



Alexandre Luis Junges¹ 

¹Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus Litoral Norte, Tramandaí, RS, Brasil.

Palavras-chave

temperatura terrestre
Joseph Fourier
efeito estufa
balanço de energia terrestre
aquecimento global

Resumo

O nome do cientista francês Jean Baptiste Joseph Fourier é frequentemente lembrado como sendo o primeiro a propor uma teoria do efeito estufa. A partir de trabalhos de historiadores da ciência, e com base na análise dos textos de Fourier, suas contribuições ao problema da temperatura terrestre são discutidas. Argumenta-se que Fourier não desenvolveu uma teoria do efeito estufa. Porém, muitos dos *insights* e conceitos que ele introduziu, como o conceito de *temperatura planetária* e *balanço de energia planetário*, abriram caminho para desenvolvimentos subsequentes sobre o problema da temperatura terrestre. Com base nesse relato histórico, almeja-se fomentar a discussão do efeito estufa em uma aula de ciências, em especial da física. Tal discussão pode contribuir para elucidar questões conceituais, bem como fornecer uma perspectiva histórica sobre a questão atual das emissões de gases de efeito estufa e suas consequências para o aquecimento global.

1. Introdução

Atualmente, a expressão “efeito estufa” não apenas é encontrada nos livros de ciências, como também é parte do imaginário popular. O termo tornou-se comum, em grande parte, devido à crescente preocupação com o impacto das ações humanas sobre o equilíbrio climático global expresso no que veio a ser denominado “aquecimento global antropogênico” [1, 2]. De fato, a intensificação do efeito estufa atmosférico consiste no mecanismo fisi-

co que permite compreender o desequilíbrio no balanço de energia terrestre e que está levando ao aquecimento do planeta.

O termo “efeito estufa” tornou-se popular, em grande parte, devido à crescente preocupação com o impacto das ações humanas sobre o equilíbrio climático global expresso no que veio a ser denominado “aquecimento global antropogênico”

O efeito estufa da Terra é um fenômeno natural, benéfico para a existência da vida, que permite ao planeta manter sua temperatura média superficial próxima dos 15 °C, ou seja, cerca de 33 °C acima do

que seria sem a presença da atmosfera. Isso é possível em razão da presença de gases atmosféricos como o vapor d’água, dióxido de carbono, metano e óxido nítrico,

E-mail: alexandre.junges@ufrgs.br

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2023, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

que têm a propriedade de transmitir a maior parte da radiação visível proveniente do Sol, enquanto absorvem fortemente a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Após absorverem a radiação infravermelha terrestre os gases atmosféricos emitem radiação em todas as direções, inclusive de volta à superfície, aquecendo a troposfera inferior [3-5]. Os detalhes dos mecanismos atmosféricos envolvidos são complexos e são expressos em equações matemáticas que descrevem o comportamento da radiação solar e terrestre dentro da atmosfera [6].¹

Apesar da ampla divulgação do termo “efeito estufa”, mesmo entre profissionais da educação científica, seu significado e sua origem ainda não é suficientemente compreendido. É comum, em materiais e livros didáticos de ciências, encontrar analogias entre o mecanismo do efeito estufa atmosférico e as estufas de floricultura e horticultura feitas de vidro ou plástico (Fig. 1).

Nos livros de física e de ciências utilizados na educação básica brasileira, a analogia com a estufa de floricultura pode vir acompanhada de explicações sobre o efeito estufa como:

O efeito estufa atmosférico recebeu este nome a partir das estufas de vidro usadas pelos fazendeiros e floristas para “prender” a energia solar. O vidro é transparente às ondas da luz visível, mas opaco às radiações ultravioleta e infravermelha (...). Assim, os comprimentos de onda curtos da luz solar atravessam o telhado de vidro da estufa e são absorvidos pelo solo e pelas plantas em seu interior. O solo e as plantas, por sua vez, emitem ondas de infravermelho com compri-



Figura 1 - Uso da analogia da estufa de floricultura em livros e materiais didáticos. Fonte: adaptado de *Nasa Climate Kids*. Disponível em <https://climatekids.nasa.gov/greenhouse-effect/>, acesso em 5/9/2023.

mentos de onda longos. Essa energia não consegue atravessar o vidro ao sair, o que aquece o interior da estufa. Curiosamente, nas estufas dos fazendeiros e floristas, o calor é mantido principalmente pela habilidade do vidro de impedir que as correntes de convecção misturem o ar mais frio do exterior com o ar mais quente do interior. O efeito estufa desempenha um papel mais importante no aquecimento global da Terra do que no aquecimento das estufas. [7, p. 291]

A comunidade científica há tempos anda preocupada com o aumento da temperatura média da atmosfera terrestre. Os cientistas atribuem esse fenômeno ao chamado efeito estufa, que consiste na “retenção” da energia térmica junto ao nosso planeta, como ocorre nas estufas de vidro que são usadas em locais onde, em certas épocas do ano, a temperatura atinge valores muito baixos. [8, p. 32]

A radiação solar é a principal fonte de energia da Terra. Ao atingir o planeta, parte dela é refletida em direção ao espaço, e outra parte interage com a atmosfera e a superfície terrestres, transferindo calor para elas e, portanto, aquecendo-as. No entanto, nem todo o calor é absorvido: parte dele é refletida e poderia se perder no espaço se não fosse a presença de certos gases (como gás carbônico, ozônio e metano) na atmosfera. Esses gases retêm parte do calor no planeta, aprisionando-o na atmosfera. Por ter mecanismo semelhante àquele das estufas de cultivo de plantas, esse fenômeno natural ficou conhecido como efeito estufa. [9, p. 55]

A analogia com a estufa de floricultura pode gerar dificuldades conceituais quando não está acompanhada de uma explicação que aponte as diferenças com o efeito estufa atmosférico. Dos livros didáticos citados acima, apenas o livro de Paul Hewitt [7] preocupa-se em fazer este esclarecimento. Ou seja, nas estufas de floricultura, o aquecimento do seu interior está mais relacionado com a transferência de calor por convecção (e também condução) do que com o fato de o vidro ou plástico das estufas facilitar a entrada da luz solar e dificultar a saída da radiação infravermelha. Assim, a razão principal do grande aquecimento no seu interior deve-se ao fato de o ar confinado no interior da estufa não ter comunicação com o ar mais frio do exterior. Por sua vez, na atmosfera terrestre, o aquecimento do planeta deve-se, principalmente, ao balanço de radiação da Terra, que inclui, explicitamente, a transferência de calor por radiação. Contudo, embora a analogia seja inapropriada, a expressão “efeito estufa” é atualmente tão popular e familiar que a sua modificação se tornou inviável.²

Outro equívoco, às vezes associado com a analogia da estufa de floricultura, é a não diferenciação entre a parte refletida da radiação solar (albedo terrestre) e a emissão de radiação terrestre. Assim, ao não explicar que a Terra primeiramente absorve radiação solar e depois emite no infravermelho, cria-se uma dificuldade conceitual para os estudantes compreenderem a absorção de radiação de ondas longas pelos gases de

efeito estufa. Compreender a assimetria da atmosfera terrestre frente à radiação solar (visível) e à terrestre (infravermelha) envolve uma diferenciação adequada entre os processos de transmissão, absorção, reflexão e emissão de radiação.

Finalmente, por vezes, o efeito estufa é associado diretamente com a poluição atmosférica, esquecendo-se que o efeito estufa natural do planeta é um fenômeno benéfico para a existência da vida como a conhecemos. Ao mesmo tempo, a relação entre o fenômeno do efeito estufa e o aquecimento global também é alvo de confusões, por exemplo, quando não é feita a diferenciação entre o efeito estufa natural e a sua intensificação resultante do aumento da concentração de gases de efeito estufa devido à queima de combustíveis fósseis pela ação humana.

Diante da importância do fenômeno do efeito estufa e de algumas das dificuldades conceituais que o acompanham, considera-se que um relato histórico tem potencial para elucidar questões e colaborar no entendimento desse fenômeno atmosférico. Segundo trabalho de historiadores do assunto [10], não está absolutamente claro quem foi o primeiro autor a empregar o termo “efeito estufa”. Sabe-se, por exemplo, que em um artigo de 1896 o químico sueco Svante Arrhenius (1859-1927) emprega o termo “*hot-house*” [11] e atribui a origem da teoria, de que a atmosfera se comporta como o vidro de uma estufa, ao cientista francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830).

De fato, relatos históricos sobre as origens da teoria do efeito estufa atmosférico comumente apontam Joseph Fourier como o primeiro a apresentar uma *teoria do efeito estufa*. Muitas vezes, tais relatos associam a explicação dada por Fourier com as explicações contemporâneas do efeito estufa, ou seja, atribuindo à descrição de Fourier avanços empíricos e conceituais que ele não dispunha na época. É consenso entre historiadores da ciência que a discussão feita por Fourier sobre o problema da temperatura terrestre constitui um marco para os desenvolvimentos posteriores sobre o estudo do clima planetário. Contudo, o que disse Fourier sobre o efeito estufa e o papel da atmosfera na determinação da temperatura planetária é frequentemente objeto de confusão, inclusive no ambiente acadêmico e escolar.

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma discussão histórica sobre a contribuição de Fourier ao problema da temperatura terrestre, bem como discutir o que disse e não disse Fourier sobre o fenômeno do efeito estufa. Além disso, tal relato permitirá observar, sob uma perspectiva histórica, as limitações envolvidas na analogia entre as estufas de floricultura e a atmosfera terrestre. Dada a ampla difusão da expressão “efeito estufa” e sua importância na discussão atual sobre as mudanças climá-

ticas, considera-se que esse resgate histórico seja relevante para o aprofundamento do entendimento do tema em sala de aula.

2. Fourier e o problema da temperatura terrestre

Além de exercer diversas funções, como administrador e egiptólogo nos tempos de Napoleão Bonaparte (1769-1821), o cientista e matemático francês Fourier, Fig. 2, conhecido pelo desenvolvimento matemático das famosas “séries de Fourier”, era um estudioso da física do calor. Uma de suas investigações centrais, que motivou seus estudos sobre a condução do calor, envolvia a busca por uma teoria universal das temperaturas terrestres, ou seja, a determinação dos fatores que afetam a temperatura do planeta Terra [10-13].

Como observa Fleming [13], o nome de Fourier é muitas vezes erroneamente citado como sendo o primeiro cientista a descrever o fenômeno do efeito estufa. Historiadores da ciência concordam que Fourier especulou sobre o papel da atmosfera na determinação da temperatura de um planeta e que, em alguns momentos, encontramos analogias com estufas de vidro em seus escritos. Contudo, a discussão do fenômeno do efeito estufa não era uma preocupação central nos escritos de Fourier, nem ao menos ele emprega o termo “efeito estufa” nos ensaios de 1824 e

1827, dedicados ao problema das temperaturas terrestres [13, 14].

De fato, como observado por Archer e Pierrehumbert [12], a contribuição de Fourier para o estudo da

Fourier introduziu o conceito de “temperatura planetária” como um objeto de estudo da física



Figura 2 - Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fourier2_-_restoration1.jpg, acesso em 10/9/2023.

temperatura terrestre foi ainda mais profunda, tendo sido Fourier quem introduziu o conceito de *temperatura planetária* como um objeto de estudo da física. Ou seja, o primeiro a associar uma “temperatura média” ao planeta como um todo e estudar os fatores que afetam essa temperatura. Evidência dessa preocupação de Fourier pode ser encontrada em suas próprias palavras [14, p. 14]: “A questão das temperaturas terrestres sempre me pareceu um dos maiores objetos de estudo cosmológico e tive esse assunto em vista, principalmente, ao estabelecer a teoria matemática do calor”.

Segundo Fleming [10, 13], os escritos de Fourier sobre o problema da temperatura terrestre datam de pelo menos 1822 na sua obra principal *Théorie Analytique de la Chaleur* (*Teoria Analítica do Calor*), Fig. 3, bem como em um ensaio apresentado à academia de ciências francesa em 1824 intitulado *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires* e publicado no mesmo ano na revista *Annales de Chimie et de Physique*. O artigo foi reimpresso em uma versão levemente diferente em 1827 e traduzido para o inglês com o título *On the temperatures of the terrestrial sphere and interplanetary space*. A discussão subsequente tomará por base a tradução para o inglês da versão de 1827 feita por Archer e Pierre-humbert [12].

No ensaio de 1827, *On the temperatures of the terrestrial sphere and interplanetary space*, Fourier discute três fatores (fontes) a partir dos quais a Terra obtém seu calor:

Segundo Fourier o calor do Sol e das estrelas circundantes são as principais fontes de aquecimento terrestre

- 1) A Terra é aquecida pela radiação solar; cuja distribuição desigual produz a diversidade dos climas;
- 2) Ela participa da temperatura comum do espaço interplanetário, sendo exposta à irradiação de inúmeras estrelas que circundam todas as partes do sistema solar;
- 3) A Terra conservou no interior de sua massa uma parte do calor primordial que ela possuía quando os planetas se formaram originalmente. [14, p. 7]

Ou seja, os principais fatores que afetam a temperatura do planeta seriam a *radiação solar*, a *radiação das estrelas circundantes* e o *calor interno da Terra* (Fig. 4). Segundo Fourier [14], nosso sistema solar está localizado em uma região do Universo onde todos os pontos do espaço têm uma mesma e constante temperatura. Essa temperatura do espaço interplanetário estaria um pouco abaixo da temperatura das regiões polares da Terra, aproximadamente 200 Kelvin, e seria causada pela irradiação de todas as estrelas que circundam o sistema solar. Assim, não fosse a ação das outras duas fontes (calor do Sol e calor primordial do interior do planeta), a Terra estaria com a mesma temperatura gelada do espaço.

Fourier tinha conhecimento da altíssima temperatura presente no interior da Terra remanescente da formação do planeta. A evidência desse calor central da Terra vinha de seus cálculos sobre a condução do calor em sólidos e de medições de temperatura feitas na época em minas subterrâneas que indicavam que a temperatura aumentava 1 °C para cada 30 a 40 metros de profundidade. Tal aumento da temperatura não poderia ser uma consequência da incidência de radiação solar, pois, fosse esse o caso, dever-se-ia observar

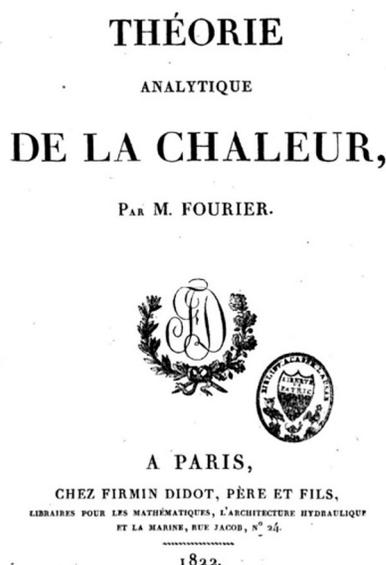


Figura 3 - Capa da obra *Teoria Analítica do Calor* de 1822. Fonte: Disponível em Google Books.

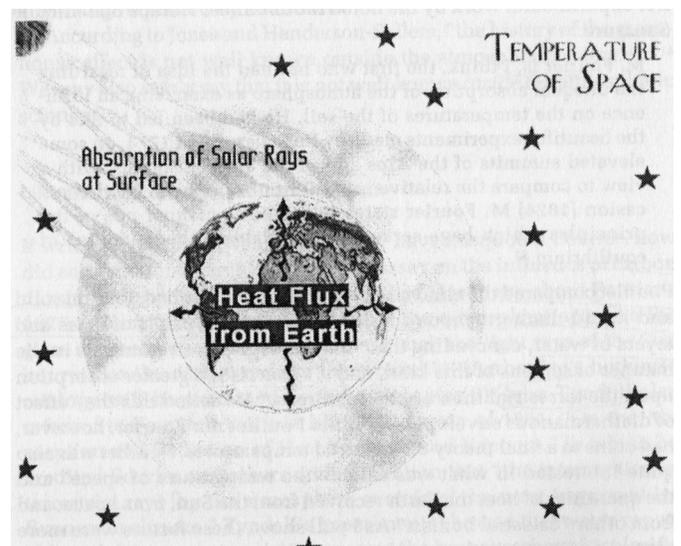


Figura 4 - As três fontes de calor que influenciam a temperatura terrestre. Fonte: Fleming, *Historical Perspectives on Climate Change* (1998) (reproduzido com a permissão do autor).

uma diminuição da temperatura com o aumento da profundidade. No que tange a contribuição do calor interno para a temperatura superficial do planeta, Fourier estimou, com base na razão do aumento da temperatura com a profundidade, que o imenso calor interno da Terra não teria mais um efeito significativo na superfície [10, 15]. Ou seja, embora relevante nas camadas mais internas da Terra, a sua contribuição para o aquecimento da superfície terrestre é tão pequena a ponto de ser imperceptível. Sabe-se hoje que Fourier estava certo ao desconsiderar a contribuição do calor interno no equacionamento do balanço de energia da Terra [5].

A principal fonte de calor da Terra reconhecida por Fourier é, sem dúvida, o Sol. Fourier [14] destaca os efeitos da radiação solar envolvendo a produção dos diversos climas da Terra devido à maior incidência de radiação solar nas regiões equatoriais do que nos polos e aos efeitos periódicos expressos nas variações diárias e sazonais da irradiação solar.

Fourier [14, 16] tem ciência da diferença entre o calor proveniente do Sol na forma de luz visível e o calor proveniente da superfície terrestre denominado por ele de “calor não luminoso” (*non-luminous heat*) e “calor irradiante não luminoso” (*non-luminous radiating heat*). Nas palavras de Fourier:

O calor do Sol, chegando na forma de luz visível, tem a capacidade de penetrar em substâncias sólidas ou líquidas transparentes, mas perde essa capacidade quase completamente quando é convertido, por sua interação com a superfície terrestre, em calor não luminoso. [14, p. 8]

Dessa forma, para Fourier, a superfície terrestre estaria localizada entre uma massa sólida, cujo interior é muito quente, e o espaço interplanetário com temperaturas menores que as regiões polares. O constante aporte de calor solar na superfície exige que o planeta retorne calor para o espaço de modo a estabelecer o equilíbrio e manter uma temperatura média constante. A radiação solar “[...] que penetra nas regiões equatoriais é exatamente compensada pelo calor que sai pelas regiões polares. Assim, a Terra devolve ao espaço celeste todo o calor que recebe do Sol” [14, p. 17].

Ou seja, Fourier destaca que a temperatura planetária é determinada pelo balanço entre a taxa com que a energia é recebida e a taxa com que é perdida. Este é um aspecto central da contribuição de Fourier ao problema da temperatura planetária. Como observam Archer e Pierrehumbert [12], além de introduzir o conceito de *temperatura planetária* Fourier estabelece as bases para a ideia de *balanço de energia da Terra*,³ tópico central da meteorologia e climatologia e de grande importância no estudo das mudanças climáticas [5].

Fourier estabelece as bases para o conceito de balanço de energia da Terra

Além do calor do Sol e do calor interno da Terra, Fourier considera que a temperatura do espaço interplanetário tem um papel importante na determinação da temperatura terrestre, pois, caso a Terra estivesse localizada em uma região com total ausência de calor (temperatura próxima ao zero absoluto), ela experimentaria temperaturas tão baixas na superfície que a vida animal e a vegetal não resistiriam [14]. Assim, por considerar que o espaço interplanetário possuía uma temperatura próxima à das regiões polares e, portanto, muito acima do zero absoluto, Fourier raciocinou que essa temperatura do espaço funcionaria como uma fonte constante de calor para o planeta.

Tendo reconhecido a existência desta temperatura fundamental do espaço, sem a qual o padrão de temperatura observado na superfície da Terra seria inexplicável, notamos que a origem deste fenômeno é óbvia. Ele deve-se à radiação de todos os corpos do universo, cuja luz e calor podem chegar até nós. [14, p. 11]

Assim, para Fourier, o *calor do espaço interplanetário* e o *calor do Sol* são as principais fontes que determinam a temperatura na superfície terrestre. De fato, Fourier reconhece que outros fatores auxiliares podem também atuar em menor grau: “Os movimentos do ar e das águas, a extensão dos oceanos, a elevação e forma da superfície, os efeitos da atividade industrial humana [...] modificam a temperatura de cada clima” [14, p. 12]. Ou seja, a atmosfera e as superfícies aquáticas teriam como efeito uma distribuição mais uniforme do calor solar incidente, podendo moderar as diferenças entre frio e quente. Porém, é enfático ao destacar que “seria impossível que a ação da atmosfera suplantasse a causa universal decorrente da temperatura comum do espaço interplanetário” [14, p. 8]. Cabe notar que apesar de Fourier mencionar a “atividade industrial humana”, essa menção não tem nenhuma relação com a problemática atual do aquecimento global antropogênico, que era um problema inexistente na época de Fourier.

Vemos, assim, que Fourier atribui um papel secundário para a atmosfera na determinação da temperatura terrestre. Apesar disso, a discussão do papel da atmosfera está presente em seu ensaio, sendo justamente a discussão a seguir que lhe deu a fama de ser o primeiro cientista a propor uma teoria do efeito estufa.

3. O que disse Fourier sobre o efeito estufa?

Ao iniciar a discussão sobre o papel da atmosfera, Fourier [14] admite que é difícil conhecer em que extensão a atmosfera afeta a temperatura média do globo terrestre. Na tentativa de explorar a questão, passa a discutir os experimentos realizados pelo naturalista suíço Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) com

um dispositivo denominado “heliotermômetro” (*heliotermometer*) ou “caixa quente” (*hot box*).

O dispositivo consistia em uma espécie de estufa em miniatura (Fig. 5) com paredes isolantes e composta de duas ou três camadas de vidro que permitiam a entrada de radiação solar. Termômetros posicionados no interior da caixa e entre as camadas de vidro permitiam a medição da temperatura. Quando expostas ao Sol, tais caixas atingiam temperaturas de até 110 °C em seu interior [17]. Já os termômetros posicionados entre as camadas de vidro atingiam temperaturas menos elevadas, decrescendo a temperatura do fundo da caixa até a superfície. Como discutido por Butti e Perlin [17], a caixa quente de Saussure foi a precursora dos modernos coletores e fornos solares.

Na época, uma das aplicações do heliotermômetro, ou caixa quente de Saussure, era medir a intensidade da radiação solar e, inclusive, testar a hipótese de que “é mais frio no topo das montanhas por que a luz solar é mais fraca nas altitudes elevadas”. Medidas realizadas ao pé e no topo da montanha por Saussure haviam indicado que a temperatura máxima atingida no interior da caixa é praticamente a mesma nas duas situações. Logo, deveria ser falsa a hipótese de que “é mais frio no topo das montanhas por que a luz solar é mais fraca nas altitudes elevadas”. Em suma, a explicação para as temperaturas mais baixas nas altas altitudes das montanhas deveria residir em outra causa.

Ao discutir o funcionamento do heliotermômetro, Fourier [14] destaca dois aspectos. Em primeiro lugar, o calor adquirido pela caixa é concentrado, porque não ocorre a renovação do ar em seu interior, ou seja, não há comunicação entre o ar interior e o ar externo. Em segundo lugar, o calor proveniente do Sol tem propriedades distintas do calor não luminoso. Desse modo, os raios do Sol são transmitidos com facilidade pelas camadas de vidro, mas, ao aquecer o interior da caixa, a luz do Sol é convertida em calor não luminoso. O calor não luminoso não consegue atravessar livremente as camadas de vidro; como consequência, há um acú-

Fourier considera que a temperatura terrestre pode ser aumentada pela interposição da atmosfera

mulo de calor no interior da caixa, pois os materiais dela são maus condutores de calor. Assim, “A temperatura aumenta até o ponto em que o calor incidente é exatamente equilibrado pelo calor dissipado” [14, p. 13].

A partir disso, Fourier passa a comparar o efeito de aquecimento da caixa de Saussure com uma condição imaginária da atmosfera terrestre.

Se todas as camadas de ar de que se forma a atmosfera mantivessem sua densidade e transparência, mas perdessem apenas a mobilidade que de fato possuem, essa massa de ar se solidificaria e, exposta aos raios do Sol, produziria um efeito do mesmo tipo que acabamos de descrever. [14, p. 13]

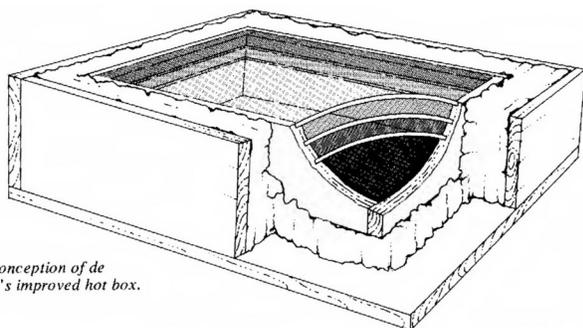
Ou seja, o mesmo efeito observado no heliotermômetro seria observado na atmosfera se supormos que a massa de ar atmosférico estivesse sólida, isto é, com a ausência de movimentos de ar. Em tal situação hipotética, a atmosfera, de modo análogo ao que ocorre nas camadas de vidro da caixa de Saussure, apresentaria temperaturas mais altas nas camadas de ar próximas a superfície terrestre e exibiria temperaturas cada vez mais baixas à medida em que nos afastamos da superfície em direção às camadas superiores da atmosfera.

Finalmente, logo após discutir a analogia entre a atmosfera e a caixa de Saussure, Fourier faz a seguinte observação sobre a temperatura na superfície terrestre.

A temperatura pode ser aumentada pela interposição da atmosfera, pois o calor no estado de luz encontra menos resistência em penetrar no ar, do que em passar de volta pelo ar depois de convertido em calor não luminoso. [14, p. 13]

Esta é possivelmente a passagem que faz a alusão mais próxima do que compreendemos hoje por “efeito estufa”. Contudo, como podemos notar, Fourier não utiliza esse termo e nada é dito sobre as características da atmosfera que a levariam a exibir esse comportamento assimétrico frente à radiação. Ou seja, de transmitir com facilidade a luz do Sol e dificultar a transmissão do calor não luminoso.

Vemos assim que, longe de oferecer uma explicação detalhada do papel da atmosfera, as observações de Fourier sobre o tema são em grande parte qualitativas, possivelmente motivadas pelos estudos realizados com o heliotermômetro, bem como sobre as propriedades distintas do vidro frente à incidência de radiação solar e o calor não luminoso. Cabe notar que essa propriedade do vidro era conhecida há muito mais tempo. Em 1681, Edme Mariotti (1620-1684) já observara que a luz do Sol atravessa facilmente o vidro e outros materiais transparentes, mas o calor das velas e outras fontes não atravessa o vidro com facilidade [15].



Artist's conception of de Saussure's improved hot box.

Figura 5 - Concepção artística do heliotermômetro ou caixa quente de Saussure. Fonte: Butti e Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology* (1981).

Como observa Van der Veen [15, p. 142], Fourier não oferece uma teoria do efeito estufa atmosférico na medida em que o seu tratamento da transferência de calor não luminoso na atmosfera priorizou a condução. Daí a analogia entre as camadas de vidro do helio-termômetro e a situação hipotética de uma atmosfera com uma massa de ar solidificada. Ou seja, em sua descrição, Fourier não inclui adequadamente os fluxos radiativos de calor não luminoso (radiação infravermelha emitida pela Terra) e, dessa forma, não oferece uma explicação satisfatória do balanço de energia terrestre que requer uma teoria do efeito estufa atmosférico. De fato, foi outro cientista francês, Claude Pouillet (1790-1868), quem, em 1838, fornece uma das primeiras discussões do balanço de radiação da Terra que inclui, explicitamente, a transferência de calor por radiação [15]. Contudo, cabe notar que a lei física (lei de Stefan-Boltzmann) que relaciona corretamente o fluxo de radiação emitido por um corpo com a sua temperatura foi descoberta empiricamente apenas em 1879 por Josef Stefan (1835-1893) e deduzida teoricamente por Ludwig Boltzmann (1844-1906) em 1884.

Da mesma forma, nos escritos de Fourier não há nenhuma discussão referente às propriedades e à composição do ar atmosférico que permitisse explicar a assimetria da atmosfera, no que tange a maior transmissividade da luz visível e maior absorvidade da radiação infravermelha. De fato, esse era outro avanço científico que ainda estava por vir. Apenas em 1859, mais de 30 anos depois, John Tyndall (1820-1893), usando um espectrômetro por ele construído, inicia uma série de experimentos sobre as propriedades radiativas dos gases atmosféricos e conclui que gases como N_2 e O_2 são praticamente transparentes à radiação infravermelha, enquanto moléculas mais complexas como H_2O , CO_2 e O_3 são fortes absorvedores de radiação infravermelha. Ou seja, o conhecimento das propriedades espectroscópicas dos gases de efeito estufa surge muito tempo depois das especulações de Fourier sobre o papel da atmosfera na determinação da temperatura terrestre.

Finalmente, como visto, é um fato que Fourier especulou sobre o papel da atmosfera terrestre na determinação da temperatura planetária. Contudo, para ele, a atmosfera terrestre desempenhava um papel secundário. Outros fatores, como a temperatura do espaço interplanetário, eram por ele considerados como sendo muito mais importantes. Além disso, dados os avanços teóricos e empíricos da época, Fourier não dispunha de um quadro teórico que lhe permitisse elaborar uma teoria do efeito estufa atmosférico e, conseqüentemente, fornecer uma descrição correta do balanço de energia terrestre.

4. Considerações finais e orientações aos professores

Ao tratar das origens da teoria do efeito estufa e do papel da atmosfera na determinação da temperatura terrestre, o nome de Fourier deve certamente ser lembrado. No entanto, como evidenciado pela discussão feita, Fourier não nos oferece uma teoria do efeito estufa e suas especulações qualitativas sobre o papel da atmosfera não ocorreram no mesmo quadro conceitual e teórico com que as modernas explicações do efeito estufa e do balanço de energia da Terra são feitas. Dessa forma, o crédito, muitas vezes atribuído a Fourier, de ser o primeiro cientista a propor uma teoria do efeito estufa não encontra suporte na história da ciência.

Entretanto, muitos dos *insights* e conceitos introduzidos por Fourier, como o conceito de *temperatura planetária* e *balanço de energia planetário*, foram fundamentais para os desenvolvimentos subsequentes sobre o problema da temperatura terrestre. Em face do dinamismo da atividade científica, os avanços posteriores, no campo das ciências atmosféricas, permitiram a compreensão de aspectos inimagináveis na época de Fourier e uma teoria satisfatória do efeito estufa foi gradualmente formulada. Após quase dois séculos de pesquisas, a ciência atmosférica atual não tem dúvidas de que as características de uma atmosfera (como densidade e composição química) constituem um dos fatores determinantes da temperatura de um planeta.

A partir do relato histórico sobre a contribuição de Fourier para o problema da temperatura terrestre, almeja-se colaborar para fomentar a discussão sobre esse importante tópico na aula de ciências, em especial, de física. Certamente, como vimos, um resgate

histórico da teoria do efeito estufa atmosférico envolve ir muito além do trabalho de Fourier. Porém, espera-se que o conhecimento dos temas e conceitos em discussão na época de Fourier possa estimular o interesse dos estudantes sobre a história e a física do efeito estufa.

Neste sentido, este trabalho poderá auxiliar professores em formação em uma turma de graduação ou atuantes na escola básica no estudo e discussão da temática do efeito estufa. Considera-se que a discussão seja adequada para o nível de Ensino Médio na disciplina de física junto a conteúdos como a termologia e a física moderna, por exemplo. Como sugestão para trabalhar a temática em uma turma de Ensino Médio, o professor pode propor uma aula investigativa, organizando os alunos em grupos e partindo de uma questão motriz do tipo: “Quais são os fatores que afetam a temperatura do planeta Terra?”. Tal questão poderá fomentar um debate sobre possíveis fatores que regulam

Fourier não oferece uma teoria do efeito estufa atmosférico na medida em que o seu tratamento da transferência de calor não luminoso priorizou a condução, não incluindo fluxos radiativos para além da radiação solar incidente. Dessa forma, não oferece uma explicação satisfatória do balanço de energia terrestre

a temperatura de um planeta. Após uma discussão inicial, os alunos, mediados pelo professor, poderão pesquisar os planetas do sistema solar e características da atmosfera (temperatura, pressão e composição química) da Terra e dos planetas vizinhos, como Vênus e Marte. Junto a essa atividade investigativa, o professor poderá sugerir a leitura de partes históricas sobre as contribuições de Fourier ao problema da temperatura terrestre. Essa discussão histórica poderá ajudar o aluno a compreender a importância de fatores como a distância entre o planeta e o Sol e sua atmosfera na determinação da temperatura planetária. Finalmente, o professor poderá discutir o fenômeno do efeito estufa. Para tanto, pode explorar as formas de transferência de calor envolvidas na “caixa quente de Saussure” e nas estufas de floricultura para, por fim, discutir as semelhanças e diferenças em relação à atmosfera terrestre. Como apontando, o relato histórico aqui exposto não descreve uma teoria do efeito estufa. Deste modo, sua utilização em sala de aula é mais apropriada para uma introdução à temática. Uma explicação da física do efeito estufa deverá ser complementada através de

outros materiais e livros. A depender do nível do ensino e da turma, alguns dos conceitos necessários ao entendimento do efeito estufa são: formas de transferência de calor, equilíbrio térmico, radiação de corpo negro, lei de Stefan-Boltzmann, lei de Wien, balanço de energia da Terra, gases de efeito estufa, modos de vibração molecular e espectros de absorção e emissão.

Dada a atual preocupação com as mudanças climáticas, torna-se necessário que a educação científica se ocupe cada vez mais dessa temática. Através da história da ciência, pode-se vislumbrar que a discussão sobre o papel da atmosfera na determinação da temperatura de um planeta ocupou a mente de importantes cientistas já no início do século XIX. Isso pode fornecer uma dimensão histórica mais apropriada sobre a discussão atual acerca da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e suas consequências para o aquecimento do planeta.

Recebido em: 9 de Agosto de 2023

Aceito em: 27 de Setembro de 2023

Notas

¹Modelos atmosféricos sofisticados incluem os movimentos de ar atmosférico, ou seja, o movimento ascendente de parcelas de ar quente. O advento dos modelos radiativo-convectivos (radiative-convective models) constitui uma revolução no campo da ciência atmosférica e, recentemente, foi agraciada com o Prêmio Nobel em Física para Syukuro Manabe pelas suas contribuições no desenvolvimento desses modelos (<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>).

²Similar a outros conceitos cuja definição física não guarda relação com o sentido dado pelo senso comum (conceito de calor, por exemplo), parece razoável considerar que o uso do termo “efeito estufa” no ensino da temática deveria vir acompanhado da diferenciação entre o efeito estufa atmosférico e aquele que ocorre em estufas de horticultura.

³Para saber mais sobre o Balanço de Energia Terrestre recomenda-se a leitura do texto Climate and Earth's Energy Budget, disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalanc.>

Referências

- [1] IPCC, *Sumário para Formuladores de Políticas. Em: Mudança do Clima 2021: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas* editado por V.P. Masson-Delmotte, A. Zhai, S.L. Pirani, C. Connors, e cols. (Cambridge University Press, Cambridge, 2021). Disponível em https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf, acesso em 10/09/2023.
- [2] S. Weart, *The Discovery of Global Warming* (Harvard University Press, Cambridge, 2008). Disponível em <https://history.aip.org/climate/index.htm>, acesso em 10/09/2023).
- [3] R. Christopherson, *Geossistemas: Uma Introdução a Geografia Física* (Bookman, Porto Alegre, 2012).
- [4] R. Goody, J. Walker, *Atmosferas Planetárias* (Edgard Blucher, São Paulo, 1996).
- [5] D. Hartmann, *Global Physical Climatology* (Academic Press, San Diego, 2016).
- [6] D. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
- [7] P. Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2002), 9ª ed.
- [8] N. Villas Bôas, R. Helou Doca, G.J. Biscuola, *Física: Termologia, Ondulatória, Óptica* (Saraiva, São Paulo, 2016), v. 2, 3ª ed.
- [9] M. Thompson, E. Peres Rios (eds.), *Observatório de Ciências 7º Ano – Manual do Professor* (Moderna, São Paulo, 2018).
- [10] J. Fleming, *Historical Perspectives on Climate Change* (Oxford University Press, New York, 1998).
- [11] S. Arrhenius, in *The Warming Papers: The Scientific Foundation for Climate Change Forecast*, editado por D. Archer, R. Pierrehumbert (Blackwell Publishing, Oxford, 2011), p. 56-77.
- [12] D. Archer, R. Pierrehumbert (eds.), *The Warming Papers: The Scientific Foundation for Climate Change Forecast* (Blackwell Publishing, Oxford, 2011).
- [13] J. Fleming, *Endeavour* **32**, 72 (1999). doi
- [14] J.B. Fourier, in *The Warming Papers: The Scientific Foundation for Climate Change Forecast* (Blackwell Publishing, Oxford, 2011), p. 7-20.
- [15] C.J. Van der Veen, *Polar Geography* **24**, 132 (2000). doi
- [16] J.B. Fourier, *American Journal of Science* **32**, 1 (1837).
- [17] K. Butti, J. Perlin, *A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology* (Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981). Disponível em https://ia800207.us.archive.org/26/items/AGoldenThread-2500YearsOfSolarArchitectureAndTechnology/golden-thread_text.pdf, acesso em 10/09/2023.