos utilizando gelo seco (CO₂) armazenado em um reservatório (garrafa PET) de 2 litros. Como podemos observar, antes da adição do dióxido de carbono na célula de gás, a temperatura medida pelo sensor estava estabilizada próximo aos 47^oC. Após a adição do dióxido de carbono, verifica-se que a temperatura diminui para cerca de 45,3^oC, resultando numa diferença de temperatura de 1,7^oC. Ou seja, corroborando a expectativa teórica de que a absorção de radiação infravermelha pelo CO₂ dentro da célula de gás resultaria numa diminuição da temperatura medida pelo sensor. Dando sequência a análise do gráfico da Fig. 4, cabe notar que o dióxido de carbono permaneceu na câmara por cerca de 2 minutos e durante esse tempo a temperatura manteve-se oscilando em torno da média de cerca de 45,3^oC. Após a remoção do dióxido de carbono da célula de gás (isso foi feito com o auxílio de uma bomba de ar acoplada uma das entradas superiores da célula de gás) pode-se

constatar, novamente no referido gráfico, que a retirada do dióxido de carbono (a partir do instante de tempo 180 segundos) resultou em uma elevação da temperatura para valores próximos a 47°C, ilustrando novamente o efeito esperado.

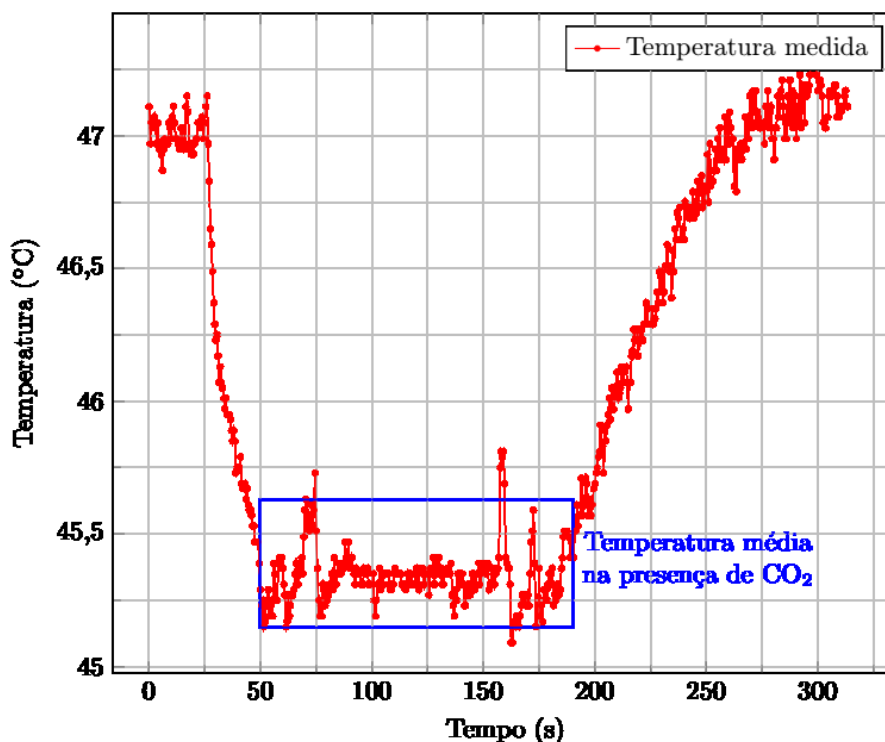


Fig. 3 – Gráfico da Temperatura em função do Tempo.

É importante salientar que o experimento foi reproduzido inúmeras vezes, seja com a utilização de gelo seco ou com o emprego da reação de bicarbonato e vinagre. Em todos os casos foi observado uma diminuição de temperatura de cerca de 1,3°C a 1,7°C, dependendo da concentração de CO₂ atingida dentro da célula de gás. Dessa forma, pode-se concluir que o experimento demonstra de forma eficaz e confiável o efeito da absorção da radiação infravermelha pelo CO₂.

Por fim, a título ilustrativo, podemos imaginar uma analogia entre o experimento realizado e a transferência de radiação na atmosfera terrestre, mantendo-se, contudo, os devidos cuidados para não extrapolar as simplificações envolvidas. Assim, como recurso ilustrativo, podemos por analogia imaginar que a lâmpada de infravermelho (emissor) representa a Terra, a célula de gás representa a atmosfera terrestre, e o sensor de infravermelho do lado externo da célula representa um sensor de satélite no espaço em órbita da Terra e que está direcionado para a superfície da Terra. Como visto, a adição de dióxido de carbono no reservatório implica em maior absorção de radiação dentro do reservatório, diminuindo a intensidade de radiação que alcança o sensor. De modo análogo, um aumento da concentração de gases estufa intensifica o efeito estufa, pois aumenta a absorção de radiação

emitida pela Terra, diminuindo a radiação que escapa pelo topo da atmosfera e, conseqüentemente, causando um desequilíbrio no balanço de energia terrestre que poderá ter como resultado o aquecimento global.

VI. Considerações finais

Diversos trabalhos da literatura, inclusive de ensino de ciências, têm discutido propostas de experimentos didáticos que exemplificam a capacidade de absorção de radiação infravermelha por gases estufa como o dióxido de carbono (BUXTON, 2010; BESSON; DE AMBROSIS; MASCHERETT, 2014; WANGONER; LIU; TOBIN, 2010; BERTÒ; VOLPE; GRATTON, 2014). Como já observado, esses trabalhos analisam o comportamento térmico de reservatórios (com e sem CO₂), expostos a uma fonte de radiação externa, fazendo uso de um ou mais sensores de temperatura posicionados dentro dos reservatórios. Contudo, esse procedimento experimental têm recebido críticas e o significado físico dos resultados obtidos tem sido objeto de debate (WANGONER; LIU; TOBIN, 2010; BERTÒ; VOLPE; GRATTON, 2014).

O experimento descrito neste trabalho constitui-se de mais uma opção experimental para demonstrar o papel ativo do CO₂ frente à radiação infravermelha. A partir das medidas realizadas, pode-se concluir que o experimento teve êxito na demonstração da capacidade de absorção de radiação infravermelha por parte do dióxido de carbono. Além disso, tendo em vista que o presente experimento não faz uso de medições de temperatura dentro de reservatórios, mas sim, emprega um sensor de temperatura de infravermelho sem contato externo à célula de gás, a presente proposta não esta sujeita as objeções feitas no trabalho de Wangoner, Liu e Tobin (2010). Por fim, cabe observar que o experimento é de baixo custo e de fácil implementação, dessa forma, apresenta um bom potencial para ser reproduzido no ambiente escolar.

Na medida em que o presente trabalho deteve-se na descrição e avaliação do experimento proposto, sem a sua aplicação em sala de aula, cabem, aqui, apenas algumas breves observações de cunho pedagógico sobre seu uso no ambiente escolar. Em primeiro lugar, possivelmente, devido ao nível conceitual envolvido, é razoável considerar que o experimento seja adequado para discussão do efeito estufa nos cursos de formação de professores. Contudo, dependendo do contexto de ensino, é igualmente razoável supor que este possa ser implementado no Ensino Médio. Sendo assim, uma possibilidade seria incluir o experimento junto a uma sequência de ensino sobre o efeito estufa previamente elaborada, como aquelas discutidas por autores como Besson, De Ambrosis e Mascherett (2014) e Tasquier, Levrine e Dillon (2016). Nas propostas desses autores, os conceitos físicos (como temperatura, espectro eletromagnético, radiação infravermelha, espectro de emissão e absorção, lei de Stefan-Boltzmann e lei de Wien), necessários para a compreensão do efeito estufa, são discutidos de forma gradativa em conjunto com atividades experimentais específicas. Em tal contexto, o presente experimento poderá constituir-se em recurso que pode

complementar a discussão conceitual sobre as propriedades dos gases estufa, permitindo ao estudante constatar experimentalmente a propriedade do CO₂ em absorver radiação infravermelha, bem como confrontar e reavaliar seus modelos e concepções sobre este fenômeno que é vital para a vida no planeta.

Por fim, espera-se que o presente experimento possa contribuir com a discussão do efeito estufa e aquecimento global na sala de aula de ciências, auxiliando no engajamento do aluno com este tópico e promovendo a conscientização e a educação ambiental relativo à temática (BRASIL, 1999).

Referências

ALBE, V.; GOMBERT, M. Students' communication, argumentation and knowledge in a citizens' conference on global warming. **Cultural Studies of Science Education**, v. 7, n. 3, p. 659-681, 2018.

ARSLAN, H.; CIGDEMOGLU, C.; MOSELEY, C. A three-tier diagnostic test to assess pre-service teachers' misconceptions about global warming, greenhouse effect, ozone layer depletion, and acid rain. **International Journal of Science Education**, v. 34, n. 11, p. 1667-1686, 2012.

ATKINS, P. **Físico-química**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 2.

BARRY, R.; CHORLEY, R. **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BESSON, U.; DE AMBROSIS, A.; MASCHERETTI, P. Studying the physical basis of global warming: thermal effects of the interaction between radiation and matter and greenhouse effect. **European Journal of Physics**, v. 31, n. 2, p. 375-388, 2010.

BERTÒ, M.; DELLA VOLPE; GRATTON, L. 'Clima change in a shoebox': a critical review. **European Journal of Physics**, v. 35, n. 2, p. 1-12, 2014.

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

BRASIL. Lei nº 9.795/1999. Dispõe sobre Educação Ambiental e institui a Política Nacional de Educação Ambiental, e dá outras providências, 1999.

BUXTON, G. The physics behind a simple demonstration of the greenhouse effect. **Physics Education**, v. 49, n. 2, p. 171-175, 2014.

Catalysis-ed. Infra-red Spectra for ldpe and hdpe. Disponível em: <http://www.catalysis-ed.org.uk/polyethene/poly_3_popup.htm>. Acesso em: 05 jun. 2019.

CHRISTOPHERSON, R. **Geossistemas**: uma introdução à geografia física. Porto Alegre: Bookman, 2012.

Digi-key Electronics. Disponível em: <<https://www.digikey.com/en/datasheets/melexis-technologies-nv/melexis-technologies-nv-mlx90614-datasheet-melexis>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

FLEMING, J. **Historical Perspectives on Climate Change**. New York: Oxford University Press, 1998.

GOODY, R.; WALKER, J. **Atmosferas planetárias**. São Paulo: Edgar Blucher, 1996.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013. Acesso em: 10 jun. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf>.

JUNGES, A. L.; MASSONI, N. T. O consenso científico sobre aquecimento global antropogênico: considerações históricas e epistemológicas e reflexões para o ensino dessa temática. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 18, n. 2, p. 455-491, 2018.

KANEKO, F.; MONJUSHIRO, H. Photoacoustic experimental system to confirm infrared absorption due to greenhouse gases. **Journal of Chemical Education**, v. 87, n. 2, p. 202-204, 2010.

LACIS, A.; SCHMIDT, G.; RIND, D.; RUEDY, R. Atmospheric CO₂: principal control knob governing earth's temperature. *Science*, v. 330, n. 6002, p. 356-359, 2010.

LE TREUT, H. *et al.* Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge: Cambridge University Press. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4-wg1-chapter1.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

Molecular vibrations: infrared spectroscopy. University of Liverpool, 2019. Disponível em: <<http://www.chemtube3d.com/vibrationsCO2.htm>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

NIBERT, K.; GROPENGIESSER, H. Understanding the greenhouse effect by embodiment. Analysing and using students' and scientists' conceptual resources. **International Journal of Science Education**, v. 36, n. 2, p. 277-303, 2014.

PIERREHUMBERT, R. Warming the world. Greenhouse effect: Fourier's concept of planetary energy balance is still relevant today. **Nature**, v. 432, p. 677, 2004.

RATINEN, I. Primary student-teachers' conceptual understanding of the greenhouse effect: a mixed method study. **International Journal of Science Education**, v. 35, n. 6, p. 929-955, 2013.

SMITH, B. **Infrared spectral interpretation**: a systematic approach. New York: CRC Press, 1999.

TASQUIER, G.; LEVRINE, O.; DILLON, J. Exploring Students' Epistemological Knowledge of Models and Modelling in Science: Results from a Teaching/Learning Experience on Climate Change. **International Journal of Science Education**, v. 38, n. 4, p. 539-563, 2016.

WAGONER, P.; LIU, C.; TOBIN, R. Climate change in a shoebox: right result, wrong physics. **American Journal of Physics**, v. 78, n. 5, p. 536-540, 2010.

WEART, S. Discovery of Global Warming. 2008. Disponível em: <<https://history.aip.org/climate/index.htm>>. Acesso em: 05 jun. 2019.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).