

A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL COMO TEMA PARA O ENSINO DA 2ª LEI DA TERMODINÂMICA USANDO A METODOLOGIA ENSINO SOB MEDIDA

Environmental degradation as a theme for teaching the 2nd law of thermodynamics through Just in Time Teaching methodology

André Andrade Rabêlo [andre.rabelo@ifs.edu.br]

Instituto Federal de Sergipe, Rod. BR-101, Km 96. Povoado Quissamã, São Cristóvão/SE. CEP 49100-000 – Brasil.

Laélia Campos [lpbcampos@academico.ufs.br]

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física/ polo 11 - Universidade Federal de Sergipe Avenida Marcelo Déda Chagas, s/n – Cidade Universitária - Rosa Elze, São Cristóvão - SE, CEP: 49107-230

Tiago Nery Ribeiro [tnribeiro@academico.ufs.br]

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física/ polo 11 - Universidade Federal de Sergipe. Avenida Marcelo Déda Chagas, s/n – Cidade Universitária - Rosa Elze, São Cristóvão - SE, CEP: 49107-230

Recebido em: 08/09/2023

Aceito em: 16/12/2023

Resumo

A segunda lei da termodinâmica rotineiramente é abordada de forma superficial na educação básica, proporcionando dificuldades à compreensão do conceito de entropia e degradação da energia. O desconhecimento sobre degradação reflete implicações importantes nos debates e decisões do cidadão em questões ambientais. Ademais, se um estudante conclui a Educação Básica e não entende a utilidade do conceito termodinâmico de entropia, temos falhado nesse aspecto enquanto professores de Física. Dessa forma, o presente trabalho relata a aplicação de uma sequência didática (SD) que apresenta a segunda lei da termodinâmica, tendo como tema transversal a sustentabilidade ambiental sob o paradigma do crescimento econômico. Utilizamos o Ensino sob Medida como estratégia ativa, adaptando-o ao ensino remoto. O fato de alunas e alunos entrarem em contato com os assuntos anteriormente à aula, aumentou sobremaneira a participação durante as aulas do ensino remoto durante a pandemia (COVID-19). Para análise dos resultados, foi realizado um estudo de natureza quantitativa e qualitativa das respostas aos testes conceituais e final, bem como a apropriação de vocabulário específico nas questões subjetivas, e nas participações durante as aulas. A SD agregou conhecimento e possibilitou pontes com outras áreas, exercitou o pensar mais crítico na interpretação dos fatos e conduziu a uma conexão entre o mundo natural e o social, despertando a curiosidade epistemológica, necessária ao futuro da sociedade.

Palavras-chave: Termodinâmica, Entropia, Degradação Ambiental, Ensino sob Medida.

Abstract

The second law of thermodynamics is routinely addressed superficially in basic education, making it difficult to understand the concept of entropy and energy degradation. Lack of knowledge about degradation has important implications for citizen debates and decisions on environmental issues. Furthermore, if a student completes Basic Education and does not understand the usefulness of the thermodynamic concept of entropy, we have failed in this regard as Physics teachers. Thus, the

present work reports the application of a didactic sequence (SD) that presents the second law of thermodynamics, having as a transversal theme the environmental sustainability under the paradigm of economic growth. We have used Just-in-Time Teaching as an active strategy, adapting it to remote teaching. The fact that students met subjects before class, greatly increased participation during remote teaching classes during the pandemic (COVID-19). To analyze the results, a quantitative and qualitative study of the responses to the conceptual and final tests was carried out, as well as the appropriation of specific vocabulary in the subjective questions, and in the participation during classes. SD added knowledge and enabled bridges with other areas, exercised more critical thinking in the interpretation of facts and led to a connection between the natural and social world, awakening the epistemological curiosity, necessary for the future of society.

Keywords: Thermodynamics, Entropy, Environmental Degradation, Just in Time Teaching.

1. Introdução

Muitos problemas ambientais podem ser abordados à luz da Segunda Lei da Termodinâmica: lixo, poluição atmosférica, contaminação das águas continentais e dos oceanos, desmatamento, degradação do solo, sobrepesca, extinção de espécies, mudanças climáticas, dentre outros. Há fartura de material (em livros, reportagens, artigos científicos, filmes e documentários) que pode ser apresentado em sala de aula a fim de estabelecer uma base factual dos impactos negativos da ação humana sobre a natureza, permitindo conectar os saberes curriculares, neste caso a degradação da energia, à realidade concreta, aos problemas maiores que as gerações atuais estão enfrentando (Freire, 1996; Aronson, 2002).

Apresentar as metas de um (utópico) desenvolvimento sustentável aos jovens é, antes de tudo, injusto, pois parece entregar a eles a tarefa de resolver os problemas que as gerações passadas produziram (incluindo a nossa). E pior, boa parte da natureza foi modificada e crianças e jovens não estão recebendo um mundo com conforto e bem-estar social, pelo menos na maior parte do mundo. Falar sobre sustentabilidade para a maior parte da população, que clama pelo suprimento de necessidades básicas e que é seduzida a cada segundo para o consumo, exige esforço e dedicação.

O conceito de entropia surgiu na termodinâmica e o significado do seu aumento é a perda de utilidade da energia, ou mais amplamente, a perda de utilidade inerente à evolução de qualquer sistema isolado (Jewett e Serway, 2017). Segundo Muller (2007), Rudolf Clausius o elaborou em 1867, a partir da análise curiosa dos processos reversíveis da máquina térmica perfeita idealizada pelo engenheiro francês Sadi Carnot. Tal máquina conseguiria extrair o máximo trabalho de uma dada quantidade de calor, nunca 100%. Como nem a perfeição do ciclo reversível garante aproveitamento integral da energia térmica, percebeu-se que a energia se degrada.

Tomando um sistema isolado, após a ocorrência de sucessivos processos irreversíveis, seu estoque de energia útil diminui, enquanto aumenta sua entropia. Todo sistema isolado caminha para a morte térmica (maximização da entropia). A única opção para que um sistema aumente seu estoque de energia útil é abrindo suas fronteiras. O aporte no sistema de matéria e/ou energia da vizinhança pode provocar reduções locais de entropia, favorecendo novas transformações no sistema, porém sempre às custas de um aumento global da entropia: se o sistema está vencendo o jogo da entropia, a vizinhança está perdendo de goleada.

A energia solar continua que a Terra recebe do Sol permite uma infinidade de sons na sinfonia da degradação da energia, que se torna mais lenta pela existência ímpar (pelo que conhecemos) de uma comunidade de vida no nosso planeta, que recicla continuamente a matéria

(seres produtores, consumidores e decompositores). Um planeta com feições diferentes, com muito mais ambientes naturais e com maior biodiversidade – solução encontrada pela natureza ao longo de bilhões de anos de evolução para situações adversas à vida de algumas espécies – existia antes do despertar do poder do fogo (criação da máquina térmica).

Há cerca de 200 anos a população humana girava em torno de 1 bilhão de pessoas, com consumo energético *per capita* de 50.000 kcal, já muito acima das 3.000 kcal biologicamente necessárias. Hoje somos 8 bilhões com consumo energético acima das 200.000 kcal por habitante, ou seja, nos dois séculos seguintes à Revolução Industrial o consumo energético total da espécie humana aumentou mais de 32 vezes. Paralelamente, sem qualquer evento adverso à vida em escala global ter ocorrido (era glacial, queda de meteoro...), temos assistido a extinções de espécies e ameaçado outras tantas ao desaparecimento.

Estudos apontam que nossa pegada ecológica já supera a biocapacidade do planeta. Ou seja, o armazenamento biológico de energia de alta qualidade no planeta (seres produtores) já é insuficiente para empatar o jogo contra a degradação natural associada ao aumento da entropia. Podemos, vivendo em cidades, custar a perceber o ritmo da degradação. Mas parte da população sente seus efeitos: moradias precárias, saneamento básico inexistente, convivência com lixo, com inundações pelo mar ou por chuvas muito acima da média, noutras regiões com a falta de chuva, difícil acesso a alimentos de qualidade (facilidade de consumir ultraprocessados). O encarecimento do acesso ao que é natural decorre da redução de oferta. Segundo Cechin (2008), é necessário entender, à luz do economista romeno Georgescu-Roegen, primeiro a relacionar a natureza com o processo econômico, que a economia não pode ser considerada alheia ao mundo natural, pois este se degrada.

A Sequência Didática (SD) aqui proposta como produto educacional visa engajar os estudantes no aprendizado da 2ª Lei da Termodinâmica, explicitada por meio do conceito de entropia, tratando transversalmente da sustentabilidade, ou seja, da relação homem-planeta. A sequência foi adaptada para o ensino remoto, trazendo elementos da metodologia ativa Ensino Sob Medida (Araújo e Mazur, 2013). Foram produzidos textos de apoio e questionários com a temática ambiental, dando suporte ao processo de ensino e aprendizagem, relevantes para uma análise crítica do tema degradação.

2. A Metodologia e a Aplicação

O produto foi aplicado em uma turma de 2º Ano do Ensino Médio de escola da rede estadual (Colégio Estadual 17 de Março) com 25 alunos, e em outra turma de 3º Ano do Ensino Médio da rede particular (Colégio de Orientação e Estudos Integrados - COESI), com 23 alunos, ambas localizadas em Aracaju/SE. A aplicação se deu de forma remota, via *Google Meet* para as aulas e *Google Sala de Aula* para as atividades e disponibilização de materiais, visto que por determinação da Prefeitura Municipal de Aracaju, as atividades presenciais nas escolas estavam suspensas, devido à pandemia do Covid-19.

O número de alunos presentes às aulas remotas síncronas nem sempre correspondeu à quantidade de alunos que responderam às atividades. Na escola estadual, 11 alunos participaram das atividades e na escola particular todos os 23. As atividades podiam ser respondidas através dos formulários on-line, ou no caderno e as respostas encaminhadas por e-mail ou via aplicativo *WhatsApp*.

A aplicação do produto foi antecedida de uma explicação breve, cerca de 15 min, informando aos alunos a metodologia que seria aplicada (Ensino sob Medida adaptado ao ensino

remoto), quais atividades deveriam ser realizadas por eles, os prazos e a forma de avaliação. Existe uma “prévia” de cada encontro na metodologia, que basicamente coloca o discente ativamente em contato com o tema que será desenvolvido no encontro seguinte (aula). A Figura 1 resume o método Ensino sob Medida (tradução do JiTT – Just-in-Time Teaching), desenvolvido por Andrew D. Gavrin e Gregor Novak no final dos anos 1990 (Gravin, 2010). De acordo com os próprios criadores, a estratégia de ensino e aprendizagem combina comunicações prévias na *Web* com a capacidade de ajuste do conteúdo, tornando os momentos em sala de aula mais eficientes e sintonizados com as necessidades dos alunos.

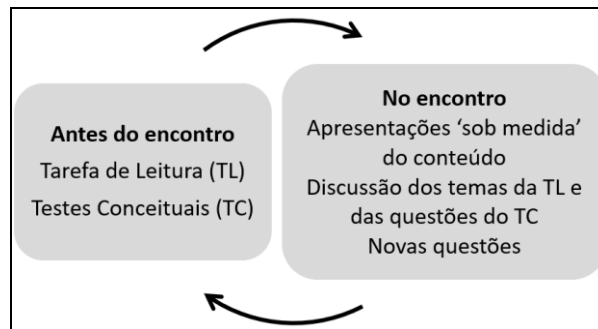


Figura 1. Ensino sob Medida (adaptado). Fonte: Autoria própria.

Como etapa inicial do Ensino Sob Medida, é proposta uma Tarefa de Leitura (TL) definida pelo professor. O aluno acessa o material e faz a leitura. Em seguida, responde a um Teste Conceitual (TC) antes de cada encontro, de forma on-line. O(a) professor(a) coleta e analisa as respostas das questões propostas antes de cada aula, a fim de definir melhor a ênfase da aula expositivo-participativa. Sendo assim, as questões possuem prazo para serem respondidas, que se encerrava um dia antes da aula.

No tempo de aula (E), as dificuldades apresentadas pelos alunos moldaram a trajetória adotada. O professor pode reapresentar questões do TC e discutir algumas respostas de forma anônima e/ou apresenta novas questões. O foco são os conceitos/temas de maior dificuldade de compreensão (a aula é sob medida). De forma presencial, podem ser propostas novas atividades em grupo envolvendo os conceitos trabalhados nas TL e na discussão em aula. É o momento com maior leque de opções. A aplicação durante a Pandemia Covid-19, através do ensino remoto, nos levou a apresentar questões novas e a resolver problemas durante os encontros. Antes do próximo encontro, os alunos podem receber outros tipos de questões mais intrigantes, relacionadas ao conteúdo trabalhado em aula e que devem ser respondidas eletronicamente. O professor avalia a aprendizagem e decide se deve retornar ao mesmo tópico na próxima aula ou se segue em frente, o que implica propor novo conjunto {TL, TC}.

Relativamente à escolha das questões do TC, há maior eficiência na promoção de discussões entre os alunos quando elas possibilitam como resposta raciocínios associados com concepções alternativas e dificuldades sobre o conteúdo estudado, segundo Araújo e Mazur (2013). E outro aspecto não menos relevante, especialmente para os alunos, é a atribuição de notas. Segundo Araújo e Mazur (2013):

Em situações que as respostas corretas recebem maior pontuação, os alunos com maior conhecimento sobre o conteúdo tendem a dominar as discussões e os que sabem menos assumem uma atitude passiva. A distribuição dos tempos de fala nos diálogos é fortemente afetada. Quando apenas a participação dos estudantes era considerada, as discussões se mostraram mais ricas com a maior parte dos estudantes aproveitando para exporem suas ideias e uma distribuição mais igualitária dos tempos de fala.(Araújo e Mazur, 2013).

No caso desta aplicação, foi atribuída uma pontuação apenas por participação nos TC's. Foram ao todo três encontros, cada encontro com duas horas-aula, três conjuntos {TL, TC}

anteriores aos encontros e um Teste Final (TF). O grau de dificuldade dos testes foi baixo, e o número de questões pequeno durante o ensino remoto, do contrário poderia haver falta de motivação. Noutras aplicações, com o ensino presencial, questões mais elaboradas podem ser propostas; cabe a análise específica de cada caso pelo professor.

3. A Sequência Didática

A sequência didática (SD) aplicada pretendeu desenvolver a ensinagem da 2ª Lei da Termodinâmica e mostrar o significado termodinâmico da variação de entropia, a fim de abordar o tema transversal meio ambiente de forma mais científica. Desde a primeira Tarefa de Leitura (TL) até o Teste Final (TF), o aluno será chamado a refletir se os padrões de desenvolvimento atuais podem ser considerados sustentáveis. A temática ambiental, entretanto, não se faz presente para sufocar a lei da degradação da energia, tampouco o conceito de entropia, essencialmente relacionado à utilidade de um sistema.

O primeiro momento, a TL1 anterior ao Encontro 1, leva o aluno a uma jornada através dos últimos 300 anos, desde que o “fogo foi posto a trabalhar” (substituição da força muscular pelas máquinas térmicas). Como neste trabalho é assumido que o mundo enfrenta problemas ambientais sérios, de origem antrópica, a ênfase maior é dada à face da degradação. Foi elaborada uma videoaula de 30 min como TL1, apresentando o desenvolvimento das máquinas térmicas por Savery e Newcomen para resolver problemas com o bombeamento de água nas minas de carvão, o aperfeiçoamento por Watt, a disseminação do uso na indústria e nos transportes, a evolução produzida pela Revolução Industrial, o crescimento da população, da busca por combustíveis fósseis, da poluição, da destruição de biomas naturais, dos impactos na produção de alimentos, da pesca oceânica. Mostrou-se também que mesmo com tanto alimento, e com tanta degradação associada à produção de alimentos, há fome e miséria no mundo (Aronson, 2002). A TL1 provoca o aluno a olhar as duas faces do uso do poder do fogo.

O TC1 traz questões sobre a identificação de máquinas térmicas no cotidiano, a relação entre as mudanças ocorridas nos últimos séculos e o uso do poder do fogo, sobre a perspectiva de mudanças. Evidente que os problemas ambientais não advêm todos da matriz energética, mas a máquina térmica (e os combustíveis fósseis) foi escolhida como ponto de partida dada a sua íntima relação com a termodinâmica e com o atual estágio de relação homem-planeta.

O Encontro 1 mostrou como as máquinas trabalhavam, abordou o conceito de rendimento e que a busca por seu aumento levou James Watt a desenvolver o condensador e conduziu Carnot a idealizar uma máquina perfeita. Apenas é apresentado o rendimento máximo de Carnot, nesse momento, e a Segunda Lei da Termodinâmica segundo Kelvin-Planck, sobre a impossibilidade de conversão integral de calor em trabalho por uma máquina térmica. Nesse encontro são resolvidas algumas questões de máquinas térmicas, comuns nos vestibulares e propostas outras, como exercícios de livros didáticos. Esse encontro é bem próximo da maneira com que esse tema é apresentado tradicionalmente.

Na TL2, o aluno é levado a refletir sobre as impossibilidades descritas nos enunciados da 2ª Lei em um pequeno texto. Outra leitura o leva a analisar o funcionamento de um refrigerador. Um pequeno vídeo apresenta o conceito de reversibilidade. É muito comum que os alunos confundam processo reversível/irreversível com fenômeno físico/químico. Um texto aborda sutilmente a morte térmica do universo e a seta do tempo. As questões do TC2 arguem o aluno quanto à irreversibilidade de alguns processos e à possível utilização da energia térmica das águas dos oceanos. Explora também o funcionamento de um refrigerador de porta aberta (é um aquecedor?).

O Encontro 2 aprofundou a Segunda Lei. O conceito de reversibilidade é explorado e a irreversibilidade dos processos naturais é tratada primeiramente como uma dificuldade de certos processos e, adiante, colocada como um axioma da termodinâmica. Daí a conclusão da perfeição da máquina reversível de Carnot, e seu rendimento insuperável. São apresentados os enunciados de Clausius e de Kelvin-Planck e mostrada a equivalência entre eles, quase inexistente nos livros didáticos da Educação Básica (Figura 2).

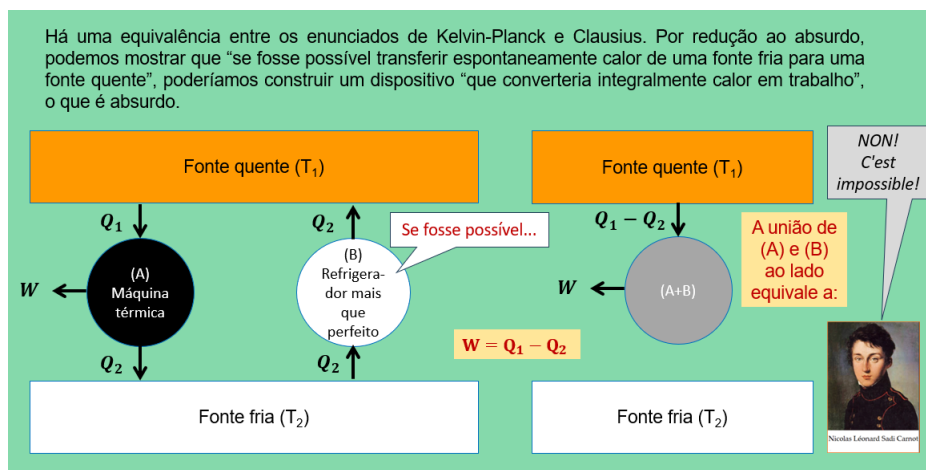


Figura 2. Equivalência dos enunciados. Fonte: Autoria própria.

Mostra-se como Clausius chegou ao conceito de entropia. Para que o uso do termo entropia não fique carente de significado, apresentamos numericamente como máquinas térmicas piores (que desperdiçam mais calor entre as mesmas fontes) produzem maior aumento de entropia do universo, levando-os a conectar o aumento de entropia à menor disponibilidade de energia útil, a um sistema mais degradado, portanto. O aumento da entropia, relacionada aos processos irreversíveis, associa-se à perda de utilidade da energia de um sistema, demonstrando a necessidade de recursos da vizinhança para restaurar as condições iniciais de um sistema. Quanto maior o aumento da entropia, mais distante da reversibilidade.

A 3ª Lei da Termodinâmica foi apresentada. A ênfase foi dada à possibilidade do cálculo da entropia das substâncias em qualquer estado, dando suporte ao cálculo da entropia de qualquer sistema cuja constituição e estado sejam conhecidos. Assim, pode-se avaliar a degradação de um sistema (de um ecossistema) através do acompanhamento de sua entropia. E mesmo em casos que haja uma maior utilidade de certo ambiente, a exemplo de uma área de solo degradado que foi recuperada após grande esforço intervencionista e hoje é um ótimo pomar comercial, somos levados a pensar nas regiões de onde foram extraídos os recursos para a recuperação daquela área, na degradação gerada nessas regiões.

Assim, pode-se levar à conclusão central da redução de impactos ambientais: antes de qualquer intervenção na natureza: pensar e repensar a necessidade, planejar (início, meio e fim), minimizar recursos e lixo, otimizar o uso da energia, aproveitar recursos gratuitos da natureza (luz e calor do Sol), vento, chuva, sombreamentos, declividades, antever o aproveitamento e/ou destinação adequada dos resíduos. Todos os processos aumentam a entropia, local ou globalmente. Os processos puramente naturais da teia ecológica da vida impõem um ritmo menor ao crescimento entrópico.

Previamente ao Encontro 3 houve uma inversão: primeiro o TC3, com uma questão aberta, relativa a mudanças do uso da terra, com o objetivo de trazer o debate no Encontro 3 dessa questão, por estar relacionada a boa parte das emissões de CO_2 no Brasil. Como o texto da TL3 aborda essa temática, o intuito foi tentar identificar alguma análise ingênua da substituição de floresta por

lavoura, por exemplo. A sustentabilidade perpassa, obrigatoriamente, pelo aumento de eficiência dos processos, em especial aqueles relativos à obtenção de energia útil.

A TL3 foi um texto produzido para esta sequência didática. No TC3, foi apresentada uma questão abordando comparativamente o aproveitamento, os beneficiários (quem e quantos), a demanda externa de recursos e os impactos socioambientais de uma área geográfica que pode ser explorada ou como floresta em pé, ou como monocultura.

O Encontro 3 aborda diretamente a questão da sustentabilidade, que é conceituada. Muitos alunos não sabiam o verdadeiro significado e tomam consciência da dificuldade. Podem ser apresentados temas já comuns em textos de Ciências da Natureza, como o ciclo Otto dos motores a quatro tempos e o funcionamento de termoeletricas, ou sugeridas questões que abordem. Evidente que é o mais interdisciplinar dos encontros, exigindo maior pesquisa e trabalho de elaboração por parte do docente. Os temas abordados com maior ênfase também podem surgir dos debates ocorridos nos encontros E1 e E2. O espectro de problemas ambientais é vasto; não há como explorar muitos de forma minimamente rigorosa em apenas duas aulas. A cada aplicação desta SD surgem novas questões, temas, dúvidas e pesquisa.

Uma questão é colocada no E3 para fomentar respostas utilizando o conceito de entropia. É proposto um experimento mental com seres vivos em um ambiente isolado (Figura 3). Pesquisadores analisariam a evolução de dois sistemas isolados com seres vivos, conforme a Figura 2, por meio de uma microcâmera. No início do experimento, todas as condições são iguais, há fartura de alimento, há água, plantas e os animais (ratos) são de mesma idade e saudáveis.



Figura 3. Experimento mental para uso do conceito de entropia. Fonte: Autoria própria.

Os pesquisadores haviam condicionado os ratos a acionarem o gerador, a fim de produzir luz que iria promover o crescimento vegetal para garantir a produção futura de alimento – e eles eram obedientes nesse aspecto. A elaboração e as condições iniciais, antes de fechar completamente a “casa” (é isolado mesmo) fica a cargo do professor e da turma. Perguntas para avaliar a previsão dos alunos: “Eles sobreviverão muito tempo?” “O consumo de energia dos ratos e a geração de biomassa a partir da luz são comparáveis?” “Mesmo com sementes de alta produtividade?” Quando os alunos não sabem, em certo momento é adequado informar que a fotossíntese possui cerca de 1% de eficiência, ou seja, de 100 joules de luz absorvida pelas folhas, apenas 1 joule de biomassa é produzido. Diante disso, a degradação é inquestionável, e a importância da microcâmera deve ser revelada: Os pesquisadores interromperiam o experimento caso a saúde dos ratinhos estivesse sendo prejudicada.

Uma vez abertos os ambientes experimentais, “Qual ambiente estaria mais próximo das condições iniciais (mais perto da reversibilidade), o dos ratinhos de maior ou menor metabolismo basal?” “O que ocorre com a entropia dos sistemas quando eles estão dormindo, ou quando a lâmpada está acesa?” “Se a entropia estivesse sendo medida diariamente, ela revelaria indiscutivelmente o fracasso da experiência de uma vida longa dos brothers?” Essas e muitas outras questões são muito úteis para avaliar a apreensão do significado da Segunda Lei usando o vocabulário utilizado pelos alunos em suas explicações. Esse exemplo mostra como a entropia pode ser uma variável importante para a avaliação da degradação. A partir daí o E3 aborda temas da nossa realidade, relacionados ao meio ambiente e à degradação da energia.

Evidente que o fechamento da sequência no E3, e a correção do Teste Final, deverá ser dialogicamente aberta. Cabe ao professor, conhecedor da Termodinâmica, mostrar que se demandarmos mais dos ecossistemas que sua própria biocapacidade, trilharemos um caminho sem volta. Citando nosso patrono, “o ensino de conteúdos não pode dar-se alheio à formação moral do educando... Pensar certo demanda profundidade e não superficialidade, e compreensão na interpretação dos fatos” (Freire, 1996). Por mais que existam exemplos, aqui e ali, de boas práticas socioambientais, a exigência paradigmática do crescimento econômico ainda é opressiva e dominante, fazendo prevalecer a degradação. Se o desenvolvimento (humano) for visto apenas com os óculos da economia, nossos filhos, netos, bisnetos... não irão dispor das mesmas condições herdadas pela geração atual.

O Quadro 1 a seguir apresenta um resumo na Sequência Didática elaborada como proposta de produto educacional.

Quadro 1. Resumo da sequência didática.

ENCONTROS	OBJETIVOS	Nº AULAS
ENCONTRO 1 2ª Lei da Termodinâmica (Kelvin)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apresentar a disseminação do uso da máquina térmica como solução de um problema social. ▪ Analisar o funcionamento de máquinas térmicas simples (Savery ou Newcomen). ▪ Apresentar o diagrama de energia de uma máquina térmica. ▪ Mostrar que a conservação da energia conduz à expressão: $W = Q_1 - Q_2$. ▪ Calcular o rendimento de uma máquina térmica e explicar o significado. ▪ Destacar que o rendimento, em geral, é baixo. ▪ Explicar porque o condensador de Watt melhorou o rendimento das máquinas. ▪ Destacar a impossibilidade prática de rendimento 100%. ▪ Apresentar (apenas apresentar) a idealização de Carnot. ▪ Apresentar o enunciado de Kelvin da 2ª Lei. ▪ Resolver exercícios de Máquinas Térmicas. ▪ Avaliar 	2
ENCONTRO 2 2ª Lei da Termodinâmica (Clausius) e Entropia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Explicar o funcionamento de um refrigerador. ▪ Calcular a eficiência de um refrigerador. ▪ Apresentar o enunciado de Clausius da 2ª Lei. ▪ Conceituar processo reversível. ▪ Discutir a possibilidade de realizar um processo mecanicamente reversível. 	2

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Discutir a possibilidade de realizar um processo termodinamicamente reversível. ▪ Explicar em termos de reversibilidade a impossibilidade prática de construir uma máquina ou um refrigerador de Carnot. ▪ Explicar que o Ciclo de Carnot conduz à degradação da energia. ▪ Conceituar entropia (função de estado) a partir de sua variação. ▪ Apresentar a 2ª Lei em termos de entropia. ▪ Apresentar o resultado da 3ª Lei (entropia das substâncias) ▪ Avaliar. 	
<p>ENCONTRO 3 Existe conciliação entre a 2ª Lei e a sustentabilidade?</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conceituar sustentabilidade. ▪ Explicar que apesar de a energia se degradar, o fato de estarmos em um sistema aberto permite a prática da sustentabilidade. ▪ Questionar sobre nossa dependência do poder do fogo. ▪ Explicar o funcionamento de um motor quatro tempos: Ciclo Otto (e/ou Diesel). ▪ Explicar o funcionamento de uma termoelétrica normal e uma de Ciclo Combinado. ▪ Apresentar o tamanho imenso da nossa dependência térmica. ▪ Analisar através de um exemplo a utilidade do conceito de entropia. ▪ Apresentar o conceito de pegada ecológica. ▪ Questionar se o uso dos recursos naturais é sustentável. Existem ou não limites biofísicos a serem respeitados? ▪ Destacar a importância dos seres vivos produtores (em especial os fotossintetizantes). ▪ Analisar aspectos entrópicos da fotossíntese. ▪ Mostrar a relação entre a fotossíntese na Amazônia e os rios voadores, tão importantes para a América do Sul (a leste da Cordilheira dos Andes), tanto para a agricultura, abastecimento de água e geração de eletricidade. ▪ Explicar que graças à Floresta Amazônica e aos Andes não há desertos no Brasil, mas que esse processo já pode ter iniciado. ▪ Analisar o impacto da transformação de uma área de floresta em um sistema de produção vegetal (monocultura) – Caso da Amazônia. ▪ Apresentar dados que confrontem a suposta necessidade de conversão de nossos biomas em monoculturas e pastagens. ▪ Discutir a fósil dependência do agronegócio. ▪ Apresentar questões sobre sustentabilidade e moderar debates a respeito da relação homem-natureza: lixo, sobrepesca e decrescimento. ▪ Avaliar (Teste Final). 	2

4. Resultados e Discussão

Embora a Sequência Didática tenha sido aplicada em duas escolas, uma pública e outra particular, o cenário do ensino remoto impôs uma redução significativa do número de alunos que participavam de forma síncrona das aulas, de modo que não foi feita uma distinção da origem das respostas, uma vez que qualquer conclusão poderia ser precipitada, diante do pequeno espaço amostral. Portanto, houve 34 alunos participantes. Assim, o número que aparece ao lado de cada resposta representa a quantidade de alunos do grupo de 34 que deram aquela resposta. Abaixo são analisados os principais aspectos da aplicação da SD.

Questão 1, TC1: Nesta questão, marque quantos itens julgar corretos. São máquinas térmicas:

Respostas dos Alunos:

<input type="checkbox"/> Forno de micro-ondas.	3/34
<input type="checkbox"/> Motor a diesel de um caminhão.	18/34
<input type="checkbox"/> Locomotiva a vapor.	31/34
<input type="checkbox"/> Ferro de passar roupa.	5/34
<input type="checkbox"/> Fogão a gás.	4/34
<input type="checkbox"/> Painel solar fotovoltaico.	2/34
<input type="checkbox"/> Turbina de avião.	6/34
<input type="checkbox"/> Aparelho de ar condicionado.	5/34

A Questão 1 teve como objetivo esclarecer, no contexto da termodinâmica, que máquina térmica é o dispositivo que converte calor em trabalho, ou energia térmica em energia mecânica. Trata-se de uma questão que reforça a necessidade de o professor definir máquina térmica, pois alguns alunos achavam que “esquentou, é máquina térmica”. Segundo PCN+ (2006), aqui se pretende refinar a utilização do vocabulário da Física.

Questão 4, TC1: Você acha que a humanidade conseguirá manter os padrões atuais de desenvolvimento e consumo diminuindo a médio prazo o uso do "poder do fogo", utilizando outras fontes de energia?

Respostas dos Alunos:

<input type="checkbox"/> SIM	23/34 (67%)
<input type="checkbox"/> NÃO	11/34 (33%)

Nesta questão tivemos como objetivo averiguar se os alunos conhecem a atual demanda e dependência por combustíveis fósseis (ou biocombustíveis). Abaixo, seguem as repostas dadas pelos alunos. Sem querer interferir na esperança de dias melhores desse conjunto de alunos, tive de mostrar dados para confrontar expectativa e realidade. Não se trata de “apagar a chama da esperança”; o objetivo é fomentar a consciência e estimular ações (individuais e de cobrança das autoridades), motivar um diálogo que revele a ingenuidade de algumas crenças, possivelmente baseadas apenas no senso comum. Afinal, são competências a serem trabalhadas em Física, segundo os PCN+ (2006), as estratégias para enfrentamento de situações-problema e a argumentação de temas de interesse da Ciência e Tecnologia.

Neste encontro foi necessário apresentar o gráfico da Figura 4 para explicitar o consumo de energia no mundo através do tempo.

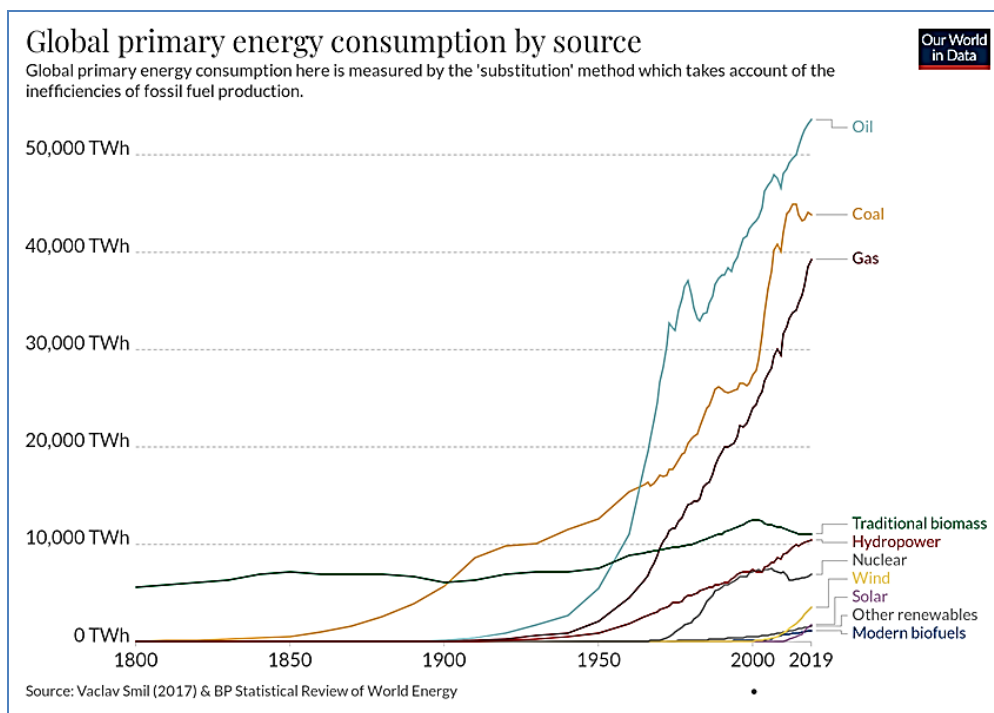


Figura 4. Consumo de energia mundial por fonte. Fonte: <https://bit.ly/3Ni8Kyh>.

O TC1 permitiu identificar, principalmente, que há pouca noção sobre o tamanho de nossa “terceira dependência”, dependência da máquina térmica (movida predominantemente a carvão, petróleo e gás), e que o caminho para um suposto desenvolvimento sustentável, no imaginário dos alunos, é carente apenas de alguns pequenos ajustes. Foi revelador, assim, uma certa concepção ingênua do grupo de alunos participantes, como os próprios confirmaram.

Segundo Freire (1996), ensinar exige apreensão da realidade, e trazer ao conhecimento do aluno a dificuldade de respeitar os padrões da natureza com a atual e crescente demanda de energia é “contribuir positivamente para que o educando vá sendo o artífice de sua formação”.

Questão 1, TC2: A energia térmica é a energia de agitação molecular. A quantidade de energia térmica contida nas águas do oceano é enorme, simplesmente pelo fato de ser uma quantidade enorme de moléculas. Supondo os oceanos a uma temperatura média de 10°C, seria possível aproveitar essa energia para convertê-la em energia elétrica, por exemplo?

Respostas dos Alunos:

() Sim	6/34 (17%)
() Não	5/34 (15%)
() Acho que sim, mas não sei como.	23/34 (68%)

Nessa questão o objetivo foi investigar, indiretamente, se o conceito de calor é dominado pelo aluno. Esta é uma ponte direta para o enunciado da segunda lei que declara a impossibilidade de conversão de calor em trabalho sem que uma parte daquele seja rejeitada para uma fonte fria. Apesar de verbalizar quase automaticamente que o calor é energia transferida devido a uma diferença de temperatura, alguns alunos imaginaram ser possível acessar a energia de agitação molecular sem uma fonte fria. Nos diálogos em aula, pode-se notar também que a energia cinética de agitação molecular foi confundida com a energia de correntes marítimas, das marés e das ondas, formas de energia mecânica, já utilizadas em usinas, ou com projetos bem descritos. Ao tratar da segunda lei (enunciado de Kelvin), enfatizei a necessidade da fonte fria, lembrando essa questão.

A questão revela a necessidade de capacitar o aluno a “identificar fenômenos naturais ou grandezas em dado domínio do conhecimento científico, estabelecer relações, identificar regularidades, invariantes e transformações que impõem restrições ao que pode ou não acontecer em processos naturais” (Brasil, 2006).

Questão 2, TC2: Num quarto de hotel há um frigobar. Após pegar uma garrafinha de água em seu interior, seu celular tocou e você esqueceu a porta do frigobar aberta. Logo em seguida você saiu para passear, deixando o quarto totalmente fechado com o frigobar aberto e funcionando. Suponha que você passou algumas horas passeando. Ao retornar ao quarto, horas depois, desconsiderando influências externas, o quarto estará

Respostas dos Alunos:

<input type="checkbox"/> Mais frio.	18/34 (53%)
<input type="checkbox"/> Na mesma temperatura.	11/34 (32%)
<input type="checkbox"/> Mais quente.	5/34 (15%)

Identificamos que 18 alunos responderam em aula que o ar frio de dentro do frigobar esfriaria o quarto (apenas inicialmente) ao se misturar com o ar do quarto. Quando explicamos o funcionamento, ficou simples concluir porque o quarto iria aquecer. Na TL2 havia uma explicação sobre o funcionamento do refrigerador, e apenas 5 alunos citaram que lembrava. A energia elétrica que entra no quarto e irá ser convertida em trabalho, acaba sendo liberada no mesmo ambiente na forma de calor, o que fica evidenciado no diagrama de energia do refrigerador, trabalhando a competência de elaborar modelos simplificados de determinadas situações, permitindo levantar hipóteses e fazer previsões (Brasil, 2000; 2006).

Questão 3, TC2: Em um dia frio você esfrega uma mão na outra rapidamente e sente que elas esquentam. Esse processo, que envolve transformação de energia cinética (movimento das mãos) em energia térmica, é reversível ou irreversível? Explique.

Respostas dos Alunos (algumas):

Reversível, pois é uma troca de calor em escala infinitesimal.

Reversível, pois não é impossível repetir o processo.

Tal processo é irreversível, pois dadas as condições é impossível transformar energia térmica em cinética.

Irreversível. Parte do calor será perdido para o ambiente.

Irreversível, pois a energia térmica é uma energia degradada.

Irreversível. Porque nesse processo dificilmente vai ser possível converter energia térmica em cinética, já que essa transformação não pode ocorrer de forma espontânea.

Nessa questão os alunos são levados a refletir sobre a possibilidade de converter calor em trabalho, embora a atividade de leitura não aborde diretamente essa situação. No vídeo da TL-2 é definido processo reversível formalmente. As respostas mostraram que estes alunos extraíram o significado correto de reversibilidade da atividade de leitura. Devido à primeira resposta acima, precisei explicar a noção de “infinitesimal” na aula do Encontro 2, quando é tratado o processo reversível. Como muitos não explicaram, questionei na aula a reversibilidade do processo. Trata-se

de trabalhar a competência explicitada em Brasil (2006): “identificar as limitações quanto aos tipos de transformações possíveis, impostas pela existência, na natureza, de processos irreversíveis”.

Algumas respostas indicaram confusão entre processo reversível/irreversível e fenômeno físico/químico. Alguns imaginavam que pelo fato de as condições após algum tempo serem “iguais” às iniciais, e a pessoa ser capaz de repetir o processo “indefinidamente” (nas palavras de um aluno), este seria reversível. Esclarecemos que as condições não permanecem iguais (a energia química armazenada nas células dos músculos foi gasta para realizar trabalho). Foi perguntado: “se alguém passasse 2 horas esfregando as mãos vigorosamente, até ficar exausto e com uma gotinha de suor na testa, a energia dissipada voltaria espontaneamente para a pessoa, que ficaria novamente cheia de disposição e com o mesmo frio inicial?” “A gotinha de suor voltaria ao interior da glândula sudorípara?”. E, enquanto isso, ele converteria CO_2 e H_2O em glicose e O_2 , semelhante a uma planta? A impossibilidade de reverter um processo natural pareceu-me ter ficado mais clara para os alunos.

O TC2 serviu para demonstrar que a noção de degradação e de irreversibilidade não são trazidos de maneira clara pelos alunos. A procura por um processo natural reversível parece não ter fim. Quando solicitamos aos alunos para citarem um processo reversível, eles ainda insistem em pensar, sem perceberem que estão no mesmo caminho dos que tentam construir um moto-perpétuo. A internet hoje ainda é repleta de vídeos que tentam convencer internautas da criação de motos-perpétuos. Daí a necessidade de exemplificar bem e cuidadosamente, pois muitos ainda se convencem da possibilidade. Talvez a culpa seja do uso corriqueiro do princípio de conservação da energia mecânica em vários problemas. Deve-se lembrar que os processos mecânicos reais macroscópicos estão no campo da termodinâmica.

O TC3 foi passado antes da TL3 (Texto em anexo), pois trata-se de uma questão aberta. A questão pretende sondar a percepção dos alunos a respeito da mudança de uso da terra, visto que desmatamento, agropecuária e incêndios florestais respondem pela maior parcela das emissões de CO_2 equivalente no Brasil, temática a ser abordada no E3.

Questão Única, TC3: Observe as imagens (1) e (2) na Figura 5:

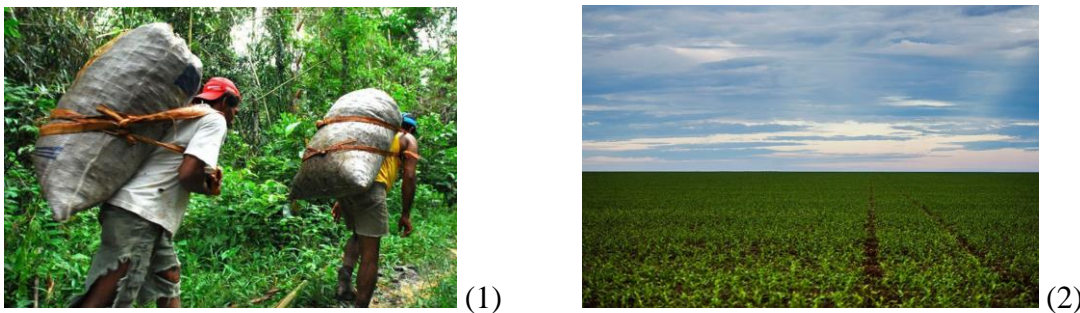


Figura 5. Imagens utilizadas no quesito da TC3. Fontes:(1) Coletores de castanha no Acre. Fonte: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2016/04/04/estimulo-ao-agroextrativismo-sera-analisado-pela-comissao-de-meio-ambiente>. Acesso em 11/06/2020. (2) Fazenda de soja. Fonte: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2019/12/11/governo-edita-mp-que-institui-um-novo-programa-de-regularizacao-fundiaria>. Acesso em 11/06/2020.

Uma região como uma floresta pode prover o sustento de famílias e comunidades por séculos. Imagine uma grande área que é parte de uma floresta. A floresta deu lugar a uma imensa plantação de soja, por exemplo. Chamemos essa área geográfica de “sistema”.

a) Considere os recursos que o “sistema” demanda da vizinhança. Em que configuração ele demanda mais recursos “para funcionar”:

Respostas dos Alunos:

() Floresta 0/34 (0%) () Fazenda 34/34 (100%)

b) Cite alguns desses recursos nos dois casos: floresta em pé e monocultura de soja.

Respostas dos Alunos:

Floresta: Ar/oxigênio (15), água/chuva (23), sol/luz (10), terra (1), nada (11), só fiscalização (1).

Fazenda: Oxigênio (2), água/chuva (32), adubo (6), operários (6), máquinas (15), sol (21), planta (1), agrotóxico (14).

c) Os recursos para serem produzidos geram mais impactos ambientais em qual configuração?

Respostas dos Alunos:

() Floresta 0/34 (0%) () Fazenda 34/34 (100%)

d) Os serviços prestados pelo sistema para a natureza e população circunvizinha são mais benéficos em qual configuração?

Respostas dos Alunos:

() Floresta 19/34 (56%) () Fazenda 15/34 (44%)

e) O número de pessoas que tiram seu sustento do sistema é maior em qual configuração?

Respostas dos Alunos:

() Floresta 11/34 (32%) () Fazenda 23/34 (68%)

No item (a) é fato notório a maior necessidade de recursos externos da fazenda quando comparada à floresta natural. Em (b) observamos que uma parte significativa dos alunos não atentaram que o “sistema” recebe energia solar, água e ar que são provenientes da vizinhança. Um único aluno citou “fiscalização”, o que destaquei como interessante no E3, e possibilitou um breve diálogo sobre investimentos nos órgãos fiscalizadores e interferências externas no papel desses órgãos. Identificamos que boa parte dos alunos citaram os vários recursos demandados pela monocultura, mas nenhum aluno citou sementes (predominantemente importadas), empréstimos bancários e gestão de negócio (nos dois casos). Em (c), unanimidade que a floresta pode se encontrar em equilíbrio com a vizinhança. Em (d) boa parte dos alunos citou maior número de beneficiados com a monocultura, prevalecendo para alguns “o dono” como maior beneficiado, mas citando os trabalhadores, comunidades do entorno, os consumidores e até “o país todo”, quando indagados no E3. Talvez a percepção do Brasil como fornecedor de gêneros alimentícios para o mundo esteja muito enraizada em nosso imaginário.

Chamou a nossa atenção pouca citação de outros benefícios e beneficiados com o extrativismo da floresta. Foi necessário pesquisar para argumentar no E3 (dedicado à temática ambiental). São centenas de pessoas que se beneficiam com a floresta em pé. Por vezes, tradições culturais são mantidas. E os efeitos sobre o clima, que não foi mencionado, pode estender o benefício a muito mais pessoas, não apenas brasileiros. A oferta de emprego é reduzida dada a grande especialização e mecanização. Pessoas ao redor por vezes terão grandes dificuldades nos deslocamentos (podem ficar ilhadas em meio a fazendas), a cultura local se esvai, e com isso perde-se o interesse, especialmente dos jovens, de permanecer na região. É comum serem afetadas quando

ocorrem pulverizações de agrotóxicos; nas entressafas sofrem com o calor e poeira devido à exposição do solo. Trabalhadores em maior número são sazonais, muitas vezes vindos de fora, outras vezes expostos a péssimas condições de trabalho em algumas culturas. Nas reservas extrativistas há sustento de comunidades, há preservação cultural, há muitas possibilidades com o turismo, há conservação da biodiversidade animal e vegetal (com potencial por vezes desconhecido) e há pesquisa científica na área e trabalhos de valorização da cultura, que deve ser divulgada conhecida. A maior parte dos brasileiros desconhece a Amazônia.

Após o Encontro 3 foi liberado o Teste Final com 12 questões. A sistemática de aplicação das avaliações durante o ensino remoto previa a disponibilização de atividades durante dois dias. O Teste Final procurou avaliar, predominantemente, a percepção dos alunos em torno da Segunda Lei da Termodinâmica. A temática ambiental, baseada predominantemente em um texto de elaboração própria intitulada: A Segunda Lei e Nossa Relação com o Planetas, e das exposições durante os Encontros, foi avaliada através dos diálogos durante as aulas.

No geral, houve indícios de um ganho cognitivo ao final da aplicação da SD, levando em conta dificuldades com o ensino remoto. O índice de acerto das questões objetivas foi sempre superior a 50% (Figura 6). A despeito da subjetividade e pequeno espaço amostral, foi percebido que algumas respostas mostraram a aplicação mais precisa de termos no contexto da 2ª Lei.

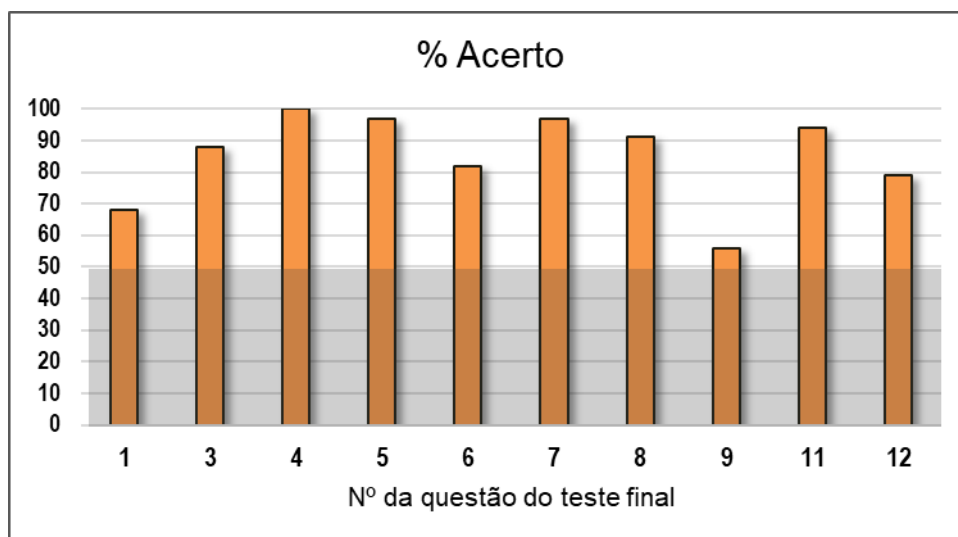


Figura 6: Percentual de acerto das questões objetivas do teste final. Fonte: Autoria própria.

O uso da metodologia ativa se mostrou eficaz ao trazer os alunos como sujeito do processo de aprendizagem, aumentando a participação e oportunizando o diálogo. A temática ambiental também foi favorável à conexão entre a Termodinâmica e a metodologia, posto que é um tema cujo debate já é amplo (Studart, 2019).

5. Análise Geral da Sequência

A Sequência Didática proposta neste trabalho pretende ser uma boa ferramenta para dar sentido e tornar útil a Segunda Lei da Termodinâmica. Acreditamos que um propósito relevante, atinge satisfatoriamente, uma vez que pode oportunizar para o discente uma discussão científica de que a energia se degrada, a compreensão da irreversibilidade dos processos naturais e a utilidade da grandeza entropia são trabalhadas com a profundidade necessária, sem se distanciar da transposição didática adequada ao nível de ensino. A possibilidade de utilizar uma metodologia trazendo a contribuição das Ciências Humanas e das Artes (Literatura, música, artes plásticas...), foi

satisfatória. Tal interação possibilitaria uma aprendizagem mais robusta, tecendo uma rede de diálogos interdisciplinares mais significativa, destacando a importância de frear a degradação, por ser racionalmente melhor para a natureza, sociedade, cultura e economia.

Trabalhar o ensino da degradação da energia, atribuindo-lhe significado ao incorporar a abordagem ambiental, ao invés do isolamento da Física pela Física, permitiu concretizar, sem perder contato com a linguagem científica específica, um processo de ensinagem capaz de desenvolver boa parte das competências esperadas (Brasil, 2006) para o aluno do ensino médio, visto que elas “se constroem em um presente contextualizado, em articulação com competências de outras áreas, impregnadas de outros conhecimentos”.

Observamos que o objetivo de entregar o significado físico da 2ª Lei da Termodinâmica foi alcançado de forma mais significativa quando comparado ao roteiro traçado pelos livros didáticos tradicionais. Mais relevante foi a abertura de diálogo para tratar de temas socioambientais de forma científica, o que possibilita conduzir os alunos ao pensar, afastando-os de falsas convicções.

6. Referências Bibliográficas

- Araújo, I. S.; Mazur, E. Instrução pelos colegas e ensino sob medida: uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino aprendizagem de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 30, n. 2, p. 362-384, 2013.
- Aronson, J. (Ed.). *Improving academic achievement: Impact of psychological factors on education*. New York: Academic Press, 2002.
- Brasil, *Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza e Matemática e suas tecnologias*. Brasília: MEC, 2000.
- Brasil, *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+). Ciências da Natureza e Matemática e suas tecnologias*. Brasília: MEC, 2006.
- Cechin, A. D. Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema? *Dissertação (Mestrado)*. Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- Freire, P. *Pedagogia da autonomia – Saberes necessários à prática educativa*. 25ª Edição. Coleção Leitura. Editora Paz e Terra, São Paulo, 1996.
- Gavrin, A. D. Using just-in-time teaching in the physical sciences. In: Simkins, S. P.; Maier, M. H. *Just-in-Time Teaching: Across the disciplines, across the academy*. Virginia, EUA: Stylus
- Jewett Jr., J. W., Serway, R. A. *Física para cientistas e engenheiros: v. 2, oscilações, ondas e termodinâmica*. Tradução da 9ª ed. americana. São Paulo: Cengage Learning, 2017.
- Muller, I. *A History of thermodynamics: The doctrine of energy and entropy*. Springer. Berlin, 2007.
- Studart, N. Inovando a ensinagem de física com metodologias ativas. *Revista do Professor de Física*, v. 3, n. 3, p. 1-24, 2019.