

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 a 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/AVvXsEgiNPRLrGMVIyG3VTXGd9Lwf7

PcadShYao2zWnjOfzpCQkIsliURyiSWo9TwOQgiHsjZikVgAPliVHDTv5Hfha2jkDI06ywyZhoM0fOwGoT7r7anPW8jmslu_ybSXxZcOVT0JEJKGjv6ZsGZNzzlp0zweDAXErS7

--

19xTSuxnMPtvztrMemfvj9XS=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgiNPRLrGMVIyG3VTXGd9Lwf7PcadShYao2zWnjOfzpCQkIsliURyiSWo9TwOQgiHsjZikVgAPliVHDTv5Hfha2jkDI06ywyZhoM0fOwGoT7r7anPW8jmslu_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-DHjPGguD0Wxl1sxD_JiecaoLua_4iVVIInQVWKdBLMSvUJ61SE1mLukXbo6a1DI7OZx933c6saOdduCVyTex_gmcOmqqDVpbuRVbA3xjLas2VhieyA=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgLnngabBuL-GRLvFFnTWT1HXIABLpdfp0uL91L2EBKsi8PWsyhraSEkz0iQC9ILHUwApNReT-DHjPGguD0Wxl1sxD_JiecaoLua_4iVVIInQVWKdBLMSvUJ61SE1mLukXbo6a1DI7OZx933c6saOdduCVyTex_gmcOmqqDVpbuRVbA3xjLas2VhieyA=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=s320)](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 CO₂, 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_lnw2bos3DasV_CovpIB2y0Q7R3L47iMPvV6X2BB-3Tlcw-25bvnITrX9KzI5XnSJOJ9kGhK_zPqJ=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEiGZqtIYMRpsKDsG_737wFmUmGUJw6nzmobaQ0yhqeJ1hQOfy8tbazKrjtVu_7snjqVzVSH6p9xl0HvOb3FpUL6PRZgcbB1BUJ-6ve7w92IA0R_lnw2bos3DasV_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.

****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 (CO₂, H₂O) poderiam absorver radiação infravermelha, enquanto oxigênio, nitrogênio e hidrogênio não (O₂, N₂, H₂).

Contudo, só no século XX se clarificaram as medidas e os gases de efeito estufa, nomeadamente: CO₂, H₂O, CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), CFCs e O₃ (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_T4gy2CwpuAMv3YckTQrmahtiHukW0ZITSiN5qbcDxbZE2baOHiOeX288i0AdqpF34SVgPr_kD4CVX9Sg9vAkaWXmucfvFo6DD=s320)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEg6rQLo4KtSBUZVuof0goIthP7Qw7FGWryZxDpOtMa3JfS-sTkpbdd6xeZB7rBRMs9ZfNLQsFt-pkg8ZMXMTpjSq_T4gy2CwpuAMv3YckTQrmahtiHukW0ZITSiN5qbcDxbZE2baOHiOeX288i0AdqpF34SVgPr_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 μm a 0,7 μm). 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 menos quente que o sol, emitindo na faixa do infravermelho em torno de 10 μm (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 μm e 15 μm , 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 CO₂ e sua interação com a radiação infravermelha. Sucede-se que a radiação infravermelha incidente na molécula de CO₂ 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/AVvXsEjuqU09PcPkCqLreedE0q_uGhWSdxCYxe_vxXIfC9jWFssmvmUVh1qSybUuWGK9KCDNsf6F4gScJqnqLSbL2myGl1ZBOJXmsS0Y1rzTbJdENPDmGQI3oYeQl3it43XV6w4zJap9TADADS-Ci2Pz1lh-gkz1uoYMYWIKltyXqLwYZob05ZkZQlrxthjq=s611))

Acima é mostrado os modos normais de vibração do CO₂ com destaque para os momentos de absorção v₂ e v₃, ao passo que o estado v₁ é apolar (simétrico). Trazendo o gráfico da emissão da radiação da Terra abaixo, vê-se a atuação da banda de 15 µm (v₂ acima) atuando na faixa de 10 µm, indicando a existência do efeito estufa.

[)](https://blogger.googleusercontent.com/img/a/AVvXsEgPvqggxQrgmC2a0ZZUE2yOWe-OBhJVb3aOmRQPioctEwX4rFbCTm03Cac8wlVp4r4MotqgDS3FYRkyv9QTR1C5KFsG7qbw-UtydOT250sYVPnAWDs9ZbgHG7JHYmYd9FWyPif1RxTQ7Thh1VuBNqgp974rIh_qbe31XAEfAmxpFnhNFemXkfRXcmQ=s805)

****O balanço energia da Terra: o efeito estufa em ação**.** A despeito do comportamento do CO₂, etc., os autores ressaltam que o mecanismo principal da temperatura planetária é o balanço de energia da Terra, qual seja, a manutenção da temperatura média entre as intensidades de energia entrantes e saíntes. 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 = 30º, acima dos 15º por conta da simplificação) e permitindo mostrar que a “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-l2n620ljHqT8mSPHxVXXijA3u3H23Ko3Bxd0Dj1tMujjkte-KqnMXf7X9YCXynx47D7wXBIPJZ-oFT0SdZvZ_SYxvLG6SMhdgPwzYvUYLkVu3r3jU7kj3vQ3uszs5_owgrCpePlwqzCQ=s544)

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 CO₂ no aquecimento global.**** Se o vapor d'água contribui mais do que o CO₂ entre os gases com efeito estufa (vapor d'água = 50%, nuvens = 25%, CO₂ = 20% e demais gases 5%), o CO₂, 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 CO₂ 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 CO₂ 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)

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 antropogênicas 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.

* * *

[i] Conforme <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 retida no sistema Terra.

[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.