

## Base física do efeito estufa e aquecimento global - 10/01/2022

\_Sobre as bases físicas que mostram que as emissões antropogênicas de gases estufa contribuem para o aquecimento global\*\*[i]\*\*\_

**\*\*Introdução\*\*.** Com a emergência da temática ambiental, nos interessa entender questões ligadas às mudanças climáticas e ao aquecimento global. Para isso, requer voltarmos a conceitos básicos outrora vistos para melhor compreensão desses fenômenos, ou seja, suas bases físicas. A respeito do artigo, mais precisamente, os autores enfocam o aquecimento global cuja causa dominante é a ação humana, de acordo com a evolução das pesquisas científicas no último século e a despeito de alegações em contrário[ii]. Então, o efeito estufa tem papel preponderante na regulação da temperatura planetária.

**\*\*O papel da composição atmosférica na temperatura planetária.\*\*** Os autores trazem o raciocínio de Fourier, primeiro a tratar da temperatura planetária, de que a Terra, recebendo energia constantemente do sol, deveria reemitir-la de volta pois, de outra forma, superaqueceria e assim poderia manter uma temperatura de equilíbrio. A energia solar atinge os planetas de seu sistema por ondas eletromagnéticas cujas intensidades dependem da luminosidade do astro e da sua distância. Porém, boa parte dessa energia não é absorvida pelo planeta[iii], já que uma parte é refletida pela atmosfera e outra parte pela superfície. Ocorre que o planeta recebe a luz solar em metade de sua superfície e a reflete por toda a sua extensão (conceito conhecido por albedo[iv]). A figura abaixo ilustra esse ponto.

[!](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEiEDbbhAJ9gTFbNxOk15\_PBSsVmfuisjzxFnyzlRspowRdbQaJUGUtpTc7meoCIOWPMGbJdC2W0n5KtdDMuhmCAZ0VVoj6XAZHC5ENrO7AvtOD2gFjd3vtCkUREEAYT9RZRat7h-\_g73mtuhx-zkHeO2VnVmLVSSqVRwLeFH39HMq80a1yxi2sb5gbo=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEiEDbbhAJ9gTFbNxOk15\_PBSsVmfuisjzxFnyzlRspowRdbQaJUGUtpTc7meoCIOWPMGbJdC2W0n5KtdDMuhmCAZ0VVoj6XAZHC5ENrO7AvtOD2gFjd3vtCkUREEAYT9RZRat7h-\_g73mtuhx-zkHeO2VnVmLVSSqVRwLeFH39HMq80a1yxi2sb5gbo=s967)

Os itens elencados acima fazem com que a temperatura de equilíbrio da Terra (-18º) seja bem menor do que a temperatura em sua superfície, em torno de 15º. Comparando com outros planetas que têm as temperaturas estimadas, podemos notar a diferença entre elas, conforme a tabela que segue.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgiNPRLrGMVIyG3VTXGd9Lwf7PcadShYao2zWnjOfzpCQkIsliURyiSWo9TwOQgiHsjZikVgAPllvHDTv5Hfha2jkDI06ywyZhoM0fOwGoT7r7anPW8jmslu\_ybSXxZcOVT0JEJkgjv6ZsGZNzzlp0zweDAXErS7

--19xTSuxnMPtvztrMemfvj9XS=s633)

Se Mercúrio e Marte as têm próximas, isso não ocorre com Terra e Vênus que as têm distintas exatamente por conta da atmosfera de cada um. Se a atmosfera é substancial, isto é, espessa e com gases estufa, ela absorve parte da radiação refletida e aumenta a temperatura da atmosfera baixa, qual seja, da superfície e a isso dá-se o nome de “efeito estufa”. Já a próxima tabela ilustra as tênues pressões atmosféricas em Mercúrio e Marte que não geram as diferenças de temperatura bem como o oposto para Terra e Vênus.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgLnngabBuL-GRLvFFnTWT1HXIABLpdfp0uL91L2EBKsi8PWsyhraSEkz0iQC9ILHUwApNReT-DHjPGguD0Wxi1sxD\_JiecaoLua\_4iVVInQVWKdBLMSvUJ61SE1mLukXbo6a1DI70Zx933c6saOdduCVyTex\_gmcOmqlDVpbuRVbA3xjLas2VhieyA=s1597)

Vênus que, mais longe do sol do que Mercúrio, ainda assim apresenta alta temperatura devido à junção da alta pressão com alta presença do gás de efeito estufa dióxido de carbono, como podemos ver a seguir.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgtCq9Jg3Q0AM8EUf3TPQdI5\_B-i7TFwAhhUur93Nt4LBFc940joIWwxMPm2b98YmNg-XbQM8BHMqDnJS3IFCeA2cPA\_A1qstxFv\_c7UqlcDjvwmqrpU\_h7PhDnwhmHeD1h\_DjJBOTbIXjmXaGZStgxMqXWXpyvngi2Zk6IetFz-xu2H7lzyOfinM06=s1601)

Ainda conforme a tabela, embora Marte também tenha alta presença de CO<sub>2</sub>, ele é pouco concentrado como se pode ver pela sua pressão atmosférica, que faz com

que o planeta não absorva muita radiação infravermelha oriunda da superfície. A tabela também mostra a distinta composição de gases que a Terra apresenta com relação aos vizinhos Vênus e Marte (conforme figura dos planetas do sistema solar que se segue[v]) e, embora seja baixa a concentração de dióxido de carbono, ele se junta a outros gases (vapor d'água, metano e óxido nitroso) para compor o efeito estufa e aumentar a temperatura da superfície em 30° acima da temperatura de equilíbrio.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEiGZqtIYMRpsKDsG\_737wFmUmGUJw6nzmobaQ0yhqeJ1hQOfy8tbazKrjtVu\_7snjqVzVSH6p9xl0HvOb3FpUL6PRZgcbB1BUJ-6ve7w92IA0R\_Inw2bos3DasV\_CovpIB2y0Q7R3L47iMPvV6X2BB-3Tlcw-25bvnITrX9KzI5XnSJOJ9kGhK\_zPqJ=s896)

Os autores também enfatizam que é a própria vida na Terra, sua biosfera, que regula a composição química da atmosfera pelos ciclos biogeoquímicos e, se a vida fosse extinta, rapidamente teríamos uma composição similar a Vênus e Marte.

**Evaluation Warning: The document was created with Spire.Doc for Python.**

**\*\*Detalhamento do efeito estufa da Terra.\*\*** Embora Fourier tenha afirmado que o calor encontra menos resistência ao entrar na atmosfera em estado de luz do que ao sair como calor não luminoso, a base física só foi evidenciada com o uso de um espectrofotômetro por Tyndall, em 1859, que mostrou que dióxido de carbono e vapor d'água (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) poderiam absorver radiação infravermelha, enquanto oxigênio, nitrogênio e hidrogênio não (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>).

Contudo, só no século XX se clarificaram as medidas e os gases de efeito estufa, nomeadamente: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> (metano), N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), CFCs e O<sub>3</sub>(ozônio) que absorvem radiação infravermelha. Abaixo são mostrados os comprimentos de onda com destaque para o espectro visível e também as ondas longas de infravermelho na qual os gases estufa são ativos radioativamente.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEg6rQLo4KtSBUZVuof0goIthP7Qw7FGWryZxDpOtMa3JfS-sTkpbdd6xeZB7rBRMs9ZfNLQsFt-pkg8ZMXMTpjSq\_T4gy2CwpuAMv3YckTQrmahtiHukW0ZITSiN5qbcDxbZE2baOHiOeX288

i0AdqpF34SVgPr\_kD4CVX9Sg9vAkaWXmucfvFo6DD=s643)

Então, conforme já dito, o sol emite ondas eletromagnéticas para nós numa radiação visível que não é absorvida por esses gases (0,4  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ). Cerca de 70% dessa radiação visível entra na Terra aquecendo-a, que então emite radiação infravermelha para o espaço que é obstruída pelos gases estufa, esquentando a baixa atmosfera.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEhkfdX5dgza8Mas9T-pYoi6YXaMHvTA5mJ9ZQFRE9AiCV83KEF35cZvPjdTzaTvbdZMHFql75Sw8BJTDxdpjOGC6fAHP-c1uh4SebdRwCITBC21UKZe-eNWEWxhveCqcLH8kHMBs5ed\_LB6sEGY9OaWxiGXkPoI0G0ohg8gGtDM5SuNgnwwTZAHH048=s847)

Acima o desenho esquemático do efeito estufa, com destaque para a emissão de dióxido de carbono em todas as direções. Outro ponto é que, quanto maior a temperatura de um corpo, menor o seu comprimento de onda emitida e aí a Terra, bem mais quente, que absorvendo o efeito estufa emite em comprimento de 10  $\mu\text{m}$  (isso será mostrado em outro gráfico mais a frente). Pois que, pelo estudo da espectroscopia do infravermelho para o dióxido de carbono, é mostrado que ele absorve radiação nos comprimentos de onda de 4,2  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , ou seja, ele é opaco nesses pontos (e vai coincidir com o comprimento de onda da Terra, como se verá).

Os autores ainda trazem uma questão extremamente técnica para esclarecer as bandas de absorção do CO<sub>2</sub> e sua interação com a radiação infravermelha. Sucede-se que a radiação infravermelha incidente na molécula de CO<sub>2</sub> possui frequência compatível com a frequência de vibração do mesmo e este absorve radiação em uma mudança do momento de dipolo, que ocorre quando a molécula vibra e interage com os campos elétricos e magnéticos da radiação.

[](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEjuqUO9PcPkCqLreedE0q\_uGhWSdxCYxe\_vxXIfC9jWFssmvmUVh1qSybUuWGK9KCDNsF6F4gScJqnqLSbL2myGl1ZBOJXmsS0Y1rzTbJdENPDmGQI3oYeQl3it43XV6w4zJap9TADADS-

**Evaluation Warning: The document was created with Spire.Doc for Python.**

Ci2Pz1lh-gkz1uoYMYWIKltyXqLwYZob05ZkZQlrxthq=s611)

Acima é mostrado os modos normais de vibração do CO<sub>2</sub> com destaque para os momentos de absorção v<sub>2</sub> e v<sub>3</sub>, ao passo que o estado v<sub>1</sub> é apolar (simétrico). Trazendo o gráfico da emissão da radiação da Terra abaixo, vê-se a atuação da banda de 15 µm (v<sub>2</sub> acima) atuando na faixa de 10 µm, indicando a existência do efeito estufa.

[![]](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgPvqggxQrgmC2a0ZZUE2yOWe-

OBhJVb3aOmRQPiOctEwX4rFbCTm03Cac8wlVp4r4MotqgDS3FYRkyv9QTR1C5KFsG7qbw-UtydOT25OsYVPnAWDs9ZbgHG7JHYmYd9FWyPlf1RxTQ7Thh1VuBNqgp974rIh\_qbe31XAeFAMxpFnhNFemXkfRXcmQ=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgPvqggxQrgmC2a0ZZUE2yOWe-

OBhJVb3aOmRQPiOctEwX4rFbCTm03Cac8wlVp4r4MotqgDS3FYRkyv9QTR1C5KFsG7qbw-UtydOT25OsYVPnAWDs9ZbgHG7JHYmYd9FWyPlf1RxTQ7Thh1VuBNqgp974rIh\_qbe31XAeFAMxpFnhNFemXkfRXcmQ=s805)

**\*\*O balanço energia da Terra: o efeito estufa em ação\*\*.** A despeito do comportamento do CO<sub>2</sub>, etc., os autores ressaltam que o mecanismo principal da temperatura planetária é o balanço de energia da Terra, qual seja, a **maior fonte de energia é a radiação solar**, a intensidade da qual é constante e **as fontes de energia são os gases de efeito estufa**. De acordo com os cientistas, um desequilíbrio que possa levar a mudança da temperatura média ocorreria por três possibilidades ou **forçantes climáticas**: 1.) **mudança da radiação solar entrante**, seja por mudança na intensidade da radiação solar ou da órbita da Terra (que não tem acontecido, segundo observações), 2.) **mudança do albedo da Terra**, pela mudança de cobertura das nuvens, partículas de aerossóis e cobertura do solo (também não ocorre) e 3.) **mudança da radiação terrestre para o espaço**, devido à alteração na concentração dos gases de efeito estufa.

Não obstante, convém lembrar que a temperatura de equilíbrio se dá a uma altitude média da atmosfera acima dos gases estufa e, abaixo deles, há a temperatura da superfície que recebe a reemissão da radiação para baixo e aí se aplicam modelos de medida da transferência radioativa que não nos interessa detalhar agora, embora os autores os tivessem simplificado em um modelo de linha que abstrai as camadas da atmosfera e outros fatores como correntes oceânicas, variações dos espectros de onda, transferência de energia entre as camadas e distribuição dos gases.

De todo modo, desse modelo é possível estimar a temperatura da superfície a partir da temperatura de equilíbrio, chegando a um valor de ~303 K (-273 = 30°, acima dos 15° por conta da simplificação) e permitindo mostrar que a

**Evaluation Warning: The document was created with Spire.Doc for Python.**

“radiação reemitida para baixo contribui para o aquecimento da superfície” (p. 16) e também que, em última instância, a radiação escapa a altas altitudes e o aumento dos gases de estufa irá aumentar a temperatura de superfície e sua diferença com relação à temperatura de equilíbrio, desequilibrando o balanço.

**\*\*O aumento do efeito estufa e a busca do balanço trazem aquecimento.\*\*** Se o efeito estufa é um processo natural e essencial para a vida na Terra, a mudança da composição química da atmosfera pela concentração de gases de efeito estufa, sem dúvida, irá aumentar a temperatura do planeta. Acontece que, se é mantida a radiação entrante e os gases de efeito estufa dificultam a sua saída, há um desequilíbrio entre a entrada e a saída de radiação. Nesse caso, a Terra precisa esquentar para reequilibrar o fluxo de energia e, aí, atinge um novo estado de equilíbrio.

[!](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEjLCE\_Y2OpN401JdPZwc\_wMHdYCrOmnFp5t0kWXQ2cYgf-l2n620IjhHqT8mSPHxVXXijA3u3H23Ko3Bxd0Dj1tMujjte-KqnMXf7X9YCXynx47D7wXBIPJZ-oFT0SdZvZ\_SYxvLG6SMhdgPwzYvUYLkVu3r3jU7kj3vQ3uszs5\_owgrCpePlwqzCQ=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEjLCE\_Y2OpN401JdPZwc\_wMHdYCrOmnFp5t0kWXQ2cYgf-l2n620IjhHqT8mSPHxVXXijA3u3H23Ko3Bxd0Dj1tMujjte-KqnMXf7X9YCXynx47D7wXBIPJZ-oFT0SdZvZ\_SYxvLG6SMhdgPwzYvUYLkVu3r3jU7kj3vQ3uszs5\_owgrCpePlwqzCQ=s320)]

**Evaluation Warning: The document was created with Spire.Doc for Python.**

A figura acima ilustra a busca pelo balanço de energia quando, em b), o aumento da concentração de dióxido de carbono irá diminuir a temperatura de saída para 236K e, então, a Terra se aquece (3º) para atingir o novo equilíbrio. Esse valor de incremento e sua rapidez de aumento ainda são debate entre os cientistas, conforme enfatizam os autores.

**\*\*Papel do CO<sub>2</sub> no aquecimento global.\*\*** Se o vapor d’água contribui mais do que o CO<sub>2</sub> entre os gases com efeito estufa (vapor d’água = 50%, nuvens = 25%, CO<sub>2</sub> = 20% e demais gases 5%), o CO<sub>2</sub>, além de não condensável, apresenta evidências de relação com as eras do gelo[vi] e é parte da história climática da terra. Soma-se a isso que o nível atual de CO<sub>2</sub> jamais foi atingido no período observado (um pico de 300 contra 400 ppm atuais das emissões humanas pós revolução industrial)[vii].

Já o vapor d’água é condensável e se regula pela temperatura da atmosfera que vai comportar determinada quantidade, o resto condensa-se. Assim sendo, ele não é considerado uma forçante climática e se associa com o mecanismo de retroalimentação. Conclui-se que o CO<sub>2</sub> é o termostato da terra, já que a sua ausência atmosférica levaria a um congelamento do planeta.



A contribuição de dióxido de carbono de origem humana é demonstrada pelas conhecidas anotações de Charles David Keelling, ilustradas abaixo.

[)  
]([https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEjoIYxkSkWiN7xt9ebAaGXatwrdoRFkWwsEL01rtNbcywXKw4HPXLZaL8RUf62CYQPejOBdBlz2QhGu-3AZoUfYt7NX0LRoLF9pCf1y40xFayURWNSN-IBDOLXh6iA\\_5uA7B0\\_N6uBykFsvu7Lj6ffunLeAp\\_KLye7jvzisXGEjsb1BXISf\\_3suMT2d=s643](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEjoIYxkSkWiN7xt9ebAaGXatwrdoRFkWwsEL01rtNbcywXKw4HPXLZaL8RUf62CYQPejOBdBlz2QhGu-3AZoUfYt7NX0LRoLF9pCf1y40xFayURWNSN-IBDOLXh6iA_5uA7B0_N6uBykFsvu7Lj6ffunLeAp_KLye7jvzisXGEjsb1BXISf_3suMT2d=s643))

Se aliarmos esse dado com as medições de temperatura ao longo dos anos (considerando incremento de 1º desde a revolução industrial) e com as comprovações científicas que descartam as outras forçantes climáticas, os autores afirmam que:

“O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) criado em 1988 sob o comando da Organização Meteorológica Mundial (WMO) em seus relatórios tem atestado com níveis de confiança cada vez maiores que as evidências científicas são suficientemente fortes para afirmar que o aquecimento observado tem como causa dominante as emissões humanas de gases estufa (Ipcc, 2013)”

Por fim, os autores sintetizam o argumento da seguinte forma:

- 1\ O efeito estufa é um fenômeno natural essencial à vida na Terra.
- 2\ O mecanismo do efeito estufa opera a partir das moléculas dos gases estufa que absorvem a radiação infravermelha emitida pela Terra, reemitindo uma parte de volta para a superfície terrestre.
- 3\ As emissões humanas estão aumentando a concentração de gases estufa na atmosfera.
- 4\ Um aumento da concentração de gases estufa na atmosfera intensifica o efeito estufa da Terra.
- 5\ Um efeito estufa mais forte causa um desequilíbrio no balanço de energia da Terra.
- 6\ Para retornar ao equilíbrio energético a Terra precisa esquentar tendo como resultado o aquecimento global.

**Evaluation Warning: The document was created with Spire.Doc for Python.**

\* \* \*

[i] Conforme <[https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo\\_ID531/v13\\_n5\\_a2018.pdf](https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID531/v13_n5_a2018.pdf)>:  
Efeito Estufa e Aquecimento Global: Uma abordagem conceitual a partir da  
física para Educação Básica. Simplificado, resumido, sem fórmulas 😊.

[ii] “Fatos alternativos” citados: 1.) o planeta não está aquecendo, mas  
resfriando; 2.) estamos num ciclo natural; 3.) as emissões de dióxido de  
carbono não são um problema; 4.) o efeito estufa não existe.

[iii] Energia absorvida = potência.

[iv] Conforme <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/albedo.htm>>, albedo  
é a medida da quantidade de radiação solar refletida de um objeto ou alvo com  
relação a quantidade de energia incidente. O albedo varia de 1 (reflexão total  
de corpo refletor perfeito) a 0 (absorção total de um corpo negro), que são  
extremos teóricos inexistentes na natureza. O albedo da Terra como um todo,  
incluindo as nuvens, é em torno de 0,4, ou seja, 60% da energia solar  
incidente é refletida e não absorvida.

[v] Fonte: <<http://estudandoepesquisando.blogspot.com/2015/02/planetas-do-sistema-solar.html>>.

[vi] Conforme citação dos autores dos estudos feitos na estação Vostok da  
Antártica.

[vii] Não só o dióxido de carbono, como metano, óxido nitroso, ozônio e  
clorofluorcarbonetos apresentam aumentos expressivos de 1850 para cá,  
principalmente pela queima de combustíveis fósseis como petróleo e carvão,  
desmatamento, agricultura e pastagens.

**Evaluation Warning: The document was created with Spire.Doc for Python.**