

Aquecimento global: Uma abordagem para o ensino de física

(*Global warming: An approach for teaching physics*)

D.A. Magalhães¹

Departamento de Ensino, Instituto Federal Catarinense, São Francisco do Sul, SC, Brasil

Recebido em 8/5/2014; Aceito em 26/6/2014; Publicado em 3/10/2014

O objetivo deste artigo consiste em apresentar uma abordagem didática acerca das mudanças climáticas e do aquecimento global. Apresentamos alguns institutos de pesquisa e o principal órgão de avaliação das mudanças climáticas e um breve panorama dos trabalhos publicados na área em periódicos nacionais, em português. Nós também discutimos algumas ideias rudimentares, tais como: radiação de corpos negros e modelos elementares, efeito estufa, forçamento radioativo e anomalias de temperatura. O assunto é discutido em diferentes níveis conceituais e matemáticos de ensino.

Palavras-chave: aquecimento global, forçamento radioativo, anomalia de temperatura, ensino de física.

The purpose of this paper is to present a pedagogical approach concerning climate change and global warming. We present some research institutes and the leading international body for the assessment of climate change and a brief overview of papers published on the subject in Brazilian journals, in Portuguese. We also discuss some elementary ideas, such as blackbody radiation and elementary models, greenhouse effect, radiative forcing and temperature anomalies. The subject is discussed in different conceptual and mathematical levels of teaching.

Keywords: global warming, radioactive forcing, temperature anomalies, Physics teaching.

1. Introdução

Há anos o estado de conhecimento das mudanças climáticas, bem como seus potenciais impactos ambientais e sócio-econômicos, têm sido amplamente difundidos em todas as esferas da sociedade. Informações são divulgadas para a população geral pelos meios de comunicação sem o cuidado e esclarecimento necessários acerca dos termos utilizados e seus significados atribuídos, o que pode levar a conclusões precipitadas, alarmistas e contraditórias.

Na atual conjectura mundial, o aquecimento global compromete o desenvolvimento sustentável do planeta, ou seja, aquele que satisfaz às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer às suas próprias necessidades. De fato, a preocupação com o desenvolvimento da consciência sustentável, preocupada com a saúde do planeta, esta em foco em muitas manchetes e discursos ambientalistas.

Por outro lado, há décadas o ensino tradicional de ciências, e em particular de física, tem-se mostrado limitado tanto para os professores quanto para os alunos e sociedade em geral; essa é uma realidade que se estende desde a escola primária até os cursos de graduação. A busca pela melhoria da qualidade do ensino,

portanto, tem sido fonte de debates que acabam culminando, inclusive, nos currículos em vigor. No Brasil, o governo tem implementado propostas que visam melhorar a qualidade do ensino de física: os PCN+ [1] e as DCN [2] apontam na direção de uma profunda reformulação do currículo de física no Ensino Médio e da formação de professores de física, respectivamente. Os PCN+ colocam como habilidades e competências para os alunos de Ensino Médio [1]: i) consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia; ii) argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia, emitindo juízos próprios sobre notícias com temas relativos à ciência e tecnologia; iii) compreender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea; iv) reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e tecnológico e utilizar esses conhecimentos no exercício da cidadania. Por sua vez, as DCN traçam que o físico deve [2]: i) manter atualizada sua cultura científica geral; ii) desenvolver uma ética de atuação profissional e a consequente responsabilidade social, compreendendo a ciência como conhecimento histórico, desenvolvido em diferentes contextos sócio-políticos, culturais e econômicos; iii) elaborar ou adaptar materiais didáticos de diferentes naturezas.

¹E-mail: diogo.magalhaes@saofrancisco.ifc.edu.br.

A abordagem de temas de interesse político, econômico e social em aulas de física mostra-se capaz de atrair a atenção dos alunos e, conseqüentemente, proporcionar uma aprendizagem significativa sobre os assuntos em questão, contribuindo para a formação crítica e consciente dos estudantes de todos os níveis de ensino, afinal um dos objetivos essenciais do processo educacional é levar aos estudantes uma informação confiável do ponto de vista da ciência. Nesse sentido, professores e futuros professores de ciências e física deveriam compreender a física inerente às mudanças climáticas e suas questões, já que é um tema que tem sido amplamente disseminado e discutido no mundo todo nos últimos anos.

O principal organismo mundial de avaliação das mudanças climáticas, com o objetivo de transmitir informações claras e cientificamente corretas para a sociedade, é o IPCC² (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). O IPCC foi estabelecido em 1988 pelo UNEP (*United Nations Environment Programme*) e pela WMO (*World Meteorological Organization*), e foi aprovado no mesmo ano pela Assembléia Geral da UN (*United Nations*). A WMO é uma agência especializada da UN, sendo sua voz sobre meteorologia, hidrologias operacionais e ciências geofísicas relacionadas; hoje, a WMO possui 191 Estados membros e Territórios. Já o UNEP consitui um programa da UN para o meio ambiente, cujo objetivo é fortalecer a capacidade dos países de integrar as respostas de mudança climática em processos nacionais de desenvolvimento, particularmente das nações em crescimento.

O glossário do IPCC [3] define o conceito de sistema climático, ou simplesmente clima, como um sistema complexo constituído, principalmente, pela atmosfera, pela hidrosfera, pela criosfera, pela superfície da terra e pela biosfera, bem como as interações entre elas. Mudanças no clima ocorrem com o passar do tempo, devido tanto à sua dinâmica interna quanto aos efeitos externos, os quais são fatores externos ao sistema climático que causam-no variações, tais como erupções vulcânicas, variações solares, mudanças antropogênicas que variam a composição da atmosfera e o próprio uso da terra. As emissões antropogênicas são emissões de gases do efeito estufa (por exemplo CO₂, N₂O, CH₄, etc.) e aerossóis associados com atividades humanas, incluindo a queima de combustíveis fósseis, desmatamento, etc.

O UNFCCC³ (*United Nation Framework Convention on Climate Change*) define o conceito de mudança climática como uma mudança de clima que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera mundial e que

se some à variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis. No glossário de definições do IPCC [3], refere-se a mudanças no estado do clima, que podem ser identificadas (por exemplo, por meio de testes estatísticos) por mudanças na média e/ou nas variações das suas propriedades, as quais persistem durante um longo período de tempo, tipicamente de décadas ou mais.

É importante ressaltar que o IPCC não é uma organização que realiza pesquisas ou monitora dados ou parâmetros climáticos; ele se restringe a analisar e avaliar as mais recentes informações científicas, técnicas e sócio-econômicas para o entendimento das mudanças climáticas.

Um dos institutos que enfatiza a ampla pesquisa científica acerca da mudança climática global é o GISS⁴ (*Goddard Institute for Space Studies*), o qual é vinculado à NASA (*National Aeronautics and Space Administration*); outro exemplo é o NCDC⁵ (*National Climatic Data Center*), o qual é um órgão do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*); por sua vez, o CRU⁶ (*Climatic Research Unit*) é vinculado a UEA (*University of East Anglia*).

Na próxima seção levantamos um breve panorama das publicações sobre o tema em periódicos de circulação nacional. Na seqüência, discutimos alguns modelos elementares para o balanço de energia do sistema Sol-Terra, bem como uma análise quantitativa não rigorosa do efeito estufa. Em seguida, trabalhamos o conceito de forçamento radioativo, o qual por sua vez é um importante parâmetro no estudo do aquecimento global, por fornecer bases quantitativas para estimativas de impactos ambientais. Depois é discutida a ideia de temperatura média global, donde se faz necessária a introdução das anomalias de temperatura.

2. Uma breve revisão

Apresentamos na seqüência uma breve e não esgotada revisão de algumas publicações relacionadas às mudanças climáticas e ao aquecimento global, em nossa língua pátria nos principais periódicos nacionais, estabelecendo um limite de dez anos.

Pina e cols. [4] discutiram incertezas e controvérsias científicas diretamente relacionadas às mudanças climáticas. Os autores fizeram considerações voltadas para o ensino básico sobre o balanço energético do sistema Sol-Terra, o efeito estufa e a sua intensificação e a temperatura média da Terra, que visam subsidiar discussões sobre o tema em sala de aula.

Já Xavier e Kerr [5] analisaram o tratamento dado ao efeito estufa em textos não científicos de grande cir-

²<http://www.ipcc.ch>.

³<http://www.unfccc.int>.

⁴<http://www.giss.nasa.gov>.

⁵<http://www.ncdc.noaa.gov>.

⁶<http://www.cru.uea.ac.uk>.

culação e em livros paradidáticos. Os autores discutiram falhas encontradas nesses materiais e como elas podem afetar a formação dos conceitos sobre o efeito estufa nos alunos e na população em geral; apresentaram também um balanço radioativo entre o sol e a terra, o qual é bastante frequente em livros textos que tratam a radiação de corpos negros.

Por sua vez, Furtado [6] apresentou um modelo adiabático da atmosfera terrestre, que descreve o aquecimento global atribuído ao efeito estufa; o autor assumiu como principal causa do aquecimento global o aumento na concentração de CO_2 na troposfera na era pós-industrial. Este trabalho, por sua vez, utiliza um ferramental matemático ainda não acessível aos estudantes de Ensino Médio, devido ainda aos atuais currículos; naturalmente, torna-se adequado para uso em cursos universitários e de formação continuada, exclusivamente.

Em comunhão com os PCN+ e as DCN, diversos autores têm apontado para a abordagem de temas controversos em sala de aula, tais como visto nas Refs. [7–9]. Dentro do contexto deste trabalho, atividades controversas ligadas a temas sociocientíficos propoçionam um ambiente em sala de aula onde as ideias científicas tomam sentido e incentivam o envolvimento dos alunos, independente do nível de ensino trabalhado.

Galvão e cols. [9] fizeram um estudo com 29 professores formandos, de um mestrado em educação, com o intuito de avaliar as potencialidades de discussões de controvérsias sociocientíficas na formação de professores; concluíram que, embora as avaliações tivessem sido positivas, havia uma necessidade constatada de “continuar a apoiar estes professores na implementação destas atividades com os seus alunos de modo a desenvolverem o conhecimento necessário à sua implementação”. Ainda segundo os autores, “as potencialidades da discussão de assuntos sociocientíficos ficaram bem evidentes nas narrativas dos professores formandos”.

Por meio de dois questionários abertos, Reis e cols. [10] investigaram compreensões que licenciandos em física de uma universidade pública possuem a respeito das mudanças climáticas. Os resultados obtidos pelos autores constaram que “a maior parte dos futuros professores não estão devidamente preparados para trabalhar com o tema mudanças climáticas como um tema controverso em suas atividades educativas”.

3. Física para o aquecimento global

A pesquisa sobre as mudanças climáticas é baseada, principalmente, em observações e em modelos climáticos.

Em geral, os modelos consideram o grupo das equações de Navier-Stokes, as quais são integradas no tempo, fundamentando projeções futuras sobre o clima. A equação de conservação de energia inclui a

variação da temperatura com o tempo e é influenciada por mudanças de fase da água fontes de energia (como a radiação solar, por exemplo), transportes de calor de regiões quentes para regiões frias, etc. Este grupo compreende um conjunto de equações não lineares que precisam ser resolvidas numericamente; o artigo da Ref. [11] apresenta alguns detalhes do modelo climático do GISS. A equação da variabilidade da temperatura com o tempo contém termos advectivos (referentes ao transporte pelo vento), de mudanças de fase e de forçamentos radiativos.

Já as observações geram um conjunto de dados climáticos utilizados em análises e estimativas. Uma das vias para esses cálculos são as SST's (*Sea Surface Temperatures*), isto é, temperaturas da superfície do oceano, as quais são medidas por termômetros ou satélites. As SST's sofrem influência tanto de processos atmosféricos como de oceânicos. Referente à atmosfera, a temperatura do ar, a velocidade do vento e a umidade são fatores relevantes na análise da troca de energia com a superfície do oceano; com relação à influência oceânica, o transporte de calor por correntes influencia profundamente as SST's.

Segundo Schmidt [12], a física dos modelos climáticos se divide em três categorias. A primeira envolve os princípios de conservação fundamentais e os processos, tais como órbitas mecânicas, por exemplo. Já a segunda trata de uma física bem conhecida do ponto de vista teórico que na prática deve ser aproximada devidos às discretizações que as equações de meios contínuos sofrem. Por fim, a terceira contempla uma física conhecida empiricamente, tais como fórmulas para vaporização, etc. E são nas duas últimas categorias que residem as grandes delicadezas da física do clima, já que há uma complexa fenomenologia de processos na escala atômica.

Nesse momento, é importante a distinção entre clima e tempo: o primeiro refere-se a um problema de valor de contorno, sendo objeto de estudo da climatologia, enquanto o segundo é um problema de valor inicial, sendo figura de interesse da meteorologia. Ainda de acordo com Schmidt [12], o tempo é caótico, já que diferenças imperceptíveis na atmosfera implicam em condições radicalmente diferentes em uma semana ou mais; de outro lado, o clima é uma descrição estatística dos estado atual e da variabilidade do sistema, e não uma trajetória individual pelo espaço de fase.

3.1. Radiação de corpos negros

Por definição, um corpo dito negro possui a propriedade de absorver toda radiação eletromagnética incidente sobre ele; a radiação dentro de uma cavidade cujas paredes estejam a uma temperatura T tem o mesmo caráter que a radiação emitida pela superfície de um corpo negro à mesma temperatura [13].

A distribuição espectral de um corpo negro a uma

temperatura (absoluta) T é determinada pela radiância espectral $R(\nu)$, onde ν é a frequência da radiação, tal que $R(\nu)d\nu$ é a energia emitida por uma superfície a uma temperatura T , por unidade de tempo e por unidade de área, entre as frequências ν e $\nu + d\nu$, a qual é dada por

$$R(\nu)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu, \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck, k é a constante de Boltzmann e c é a velocidade da luz no vácuo. A radiância R emitida pela superfície do corpo a uma temperatura T , em todas as frequências, é dada pela lei de Stefan-Boltzmann⁷

$$R = \sigma T^4, \quad (2)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Assim, supondo que um corpo se comporte como um corpo negro, a Eq. (2) nos permite estimar a temperatura absoluta de sua superfície através da relação $T = \sqrt[4]{R/\sigma}$.

3.2. Modelos elementares

Atribuir uma única temperatura a Terra é consistente com as observações feitas do espaço, cujo espectro de radiação se comporta como o de um corpo negro, a menos de algumas lacunas, as quais correspondem à absorção dos gases do efeito estufa, como mostra a Fig. 1. A parte azul da Fig. 1 representa a radiância espectral da parte superior da atmosfera da Terra, cujo comportamento se aproxima de um corpo negro a uma temperatura $T = 294 \text{ K} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$.

No caso de nosso planeta, temos o Sol como fonte natural de aquecimento, cuja energia irradiada por unidade de tempo e área é $R = 1360,8 \text{ Wm}^{-2}$, denominada constante solar.⁸ Entretanto, a radiação incide sobre a projeção de sua superfície sobre um plano perpendicular à direção de propagação dessa radiação; essa área vale πr^2 , onde r é o raio da Terra. Considerando seu movimento de rotação, todos os $1360,8 \text{ Wm}^{-2}$ são distribuídos por toda sua superfície, isto é, $4\pi r^2$. Portanto, a radiação incidente sobre a superfície da Terra é quatro vezes menor do que a constante solar, ou seja, $R = 342 \text{ Wm}^{-2}$. Utilizando a Eq. (2), conclui-se que a temperatura da superfície da Terra seria $T \simeq 278,32 \text{ K} = 5,32 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse modelo não leva em consideração o albedo (α) da Terra, isto é, a radiação solar que é refletida pela superfície da Terra e retorna diretamente para o espaço, ou simplesmente fator de reflectividade.

Incorporando esse termo à lei de Stefan-Boltzmann, ela fica reescrita como

⁷Uma análise da lei de Stefan-Boltzmann bem como uma sucinta discussão sobre radiação eletromagnética e radiação de corpo negro podem ser encontradas, por exemplo, na Ref. [13].

⁸Medidas feitas pelo TIM (*Total Irradiance Monitor*), um espectrômetro a bordo do satélite SORCE (*Solar Radiation and Climate Experiment*), da NASA. A Ref. [15, p.8SM-7] apresenta uma reconstrução da irradiação solar total entre os anos de 1750 e 2012.

⁹Uma figura que representa o balanço de energia da Terra de uma forma mais completa e com dados oficiais pode ser encontrada na Ref. [3, p. 181], por exemplo.

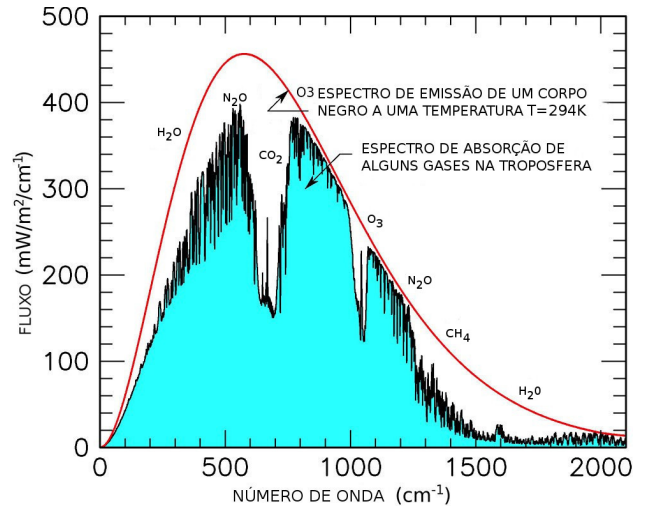


Figura 1 - Radiância espectral da parte superior da atmosfera da Terra, mostrando a absorção de frequências específicas e o princípio de absorção. A curva vermelha mostra o fluxo de um clássico corpo negro com $T = 294 \text{ K} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$. Adaptado da Ref. [14].

$$(1 - \alpha)R = \sigma T^4. \quad (3)$$

Tomando-se $\alpha = 0,3$, obtém-se $T \simeq 254,57 \text{ K} = -18,43 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3. Efeito estufa

Os valores obtidos para a temperatura da Terra a partir dos dois modelos básicos divergem daquele observado e considerado atualmente correto: $T = 288 \text{ K}$ [16]. A Fig. 2 representa esquematicamente o balanço de energia da Terra, segundo os cálculos apresentados neste texto.⁹ A temperatura no canto superior esquerdo indica $T = 278,32 \text{ K}$ obtida em nossa primeira análise; a do canto superior direito, $T = 254,57 \text{ K}$, quando consideramos o fator de absorção da superfície da Terra; e da parte inferior, a temperatura observada para a Terra: $T = 288 \text{ K}$.

O conceito do efeito estufa consiste numa possível abordagem para a diferença de temperatura $\Delta T = 288 - 254,57 = 33,43 \text{ K}$ entre a temperatura observada da Terra e da estimada pelo modelo elementar, que a considera um corpo negro e leva em conta a reflectividade da superfície da Terra.

Antes de tentarmos tratar da possível ação e influência do homem sobre o clima, é importante compreendermos como se constitui a correlação entre a atividade solar e a temperatura da superfície da Terra. Silva [17] explica que:

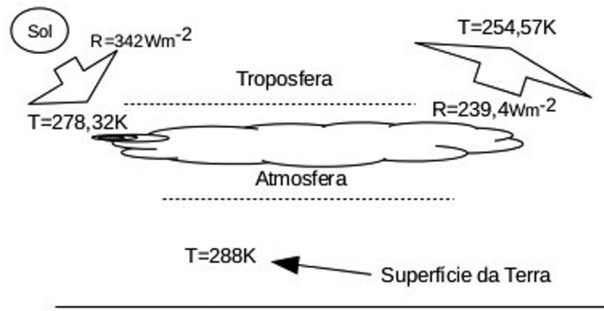


Figura 2 - Balanço de energia da Terra indicando as radiâncias de entrada e saída da troposfera e as respectivas temperaturas correspondentes, bem como a temperatura atual considerada para a superfície da Terra.

Quando a atividade solar aumenta, aumenta também o vento solar entrelaçado por campos magnéticos que permeia todo o espaço interplanetário. Este campo magnético, intensificado em épocas de máxima atividade solar, por sua vez inibe a penetração de raios cósmicos (que na verdade são partículas em sua maioria carregadas eletricamente) no sistema solar e, por consequência, na atmosfera terrestre. Os raios cósmicos são partículas produzidas fora do sistema solar com uma energia tipicamente bem superior a das partículas que compõem o vento solar. Estas partículas cósmicas servem como centros de nucleação para a formação de gotículas de água que compõem as nuvens. Logo, um fluxo menor de raios cósmicos acarreta uma redução do número de nuvens, que são responsáveis por refletir a luz solar. Devido à redução das nuvens na atmosfera, há menos perdas por reflexão, gerando uma maior incidência de radiação solar na superfície da Terra.

Em seguida, basicamente, a superfície da Terra, que passa a absorver maior radiação (visível), devolve essa energia na forma de radiação infravermelha. O espectro de alguns gases da atmosfera tem linha de absorção nesta parte, o que faz com que eles absorvam uma parte de fótons infravermelhos, tal que eles ficam retidos e não retornam ao espaço; isto, aliás, é o que permite a forma de vida na Terra como se tem hoje em dia.

Consideremos um acréscimo de temperatura ΔT decorrente de uma variação ΔR no balanço do fluxo radioativo da Terra, atribuídos, genericamente, tanto aos agentes externos como à própria dinâmica interna do clima. Reescrevamos a Eq. (2)

¹⁰Tal como, por exemplo, quando saímos de uma sala com ar condicionado ligado a uma temperatura $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ para uma outra ao lado sem ar condicionado a $T = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, tal que $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

¹¹A análise feita também pode ser aplicada tomando-se $\epsilon \ll 1$, tal que $\sqrt[4]{1+\epsilon} \approx 1 + \frac{\epsilon}{4}$; daí, obtém-se, em primeira ordem de aproximação, $\Delta T \sim \epsilon T/4$; ou ainda, simplesmente abrindo o termo $(T + \Delta T)^4$, donde $\Delta R \simeq 4\sigma T^3 \Delta T$.

¹²A ideia de temperatura média global será tratada adiante.

$$R + \Delta R = \sigma(T + \Delta T)^4. \quad (4)$$

Dividindo-a por R e utilizando a própria Eq. (3), tem-se

$$\Delta T = T \left(\sqrt[4]{1 + \epsilon} - 1 \right), \quad (5)$$

onde $\epsilon \equiv \Delta R/R$ representa a variação percentual no fluxo de radiação total; analisemo-la.

Com $T = 254,57 \text{ K}$, se $\epsilon \sim 1$, teríamos $\Delta T \simeq 48,17 \text{ K}$; se $\epsilon \sim 0,1$, teríamos $\Delta T \simeq 6,14 \text{ K}$. Ambos os resultados ilustram algo absurdo, visto que seriam detectados com qualquer termômetro de grande imprecisão ou tão imprecisos quanto se queira; em outras palavras, se isso acontecesse, nosso próprio organismo perceberia essa informação climática.¹⁰ Agora, se $\epsilon \sim 0,01$, teríamos $\Delta T \approx 0,63 \text{ K}$, um resultado certamente mais razoável para os padrões humanos, considerando um limite de variação da ordem de 1 K para nossa percepção. Assim, fazendo $\Delta T \equiv 1 \text{ K}$, tem-se $\epsilon \simeq 0,0158$, donde conclui-se que $\Delta R \simeq 3,76 \text{ Wm}^{-2}$; ou seja, um aumento de aproximadamente $3,76 \text{ Wm}^{-2}$ no fluxo radioativo da Terra implicaria, aproximadamente, num aumento de 1 K na temperatura da Terra.¹¹

3.4. Forçamento radiotivo

O clima é um sistema complexo, composto por inúmeros agentes, internos e externos, que participam da dinâmica de sua constituição, tal que uma dada alteração, então, é resultado de um conjunto de ações interligadas. Nesse sentido, o estudo da influência de um certo agente não pode mostrar seu próprio impacto. É por isso que são usados parâmetros que relacionam causa e efeito com o objetivo de estimar o impacto de um dado componente do clima. O forçamento radiotivo F e o forçamento radiotivo efetivo FE são amplamente utilizados na comunidade científica, visto que, a partir de subsídios quantitativos, permitem estimar, individualmente, o impacto de agentes do clima, incluindo os fatores antropogênicos e os naturais [3].

Conceitualmente, o forçamento radioativo expressa a mudança do fluxo de radiação sobre a Terra, para mais ou para menos, entre a troposfera e sua superfície, devido a alguma mudança oriunda de algum agente externo [3]. Já o forçamento radiotivo efetivo representa a mudança do fluxo de radiação incidente ao longo da troposfera após considerados seus efeitos sobre atmosfera, vapor de água e nuvens; ele contempla ajustes ou rápidas mudanças ocorridas num dado sistema, mas com uma temperatura global mensurável,¹² pelo menos em alguma porção local de sua superfície [3]. Ambos são medidos em W/m^2 . Os cálculos de FE requerem

longas simulações com modelos complexos que os de F ; entretanto o fruto disso é mais promissor, visto que a inclusão desses termos de ajuste rápido produzem um melhor indicador para a temperatura média global.¹³

Operacionalmente, há uma relação linear que representa o balanço de energia do clima, dada entre sua variação de temperatura ΔT e o forçamento radiotivo F [3]

$$\Delta T = \lambda F. \quad (6)$$

O parâmetro de proporcionalidade λ representa a sensibilidade climática.

Usualmente calcula-se F usando-se duas épocas distintas, tais como a era pré-industrial e os dias atuais, ou seja, $\lambda \equiv \lambda_1 + \lambda_2$. Segundo o IPCC [3], $\lambda = 1,06 \text{ K (W/m}^2\text{)}^{-1}$, tal que $\lambda_1 = 0,631 \text{ K (W/m}^2\text{)}^{-1}$ e $\lambda_2 = 0,429 \text{ K (W/m}^2\text{)}^{-1}$.

No relatório do IPCC de 2013 consta uma tabela que sintetiza os forçamentos radiotivos relativos a 1750 [3, p. 14]; a Tabela 1 apresenta uma síntese deste conteúdo.

Em 2013, os efeitos da concentração de gás carbônico representam 56% do forçamento radiotivo referente aos impactos dos gases do efeito estufa e aproximadamente 73% do total. Essencialmente, nisso reside a preocupação em relação à emissão de CO_2 na atmosfera e seus impactos na natureza, donde surge a especulação dos efeitos danosos causados pelo homem sobre o clima, principalmente a queima de carvão, petróleo e gás natural.

Outro ponto a ser notado é que a análise da seção anterior, donde obtivemos $\Delta R \simeq 3,76 \text{ Wm}^{-2}$, é da mesma ordem de grandeza do forçamento radiotivo total $F = 2,29 \text{ Wm}^{-2}$.

Agora, utilizando a Eq. (6), com $\lambda = 1,06$ e $F = 2,29$, temos que $\Delta T \simeq 2,43 \text{ K}$, que representa uma variação de temperatura da ordem de grandeza do limite acima discutido. Em outras palavras, variações de temperatura de ordem de grandeza superiores deveriam ser trivialmente percebidas, ao contrário do que ocorre, de fato, em nossos padrões humanos.

Uma outra maneira de olharmos para o forçamento radiotivo é a partir da lei de Stefan-Boltzmann

$$F \equiv \gamma \sigma | T_{top}^4 - T_{sup}^4 |, \quad (7)$$

onde T_{top} e T_{sup} são as temperaturas da toposfera e da superfície, respectivamente, e a constante γ será analisada a seguir.

Com $T_{sup} = 288 \text{ K}$ e $T_{top} = 254,57 \text{ K}$, tem-se $F = 151,95\gamma$. Tomando-se $F = 2,29 \text{ Wm}^{-2}$ ou $F = 3,76 \text{ Wm}^{-2}$, tem-se estimada a ordem de grandeza de $\gamma \sim 0,01$, tal como ϵ ; ou seja, $\gamma \equiv \epsilon$ representa simplesmente o aumento de 0,01 na emissividade da superfície da Terra para os valores adotados nessa análise.

Outra possível análise se dá utilizando as Eqs. (6) e (7) e considerando $\Delta T \sim 1 \text{ K}$, $T_{sup} = 288 \text{ K}$ e $T_{top} = 254,57 \text{ K}$, donde se obtém $\lambda\gamma = 0,0066$. De um lado, assumindo $\gamma \sim 0,01$ tem-se $\lambda \simeq 0,66$, conferindo com a ordem de grandeza do relatório do IPCC; de outro, com $\lambda = 1,06$, tem-se $\gamma \simeq 0,0062 \sim 0,01$.

3.5. Temperatura

A Termodinâmica é uma teoria fenomenológica da matéria, isto é, seus conceitos são definidos a partir de experimentos; ela descreve somente sistemas cujos parâmetros termodinâmicos não variam com o tempo. Isto é definido por uma relação funcional, a equação de estado entre as variáveis extensivas e intensivas do sistema [19, 20]. Exemplos de parâmetros extensivos são a energia interna o volume, a entropia e o número de mols; de intensivos, a temperatura, a pressão e o potencial químico.

Sejam dois sistemas A e B separados e, individualmente, em equilíbrio termodinâmico. Considere agora que os dois sistemas sejam colocados em contato, tal que depois de certo tempo um novo equilíbrio foi atingido. O volume V do novo sistema é dado pela soma $V = V_A + V_B$, tal como o número de mols $N = N_A + N_B$. Por outro lado, sua temperatura T não será dada soma $T_A + T_B$ ou muito pouco provavelmente por $(T_A + T_B)/2$, por exemplo. De maneira geral, um parâmetro extensivo assume valor que depende do tamanho de cada parte do sistema, dado pela somas dessas partes, enquanto que os intensivos possuem o mesmo valor de cada parte do sistema. Esses resultados são coerentes com nossa intuição.

Tabela 1 - Forçamentos radioativos atribuídos pelo IPCC devidos às causas naturais e às antropogênicas, relativos a 1750.

Causas		Forçamento (W/m^2)
Antropogênica	CO_2	1,68
Antropogênica	CH_4	0,97
Antropogênica	N_2O	0,17
Antropogênica	Outros gases do efeito estufa	0,18
Antropogênica	Aerosóis, uso da terra, outras	-0,76
Naturais	Variações na radiação solar	0,05
Total		2,29

¹³A partir daqui, utilizaremos o termo geral forçamento radiotivo para nos referirmos a ambos nesse texto, sem perda de significado físico fundamental para as discussões e objetivos propostos aqui.

Levemos a discussão ao contexto do aquecimento global e das mudanças climáticas.

O conceito formal de temperatura, que é dado pela termodinâmica, só faz sentido para sistemas em equilíbrio termodinâmico. Para sistemas fora do equilíbrio, a ideia de temperatura existe localmente apenas. De fato, é plausível se falar da média das leituras de temperatura de um mesmo relógio de praça pública ao longo de um dia, por exemplo, pois se trata de uma análise local. Porém, não há qualquer sentido se falar de uma média de registros de temperatura ao longo de um dia de vários relógios alocados em pontos distintos de uma cidade. Fatores como vegetação e altitude variam drasticamente as temperaturas absolutas e uma média entre temperaturas absolutas de diferentes regiões não possui nenhum significado físico. Além disso, muitas regiões não possuem estações de medidas de temperatura.

São nessas circunstâncias que reside o motivo de se usar o que se denomina anomalias de temperatura. Elas descrevem com mais acurácia a variabilidade climática ao longo de áreas de grande extensão e cálculos de tendência de temperaturas [21]. Como explicam as Refs. [21, 22], por exemplo, as séries temporais de anomalias de temperatura global são calculadas através das superfícies terrestres e oceânicas, cujos dados consistem em médias mensais de anomalias de temperatura em pontos de $5^\circ \times 5^\circ$, referentes à latitude e à longitude. O período de referência dos dados utilizados atualmente pelo NOAA é 1981-2010 [21], enquanto que para CRU [23] é 1961-1990; são períodos de 30 anos que oferecerem maior cobertura de dados, respectivamente.

Basicamente, o cálculo das anomalias é construído da seguinte maneira. Seja T_m a temperatura média do mês corrente e T_r a temperatura média do período de referência. Então, a anomalia de temperatura T_a é definida por

$$T_a \equiv T_m - T_r. \quad (8)$$

As médias adotadas nos cálculos de T_m e T_r constituem um grande foco de questionamento, tendo em vista o que já foi mencionado em relação à variabilidade climática ao longo de diferentes regiões, ainda mais as que carecem de estações de medidas. Essex, McKittrick e Andresen [24] confeccionaram um minucioso artigo chamando a atenção para a equivocada colocação da ideia de temperatura média global; os autores demonstram que tratamentos estatísticos distintos para um mesmo conjunto de dados levam a médias diferentes,¹⁴ apresentando um interessante exemplo sobre o conceito de temperatura e a lei de resfriamento de Newton. Concluem o trabalho enfatizando que a estatística não pode ser alternativa plausível para a falta de uma física de sistemas complexos e fora do equilíbrio.

¹⁴Basta nos remetermos ao simples exemplo de associações de resistores ou capacitores em série e paralelo para que se aborde essa questão num nível básico, bem como o cálculo da velocidade média de partículas de um gás ideal.

As anomalias de temperatura também são calculadas anualmente. O número então atribuído ao suposto aquecimento global da Terra é aproximadamente $0,5^\circ\text{C}$ para os últimos 100 anos, conforme mostra a Fig. 3. De fato, vários resultados de diferentes institutos de pesquisa, bem como do próprio IPCC, se aproximam deste valor citado.

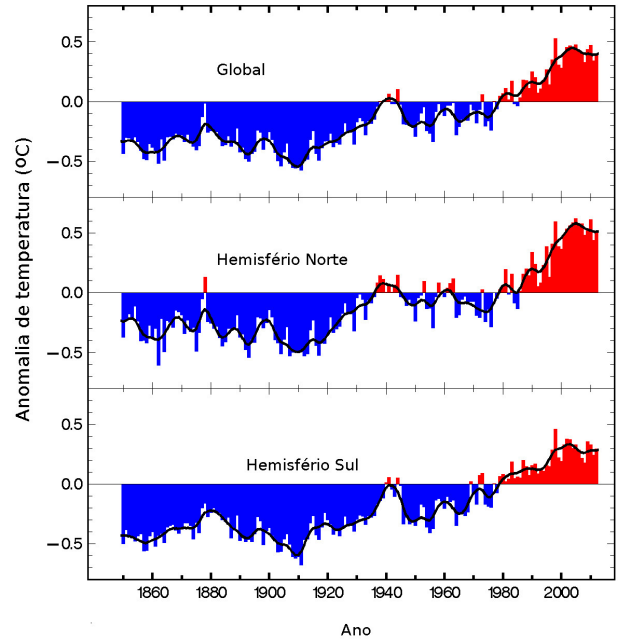


Figura 3 - Gráfico de anomalia de temperatura global e dos hemisférios norte e sul, para o período de referência entre 1850 e 2012. A linha escura em cada um deles indica a tendência das anomalias. Adaptado do original, disponível na Ref. [25].

4. Considerações finais

Nesse artigo discutimos ideias, conceitos e formulações primordiais para o entendimento básico do aquecimento global e das mudanças climáticas, voltados para o ensino de física e áreas afins, em nossa língua pátria, na expectativa de tornar o conteúdo mais acessível a estudantes e professores do ensino básico, principalmente. Este texto acrescenta elementos introdutórios matemáticos e conceituais sobre o tema; abordou-se quantitativamente uma introdução ao forçamento radiativo e sua relação com o efeito estufa, bem como da anomalia de temperatura.

É fundamental a importância da compreensão clara e cientificamente correta do que é o aquecimento global e acerca das ideias e conceitos científicos envolvidos, pois sem isso quantidades que são bem definidas e com interpretações precisas na física perdem o sentido quando divulgadas para a sociedade, tomando significados imprecisos e até mesmo inadequados. Conseqüentemente, toda a questão política e ambiental poderia

ser questionada em vários aspectos. Isto comprometeria a educação no seu sentido mais amplo, para que todas as esferas da população recebam conteúdos bem elaborados e fundamentados sobre a ciência.

Inevitavelmente, interesses políticos e econômicos têm forte influência na disseminação de tais informações; uma que teve uma grande repercussão em todo o mundo foi *An inconvenient truth*.¹⁵ No Brasil, inúmeras matérias destacam as mudanças climáticas e o aquecimento global sem fundamentação e cuidados científicos adequados. De fato, como educadores e formadores de opinião, é relevante a preocupação com os alarmistas do aquecimento global, para os quais mudanças climáticas remetem a falsa compreensão de catástrofes climáticas. Industrialização que aumenta produção do CO₂ na atmosfera, efeito estufa que aumenta a temperatura da Terra, clima que começa a ficar desequilibrado, modelos computacionais que prevêem aceleração do aquecimento global, geleiras que estão diminuindo e níveis de oceanos crescendo, maior número de fenômenos climáticos extremos (furacões, tornados, tsunamis, etc.), espécies que estão sendo ameaçadas, doenças tropicais (malária, dengue, etc.) que se propagam até regiões que antigamente eram mais frias, são algumas das questões que devem ser tratadas com cuidado. Afinal, nossos ancestrais sobreviveram e evoluíram em uma era do gelo e o próprio efeito estufa cria condições adequadas para nossos padrões de vida atuais; enfim, sempre houveram variações climáticas. Nesse sentido, o aquecimento global é um tema que permite explorar inúmeras faces da formação tanto de nossos estudantes e futuros professores, bem como de outros profissionais que já estão em exercício de suas funções.

Ademais, as mudanças climáticas constituem um ponto de partida comum principalmente para atividades interdisciplinares em diferentes níveis de ensino, tais como oficinas, ciclo de palestras e núcleos de estudos.

Por fim, mas antes de tudo, defendemos também um mundo sustentável, mas a começar por uma educação sustentável, na qual os impactos midiáticos sejam menos sensacionalísticos e importantes do que a educação de nossas crianças e adolescentes. Espera-se com esse trabalho que alguma luz tenha sido lançada e, principalmente, que possa ser útil a professores e futuros professores de física e áreas afins no exercício de sua prática educativa diária.

Referências

- [1] BRASIL, PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (MEC-SEMTEC, Brasília, 2002).
- [2] BRASIL, Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física (MEC-SESU, Brasília, 2001).
- [3] T.F. Stocker, D.Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and

P.M. Midgley (eds), *IPCC, 2013: 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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013), disponível em <http://www.climatechange2013.org>, acessado em maio de 2014.

- [4] A. Pina, L.F. Silva, Z.T.O. Junior, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 449 (2010).
- [5] M.E.R. Xavier and A.S. Kerr, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 325 (2004).
- [6] M.T. Furtado, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **34**, 3310 (2012).
- [7] R. Levinson, *Towards a Pedagogical Framework for the Teaching of Controversial Socio-Scientific Issues to Secondary School Students in the Age Range 14-19*. Tese de doutorado, Universidade de Londres, 2008. Apud, A. Pina, L.F. Silva, Z.T.O. Junior, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 449 (2010).
- [8] P.R. Reis, *Controvérsias Sócio-Científicas: Discutir ou Não Discutir? Percursos de aprendizagem na disciplina ciências da terra e da vida*. Tese de doutorado, Universidade de Lisboa, 2004. Apud, A. Pina, L.F. Silva, Z.T.O. Junior, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 449 (2010).
- [9] C. Galvão, P. Reis e S. Freire, *Ciência & Educação* **17**, 505 (2011).
- [10] D.A. Reis, L.F. Silva e A. Pina, *ALEXANDRIA Revista de Educação em Ciência e Tecnologia* **4**, 57 (2011).
- [11] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, P. Kharecha, A. Lacis, R. Miller, L. Nazarenko, K. Lo, G. A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, S. Bauer, E. Baum, B. Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Cohen, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, J. Jonas, M. Kelley, N. Y. Kiang, D. Koch, G. Labow, J. Lerner, S. Menon, T. Novakov, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, R. Schmunk, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, D. Streets, N. Tausnev, D. Thresher, N. Unger, M. Yao, S. Zhang, *Climate Dynamics*, **29**, 661 (2007).
- [12] G.A. Schmidt, *Physics Today* **60**, 72 (2007).
- [13] R. Eisberg and R. Resnick, *Física Quântica* (Campus, Rio de Janeiro, 1994) 9ª ed.
- [14] G.A. Schmidt, *Taking the Measure of the Greenhouse Effect*, 2010, disponível em http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt_05/curve_s.gif, acessado em 1/5/2014.
- [15] G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 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*, edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M.

¹⁵Disponível no endereço eletrônico <http://www.algore.com/>.

- Midgley. Disponível em www.climatechange2013.org e www.ipcc.ch, acessado em maio de 2014.
- [16] D.L. Hartmann, op. cit., Cap. 2.
- [17] A.V.R. Silva, *Nossa Estrela: O Sol* (Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [18] T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds), IPCC, 2013: 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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013), disponível em <http://www.climatechange2013.org>, acessado em maio de 2014.
- [19] H.B. Callen, *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (John Wiley & Sons, New York, 1985) 2nd ed.
- [20] K. Huang, *Statistical Mechanics* (John Wiley & Sons, New York, 1987) 2nd ed.
- [21] *Global Surface Temperature Anomalies*, disponível em <http://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/anomalies.php>, acessado em maio de 2014.
- [22] *Surface Temperature Analysis*, disponível em http://data.giss.nasa.gov/gistemp/abs_temp.html, acessado em maio de 2014.
- [23] *Temperature*, disponível em <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>, acessado em maio de 2014.
- [24] C. Essex, R. Mckittrick and B. Andresen, *J. Non-Equilibrium Thermodynamics* **32**, 1 (2006).
- [25] P.D. Jones, T.J. Osborn, R. Briffa, *Global and Hemispheric Annual Temperatures Anomalies, 1850 to 2008*. Disponível em <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/temp/jonescru/graphics/glnhsh.png>, acessado em junho de 2014.