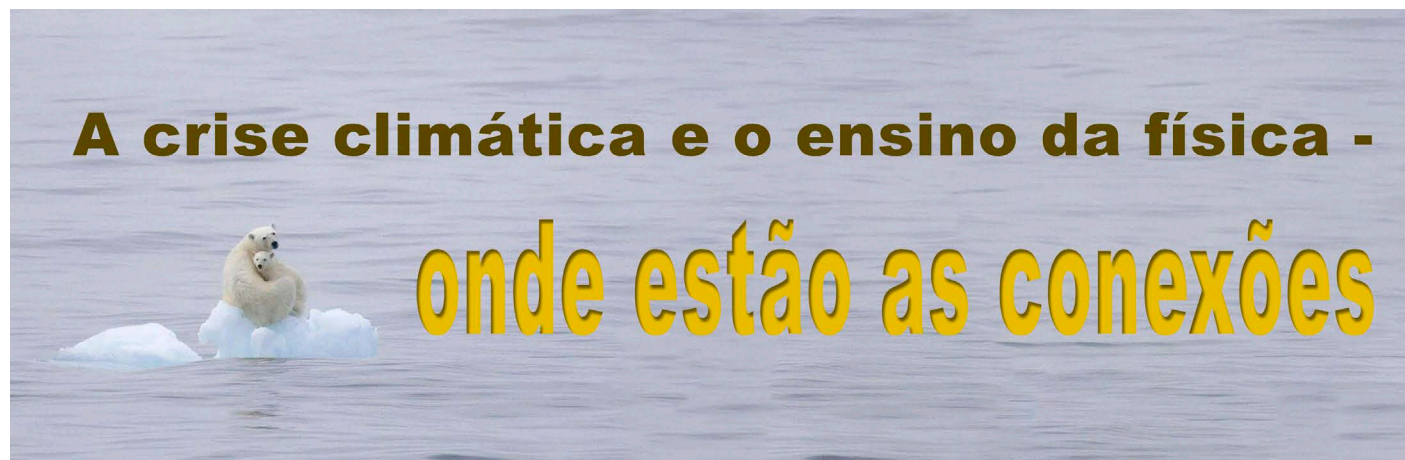




.....
Iramaia Jorge Cabral de Paulo^{1#} 

¹Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, MT, Brasil.
.....

Palavras-chave

mudanças climáticas
moldura filosófica
ciência da complexidade
ensino de física

Resumo

A configuração climática global contemporânea, marcada por desafios críticos como perda de biodiversidade, aquecimento global, poluição, desigualdade social e crises de saúde, é, segundo o IPCC, resultado direto de atividades antrópicas insustentáveis, tornando urgente uma reavaliação das perspectivas científicas tradicionais. A visão cartesiana, fundamentada no racionalismo, no determinismo e na compartimentalização, embora historicamente relevante, mostra-se insuficiente para compreender a complexidade dos problemas atuais. Nesse contexto, o pensamento sistêmico, subjacente à ciência da complexidade, apresenta-se como uma moldura filosófica mais adequada para interpretar e enfrentar as crises ambientais e sociais deste século. Embora os temas em questão possuam um forte viés interdisciplinar, as especialidades continuam sendo fundamentais. O papel da física no entendimento do clima é destacado, com ênfase em conceitos fundamentais como radiação, termodinâmica e fluidodinâmica atmosférica. Este artigo propõe uma reestruturação do ensino de física com uma abordagem fenomenológica e interdisciplinar, a fim de preparar futuros cidadãos capazes de compreender e atuar frente às alterações climáticas globais, desenvolvendo uma visão crítica e criativa para enfrentar os desafios ambientais do século XXI.

1. A crise climática e o ensino da física - onde estão as conexões

A configuração climática planetária que tem se estabelecido nas últimas décadas é caracterizada por perda de biodiversidade, alterações climáticas, acentuação da desigualdade social, poluição do ar, risco de escassez de água, fome para milhões de pessoas, ausência de paz, uso predatório de recursos naturais, pandemias recentes e futuras, extrema concentração de renda e falta de felicidade.

Diante desses grandes desafios, não cabe mais discutir se estamos vivendo uma mudança climática ou se a ação antrópica tem alguma responsabilidade sobre essas transformações. Já estamos enfrentando uma crise climática sem precedentes. Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC)¹. Naquela época, já havia preocupações com o aquecimento global e muitos estudos estavam sendo desenvolvi-

#Autora de correspondência. E-mail: irafisufmt@gmail.com.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



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

dos sobre o tema. O objetivo do painel é avaliar pesquisas, interpretá-las e reunir todas as informações relevantes, tanto técnicas quanto socioeconômicas, em relatórios abrangentes, claros e acessíveis a todos.

O relatório síntese que conclui o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC [1], publicado em 2023, assevera que:

O uso insustentável e desigual de energia e da terra, bem como mais de um século de queima de combustíveis fósseis, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo 1,1 °C a mais que no período de 1850-1900 em 2011-2020. Isto vem resultando em impactos adversos generalizados e perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas.

O prognóstico é que a temperatura global aumentará em 1,5 °C na primeira metade da década de 2030. Caso alcancemos um aumento de 2 °C até o final deste século, o aquecimento global intensificará riscos múltiplos e simultâneos em todas as regiões do mundo, comprometendo significativamente a vida no planeta (Ibid., p. 7). Ou seja, estamos diante de um planeta doente e precisamos encontrar a cura, sob pena de comprometimento da vida tal qual a conhecemos, incluindo a nossa.

No âmbito da pesquisa científica, os parâmetros para a cura estão bem estabelecidos. Contudo, é urgente uma mudança em nossa “moldura filosófica”, ou seja, em nossa visão de mundo e modo de pensar. Por mais que a ciência avance, será a aprendizagem e a aplicação pragmática do conhecimento construído que nos salvará.

A estrutura filosófica que originou nossa configuração social, científica, política e cultural atual é de base cartesiana. Formulada no século XVII por René Descartes (1596-1650), ela estabeleceu os fundamentos da ciência ocidental e o que se tornaria conhecido como *racionalismo epistemológico* [2]. A moldura filosófica cartesiana fundamenta-se em três conceitos basilares:

1. Racionalismo: fenômenos naturais devem ser compreendidos racionalmente, por meio de leis precisas. Para reconhecer algo como verdadeiro, é necessário usar a razão, o raciocínio, como filtro.
2. Determinismo: fenômenos naturais podem ser compreendidos em termos de causa e efeito.
3. Compartimentalização: o universo funciona como um relógio que pode ser compreendido ao entendermos cada uma de suas partes. É fundamental decompô-lo em partes isoladas, em ideias claras e distintas. Propõe-se fragmentar e dividir o objeto de estudo para melhor entender, compreender, estudar, questionar, analisar e criticar o todo, ou seja, o sistema.

O pensamento sistêmico pode nos ajudar a enfrentar os desafios da crise atual, e de futuras crises que irão desafiar a humanidade

Essas ideias ganharam força com as contribuições de Isaac Newton, cujas leis do movimento forneceram um modelo universal e simples para explicar fenômenos naturais, reforçando o método analítico. O sucesso das leis de Newton, que descreviam desde o movimento dos astros até os corpos na Terra, impactou profundamente a ciência e a sociedade, influenciando invenções tecnológicas e o movimento iluminista, que marcou eventos históricos como a Revolução Francesa e a Independência Americana.

No século XVIII, o pensamento cartesiano tornou-se central à organização social e cultural, moldando a sociedade moderna. Esse modelo racionalista permeia até hoje nossas instituições educacionais, nosso sistema econômico e nossas concepções sobre o mundo. Contudo, a partir do século XX, a ciência começou a revelar as limitações e falhas desse paradigma cartesiano, questionando a adequação de seus princípios para entender a complexidade da natureza e os desafios atuais já elencados.

Em contraste com a visão cartesiana, qualquer sistema complexo e fora do equilíbrio não pode ser comparado a um relógio, mas sim a um sistema dinâmico e aberto, cujo funcionamento depende tanto das interações internas entre seus componentes quanto da relação com o ambiente ao seu redor. Da mesma maneira, os temas sociais atuais exigem uma abordagem integrada e complexa: construir uma sociedade sustentável, unir uma economia eficiente à justiça social, estabelecer uma relação simbiótica entre a humanidade e o planeta, fomentar o entendimento entre culturas historicamente em conflito e com distintas visões religiosas, enfrentar doenças sistêmicas, integrar ativamente os idosos na sociedade, superar preconceitos associa-

dos à criminalidade e ao uso de drogas e lidar com a própria crise climática. Além das dificuldades inerentes, esses desafios possuem características comuns? Qual é o grau de generalidade permitido?

O pensamento sistêmico subjacente à ciência da complexidade tem se estabelecido como a moldura filosófica adequada para nos ajudar a enfrentar os desafios da crise atual e de futuras crises que desafiarão a humanidade. Esse paradigma teve seu marco inicial no final do século passado, com a maioria dos estudos datando do final da década de 1970, mas consolidou-se como ciência com Ilya Prigogine, prêmio Nobel de Química de 1977, que empregou o termo “Complexidade” como conceito científico. Prigogine estabeleceu os princípios gerais dos sistemas complexos fora do equilíbrio [3].

Para Prigogine e Nicolis [4, p. 6], a complexidade é encontrada em diversos contextos e está relacionada à própria manifestação da vida. Logo, a busca de soluções para os desafios que ora se apresentam requer

uma abordagem que necessariamente passa pelas intrincadas relações pertinentes à vida.

Complexidade é uma ideia que parte de nossa experiência cotidiana. Nós a encontramos em diversos contextos ao longo de nossas vidas, mas mais comumente temos a sensação de que a complexidade é de alguma forma relacionada às diversas manifestações da vida.

A ciência da complexidade, ou ciência dos sistemas complexos, investiga como um grande conjunto de componentes pode se auto-organizar, por meio de interações locais, para gerar estruturas e comportamentos complexos em escalas maiores. Esse processo de auto-organização ocorre frequentemente sem a necessidade de uma autoridade central ou controle externo.

As propriedades globais emergentes desses sistemas não podem ser compreendidas apenas pelo estudo de suas partes constituintes. O estudo de sistemas complexos exige novas ferramentas matemáticas e metodologias científicas.

A caracterização dos sistemas complexos requer uma visão absolutamente sistêmica e interdisciplinar para construir uma abordagem analítica, já que se trata de sistemas abertos, dinâmicos e, portanto, multi-interativos. Sistemas complexos estão intimamente relacionados à vida. Assim, estudá-los nos remete à compreensão de como a vida surge e se mantém. A complexidade que vemos no mundo é resultado de uma simplicidade fundamental. Os sistemas complexos são simples, criativos e geram padrões complexos.

A caracterização dos sistemas complexos, como objetos de estudo, ainda passa por um processo de construção. Como a vida é sempre cheia de meandros e surpresas, talvez jamais consigamos uma descrição completa que nos satisfaça plenamente. Contudo, seguramente podemos partir de três princípios onipresentes nos processos de organização da vida: adaptabilidade, estabilidade e inter-relacionamento.

Segundo Nussenzweig [5], em seu livro *Complexidade e caos* (2008), os sistemas complexos também apresentam as seguintes características:

- **Dinamicidade fundamental:** o sistema complexo está em constante evolução e é, formado por várias unidades. São totalidades integradas cujas propriedades não podem ser reduzidas às partes menores; essas propriedades são intrínsecas, mas só podem ser compreendidas dentro do contexto do todo maior.
- **Interatividade:** um sistema complexo funciona como uma rede fechada de interações, onde qualquer alteração nas relações entre suas partes ou componentes leva a mudanças nas interações dessas ou de outras partes do sistema. Isso ocorre porque cada unidade se relaciona tanto com seus pares quanto com diversas outras unidades do próprio sistema.

Um sistema complexo é aberto, depende da relação interna de seus componentes e da relação com o ambiente

- **Aberto:** um sistema complexo interage com o meio ambiente, sustentando-se por um contínuo fluxo de energia e matéria extraídas de seu entorno, necessário para continuar existindo.
 - **Frustração:** como os sinais recebidos dos pares ou do ambiente podem ser contraditórios ou variar em intensidade, a resposta do sistema pode frustrar algumas dessas entradas. Nem todos os estímulos são adequadamente assimilados, o que resulta em interações significativas para o sistema. É importante lembrar que se trata de um sistema aberto e não linear, em que o estímulo recebido pode ter efeito excitatório ou inibitório.
 - **Aprendizagem:** ocorre à medida que a estrutura básica do sistema se transforma com sua evolução e interação com o ambiente externo. Trata-se da capacidade de modificar sua estrutura interna ao absorver matéria e energia do meio, desenvolvendo novos modos de comportamento em um processo contínuo de desenvolvimento e evolução.
 - **Aleatoriedade:** certas características do sistema são distribuídas aleatoriamente, dependendo das flutuações imprevisíveis do ambiente. A natureza não segue nossos tratados e manuais científicos ou sociais.
 - **Ordem emergente:** sistemas complexos auto-organizam-se de maneira espontânea, característica que representa a síntese das qualidades de um sistema complexo. Essa auto-organização surge com a criação espontânea de novas estruturas e comportamentos, mantida pelo fluxo contínuo de energia e matéria que impede o sistema de alcançar o equilíbrio. É justamente fora do equilíbrio que ocorre a marca distintiva da auto-organização. A interconectividade não linear entre os componentes do sistema cria ciclos de realimentação, descritos matematicamente por equações não lineares. Esses sistemas formam uma rede de produção de componentes, uma estrutura fechada em que os próprios componentes geram e mantêm a dinâmica do sistema, definindo-o como uma entidade autônoma. Nesse fluxo contínuo, os elementos tornam-se ou deixam de ser componentes do sistema, em um processo conhecido como *autopoiese*.
- Em outras palavras, sistemas complexos auto-organizam-se como sistemas vivos e viver não é apenas utilizar essa dinâmica para existir, mas também ser constituído por ela, à medida que ela define a autonomia de sua vida [6, p. 16].
- **Hierarquia:** quando um sinal ou qualquer estímulo atinge determinada parte do sistema, ele é tratado em níveis diferentes, dependendo do grau de interação ou importância para o sistema.
 - **Atratores:** uma configuração ou estado para o qual os sistemas dinâmicos tendem a se estabilizar, exibindo geometria fractal.

- Histerese: o sistema complexo pode manter sua estabilidade por algum tempo em uma certa “paisagem”, dependendo criticamente de sua história anterior, ou seja, o sistema apresenta uma tendência de conservar suas propriedades na ausência do estímulo que as gerou.
- Propriedades coletivas emergentes: propriedades ou características qualitativamente novas que surgem a partir da multiplicidade de interações entre suas unidades, as quais, por sua vez, competem ou cooperam entre si.
- Estrutura fractal: sistemas complexos possuem uma geometria fractal, ou seja, apresentam uma dimensionalidade fracionária. Na escola, aprendemos que objetos com altura, largura e comprimento são tridimensionais; áreas ou superfícies, bidimensionais, e linhas, unidimensionais. No entanto, nada na natureza é completamente tridimensional - cada forma natural exibe um desenho complexo com orifícios, saliências, reentrâncias, sinuosidades e inúmeras irregularidades estruturais.

Então, qual forma geométrica melhor representa a natureza?

Nos anos 1930, Kurt Gödel demonstrou que a matemática, considerada a mais precisa das ciências, não é absolutamente coerente e que os teoremas desenvolvidos até então apresentavam falhas lógicas. Sua descoberta abalou a crença de que a matemática poderia oferecer um sistema exato e determinista para a ciência. A partir daí, a matemática passou a incorporar uma visão mais probabilística, aproximando-se da descrição de fenômenos naturais de maneira mais realista e menos idealizada.

Nossa perspectiva influencia nossa compreensão: ao adotar uma visão cartesiana, podemos confortavelmente interpretar a física como um campo idealizado para descrever sistemas isolados e fechados. No entanto, essa escolha limita nossa capacidade de entender questões complexas, como a crise climática, além das novas configurações sociais, políticas e educacionais que enfrentamos. Em contraste, a ciência da complexidade - e os sistemas complexos - permeiam diversas áreas científicas e profissionais, como física, biologia, sociologia, economia, política, antropologia, medicina, engenharia e tecnologia da informação, entre outras.

Tecnologias recentes, como redes sociais, dispositivos móveis, veículos autônomos e blockchain, criam sistemas com propriedades emergentes essenciais para compreender e prever o bem-estar social.

Um conceito fundamental da ciência da complexidade é a “universalidade”, que sugere que muitos sistemas de diferentes áreas apresentam fenômenos com características semelhantes, podendo ser descritos por modelos científicos equivalentes. No entanto, sistemas

naturais que contam com especialistas apresentam vantagens significativas em comparação com aqueles que não dispõem desse recurso [7]. Nesse sentido, a ciência da complexidade fornece a base teórica para ações interdisciplinares, enfatizando a importância de especialistas dispostos a trabalhar em integração. Esse é o desafio.

A física desempenha um papel crucial na compreensão da Terra como um sistema complexo, especialmente no contexto das mudanças climáticas globais. Tópicos como emissão e absorção de radiação, leis de Planck e de Stefan-Boltzmann, termodinâmica de sistemas fora do equilíbrio aplicada a ecossistemas, medidas de fluxos de matéria e energia e dinâmica atmosférica, são essenciais para a compreensão dos processos ambientais. Além disso, conceitos como temperatura, calor, umidade relativa, emissividade, refletância (albedo) e leis da termodinâmica, bem como as diferentes formas de transmissão de calor, constituem conhecimentos indispensáveis para a análise e interpretação dos fenômenos ambientais e atmosféricos. Portanto, o ensino da física deve ser repensado para incorporar abordagens fenomenológicas e conceitos fundamentais que promovam a compreensão do estado atual do clima e de suas consequências. Além disso, o ensino deve estimular a criticidade e a criatividade, incentivando a busca por soluções e a implementação de propostas existentes.

2. Considerações finais - o futuro do presente para o ensino da física

A ciência da complexidade faz parte do estudo de sistemas abertos - sistemas que trocam constantemente energia, movimento e matéria com o ambiente e que, por isso, se encontram fora do equilíbrio. Dedica-se a investigar fenômenos não lineares e situações reais, sem idealizações, reconhecendo a natureza intrinsecamente variável e interconectada dos fenômenos. Diferentemente da ciência cartesiana, que buscou, historicamente, simplificar os fenômenos naturais ao supor atrito e forças constantes ou mesmo sistemas de apenas dois corpos, a linearidade é, na verdade, uma exceção, aplicável a poucos fenômenos naturais. A vida, o clima, a sociedade, a aprendizagem e a economia, que permeiam o cotidiano, não se enquadram no modelo cartesiano e são justamente o foco da complexidade.

Observando o mundo à nossa volta e os desafios contemporâneos, não é difícil perceber que a física, enquanto ciência básica, é fundamental para compreender a crise climática e suas implicações. Ao mesmo tempo, enfrentamos uma crise nos valores e no papel da escola, ainda que seja inegável seu poder de transformação, capaz de empoderar vidas por meio do conhecimento. Essa realidade nos leva a repensar quais

A física é a chave para entender a crise climática e transformar valores, mas cabe à escola transmitir esse conhecimento com propósito e reflexão

conteúdos e conceitos são essenciais para essa transformação, de modo que promovam autonomia e senso crítico. No entanto, essa tarefa não é simples, dado o cenário de constantes mudanças metodológicas, leis e currículos.

O que realmente importa é o conhecimento que transmitimos e a maneira como abordamos os conceitos físicos. O modelo cartesiano, que nos ensina a ver sistemas idealizados e isolados, oferece pouco sen-

tido para os estudantes. Nossa formação está estruturada nessa visão, mas, ao incorporarmos uma perspectiva sistêmica, podemos mostrar aos alunos que sem o entendimento da física perdemos autonomia nas relações com o mundo. Esse é o desafio.

Recebido em: 29 de Outubro de 2024

Aceito em: 3 de Novembro de 2024

Nota

¹Sigla para Intergovernmental Panel on Climate Change.

Referências

- [1] IPCC, in: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, Geneva, 2023), pp. 1-34, doi 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- [2] E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Harper Torchbooks, New York, 1960).
- [3] M.M. Waldrop, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos* (Simon and Schuster, New York, 1993).
- [4] G. Nicolis, I. Prigogine, *Exploring Complexity: An Introduction* (W.H. Freeman and Company, New York, 1989).
- [5] M.H. Nussenzveig, *Complexidade e Caos* (UFRJ/COPEA, Rio de Janeiro, 1999).
- [6] H. Maturana, F.J. Varela, *De Maquinas Y Seres Vivos: Autopoiesis: La Organizacion De Lo Vivo* (Lumen Editorial, Barcelona, 2005), 6ª ed.
- [7] G. Nicolis, I. Prigogine, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations* (Wiley, New York, 1997).