



Revista
Educar Mais

O conceito de entropia e sua relação com o processo econômico: implicações ao Ensino de Física

The concept of entropy and its relationship to the economic process: implications for Physics Teaching

El concepto de entropía y su relación con el proceso económico: implicaciones para la Enseñanza de la Física

Ana Paula Grimes de Souza¹ 

• Iara Maitê Campestrini Binder² 

Renata Feuser Silveira³ 

RESUMO

Este ensaio teórico trata de implicações ao ensino de física acerca das relações entre as leis da termodinâmica, o processo econômico e questões ambientais, na perspectiva de Nicholas Georgescu-Roegen (G-R). Tem-se como pressuposto que o desejo humano de domínio da natureza teve como foco o acúmulo de conhecimento e o de capital, na transformação da ciência em valor econômico. Os efeitos desse processo exigem a necessária reflexão sobre os limites impostos pela própria natureza, em termos energéticos e de recursos materiais. Assim, é urgente pensar um ensino de ciências que vise a globalidade e a compreensão das multidimensões dos fenômenos naturais e sociais e que busque problematizar as implicações da ciência e da tecnologia na sociedade e na salvaguarda ambiental.

Palavras-chave: Georgescu-Roegen; Entropia; Ensino de Física.

ABSTRACT

This theoretical essay deals with implications for the teaching of physics about the relationships between the laws of thermodynamics, the economic process and environmental issues, from the perspective of Nicholas Georgescu-Roegen (G-R). It is assumed that the human desire to dominate nature focused on the accumulation of knowledge and capital, in the transformation of science into economic value. The effects of this process require the necessary reflection on the limits imposed by nature itself, in terms of energy and material resources. Thus, it is urgent to think about a science teaching that aims at the globality and the understanding of the multidimensions of natural and social phenomena and that seeks to problematize the implications of science and technology in society and in environmental protection.

Keywords: Georgescu-Roegen. Entropy. Physics Teaching.

RESUMEN

Este ensayo teórico trata sobre las implicaciones para la enseñanza de la física sobre las relaciones entre las leyes de la termodinámica, el proceso económico y las cuestiones ambientales, desde la perspectiva de Nicholas Georgescu-Roegen (G-R). Es asumido que el deseo humano de dominar la naturaleza se centró en la

¹ Licenciada em Física, Mestra e Doutoranda em Educação Científica e Tecnológica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC - Brasil. Email: anapaulagrimes@gmail.com

² Licenciada em Física, Especialista em Informática na Educação, Mestra em Física, Doutoranda em Educação Científica e Tecnológica (UFSC) e Professora do Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul/SC - Brasil. E-mail: iara.campestrini@ifsc.edu.br

³ Licenciada em Matemática, Especialista em Metodologia e Prática Interdisciplinar do Ensino, Mestra em Ensino de Ciências, Matemática e Tecnologias e Doutoranda em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC - Brasil. Email: renata.feuser@gmail.com

acumulación de conocimiento y capital, en la transformación de la ciencia en valor económico. Los efectos de este proceso exigen la necesaria reflexión sobre los límites impuestos por la propia naturaleza, en cuanto a energía y recursos materiales. Por lo tanto, es urgente pensar en una enseñanza de la ciencia que tenga como objetivo la globalidad y la comprensión de las multidimensiones de los fenómenos naturales y sociales y que busca problematizar las implicaciones de la ciencia y la tecnología en la sociedad y las salvaguardias ambientales.

Palabras clave: Georgescu-Roegen. Entropía. Enseñanza de la Física.

1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento da ciência e da tecnologia, principalmente a partir da Revolução Industrial, não foi acompanhado de grande preocupação com os impactos da atividade industrial e econômica sobre o planeta Terra. A progressiva industrialização, a crescente produção de bens e o estímulo ao consumo, de forma a fomentar a economia, revelam uma intrínseca relação com a apropriação da natureza pelo homem. Ou seja, esse sentimento de apropriar-se da natureza se relaciona com a postura caracteristicamente humana de controle dos objetos naturais, conforme aponta Lacey (2010), ao apresentar a perspectiva de valor chamada de valorização moderna do controle. O aumento dessas capacidades de controle implica a criação de novas tecnologias que, por sua vez, são incorporadas cada vez mais na vida das pessoas, de forma que problemas são definidos em termos de suas soluções tecnológicas. O reflexo dessa intensa apropriação e controle da natureza se dá pela crise ambiental instaurada nos últimos anos, a qual vem despertando interesse de cientistas, de políticos e da sociedade em geral.

Estudos de especialistas têm mostrado dados a respeito das implicações geradas pela ação antropogênica na biodiversidade global e nas mudanças climáticas. No site⁴ do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), instituição pública brasileira vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, é possível encontrar dados que corroboram as afirmações supracitadas. Segundo as projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a ação do homem na natureza pode levar, nos próximos 100 anos, ao aumento entre 1,8°C e 4,0°C da temperatura média global. Além disso, ações caracterizadas como a queima de combustíveis fósseis, as queimadas, os desmatamentos e a produção de lixo, entre outras, podem elevar o nível do mar entre 0,18 m e 0,59 m. O aumento da temperatura média global e a elevação dos oceanos poderá afetar significativamente o ecossistema terrestre, com alteração na distribuição de chuvas, com secas e enchentes extremas, assim como poderá influenciar a atividade humana, no âmbito social e econômico.

Os impactos das atividades industriais e econômicas na biodiversidade também são assustadores. Um vídeo⁵ elaborado por Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT) mostra pesquisadores de instituições como INPE, INCT, USP (Universidade de São Paulo) e UNB (Universidade de Brasília), trazendo reflexões sobre a intrínseca relação entre a manutenção da biodiversidade terrestre e as alterações climáticas do planeta. A destruição da biodiversidade impacta diretamente os serviços

⁴ INPE. Disponível em:

<http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9#:~:text=As%20proje%C3%A7%C3%B5es%20do%20Painel%20Intergovernamental,atividades%20humanas%20e%20os%20ecossistemas> Acesso em: 30/11/2020.

⁵ Vídeo: o clima e a biodiversidade. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XNY8UyKfTJg> Acesso em 29 de novembro de 2020.

ambientais nos diferentes biomas, os quais são essenciais para manutenção do equilíbrio climático da Terra.

Além da mudança climática e de alterações na biodiversidade da fauna e da flora, o estilo de vida contemporâneo e predominante da humanidade tem levado a um esgotamento dos recursos naturais disponíveis. Barbosa e Marques (2015) alegam que o enfrentamento dessas questões é fundamental para a subsistência das futuras gerações. Para isso, são necessárias alterações no sistema econômico, visando a diminuição de bens de consumo e melhorias na produção de bens e serviços. Os autores consideram ainda que pensar o contexto da sustentabilidade ambiental é pensar nas questões econômicas associadas. Corrobora-se com este pensamento, pois refletir sobre a interdependência entre ambiente e economia é rever os valores embutidos na perspectiva da valorização moderna do controle, conforme pontua Lacey (2010). Da mesma forma, essa reflexão poderá contribuir na superação das visões simplistas e salvacionistas da ciência, como apontam Auler e Delizoicov (2001), que não consideram a finitude dos recursos biofísicos do planeta e defendem o desenvolvimento científico e tecnológico desenfreado, como suficiente para sanar os danos causados por ele mesmo.

É sobre esses limites biofísicos, vinculados aos postulados termodinâmicos, que este ensaio teórico visa tecer reflexões. Em especial, tem-se como objetivo traçar a interdependência entre a absorção e liberação de matéria-energia e o processo econômico, assim como argumentar como esse contexto torna desafiador o objetivo da sustentabilidade ambiental. Para além deste objetivo, propõe-se trazer reflexões sobre uma possível abordagem da Educação Ambiental dentro do contexto da disciplina de física. Conforme apontam Sudário, Fortunato e Lourenço (2016), há uma grande carência de pesquisas sobre essa temática em periódicos tradicionais da área, refletindo em um "distanciamento entre a necessidade latente da conjuntura atual e a importância basilar da formação de professores" (p. 137).

Para tal, este ensaio teórico apresenta, inicialmente, uma discussão conceitual acerca da 2ª lei da termodinâmica. Na sequência, é apresentada a perspectiva de Nicholas Georgescu-Roegen (G-R), discutida principalmente em sua obra *O Decrescimento: entropia, ecologia, economia* (2012), abordando relações entre a economia, a possibilidade da sustentabilidade ambiental e os postulados termodinâmicos. Por fim, são propostas algumas reflexões sobre como as ciências naturais, em particular a física, podem contribuir para um ensino mais sistêmico e menos fragmentado acerca de questões humanitárias.

2. ENTROPIA: SOB UM OLHAR DA FÍSICA

O intuito dessa seção não é fazer uma longa explanação sobre o desenvolvimento dos conceitos físicos envolvidos nas leis da termodinâmica, visto a complexidade desses conhecimentos. Porém, pretende-se trazer algumas noções básicas sobre essas leis, em especial, a lei da entropia, com o intuito de transpor esses conceitos fundamentais para o processo econômico, de acordo com a teoria proposta por G-R.

Um dos principais constructos da física é a lei de conservação de energia. A mecânica clássica, por exemplo, comumente trabalha com sistemas isolados. Neles, a energia mecânica é conservada, sofrendo apenas transformações de um tipo de energia em outro. Pensando no movimento de um pêndulo simples, por exemplo, é possível observar a energia cinética do sistema sendo transformada em energia potencial gravitacional conforme o objeto oscila. Ou seja, o objeto aumenta a sua

velocidade conforme atinge o ponto mais baixo de sua trajetória e diminui sua velocidade ao atingir o ponto mais alto e, assim, interminavelmente, caso não sejam consideradas as perdas de energia, por meio da ação de forças dissipativas.

A primeira lei da termodinâmica pode ser considerada como uma extensão da lei de conservação de energia para sistemas que não estão isolados. Nesses casos, podem haver trocas de energia entre o sistema e o ambiente na forma de calor e trabalho (PIZZO, 2015; HALLYDAY; RESNICK; WALKER, 2018). Como exercício de imaginação, consideram-se duas situações. Na primeira, uma pessoa segura uma xícara de café 'quente' e percebe que, com o passar do tempo, sua mão fica mais fria, e a xícara de café mais quente do que estava inicialmente. Numa segunda situação, uma pessoa retira uma pedra de gelo do congelador e a deixa em cima da mesa da cozinha, a qual está na temperatura ambiente. Após alguns segundos, ela percebe que o gelo ficou a uma temperatura ainda mais baixa e a mesa da cozinha, esquentou. As situações anteriores causaram estranheza?

Considerando os sistemas fechados (mão + xícara / pedra de gelo + mesa), ambas as situações não violam o princípio de conservação de energia. Porém, tais situações proporcionariam um grande estranhamento a qualquer pessoa. Essa estranheza ocorre porque não é este o sentido natural dos acontecimentos, uma vez que as situações exemplificam processos unidirecionais. É comum aumentar a temperatura da mão no contato com a xícara de café, e a temperatura da xícara diminuir, já o processo inverso não ocorre. Assim como é natural o gelo derreter pois este, uma vez em condições de mudança de estado físico (sólido para líquido), absorve o calor da mesa necessário para tal mudança, e a mesa da cozinha, diminui sua temperatura uma vez que cede calor para o gelo derreter. Nunca o contrário. Esses processos supracitados são consequências da lei zero da termodinâmica e classificados como irreversíveis.

É sobre esse contexto que está pautada a 2ª lei da termodinâmica. Rudolf J. Clausius, em 1850, e William Thomson (Lord Kelvin), em 1851, enunciaram a 2ª lei da termodinâmica, visando descrever a irreversibilidade dos processos naturais. Ambos se inspiraram no trabalho do engenheiro francês Sadi Carnot, o qual apresentou a primeira formulação da 2ª lei ao estudar o contexto do motor térmico e concluir que não é possível produzir trabalho sem o uso de uma fonte quente e uma fonte fria. Carnot propôs um ciclo idealmente reversível para uma máquina térmica de máximo rendimento. Nesse contexto de máquinas térmicas, o postulado de Lord Kelvin afirma que nenhum motor térmico é capaz de apresentar um rendimento de 100%, uma vez que parte do calor recebido da fonte quente é desperdiçado para a fonte fria. E, por fim, Clausius postulou que não é possível, por um processo espontâneo, que o calor flua de um corpo com temperatura mais baixa para um corpo com temperatura mais alta (vide os exemplos da xícara de café e da pedra de gelo). Tais postulados não violam o princípio de conservação de energia, pois a energia 'degradada', apesar de transformar-se, não pode ser reaproveitada de maneira espontânea devido à irreversibilidade dos processos (PINHO; ANDRADE, 2011).

Em 1865, Clausius introduziu o conceito de entropia, o que resultou em um enunciado mais genérico para a 2ª lei da termodinâmica, determinando que a entropia do universo tende a um máximo. Conforme descrevem Pinho e Andrade (2011), a partir dos estudos da época, concluiu-se que enquanto a 1ª lei da termodinâmica corresponde ao princípio de conservação, a 2ª lei corresponde a um princípio de evolução. Os autores ainda resumem que "nos casos dos processos naturais (irreversíveis), o aumento da entropia traduz uma 'degradação' de energia, já que o calor trocado,

devido a este aumento, corresponde a um trabalho que poderia ser utilizado se a transformação fosse efetuada reversivelmente” (PINHO; ANDRADE, 2011, p. 156).

O conceito de entropia ganhou, anos depois, uma interpretação estatística relacionada às distribuições possíveis de moléculas em um sistema. Ou seja, uma medida da probabilidade termodinâmica comumente explicada como um grau de *desordem* do sistema. Assim, segundo Halliday, Resnick e Walker (2018), em qualquer processo termodinâmico, o qual começa e termina em estados de equilíbrio, a entropia do sistema mais ambiente aumenta ou permanece constante, quer dizer, a ordem do sistema transforma-se continuamente em desordem. É a partir do conceito de entropia, associado ao aumento da desordem dos sistemas termodinâmicos, que G-R analisa o processo econômico relacionado aos limites impostos pela própria natureza, em termos energéticos e de recursos materiais, vinculados tanto à extração de estoque de matéria e energia, quanto aos resíduos depositados no meio ambiente. A análise da entropia sob a perspectiva econômica é apresentada na próxima seção.

3. ENTROPIA: SOB UM OLHAR ECONÔMICO

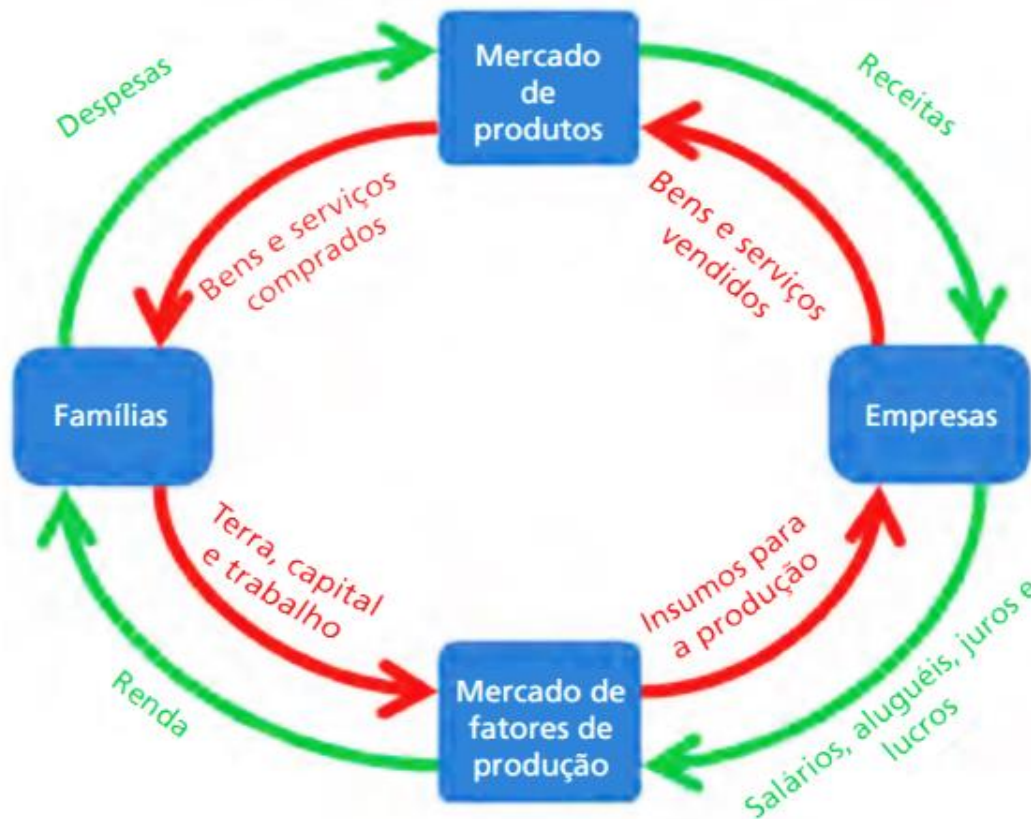
Após uma discussão conceitual sobre as duas leis fundamentais da física, esta seção debruça-se sobre o trabalho de G-R, a fim de estabelecer relações entre as ciências naturais, em particular as leis da termodinâmica, e as ciências econômicas, cujos processos baseiam-se na utilização de forma demasiada dos recursos naturais (material e energético) e parecem desconsiderar a finitude do planeta Terra, os seus limites e a irreversibilidade do sistema econômico. Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) foi um matemático e economista romeno que dedicou parte da sua vida a aproximar as ciências naturais das teorias econômicas. Apesar de não ter tido grande reconhecimento no período de seus escritos, suas ideias são fundamentais para a economia ecológica, pois levam em conta os fatores físicos e biológicos para a discussão da (in)sustentabilidade (BARBOSA; MARQUES, 2015; MONTIBELLER-FILHO, 1999).

O livro de G-R, *O Decrescimento: entropia, ecologia e economia* (2012), o qual representa um compilado de artigos escritos pelo autor dentre os anos de 1971 e 1982 (BARBOSA; MARQUES, 2015), é um convite a expandir as percepções e entender como utilizar das ciências naturais para explicar as relações do processo econômico e a possibilidade de uma sustentabilidade ambiental. Segundo G-R, as ciências econômicas se limitaram, nas últimas décadas, a compreender a economia com base em uma epistemologia mecanicista, fundamentada em um modelo regido unicamente pelo princípio de conservação de matéria e energia. A crítica do autor está pautada no ‘esquecimento’, por parte dos economistas, de que o processo econômico não é um processo isolado e independente das leis das ciências naturais, tão pouco obedece a lei da reversibilidade. Este processo, segundo G-R, não funciona sem ser alimentando constantemente, alterando o meio ambiente e sendo alterado por ele, como consequência.

A sustentação da tese de G-R está pautada na 2ª lei da termodinâmica. Conforme explicitado na seção anterior, por mais que a lei de conservação da energia se manifeste nos fenômenos reais, uma vez que a quantidade de energia de entrada e saída permanece constante, a natureza dessa energia é alterada. A dissipação de energia em outros tipos que não podem ser facilmente reaproveitados em formato de trabalho útil, a não ser que haja um grande dispêndio de energia, é o fator crucial para compreendermos, segundo G-R, o desafio de sustentar os padrões de consumo e produção.

Na economia clássica, a função de produção apresenta um modelo de fluxo circular, no qual são relacionadas as quantidades de produtos com as quantidades de insumos para a produção, conforme pode ser visto na Figura 1. O problema apontado por G-R é que este modelo não leva em conta os limites de estoques dos recursos naturais, nem os resíduos gerados nesse processo (LOCATELLI, 2016; CECHIM; VEIGA, 2010). Mediante este contexto, Locatelli (2016, p. 481) considera a necessidade de “algum novo modelo empírico ou teórico que represente a realidade de maneira mais adequada e que contabilize todas as variáveis envolvidas no processo de produção e consumo, e que auxilie na tomada de decisão de agentes econômicos”.

Figura 1: Modelo circular de fluxo circular de renda



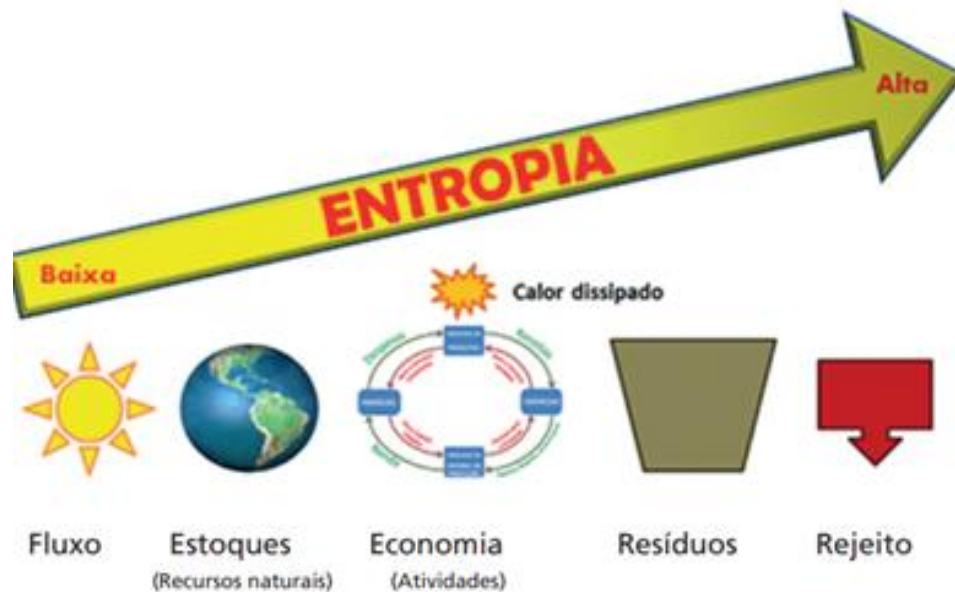
Fonte: LOCATELLI, 2016.

Uma proposta de novo modelo é apresentada na teoria de G-R. Com base nessa teoria, Locatelli (2016) criou um esquema (Figura 2) agregando as variáveis até então desconsideradas, que são o estoque de recursos naturais e fluxo de energia, assim como os resíduos e rejeitos. A Figura 2 ilustra o que o matemático-economista G-R denomina de dote da humanidade. Segundo ele, são duas as fontes de recursos naturais que a humanidade dispõe. A primeira é denominada de *fluxo* e refere-se à fonte de energia livre recebida pelos raios de Sol, interceptados pela Terra. A segunda corresponde aos recursos naturais – materiais e energéticos – que constituem um *estoque* armazenado nas entranhas do planeta. Entre o *fluxo* e o *estoque*, a única fonte de recursos naturais cuja utilização não incorre o risco de afetar a disponibilidade para as gerações futuras, é a energia solar.

A grande questão apontada por G-R é que o fluxo e o estoque não fazem parte de um processo circular. O processo econômico, sendo um processo vivo e real, é também um processo irreversível, não podendo ser entendido simplesmente por um pensamento mecanicista. G-R defende que os economistas sempre deveriam ter levado em conta essa diferença qualitativa entre o que entra no processo econômico, os *inputs*, e o que sai, os *outputs*. Os primeiros sendo os recursos naturais de

valor e os segundos, o que é rejeitado ou resíduos sem valor. Relacionando com a abordagem termodinâmica, “a matéria-energia absorvida pelo processo econômico o é num estado de baixa entropia e sai num estado de alta entropia” (G-R, 2012, p.57).

Figura 2: A entropia ambiental gerada pelo processo econômico resulta em um fluxo irreversível



Fonte: LOCATELLI, 2016.

Se não houvesse o *déficit* entrópico, a energia apresentada na forma de calor poderia ser transformada integralmente em trabalho. Tal trabalho poderia ser transformado novamente em energia útil. A natureza, porém, não apresenta esse comportamento. O processo econômico parte de um sistema de baixa energia e entrega seus produtos com um saldo remanescente de resíduos, que não poderão ser integralmente reaproveitados. Não porque a tecnologia não o permite até o momento, mas porque viola uma das leis mais fundamentais da física: a lei da entropia.

Nesse contexto, G-R traz um alerta em relação ao sentimento das pessoas por uma não preocupação com o limite de trabalho útil, que poderá se efetuar enquanto a Terra estiver recebendo a energia utilizável na forma de fluxo, o Sol. Em outras palavras, por mais que a energia seja dissipada em outras formas que não serão reaproveitadas, uma fonte externa continuará alimentando o planeta Terra, contribuindo para o desenvolvimento de todas as formas de vida, além de se constituir como uma alternativa para o processo econômico. Isso é fato: ainda restam cerca de 4,5 bilhões de anos para a morte da estrela do sistema solar. Entretanto, até que ponto, atualmente, essa energia pode ser aproveitada?

Conforme mencionado anteriormente, G-R explicitou duas fontes energéticas para o planeta Terra. A primeira é uma energia externa proveniente do Sol, enquanto a segunda pertence ao estoque terrestre de matéria-energia. Essa segunda fonte é proveniente, por exemplo, de combustíveis fósseis que possuem reservas ínfimas as quais não serão suficientes para manter a atividade humana por muitas décadas, uma vez que essas reservas fazem parte de um estoque consumido amplamente ao longo da história, sofrendo o *déficit* entrópico devido à irreversibilidade dos processos.

Segundo G-R, mesmo as reservas de urânio não serão suficientes se utilizadas em processos de geração de energia atualmente dominados (fissão nuclear). Além da preocupação com a finitude do estoque de energia, “o uso de qualquer energia terrestre produz uma poluição nociva de, ademais, é

irredutível e, por isso mesmo, cumulativa [...]” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p.121). Por este motivo, num comparativo entre o estoque terrestre de matéria-energia com o fluxo de energia proveniente do Sol, esta última apresenta uma vantagem “única e incomensurável”: a isenção de poluição. Para G-R, os esforços de cientistas e engenheiros devem se concentrar na utilização de maneira direta da energia solar, única fonte essencialmente ilimitada, mas que ainda é barrada no pouco aproveitamento energético de modo direto.

Ao refletir sobre as fontes de energia da Terra, fluxo e estoque, energia e matéria, no âmbito do processo econômico, o matemático e economista G-R extrapola a aplicação do conceito de entropia para além da energia solar e energia “terrestre”. Para o autor, é necessário pensar no processo entrópico que surge também nos recursos materiais existentes na Terra. Ou seja, na matéria que, uma vez degradada, não retorna à estrutura inicial (não, pelo menos, por um processo energeticamente favorável), além da constatação de que nenhum trabalho pode ser obtido sem que alguma matéria utilizável se transforme em matéria não utilizável. Tal fato torna limitada a possibilidade de reciclagem, defendida pelos economistas ortodoxos como a solução para a geração de resíduos nos processos de produção.

Todo esse contexto apresentado é fundamentado na dependência que a humanidade criou de instrumentos exossomáticos (aqueles não pertencentes ao corpo do homem, mas produzidos por ele). Essa dependência, segundo G-R, levou a espécie humana a apresentar um problema totalmente diferente das demais. Um problema que não é apenas biológico, nem apenas econômico, mas sim, um problema *bioeconômico*. Porém, os recursos de energia e de matéria, considerados o dote da humanidade, não pertence à geração atual. O que a atual geração deixará para as vindouras? Se o desejo é a proteção das futuras gerações, é preciso pensar numa reeducação “[...] a fim de ter um pouco de simpatia pelos seres humanos *futuros* da mesma forma que [uma preocupação] com o bem-estar do [...] ‘próximo’ *contemporâneo*” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p.130).

Apesar das reflexões sobre o dote da humanidade em termos de matéria e energia e sobre a degradação entrópica pelo qual esse dote é submetido, G-R afirma que seria uma insensatez renunciar a todo conforto advindo da evolução científica e tecnológica e declara que “a humanidade não voltará às cavernas, ou melhor, às árvores!” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 132). Ciente disso, o autor propõe um *programa bioeconômico mínimo*. Dentre outras propostas, tal programa visa evitar todo desperdício de energia além de reduzir o esgotamento do estoque de matéria-energia. Outras duas propostas do programa é uma alimentação mundial desenvolvida por meio da agricultura orgânica e o combate à obsolescência das mercadorias.

A implantação desse programa bioeconômico mínimo requer uma reeducação da forma com que o ser humano se reconhece tanto pertencente à espécie humana quanto numa relação de interdependência com outras espécies da fauna e da flora. Ou seja, faz-se necessário reorientar o olhar numa relação com a natureza da qual a humanidade não é proprietária, mas é parte integrante. É latente a preocupação com as questões climáticas e com os rumos que a humanidade está traçando para o planeta Terra. Por isso, as discussões sobre o processo entrópico da matéria e da energia, associado ao processo econômico, são uma tentativa de despertar o ser humano para questões que não estão alheias ao seu cotidiano, como parecem estar. Permanece uma questão: a atual geração está disposta a abrir mão do apego ao conforto exossomático em prol das futuras gerações?

4. ENTROPIA: IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO

Se pensar na saúde do planeta e na subsistência das futuras gerações perpassa por uma reeducação, conforme afirmado por G-R, é preciso, portanto, pensar em qual é o papel da educação formal nesse contexto. Nesse sentido, surgem alguns questionamentos: qual o papel das ciências naturais na educação básica? Por que devemos ensinar física aos estudantes do ensino médio? E, mais especificamente, por que ensinar as leis da termodinâmica? Possíveis respostas a essas questões implicam a importância de formar um cidadão científica e tecnologicamente alfabetizado, num movimento de superação da perspectiva reducionista e tecnocrática, na qual o conteúdo seja visto como fim em si mesmo, em direção a uma visão democrática que busque a compreensão das implicações sociais da ciência e da tecnologia e que relacione o ensino dos conceitos científicos à problematização dos mitos referentes à neutralidade científica e tecnológica (AULER; DELIZOICOV, 2001).

A Base Nacional Comum Curricular (2018), por exemplo, aponta a necessidade de as ciências naturais proporcionarem conhecimentos contextualizados e que contribuam para que o estudante seja capaz de fazer julgamentos, tomar iniciativas, elaborar argumentos e apresentar proposições alternativas. Além de favorecer discussões sobre “as implicações éticas, socioculturais, políticas e econômicas de temas relacionados às Ciências da Natureza” (BRASIL, 2018, p. 537), a BNCC traz ainda, como uma das dez competências gerais da educação básica, a promoção de uma “consciência socioambiental e o consumo responsável em âmbito local, regional e global, com posicionamento ético em relação ao cuidado de si mesmo, dos outros e do planeta” (BRASIL, 2018, p. 7). Pode-se perceber que esta competência vem ao encontro das propostas do programa bioeconômico mínimo de G-R.

Pretende-se defender com este ensaio a possibilidade de se trabalhar temas fundamentais da física, como as leis da termodinâmica, em uma perspectiva democrática, conscientizadora, que proporcione ao estudante uma visão holística do mundo. Ou seja, abordar o conceito de entropia do ponto de vista da física, da sustentabilidade e da economia, constituindo em um terreno fértil para a promoção de um processo de ensino e aprendizagem transformador e de significado para os estudantes. Ademais, conforme propõem Bazzo et al. (2016), a contextualização da ciência e da tecnologia como atividade humana de grande importância social promove a criticidade e a criatividade, onde por meio da integração dos estudos técnicos e científicos à realidade social contemporânea estimula nos jovens a análise reflexiva das suas interferências na sociedade.

Para que isso efetivamente aconteça, as ciências naturais, assim como as demais áreas do conhecimento, precisam ser ensinadas fora de suas ‘caixinhas’. O enfrentamento da crise ambiental se dá em um contexto interdisciplinar. Divisões entre as disciplinas foram historicamente construídas, herdadas de uma concepção cartesiana, pela necessidade de aprofundamento e especialização em cada área de conhecimento. Tal disciplinarização se faz presente ainda hoje na educação, prejudicando o desenvolvimento de um pensamento sistêmico e de um olhar holístico (MORIN, 2011).

Segundo Watanabe-Caramello e Strieder (2011, p.103), faz-se necessária a incorporação no currículo de discussões que visem “o desenvolvimento de diferentes visões de mundo, considerando tanto a complexidade no âmbito social (aspectos sociais, políticos, econômicos e ambientais) quanto a complexidade no âmbito científico (aspectos das ciências naturais, humanas etc). Sobral (2014) também alerta para a fragmentação presente em alguns elementos curriculares vinculados à educação ambiental trabalhados na educação formal e propõe que os temas sejam observados por uma ótica global, incluindo os aspectos econômicos, sociais e políticos, e que visem o

desenvolvimento de um pensamento crítico e criativo, necessário para lidar com temas tão complexos como este.

Para Morin (2011), a separação das ciências em disciplinas hiperespecializadas e a disjunção entre as ciências humanas e as da natureza, constituem obstáculos presentes no ensino os quais conduzem à atrofia da disposição mental natural de apreender o que está tecido junto. Esta tessitura é, por sua vez, a formação do pensamento complexo, que visa superar a dispersão e a desunião dos conhecimentos. Um pensamento complexo, num exercício dialógico e temporalmente concomitante, separa e religa o ser humano da natureza e do cosmo, das culturas científica e humanística, do local e do global (MORIN, 2015).

A formação do pensamento complexo está intimamente relacionada com a construção de um conhecimento pertinente. Esse tipo de conhecimento não é um novo conceito, lei ou princípio científico. É, outrossim, uma nova forma de olhar para estes conceitos, leis e princípios, não os colocando de forma disciplinar, compartimentada e desunida. Dessa forma, Morin (2011) embasa a construção do conhecimento pertinente em quatro princípios: o contexto, o global, o multidimensional e o complexo.

O contexto é o primeiro dos princípios. É o referencial no qual dados e informações são situados, adquirindo sentido. Por sua vez, o princípio global "é o conjunto das diversas partes ligadas [ao contexto] de modo inter-retroativo ou organizacional" (MORIN, 2011, p. 34). A formação de um pensamento global fomenta a concepção de sistema, de um todo organizado, onde "por meio da organização [...] o todo se constitui em algo mais do que a mera soma das partes" (MORIN, 2015, p. 109). Ao afirmar que o todo se constitui em algo maior do que a soma das partes, Morin (2011, p. 35) afirma que "o todo tem qualidades ou propriedades que não são encontradas nas partes, se [...] isoladas [...] certas qualidades ou propriedades das partes podem ser inibidas pelas restrições provenientes do todo".

O princípio multidimensional, por sua vez, revela-se na relação que o todo estabelece com as partes, assim como na interdependência das partes com o todos e das partes entre si. O entendimento dessa interdependência entre o todo e as partes, com o global e com o contexto, tem-se a iminente formação do pensamento complexo. Dentre as considerações para a formação do pensamento complexo, Edgar Morin traz ainda reflexões sobre as ações antrópicas no planeta Terra e as possíveis implicações dessas ações para sobrevivência dos seres humanos. Neste contexto, dentre os sete saberes necessários à educação do futuro, eleitos por Morin (2011), o quarto é denominado de *Identidade Terrena*. Este saber é apresentado com provocações sobre os problemas do mundo contemporâneo e as condições de vida produzidas pelo homem.

Morin (2011) adverte que a humanidade está vivendo em uma *era planetária*, período que compreende desde o século XVI até os dias atuais. Mais precisamente, numa fase denominada pelo autor de *mundialização*, reconhecida pelo avanço das tecnologias de telecomunicações e pelo advento da Internet. Nesta fase, os seres humanos são submergidos pela complexidade do mundo, sufocados pela grande quantidade de informação e com grandes dificuldades de compreender o todo. Essa falta de inteligibilidade do mundo advém do modo "atrofiado" de pensar, de disciplinar em vez de globalizar, de subtrair de contexto em vez de contextualizar.

Assim, Morin (2011) afirma que o desenvolvimento proposto pela mundialização gerou mais malefícios do que soluções, levando as civilizações às crises, tornando insustentável até mesmo o

que é chamado de desenvolvimento sustentável. A humanidade está à beira de um colapso ambiental e aquela tão defendida dominação da natureza, enraizada no pensamento científico moderno, a tem conduzido ao suicídio. Nas palavras do autor, “se a modernidade é definida como fé incondicional no progresso, na tecnologia, na ciência, no desenvolvimento econômico, então esta modernidade está morta” (MORIN, 2011, p. 62).

Na perspectiva de formar uma nova geração consciente desse contexto, que compreenda esses fenômenos a partir de um pensamento complexo, Morin defende a necessidade de ensinar a identidade e consciência terrena. Essa consciência, que necessita de uma reforma de pensamento, está pautada em “aprender a ser, a viver, dividir e comunicar como humanos do planeta Terra” (MORIN, 2011, p.66). Esse ensinar a identidade terrena que favoreça “atitudes e práticas democráticas nas questões de importância social relacionadas com a inovação tecnológica e a intervenção ambiental [...] [sendo] estímulo para o desenvolvimento socioeconômico respeitoso com o meio ambiente e equitativo com relação às futuras gerações” (BAZZO; PEREIRA; BAZZO, 2016, p. 71).

Por isso, a urgência de uma educação que vislumbre não apenas o progresso, mas também a sobrevivência desta e das próximas gerações. Para que isso possa se concretizar, este ensaio traz subsídios para o ensino de ciências que envolva conceitos da termodinâmica, vinculado aos econômicos e sociais. Com tal reconhecimento, defende-se uma educação emancipatória e transformadora de realidade que, no contexto apresentado por Morin, propicie um sentimento de pertencimento a essa Terra e que transforme a espécie humana em verdadeira humanidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões socioambientais são complexas e desafiadoras para as mais variadas instâncias da sociedade. Por isso, são urgentes as discussões sobre esta temática nas esferas públicas e privadas, haja vista todos os envolvidos no processo econômico, como apresentado na Figura 2, que vão desde a utilização dos recursos naturais de matéria e energia, passando pelo processo econômico de produção e consumo, até o descarte ou reaproveitamento de resíduos e rejeitos. Em especial, abordar tais discussões nos locais formais de educação, na perspectiva da formação do pensamento complexo, é a oportunidade para que os cidadãos tenham contato de modo mais efetivo com conhecimentos sistematizados das diferentes esferas sociais (WATANABE-CARAMELLO; STRIDER, 2011).

As ciências naturais, por meio dos seus constructos, têm poder explicativo e preditivo acerca das questões ambientais. Por esse motivo, defende-se a necessidade desses temas se fazerem presentes nas aulas de ciências da natureza. A física, em especial a segunda lei da termodinâmica, pode ser a propulsora de reflexões nesse contexto, numa articulação intrínseca com o processo econômico, uma vez que toda atividade humana se dá a partir de energia de baixa entropia da natureza, resultando em energia de alta entropia. Ou, como defendem Cavalcanti e Watanabe (2019, p. 7), “toda cadeia produtiva de bens e serviços pode ser analisada levando em consideração as transformações de energia e o aumento de entropia”.

A proposta teórica de G-R, introduzida neste ensaio, parece ser um bom caminho a ser trilhado para a compreensão do que já está posto em termos ambientais, além de se constituir como um caminho inicial para maiores discussões acerca das relações entre economia, ecologia e as ciências naturais.

Essas discussões fazem parte de uma educação científica e tecnológica, onde professores, acadêmicos, pesquisadores e cientistas, de todos os níveis e áreas, comungam da preocupação com o bem-estar do próximo, da fauna e da flora, do planeta Terra.

Os desafios para a educação do terceiro milênio são grandes, assim como é grande o número de variáveis envolvidas no processo civilizatório para que os objetivos de formação cidadã sejam alcançados. É preciso pensar em uma educação voltada para a complexidade, que vise a globalidade ao invés da fragmentação, que possibilite compreender as multidimensões dos fenômenos naturais e sociais e que supere uma visão reducionista e excludente de mundo.

6. REFERÊNCIAS

AULER, Décio; DELIZOICOV, Demétrio. Alfabetização científico-tecnológica para quê? **Revista Ensaio: pesquisa em educação e ciências**, Belo Horizonte, v. 03, n. 03, p. 01-13, jun. 2001.

BARBOSA, Leila Cristina Aoyama; MARQUES, Carlos Alberto. Sustentabilidade ambiental e postulados termodinâmicos à luz da obra de Nicholas Georgescu-Roegen. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n.2, p.1124-1132, maio/ago.2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/16919>. Acesso em: 04 abr. 2022.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. do V. e BAZZO, J. L. dos S. **Conversando sobre educação tecnológica**. 2ª ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2016.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**: Ensino Médio. Brasília: MEC/Secretaria de Educação Básica, 2018.

CECHIN, Andrei Domingues; VEIGA, José Eli. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 438-454, jul./set.2010.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **O Decrescimento**: entropia, ecologia, economia. São Paulo: Senac, 2012. 258p.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. vol.4, 10 ed.; Rio de Janeiro: LTC 2018.

LACEY, Hugh. **Valores e atividade científica**. vol. 2. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia/Editora 34, 2010.

LOCATELLI, Pedro Marcos. Proposta de um instrumento econômico para viabilizar o pagamento por serviços ambientais urbanos aos catadores de materiais recicláveis. *In*: PEREIRA, Bruna Cristina Jaquette; GOES, Fernanda Lira (org). **Catadores de Materiais Recicláveis**: um encontro nacional. Rio de Janeiro: Ipea, p. 459-505, 2016.

MORIN, Edgar. **Os sete saberes necessários à educação do futuro**. São Paulo: Cortez, 2011.

MORIN, Edgar. **Ensinar a viver**: manifesto para mudar a Educação. Porto Alegre: Meridional, 2015.

MONTIBELLER FILHO, Gilberto. **O mito do desenvolvimento sustentável**. 1999. 266 f. **Tese** (Doutorado Interdisciplinar em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

PINHO, Suani Tavares Rubim de; ANDRADE, Roberto Fernandes Silva. A. Evolução das ideias da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. *In*: ROCHA, José Fernando Moura (org). **Origens e Evolução das Ideias da Física**. Salvador: EDUFBA, p. 139-181, 2011.

PIZZO, Sandro Megale (org.). **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

RIBEIRO, Thiago Cavalcanti.; WATANABE, Giselle. A entropia nos livros didáticos e possíveis aproximações com a complexidade. Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, XII, 2019, Natal. **Anais...Natal**, 2019. Disponível em: <http://abrapecnet.org.br/enpec/xii-enpec/anais/resumos/1/R2148-1.pdf> Acesso em: 15 abr. 2022.

SOBRAL, Marcela de Marco. A importância do pensamento reflexivo crítico e criativo na Educação Ambiental. **Revista Brasileira De Educação Ambiental (RevBEA)**, v.9, n. 2, p. 314-343, 2014.

SUDÁRIO, Patrick; FORTUNATO, Ivan; LOURENÇO, Caroline. A Educação Ambiental em periódicos brasileiros de ensino de física. **Revista Brasileira De Educação Ambiental (RevBEA)**, v.11, n. 2, p. 127-138, 2016.

WATANABE-CARMELLO, Giselle; STRIEDER, Roseline Beatriz. Elementos para inserir as questões ambientais em aulas de física: da prática baseada em temas à complexificação do conhecimento. **Pesquisa em Educação Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 101-117, dez. 2011.

Submissão: 29/11/2022

Aceito: 27/12/2022