

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

TIAGO MARTINS MOURA

**A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA: UMA
PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA**

MOSSORÓ

2017

TIAGO MARTINS MOURA

**A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA: UMA
PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), pólo 09, do Departamento de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Linha de Pesquisa: Física no Ensino Médio.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz.

MOSSORÓ

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M931s Moura, Tiago Martins .

A segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia: Uma proposta de sequência didática potencialmente significativa / Tiago Martins Moura. - 2017.

152 f. : il.

Orientador: Carlos Antonio López Ruiz.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Física, 2017.

1. Segunda lei da termodinâmica. 2. Entropia.
3. Sequência didática. 4. EJA. I. Ruiz, Carlos Antonio López , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

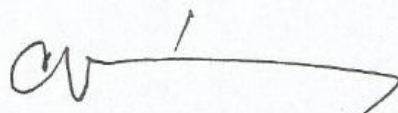
TIAGO MARTINS MOURA

A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA: UMA PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

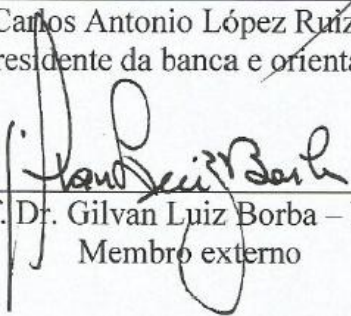
Dissertação apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), pólo 09, do Departamento de Ciências Exatas e Naturais (DCEN) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Linha de Pesquisa: Física no Ensino Médio.

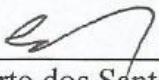
APROVADO EM 24 DE NOVEMBRO DE 2017.



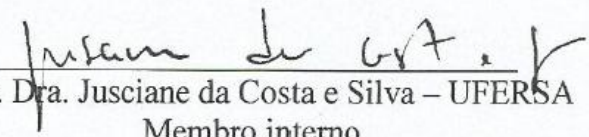
Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz – UFERSA
Presidente da banca e orientador



Prof. Dr. Gilvan Luiz Borba – UFRN
Membro externo



Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos – UFERSA
Membro interno



Prof.^a Dra. Jusciane da Costa e Silva – UFERSA
Membro interno

DEDICO

Aos meus amados pais Sebastião Moura e Maria José,

Ao meu amado filho Kalel Moura,

A minha amada esposa Cristiane Moura,

E a minha família que tanto me fortalece,

*E aos meus professores, educadores e mentores que acreditam que a
educação é o meio pelo qual transforma o indivíduo e a sociedade.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e amigo o Professor Dr. Carlos Antonio López Ruiz pelo empenho, dedicação, instruções e incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

A Sociedade Brasileira de Física (SBF) pelo desenvolvimento deste Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), em especial a secretaria Silvana Feitosa por todas as orientações.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao colegiado do MNPEF na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), pólo 09, por terem aceitado o desafio de desenvolver este Mestrado nesta Instituição de Ensino Superior (IES). Em especial todos os professores que contribuíram em minha formação nesta pós-graduação.

Aos meus amados pais Sebastião Moura e Maira José, pois sem seus ensinamentos e incentivos jamais teria conseguido chegar aqui e pretender o futuro.

A minha amada esposa Cristiane Moura, merecedora de todo meu amor e respeito, por toda sua paciência, companheirismo, atenção, amor e dedicação nesta jornada e sempre.

Ao meu pequeno e amado filho Kalel Moura por motivar me pretender um futuro melhor.

A minhas irmãs Margarida Henriques e Lidiane Ferreira por seu apoio incondicional.

A Niseuda Neves por todo o auxílio extracurricular.

As minhas queridas Laika e Mel pelos momentos de descontração.

Aos meus colegas de sala e amigos do Mestrado Profissional pelas parcerias nas dificuldades e trabalhos realizados, momentos de descontrações nestes semestres de convivência.

Aos membros da banca examinadora por terem aceitado o convite de participar da defesa e pelas valiosas considerações por virem.

A todos meus amigos da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) que tanto me incentivaram e contribuíram para esta formação. Em especial a Thiago Fernandes, Diego Alves, Rosita Rodrigues, Bezerra Neto, Professor Vamberto Dias, Professor Fabio Cabral, Professor Nilson Sena e ao Professor Thoma Dumelow.

A todos os colegas e amigos professores, direção e vice, coordenação pedagógica, supervisores, técnicos e apoio do Centro de Educação de Jovens e Adultos (CEJA) Professor Alfredo Simonetti pelo incentivo, apoio e compreensão nos ajuste de horários para que pudesse cursar este Mestrado. Em especial a Socorro Barbosa, Elizete Dantas, José Nerenilson e Sandra Russo.

A turma do bloco B1 noturno do CEJA, local de aplicação do produto educacional. Por terem confiado, se empenhado e aceitado fazer parte deste projeto.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para que eu pudesse concluir com êxito este trabalho.

“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton (1643 – 1727).

RESUMO

A Segunda lei da termodinâmica está intimamente ligada ao conceito de entropia, compondo o rol das leis mais fundamentais da Física. Porém, como mostrou a revisão sistemática realizada nas principais revistas de Ensino de Física do Brasil, banco de dissertações de Mestrados Profissional em Ensino de Física de universidades consolidadas nesta área e livros didáticos comumente utilizados nas escolas públicas do município de Mossoró/RN, há significativa carência de trabalhos que contemplem intervenções didáticas em sala de aula sobre essas temáticas na Educação básica. No presente trabalho, realizado no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) no pólo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), apresentamos uma sequência didática sobre essas temáticas. Sua implementação aconteceu no Bloco B1 noturno, na unidade equivalente ao segundo ano, no Centro de Educação de Jovens e Adultos (CEJA) Professor Alfredo Simonetti – escola da rede estadual de ensino. A sequência didática foi planejada buscando desenvolver situações de aprendizagem contextualizadas, potencialmente significativas, explorando a interação entre alunos e alunos e professor, o pensamento crítico e reflexivo não privilegiando o ensino tradicional. Para tanto, adotamos referenciais teóricos presentes em textos de David Paul Ausubel, Joseph Donald Novak, Paulo Reglus Neves Freire, Marco Antonio Moreira e Parâmetros Curriculares Nacionais. Foi elaborado um texto, concebido como guia para o desenvolvimento da sequência didática, que foi complementado, durante a implementação desta, com a criação de situações de aprendizagens. A sequência é composta por dez aulas, contemplando conteúdos tais como: máquinas térmicas e seus princípios de funcionamento, elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e de Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA), ciclo de Carnot, segunda lei da termodinâmica, entropia em sistemas isolados (processo reversíveis e irreversíveis), interpretação estatística da entropia, entropia em sistemas vivos, plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS e cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos. Os resultados das atividades desenvolvidas e aplicação do pós-teste mostraram que as estratégias didáticas utilizadas na sequência didática foram eficazes uma vez que os resultados verificados foram melhores se comparado ao pré-teste.

Palavras-chave: Segunda lei da termodinâmica. Entropia. Sequência didática. EJA.

ABSTRACT

The second law of thermodynamics is closely linked to the concept of entropy, consisting of a list of the most fundamental laws of physics. However, as shown by a systematic review of in the main physics teaching journals of the country, a database of master's dissertations in Physics Teaching at universities consolidated in this area, and textbooks commonly used in public schools in the city of Mossoró/RN, there is, in basic education, a significant lack of works that contemplate didactic interventions in the classroom on these themes. In the present work, carried out within the National Professional Masters in Physics Teaching (NPMPT) program at the Federal Rural University of the Semi-Arid (FRUSA) campus, we present a didactic sequence on these themes. Its implementation took place in nocturnal B1 block, in the unit equivalent to the second year, at the Professor Alfredo Simonetti Center for Youth and Adult Education (CYAE) state school. The didactic sequence was designed to develop contextualized, potentially meaningful learning situations, exploring the interaction between students and between students and teacher, critical and reflexive thinking not being favored in traditional teaching. To this end, we adopted theoretical references present in texts by David Paul Ausubel, Joseph Donald Novak, Paulo Reglus Neves Freire, Marco Antonio Moreira and National Curricular Parameters. A text was prepared, designed as a guide for the development of the didactic sequence, which was complemented, during its implementation, by the creation of learning situations. The sequence is composed of ten lessons, including contents such as: heat engines and their principles of operation, elements of History and Philosophy of Science (HPS) and Science, technology, society and environment (STSE), the Carnot cycle, the second law of thermodynamics, entropy in isolated systems (reversible and irreversible processes), statistical interpretation of entropy, entropy in living systems, thermodynamic temperature entropy-TS plots, and calculation of the amount of heat in technological processes. The results of the activities developed and the application of the post-test showed that the strategies used in the didactic sequence were effective since the verified results were better when compared to the pre-test results.

Keywords: Second law of thermodynamics. Entropy. Didactic sequence. YAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do fluxo de energia no funcionamento das máquinas térmicas.....	23
Figura 2 – Ciclo de Carnot.....	24
Figura 3 – Representação esquemática do motor de quatro tempos (admissão, compressão, explosão e exaustão) – Ciclo de Otto.....	25
Figura 4 - Ciclo de Otto no plano PV.....	26
Figura 5 - Ciclo de Diesel no plano PV.....	27
Figura 6 – Diagrama de fluxo de energia em um refrigerador.....	27
Figura 7 – Motor perpetuo de segunda espécie acoplado ao um refrigerador.....	28
Figura 8 - Ciclo qualquer superposto por uma família de isotermas.....	29
Figura 9 – Representação do ciclo qualquer como um conjunto ciclos de Carnot.....	29
Figura 10 – Cálculo da quantidade de calor da fonte quente.....	30
Figura 11 – Cálculo da quantidade de calor da fonte fria.....	30
Figura 12 – Difusão gasosa.....	31
Figura 13 – Síntese – Microestado, macroestado e probabilidade termodinâmica.....	33
Figura 14 – Máquina térmica.....	51
Figura 15 – Esquema de funcionamento de uma máquina térmica.....	52
Figura 16 – Esquema de funcionamento de uma hidroelétrica.....	52
Figura 17 – Ciclo de Carnot do plano PV.....	54
Figura 18 – Difusão gasosa.....	59
Figura 19 – Expansão isotérmica do gás ideal.....	60
Figura 20 – Cálculo do trabalho na expansão isotérmica do gás ideal.....	61
Figura 21 - Formas possíveis de distribuir quatro partículas entre as duas metades do recipiente.....	63
Figura 22 – Ciclo de Carnot no plano TS.....	68

Figura 23 – Cálculo da quantidade de calor fornecida pela da fonte quente.....	68
Figura 24 – Cálculo da quantidade de calor transferida à fonte fria.....	68
Figura 25 – Ciclos de Carnot, II, e outro qualquer, I.....	69
Figura 26 – Área limitada pelo ciclo de Carnot.....	70
Figura 27 – Área limitada por um ciclo diferente do de Carnot.....	70
Figura 28 – Quantidade de calor da fonte quente no ciclo de Carnot.....	70
Figura 29 – Quantidade de calor da fonte quente em um ciclo qualquer.....	70
Figura 30 – Rendimento dos ciclos de Carnot e outro qualquer.....	70
Figura 31 – Comparativa do rendimento do ciclo I e ciclo II segundo suas áreas.....	71
Figura 32 – Ciclo de Carnot no plano PV.....	71
Figura 33 – Carta entrópica da água.....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultado da avaliação parcial com o texto auxiliar <i>Kara e os processos reversíveis e irreversíveis</i>	81
Gráfico 2 - Resultado da avaliação parcial elaborando o Mapa conceitual.....	81
Gráfico 3 - Resultado principal do Questionário de avaliação da implementação da sequência didática.....	82
Gráfico 4 - Resultado da avaliação parcial principal Pós-teste.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Abordagem dada à termodinâmica por livros-textos de Física do Ensino Médio.....	45
Quadro 2 – Síntese do planejamento da sequência didática.....	46
Quadro 3 – Síntese dos processos isotérmicos e adiabáticos do gás ideal.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo comparativo – isotérmica vs. adiabática.....	54
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BNCC - Base Nacional Curricular Comum.
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
- CBEF - Caderno Brasileiro de Ensino de Física.
- CEB - Câmara de Educação Básica.
- CEIPEV - Centro de Educação Integrada Professor Eliseu Viana.
- CEJA - Centro de Educação de Jovens e Adultos.
- CNE - Conselho Nacional de Educação.
- CREF - Centro de Referência para o Ensino de Física.
- CTSA - Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente.
- EJA - Educação de Jovens e Adultos.
- Enem - Exame Nacional do Ensino Médio.
- HFC - História e Filosofia da Ciência.
- His/Tec - Abordagem fundada em elementos históricos e da tecnologia.
- IEC - Investigações em Ensino de Ciências.
- IES - Instituição de Ensino Superior.
- LDBEN - Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional.
- Macro/FN – Abordagem macroscópica fenomenológica.
- Macro/LG – Abordagem macroscópica / Lei dos Gases.
- Micro/CM – Abordagem microscópica baseada na teoria cinético-molecular da matéria.
- Micro/DES – Abordagem microscópica que associa entropia à desordem.
- MNPEF - Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.
- PCNEM - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.
- PCNs - Parâmetros Curriculares Nacionais.
- PV - Pressão Volume.

RBEF - Revista Brasileira de Ensino de Física.

RBPEC - Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências.

SBF – Sociedade Brasileira de Física.

TCM - Teoria Cinético Molecular.

TS - Temperatura Entropia.

UEPS - Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

UERN - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E A ENTROPIA COMO CONTEÚDOS DO ENSINO MÉDIO	22
3	PLANEJAMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	39
3.1	Contexto da aplicação.....	39
3.2	Fundamentação teórica.....	40
3.3	Revisão bibliográfica.....	42
4	IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	48
4.1	Primeira aula - Apresentação da sequência didática. Pré-teste.....	48
4.2	Segunda aula - Máquinas térmicas. Princípios de funcionamento e elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e das relações de Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA).....	50
4.3	Terceira aula - O ciclo de Carnot.....	53
4.4	Quarta aula - A segunda lei da termodinâmica. Entropia.....	56
4.5	Quinta aula - A entropia em processos irreversíveis.....	58
4.6	Sexta aula - Interpretação estatística da entropia.....	61
4.7	Sétima aula - O plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS. Cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos.....	67
4.8	Oitava aula - A entropia em sistemas vivos.....	73
4.9	Nona aula - Aula integradora: construção de um mapa conceitual.....	77
4.10	Décima aula - Aplicação do pós-teste.....	78
5	CONCLUSÕES	80
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	91
	APÊNDICE B – PRÉ-TESTE	135

APÊNDICE C – TEXTO DE APOIO.....	137
APÊNDICE D – ATIVIDADE PROPOSTA COM O TEXTO AUXILIAR..	143
APÊNDICE E – PROPOSTA DE MAPA CONCEITUAL A SER DESENVOLVIDO NA AULA INTREGADORA.....	145
APÊNDICE F – PÓS-TESTE.....	146
APÊNDICE G – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	150

1 INTRODUÇÃO

O gosto e admiração que tenho pela termodinâmica me possibilitam lembrar o meu primeiro contato com sua segunda lei. Aconteceu no segundo ano do Ensino Médio, em 2002, no Centro de Educação Integrada Professor Eliseu Viana (CEIPEV), em Mossoró/RN. Assimilei unicamente a definição do rendimento da máquina térmica. Já com a entropia, o primeiro encontro aconteceu, em 2005, no terceiro período do curso de licenciatura em Física da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN). O professor a relacionou à desordem.

Nas duas ocasiões, ambos os assuntos foram tratados quase da mesma forma. Os professores não os relacionaram a qualquer situação que me fosse mais próxima. Inclusive os exemplos e exercícios propostos no livro abordavam situações típicas das regiões sul e sudeste do país e, portanto, distantes de nosso contexto vivencial mais imediato. Essa falta de contextualização dos conteúdos é uma das deficiências mais significativas do chamado ensino tradicional, ainda presente em nosso sistema educacional (LIMA, 2012; FRAGA, 2007; RICARDO, 2007).

Nesta dissertação, constituída de cinco capítulos, considerando a presente introdução como o primeiro, apresentamos, pretendendo contribuir na necessária superação desse ensino tradicional, uma proposta de sequência didática sobre a segunda lei da termodinâmica e a entropia, elaborada como resultado de nosso trabalho no pólo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) e aplicada no Centro de Educação de Jovens e Adultos (CEJA) Professor Alfredo Simonetti, em Mossoró, na unidade de conhecimento equivalente ao segundo ano do Ensino Médio regular.

No segundo capítulo abordamos a segunda lei da termodinâmica e a entropia como conteúdos do Ensino Médio. Nele apresentamos ao nível da disciplina de Física Geral dos cursos de Licenciatura o conteúdo conceitual da proposta e discutimos suas potencialidades para alcançar as finalidades do ensino de Física em termos das competências e habilidades sugeridas nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) e PCN+.

No terceiro, dedicado ao planejamento da sequência didática, caracterizamos o contexto da sua aplicação, destacando o desafio deste ser a Educação de Jovens e Adultos. Na apresentação da fundamentação teórica indicamos que nos PCN, PCN+ e na proposta da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) subjaz um bom referencial teórico no qual se fundamenta a necessidade de uma mudança paradigmática no ensino de ciências, e de Física em particular, para poder atender as exigências que a contemporaneidade está impondo à Educação Básica. Afirmamos perceber nesse referencial teórico conteúdos de varias teorias sobre o ensino e a aprendizagem, optando por nos aprofundar especificamente na teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, complementando-a com contribuições oriundas de concepções de Paulo Freire, Joseph Novak e Marco Antônio Moreira, cujos fundamentos esboçamos. Justificamos a pertinência da nossa proposta no âmbito da pesquisa em ensino de Física no Brasil com base nos resultados de uma revisão bibliográfica nas revistas Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF), Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (RBPEC), revista eletrônica Investigações em Ensino de Ciências (IEC) e também nas dissertações e materiais didáticos de dois cursos de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MPEF) bem conceituados na avaliação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES): o da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Concluimos o capítulo apresentando o conteúdo das dez aulas da sequência didática.

No quarto relatamos detalhadamente como aconteceu a implementação de cada uma dessas dez aulas.

No último capítulo, dedicado às conclusões, justificamos com base nos resultados das avaliações realizadas durante a implementação da sequência didática que seu objetivo de constituir-se numa proposta de superação do ensino tradicional foi alcançado. Concluimos apresentando os resultados da aplicação de um questionário que visava conhecer as opiniões dos alunos. As respostas e depoimentos destes permitem afirmar que a turma aprovou nossa proposta de trabalho.

E por fim, apresentamos as referências e os apêndices.

2 A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E A ENTROPIA COMO CONTEÚDOS DO ENSINO MÉDIO

Na tentativa de superar o ensino tradicional os PCNEM sugerem que no ensino de Física primeiramente se responda a pergunta “para que ensinar Física?” e depois “o que ensinar de Física?”. Isso implica numa nova concepção sobre os conteúdos de ensino na qual eles deixam de ser um objetivo em si para se constituir em meios para alcançar as finalidades do Ensino Médio em termos de competências e habilidades sintonizadas com as exigências da contemporaneidade (MENEZES, 2001).

Assim sendo, organizar e dirigir situações de aprendizagem que consigam traduzir determinados conteúdos de ensino na linguagem dessas competências e habilidades se constitui em uma das tarefas mais importantes da atuação do professor na educação científica (PERRENOUD, 2008). E, claro, isso exige uma profunda reflexão sobre as potencialidades de domínios específicos de conhecimento da Física, quando pensados como possíveis conteúdos do Ensino Médio. Neste sentido, tanto os PCNs quanto a proposta da BNCC apresentam uma sugestão bastante bem estruturada, considerando conteúdos conceituais, procedimentais e atitudinais. Nela, em particular, a segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia são contemplados no tema estruturador sugerido nos PCNs: Calor, ambiente e usos de energia (BRASIL, 1996) e na unidade de conhecimento: Energia em sistemas e processos naturais e tecnológicos da BCNN (BRASIL, 2016).

Historicamente a segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia foram desenvolvidos primeiramente a partir do estudo do estabelecimento do equilíbrio térmico e da eficiência das máquinas térmicas e só posteriormente no contexto da Teoria Cinética Molecular (TCM). Como resultados desses estudos foram elaboradas duas interpretações desses conceitos: a termodinâmica e a estatística, que podem ser consideradas complementares (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2005) e (SEARS; FREEDMAN YOUNG, 2003).

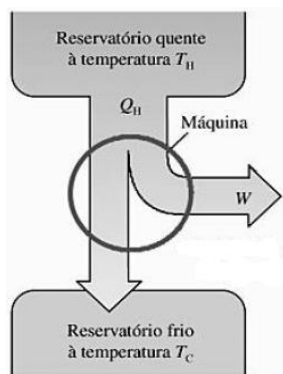
A segunda lei da termodinâmica indica a direção em que acontecem espontaneamente os fenômenos na natureza. Ela é resultado da generalização de fatos experimentais. Assim, no processo de estabelecimento de equilíbrio térmico entre dois corpos a diferentes temperaturas

o fluxo de calor se dá do corpo mais quente para o mais frio. A primeira lei da termodinâmica não estaria sendo violada se a transferência de energia acontecesse em sentido contrário: do corpo frio para o quente. Ela apenas exige que a energia se conserve, não indicando a direção da sua transferência. Daí a necessidade da segunda lei, cuja primeira formulação, acima aludida, pertence a Rudolf Clausius.

Outra formulação da segunda lei da termodinâmica é resultado dos estudos do funcionamento das máquinas térmicas iniciados por Carnot.

As máquinas térmicas utilizam certa quantidade de calor (Q_H) de um reservatório quente para realizar um trabalho mecânico útil (W) e transferem uma quantidade de calor (Q_C) para um reservatório frio, conforme diagrama representado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama do fluxo de energia no funcionamento das máquinas térmicas



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

Segundo o princípio de conservação da energia, o trabalho (W) realizado por estas máquinas será:

$$|W| = |Q_H| - |Q_C| \quad (1)$$

Comumente se adota como positivo o calor adquirido pelo sistema (Q_H) e negativo quando cedido por este (Q_C).

A função destas máquinas é transformar a maior quantidade possível do calor absorvido (Q_H) em trabalho (W). Assim, seu rendimento (η) é definido como:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} \quad (2)$$

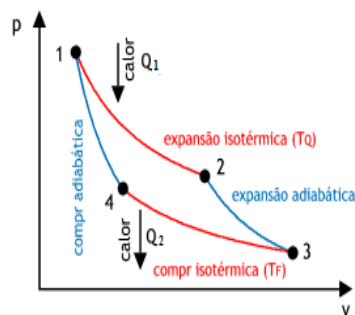
Ou

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_H} \quad (3)$$

Com base em (3) surge a seguinte pergunta: seria possível construir uma máquina térmica na qual $Q_c = 0$ e consequentemente, $\eta = 1$? Seu funcionamento não implicaria no incumprimento do princípio de conservação da energia. No entanto, fatos experimentais indicam a impossibilidade de construir essa máquina. Por isso, tal impossibilidade foi estabelecida como outra formulação, de Kelvin-Planck, da segunda lei da termodinâmica que, aliás, não contradiz a formulação de Clausius, como será mostrado mais na frente quando abordado o funcionamento de um refrigerador. Nesse sentido, as duas formulações são equivalentes.

Sabendo da existência desta limitação, Carnot propôs uma máquina ideal que funcionasse segundo o ciclo que leva seu nome (Figura 2).

Figura 2 – Ciclo de Carnot



Fonte: MSPC, 2008.

O Ciclo de Carnot é constituído por dois processos isotérmicos e dois adiabáticos, todos reversíveis. O gás se expande isotermicamente de 1 até 2, absorvendo Q_1 , em seguida expande-se adiabaticamente de 2 até 3, diminuindo sua temperatura para T_F , depois é comprimido isotermicamente de 3 até 4 cedendo Q_2 e por fim é comprimido de 4 até 1 adiabaticamente, retornado ao seu estado inicial.

O rendimento para a máquina térmica, operando segundo o Ciclo de Carnot é dado em função das temperaturas de suas fontes quente e fria, independentemente da substância de trabalho.

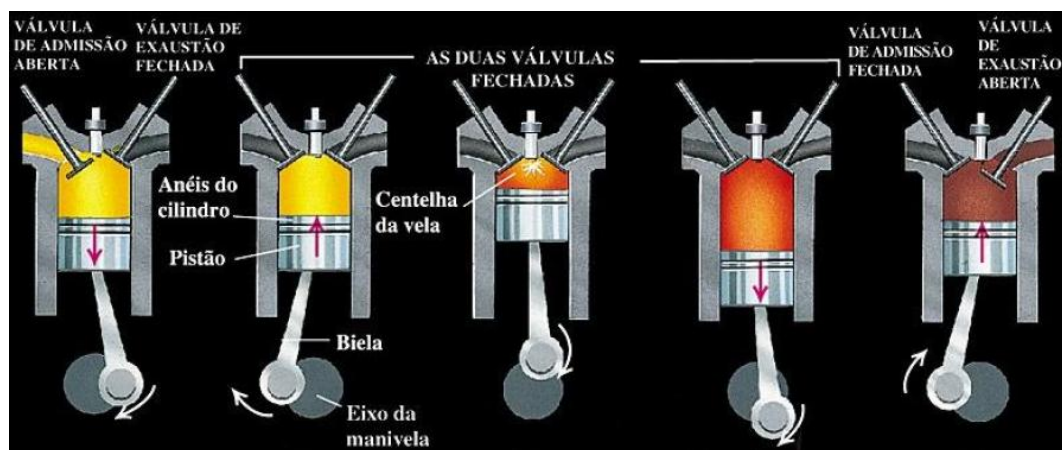
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (4)$$

A equação (4) indica a impossibilidade de se alcançar uma temperatura igual a zero Kelvin. Do ponto de vista teórico o rendimento da máquina ideal de Carnot representa o limite da eficiência a ser alcançada por uma máquina real em cujo funcionamento sempre estão presentes processos irreversíveis.

Nas máquinas reais, assim como na ideal de Carnot, se realizam determinados ciclos termodinâmicos. Os mais comuns são o de Otto e o de Diesel.

O ciclo do Otto acontece nos motores a gasolina. A Figura 3 trás uma representação deste ciclo.

Figura 3 – Representação esquemática do motor de quatro tempos (admissão, compressão, explosão e exaustão) – Ciclo de Otto.

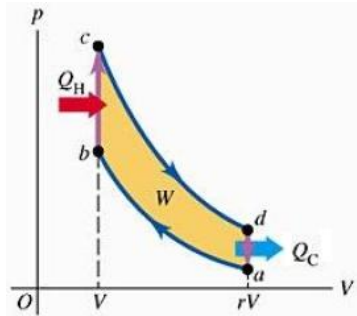


Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

No primeiro tempo a válvula de admissão é aberta, assim é injetado no cilindro um mistura de ar e gasolina. No segundo tempo a válvula de admissão é fechada e a mistura é comprimida adiabaticamente pelo pistão do cilindro. No terceiro tempo é gerada uma centelha pela vela de ignição culminando em uma explosão adiabática (Q_H), produzindo trabalho (W) transmitindo em forma de movimento circular ao pistão. No quanto tempo, a válvula de exaustão é aberta empurrando a mistura queimada para fora do cilindro (Q_C).

A Figura 4, trás o Ciclo de Otto no plano PV conforme as quatro etapas descritas anteriormente.

Figura 4 - Ciclo de Otto no plano PV



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

O rendimento deste ciclo é calculado por:

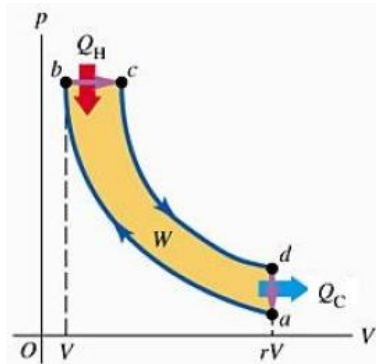
$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (5)$$

Portanto, para aumentar o rendimento do motor a razão de compressão (r) deverá ser a maior possível, evitando alcançar durante a compressão de a até b a temperatura de detonação da mistura de ar e gasolina. Em geral, os motores a gasolina possuem um rendimento entorno dos 22% (RIBEIRO, 2015).

O ciclo de Diesel acontece nos motores a diesel, mas seu funcionamento é semelhante ao de gasolina. O rendimento destes motores também é dado pela equação (5). O detalhe que faz estes motores possuírem maior rendimento reside no fato de no momento da compressão não haver combustível em seu cilindro, logo não há riscos de pré-ignição ou detonação. Assim, a taxa de compressão r pode ser maior, elevando o rendimento até o entorno dos 35% (RIBEIRO, 2015).

A Figura 5, trás o Ciclo de Diesel no plano PV.

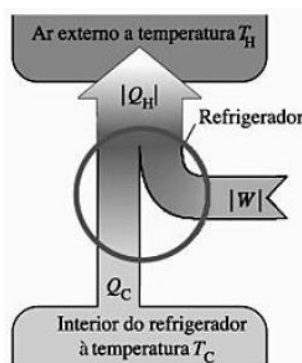
Figura 5 - Ciclo de Diesel no plano PV



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

A segunda lei da termodinâmica veta a transferência espontânea de energia de um corpo frio para outro quente. No entanto, essa transferência de forma não espontânea é possível. Qualquer dispositivo que faça o calor fluir de uma fonte fria para uma fonte quente é chamado de refrigerador. Este dispositivo também pode ser chamado de máquina térmica funcionando com o ciclo invertido. A Figura 6 representa o esquema de funcionamento de um refrigerador.

Figura 6 – Diagrama de fluxo de energia em um refrigerador



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

Neste caso, o trabalho, W , é utilizado para transferir a quantidade de calor Q_C da fonte fria para a quente. Com base no princípio de conservação da energia temos que:

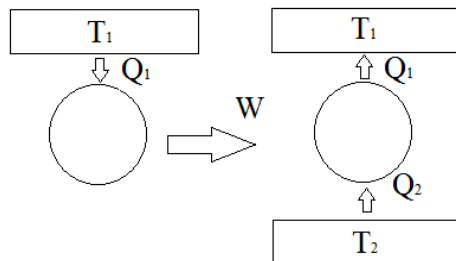
$$|Q_H| = |Q_C| + |W| \quad (6)$$

O coeficiente de desempenho do refrigerador, K , é calculado de forma semelhante ao rendimento do motor, mas considerando a inversão do ciclo:

$$K = \frac{Q_c}{W} \quad (7)$$

Como acima mencionado, utilizando o princípio de funcionamento do refrigerador pode-se demonstrar a equivalência das formulações de Clausius e de Kelvin-Planck da segunda lei da termodinâmica. Para tanto é suposto a existência de uma máquina térmica que transforma todo o calor do reservatório quente, Q_H , em trabalho, W . Esse trabalho pode ser utilizado para colocar em funcionamento um refrigerador que transfere o calor Q_2 do reservatório frio para o quente (Figura 7). O resultado do funcionamento em conjunto desses dois dispositivos implicaria na transferência de calor do reservatório frio para o quente sem realizar trabalho. Portanto, a existência de uma máquina de 100% de rendimento contradiz a formulação de Clausius da segunda lei da termodinâmica. Assim sendo, as duas formulações da lei são equivalentes.

Figura 7 – Motor perpetuo de segunda espécie acoplado ao um refrigerador



Fonte: Autoria própria, 2017.

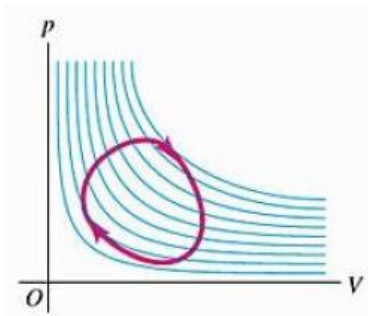
O aprofundamento no estudo dos processos reversíveis e irreversíveis levou Clausius a outra formulação da segunda lei da termodinâmica, através da introdução de um novo conceito: a entropia. Isso foi feito a partir da análise do rendimento da máquina térmica ideal de Carnot, para a qual tem lugar à seguinte expressão:

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (8)$$

Ou seja, a soma algébrica das razões Q/T no ciclo de Carnot é igual a zero.

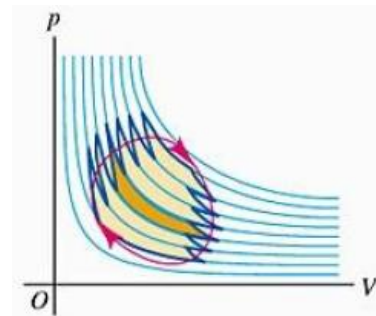
Esse resultado pode ser generalizado para um ciclo qualquer, concebido como um conjunto de ciclos de Carnot obtidos como resultado da união de uma família de isotermas através de segmentos de adiabáticas, como mostrado nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Ciclo qualquer superposto por uma família de isotermas



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

Figura 9 - Representação do ciclo qualquer como um conjunto de ciclos de Carnot



Fonte: YOUNG; FREEDMAN, 2003.

Assim, temos que:

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = 0 \quad (9)$$

No limite de diferenças de temperatura infinitesimais entre os pares de isotermas a equação (9) se transforma em:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (10)$$

Com base em (10) inferimos que dQ/T representa um diferencial exato de uma certa função. Esta é denominada entropia e comumente se representa pela letra S . Portanto, a entropia é uma função cuja variação não depende do processo mediante o qual o sistema termodinâmico passa de um estado para outro. Nesse sentido se diz que a entropia é uma função de estado. Assim, temos que:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (11)$$

Considerando (11) a equação (10) pode ser reescrita como:

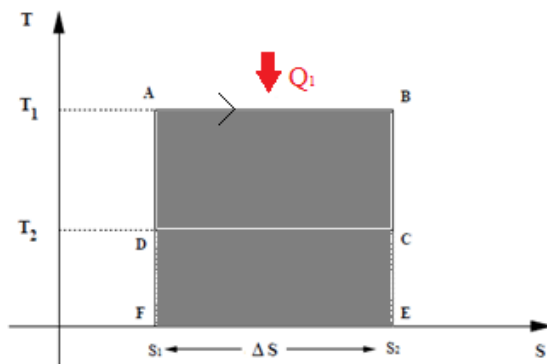
$$\oint dS = 0 \quad (12)$$

É importante registrar que a equação (10) somente é válida para processos reversíveis.

Como se pode inferir de (11) e da expressão para o rendimento da máquina de Carnot, quando a temperatura do reservatório quente aumenta o rendimento também aumenta e sua entropia diminui. No caso contrário, quando a temperatura diminui o rendimento também diminui e a entropia aumenta. Portanto, o aumento da entropia indica que a capacidade de utilizar a energia do reservatório quente para realizar trabalho diminui. Nesse sentido, se diz que o aumento da entropia implica na degradação da energia.

No plano termodinâmico de entropia vs. temperatura o cálculo do rendimento do ciclo de Carnot dispensa o uso do calculo integral. Para tanto basta determinar graficamente as quantidades de calor envolvidas no ciclo como mostram as Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Cálculo da quantidade de calor da fonte quente

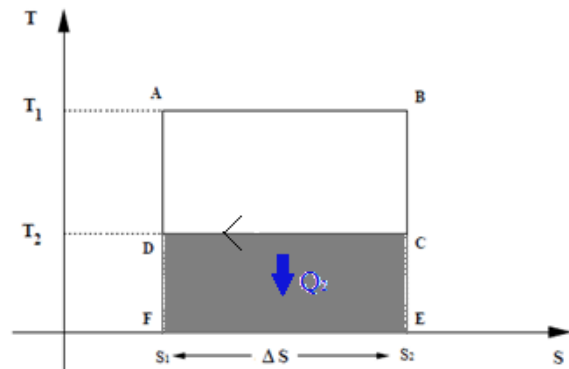


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

$$A_{\text{retângulo}} = \text{Base} \cdot \text{altura}$$

$$Q_1 = (S_2 - S_1) \cdot T_1$$

Figura 11 – Cálculo da quantidade de calor da fonte fria



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

$$A_{\text{retângulo}} = \text{Base} \cdot \text{altura}$$

$$Q_2 = (S_2 - S_1) \cdot T_2$$

Assim, temos que:

$$\eta = 1 - Q_2/Q_1$$

$$\eta = 1 - [(S_2 - S_1).T_2] / [(S_2 - S_1).T_1]$$

$$\eta = 1 - T_2/T_1 \quad (13)$$

Como o rendimento dos ciclos que contemplam processos irreversíveis é menor que o do ciclo de Carnot, seguindo o mesmo procedimento que utilizamos para obter a equação (8), para estes ciclos obtemos que:

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0$$

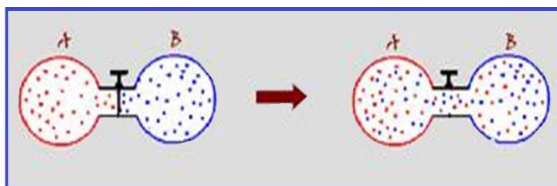
$$dS > \frac{dQ}{T} \quad (14)$$

Com base em (14) a segunda lei da termodinâmica é enunciada da seguinte maneira: em um sistema isolado quando acontece um processo irreversível a entropia aumenta. Evidentemente, como os processos reais são irreversíveis, essa formulação da segunda lei da termodinâmica indica a direção em que acontecem espontaneamente os fenômenos na natureza.

Para calcular a variação da entropia nos processos irreversíveis, nos quais $dS > dQ/T$, considerando que a entropia é uma função de estado, escolhe-se um processo reversível, no qual $dS = dQ/T$, através do qual o sistema passa do mesmo estado inicial até o final no processo irreversível. O cálculo da variação da entropia no fenômeno da difusão de gases ideais é um bom exemplo para ilustrar esse procedimento.

Imaginemos um recipiente, com dois compartimentos interligados por uma válvula, no qual há dois gases ideais. Em um dado momento abre-se a válvula e os gases se difundem isotermicamente (Figura 12). Para calcular a variação da entropia quando acontece esse processo irreversível podemos escolher o processo reversível de expansão isotérmica desses gases.

Figura 12 – Difusão gasosa



Fonte: BOCAFOLI, 2005.

Neste último, como a energia interna do gás ideal é função apenas da temperatura, com base na primeira lei da termodinâmica, teremos que:

$$\text{Como } dQ = PdV \text{ e } dS = dQ/T, \text{ logo: } dS = PdV/T \quad (15)$$

Considerando a equação de estado do gás ideal $PV = (m/\mu)RT$, temos que:

$$\begin{aligned} dS &= (m/\mu)R(dV/V) \\ \Delta S_1 &= R (m_1/\mu_1) \ln (V_1 + V_2) / V_1 \\ \Delta S_2 &= R (m_2/\mu_2) \ln (V_1 + V_2) / V_2 \\ \Delta S &= \Delta S_1 + \Delta S_2 \end{aligned} \quad (16)$$

Onde m_1 e m_2 são as massas dos gases, μ_1 e μ_2 suas massas molares e V_1 e V_2 os volumes dos gases antes da sua difusão.

Portanto, como tanto ΔS_1 quanto ΔS_2 são maiores que zero, a entropia nesse processo reversível de expansão isotérmica dos gases aumenta. E, como a entropia é uma função de estado, esse aumento será igual ao que acontece no processo irreversível da difusão, porque em ambos os processos os estados termodinâmicos, inicial e final, são os mesmos.

A consideração de que os sistemas macroscópicos são formados por uma enorme quantidade de partículas levou Boltzmann a outra interpretação da entropia e consequentemente da segunda lei da termodinâmica: a estatística. Nessa interpretação os estados termodinâmicos de um determinado sistema macroscópico se determinam pelas posições e quantidades de movimento linear das partículas que o constituem. Os estados assim definidos são chamados de microestados. Assim, um determinado estado, caracterizado por parâmetros macroscópicos, como a temperatura, a pressão e o volume, por exemplo, pode ser realizado através de diferentes microestados. Nessa abordagem a entropia vai ser definida com base na quantidade desses microestados.

Comumente o acima esboçado se apresenta inicialmente considerando um sistema formado por quatro partículas. Vejamos de quantas maneiras se podem distribuir essas quatro partículas entre as duas metades de um determinado volume conforme Figura 13.

Figura 13 – Síntese – Microestado, macroestado e probabilidade termodinâmica

W = 1	<table border="1"><tr><td></td><td>1 2</td></tr><tr><td></td><td>3 4</td></tr></table>		1 2		3 4	<table border="1"><tr><td></td><td>X X</td></tr><tr><td></td><td>X X</td></tr></table>		X X		X X																									
	1 2																																		
	3 4																																		
	X X																																		
	X X																																		
W = 4	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2 4</td></tr><tr><td></td><td>3</td></tr></table>	1	2 4		3	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1 4</td></tr><tr><td></td><td>3</td></tr></table>	2	1 4		3	<table border="1"><tr><td>3</td><td>1 4</td></tr><tr><td></td><td>2</td></tr></table>	3	1 4		2	<table border="1"><tr><td>4</td><td>1 3</td></tr><tr><td></td><td>2</td></tr></table>	4	1 3		2	<table border="1"><tr><td>X</td><td>X X</td></tr><tr><td></td><td>X X</td></tr></table>	X	X X		X X										
1	2 4																																		
	3																																		
2	1 4																																		
	3																																		
3	1 4																																		
	2																																		
4	1 3																																		
	2																																		
X	X X																																		
	X X																																		
W = 4	<table border="1"><tr><td>2 4</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td></td></tr></table>	2 4	1	3		<table border="1"><tr><td>1 4</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td></td></tr></table>	1 4	2	3		<table border="1"><tr><td>1 4</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td></td></tr></table>	1 4	3	2		<table border="1"><tr><td>1 3</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td></td></tr></table>	1 3	4	2		<table border="1"><tr><td>X X</td><td>X</td></tr><tr><td>X</td><td></td></tr></table>	X X	X	X											
2 4	1																																		
3																																			
1 4	2																																		
3																																			
1 4	3																																		
2																																			
1 3	4																																		
2																																			
X X	X																																		
X																																			
W = 6	<table border="1"><tr><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr></table>	1	3	2	4	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>4</td><td>3</td></tr></table>	1	2	4	3	<table border="1"><tr><td>3</td><td>1</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td></tr></table>	3	1	4	2	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>4</td><td>3</td></tr></table>	2	1	4	3	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr></table>	2	1	3	4	<table border="1"><tr><td>X</td><td>X</td></tr><tr><td>X</td><td>X</td></tr></table>	X	X	X	X
1	3																																		
2	4																																		
1	2																																		
3	4																																		
1	2																																		
4	3																																		
3	1																																		
4	2																																		
2	1																																		
4	3																																		
2	1																																		
3	4																																		
X	X																																		
X	X																																		
W = 1	<table border="1"><tr><td>1 2</td><td></td></tr><tr><td>3 4</td><td></td></tr></table>	1 2		3 4					<table border="1"><tr><td>X X</td><td></td></tr><tr><td>X X</td><td></td></tr></table>	X X		X X																							
1 2																																			
3 4																																			
X X																																			
X X																																			
	PROBABILIDADE TERMODINÂMICA	MICROESTADOS	MACROESTADOS																																

Fonte: TELECNIN, 1973.

Nesta figura, cada uma das configurações é denominada microestado. Portanto, ao sistema constituído por 4 partículas correspondem 16 microestados possíveis. Os macroestados são caracterizados pela quantidade de partículas em cada uma das metades do volume. Assim, há o macroestado no qual na metade esquerda do volume há uma partícula e na metade direita 3 partículas. A esse macroestado correspondem 4 microestados. E, conseqüentemente, a probabilidade matemática de se realizar esse macroestado será de 4/16. Ao macroestado no qual há a mesma quantidade (duas) de partículas em ambas as partes do volume correspondem 6 microestados, e sua probabilidade matemática será igual a 6/16. O número de microestados através dos quais se pode realizar um determinado estado macroscópico se denomina peso estatístico ou probabilidade termodinâmica (W). E, como se pode inferir dos exemplos anteriormente analisados, quanto maior for o peso estatístico maior será a probabilidade matemática desse estado macroscópico. Isso pressupõe que a probabilidade de todos os microestados é a mesma.

A probabilidade do estado no qual todas as partículas se encontram em uma das metades do volume, no caso do sistema constituídos por 4 partículas, é bastante grande (2/16 ou 1/8). Esse resultado muda radicalmente quando consideramos o número de partículas característico dos sistemas macroscópicos: o número de Avogadro: $6,02 \cdot 10^{23}$. Nesse caso a probabilidade desse macroestado é praticamente zero: $2/2^{6,02 \cdot 10^{23}}$.

Com base no anteriormente exposto poderíamos considerar a probabilidade termodinâmica como a grandeza física que indicaria a direção em que acontecem os fenômenos na natureza e, conseqüentemente, dar uma interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica diretamente em termos dela. No entanto, para conservar o caráter aditivo da entropia, presente na interpretação termodinâmica desse conceito para sistemas compostos por dois subsistemas, cuja probabilidade termodinâmica seria o produto das probabilidades dos subsistemas ($W = W_1 W_2$), a entropia (S) se define como:

$$S = k \ln W \quad (17)$$

Onde $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/k}$ é a constante de Boltzmann e W a probabilidade termodinâmica. Para o sistema composto por dois subsistemas temos que:

$$\begin{aligned} S &= k \ln W_1 W_2 = k \ln W_1 + k \ln W_2 \\ \Delta S &= S_1 + S_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Segundo essa interpretação estatística quando acontece um processo irreversível a entropia aumenta, passando o sistema de um estado de menor para outro de maior probabilidade. No estado de equilíbrio termodinâmico o qual se realiza com o maior número possível de microestados a entropia alcança seu valor máximo.

Para o zero absoluto de temperatura a probabilidade termodinâmica é igual a um ($W = 1$). Nesse caso a entropia é igual a zero ($S = k \ln 1 = 0$). Daí se infere que quando a temperatura tende ao zero absoluto a entropia tende a zero. Esta afirmação é considerada como o terceiro princípio da termodinâmica ou teorema de Nerst.

Com base nas duas interpretações da entropia, pode-se estabelecer uma relação entre elas e refletir sobre os limites de validade da segunda lei da termodinâmica (TELECNIN, 1973). Para tanto vamos analisar o processo do equilíbrio térmico entre dois corpos, A e B, cujas temperaturas são T_A e T_B ($T_A > T_B$). Consideremos que nesse processo é transferida uma pequena quantidade de calor ΔQ . Assim sendo, da interpretação termodinâmica de Clausius temos que as variações da entropia dos corpos serão:

$$\Delta S_A = \Delta Q/T_A \text{ e } \Delta S_B = \Delta Q/T_B$$

E a variação da entropia no processo será:

$$\begin{aligned}\Delta S_{AB} &= \Delta S_B - \Delta S_A \\ \Delta S_{AB} &= \Delta Q / T_B - \Delta Q / T_A \\ \Delta S_{AB} &= \Delta Q (T_A - T_B / T_B T_A)\end{aligned}\quad (19)$$

Da interpretação estatística de Boltzmann teremos que:

$$\begin{aligned}\Delta S_{AB} &= S_B - S_A \\ \Delta S_{AB} &= K \ln W_B - K \ln W_A \\ \Delta S_{AB} &= K \ln (W_B / W_A)\end{aligned}\quad (20)$$

Igualando (19) e (20), teremos:

$$\Delta Q (T_A - T_B / T_B T_A) = K \ln (W_B / W_A)$$

$$(\Delta Q / K) (T_A - T_B / T_B T_A) = \ln (W_B / W_A)$$

Portanto,

$$W_B / W_A = e^{(\Delta Q / K) (T_A - T_B / T_B T_A)} \quad (21)$$

Se em (21) $T_A = 301\text{k}$, $T_B = 300\text{k}$ e $\Delta Q = 10^{-7}\text{J}$, temos que:

$$\begin{aligned}W_B / W_A &= e^{(\Delta Q / K) (T_A - T_B / T_B T_A)} \\ W_B / W_A &= e^{(10(\exp.(-7)) / 1,38.10(\exp.(-23))) (301 - 300 / 301.300)} \\ W_B / W_A &\cong e^{10(\exp.12)}\end{aligned}$$

Este resultado mostra uma probabilidade ínfima (mas existente) de ocorrência do fluxo de calor ser transferido do corpo com menor temperatura para o de maior temperatura. Vê-se que para $2,7^{1.000.000.000.000}$ casos de transferência de 10^{-7} J do corpo com temperatura de 301 K para o corpo com temperatura de 300 K existe apenas um caso de transferência da mesma quantidade de calor do corpo com 300 K para o corpo com temperatura de 301 K. Por esta razão, o que para Clausius era impossível - a transferência de calor do corpo frio para o quente -, para Boltzmann não era, mas sim, de uma probabilidade praticamente zero de acontecer, o que conceitualmente não é a mesma coisa.

Se nesse processo mantemos os mesmos valores da temperatura, porém a quantidade de energia transferida for significativamente menor ($\Delta Q = 12 \cdot 10^{-19} \text{J}$) vamos obter um resultado bem diferente do anteriormente analisado. Nesta nova situação temos que:

$$W_B/W_A = e^{(\Delta Q/K) (T_A - T_B / T_B T_A)}$$

$$W_B/W_A = e^{(12 \cdot 10^{-19} / 1,38 \cdot 10^{-23}) (301 - 300 / 301 \cdot 300)}$$

$$W_B/W_A = e^{9,559 \cdot 10^{-1}}$$

$$W_B/W_A \cong e^1$$

$$W_B/W_A = 2,71$$

Este resultado nos mostra que, aproximadamente a cada três casos de transferência de $12 \cdot 10^{-19} \text{J}$ do corpo mais quente para o mais frio corresponde um caso de transferência dessa mesma quantidade de calor do mais frio para o mais quente. Ou seja, a probabilidade de transferência de calor do corpo frio para o quente é bastante grande (>30 %). Com base nesse resultado é concluído que em processos nos quais a quantidade de energia transferida é muito pequena a segunda lei da termodinâmica não se cumpre. No exemplo que acabamos de apresentar o valor de $12 \cdot 10^{-19} \text{J}$ de energia é aproximadamente igual à adquirida por um elétron numa diferença de potencial de 10 V. Isso revela o caráter estatístico dessa lei. Ela se aplica somente para sistemas formados por um número grande de partículas.

No artigo intitulado “*Sobre o movimento de pequenas partículas em suspensão dentro de líquidos em repouso, tal como exigido pela teoria cinético-molecular do calor*”, Einstein (1905) sugere a possibilidade do não cumprimento da segunda lei da termodinâmica se confirmados os resultados obtidos por ele nesse artigo sobre o movimento browniano. Nesse movimento, considerado uma das evidências experimentais mais consistentes da validade da teoria cinético molecular, há transferência de energia do meio para a partícula browniana sem que entre eles exista uma diferença de temperatura, como exige a segunda lei da termodinâmica.

Para finalizar esta discussão sobre os limites de validade da segunda lei da termodinâmica é pertinente destacar que ela não se aplica em sistemas que tem a capacidade de formar estruturas como é o caso do universo e da vida. Na presente proposta de sequência

didática é abordado esse assunto com base no livro de Schroedinger (1943) “*O que é a vida? O aspecto físico da célula viva*”.

O conteúdo acima exposto sobre a segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia possibilita uma reflexão sobre as potencialidades desses conceitos para alcançar as finalidades do Ensino Médio e sobre os desafios didáticos a serem superados na elaboração do produto educacional (sequência didática).

Uma dessas finalidades diz respeito à concepção da ciência como um produto da criação humana que, pela sua natureza, sempre é influenciada pelo seu contexto histórico e sociocultural. No caso dos conceitos que estamos analisando, eles estão intimamente relacionados com a revolução industrial o que facilita abordar dimensões desejáveis no ensino de ciências como as relações CTSA e a interdisciplinaridade. Eles propiciam também uma discussão sobre os conhecimentos científico e tecnológico, mostrando um dos momentos da história da ciência, no qual o conhecimento tecnológico antecede ao científico, assim como o uso da luneta por Galileu antecedeu à teoria sobre a formação de imagens a partir de Kepler. Tal discussão se pode constituir numa crítica a uma visão distorcida da relação entre esses conhecimentos, uma visão linear, que concebe o conhecimento científico como condição necessária para a existência do tecnológico. Nessa visão o conhecimento tecnológico resulta ser uma mera aplicação do conhecimento científico.

Como conteúdos de ensino a segunda lei da termodinâmica e a entropia permitem alcançar outras finalidades do Ensino Médio relacionadas à inteligibilidade de fenômenos naturais, às possibilidades de utilizar códigos, símbolos, tabelas, gráficos e esquemas presentes no universo vivencial dos alunos, à investigação e compreensão de situações-problema que possibilitam desenvolver a capacidade de observar, estabelecer relações, quantificar variáveis e propor estratégias de solução.

Desta forma, fica clara a pertinência da segunda lei da termodinâmica e da entropia como conteúdos de ensino de Física para a compreensão de um mundo complexo, que passa por constantes transformações, auxiliando os alunos a enfrentar situações reais e inéditas, relacionadas com novas tecnologias que surgem a toda hora, problemas ambientais, interpretação de manuais e de resultados de exames médicos e outros, posicionamento crítico e reflexivo diante notícias de jornal e noticiários e redes sociais. Enfim, contribuindo, por

meio da educação científica, na formação do perfil de um cidadão que possa transformar positivamente o mundo que o cerca.

Contudo, há desafios a serem enfrentados para transpor a entropia e a segunda lei da termodinâmica para uma linguagem acessível aos alunos. O primeiro deles é encontrar meios, com base nos quais não seja necessário utilizar na sua introdução o cálculo diferencial e integral, conteúdo não contemplado no Ensino Médio. O segundo, os discentes necessitam possuir conhecimentos anteriores, necessários para construção desses novos conceitos, tais como: a Teoria Cinético Molecular do gás ideal, indispensável para a interpretação estatística da entropia; o calor; a energia interna e a primeira lei da termodinâmica.

3 PLANEJAMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

No planejamento da sequência didática foi levado em consideração o contexto em que seria aplicada, sua fundamentação teórica e as publicações no Brasil da área de Ensino de Física sobre o tema da nossa proposta de intervenção em sala de aula.

3.1 Contexto da aplicação

A aplicação aconteceu em uma turma de trinta e três alunos do bloco B1 do turno noturno, numa unidade de conhecimento correspondente ao segundo ano do Ensino Médio regular, no Centro de Educação de Jovens e Adultos Professor Alfredo Simonetti, localizado na cidade de Mossoró/RN. Ele conta com a infraestrutura básica de funcionamento, faltando laboratórios de ciências, auditórios e ambientes para as atividades de educação física.

A EJA está amparada em documentos oficiais como a carta magna de 1988, a emenda constitucional nº 59/2009, a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDBEN) e as resoluções nº 11/2000 e nº 3/2010 da Câmara de Educação Básica do Conselho Nacional de Educação (BRASIL, 1996; STRELHOW, 2010; FRIEDRICH, M. et al, 2010). As duas últimas estenderam a ela as diretrizes Curriculares Nacionais dos ensinos Fundamental e Médio, porém nos PCN's e PCN's + não se fala especificamente da EJA e na proposta da BNCC se faz uma apresentação dela em apenas sete linhas, revelando certo desinteresse de nossos governantes, pesquisadores da educação e sociedade em geral por esta modalidade de ensino, o que acaba por marginalizá-la (BRASIL, 1998; BRASIL, 2010).

A EJA tem por finalidade oferecer gratuitamente a quem não teve acesso aos ensinos Fundamental e Médio, na idade própria, a possibilidade de conclusão da Educação Básica em um período de tempo menor, mediante cursos e exames, considerando as características, interesses, condições de vida e de trabalho dos alunos, visando a continuação de estudos e/ou a inserção no mercado de trabalho (SCRIVANO et al, 2013).

Na concepção da sequência didática tínhamos plena consciência de que trabalhar com a EJA é um desafio ainda maior que com os níveis regulares de ensino devido à sua curta

carga horária, ao vasto número de conteúdos e às especificidades de seu público-alvo extremamente heterogêneo, a tal ponto de haver em uma mesma turma alunos com idades de 15 a 50 anos ou mais, alguns dos quais vinham estudando regularmente, enquanto outros pararam há décadas. Comumente são pessoas que estão à margem do mercado de trabalho o que influencia negativamente na sua autoestima. Contam com histórico de reprovação e evasão. São pessoas que buscam uma formação educacional básica por motivos profissionais e pessoais, acreditando na possibilidade de conquistar o reconhecimento e estima da sua família e de seu entorno social. Essa importância social da EJA nos incentivou a enfrentar o desafio.

3.2 Fundamentação teórica

Como anteriormente mencionado, na concepção da sequência didática levamos em consideração os PCN, PCN+ e a proposta da BNCC. Nesses documentos subjaz um bom referencial teórico no qual se fundamenta a necessidade de uma mudança paradigmática no ensino de ciências, e de Física em particular, para poder atender as exigências que a contemporaneidade está impondo à Educação Básica. Não resulta difícil perceber nesse referencial, conteúdos de várias teorias sobre o ensino e a aprendizagem. Nesse sentido, optamos por nos aprofundar especificamente na teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, complementando-a com contribuições oriundas de concepções de Paulo Freire, Joseph Novak e Marco Antônio Moreira.

Ausubel considera o conhecimento prévio que o aluno traz consigo o fator mais determinante para sua aprendizagem. Segundo sua teoria, a nova informação pretendida interage com conceitos preexistentes na estrutura cognitiva do indivíduo. Estas ideias ou conceitos que o aluno já possui, chamados de subsunçor, servem de ancoradouro para atribuir significados às novas informações (AUSUBEL, 2002).

Quando o indivíduo não possui subsunçores, Ausubel propõe a utilização de organizadores prévios. Estes são recursos didáticos que pretendem estabelecer relações entre os conhecimentos prévios e o a ser ensinado, tais como um texto, situação-problema, simulação, filme, entre outros (AUSUBEL; NOVAK; HELEN, 1980).

Na aprendizagem significativa a nova informação se relaciona com o conhecimento prévio de forma substantiva, não arbitrária. Ela contrasta com a aprendizagem mecânica, na qual não há interação substantiva do conteúdo a ser ensinado com as proposições já preexistentes na cabeça do aluno.

Os conhecimentos prévios nem sempre funcionam como elemento facilitador da aprendizagem. Isso acontece quando o aluno tem concepções alternativas às científicas. Nesse caso o conhecimento prévio, no dizer de Gaston Bachelard, se constitui num obstáculo epistemológico a ser considerado no ensino (BACHELARD, 1996).

Para que ocorra aprendizagem significativa são necessárias pelo menos duas condições: i) o material a ser utilizado deve possuir potencial significativo, ou seja, o conhecimento nele pretendido deverá ser relacionável com o existente na estrutura cognitiva do aluno; ii) o aprendiz deverá ter predisposição em aprender significativamente. A princípio não há material significativo, mas potencialmente significativo. Quem posteriormente irá dar ou não significação a este material são seus leitores (MOREIRA, 2012).

Moreira (2005), na sua teoria da aprendizagem significativa crítica vem ratificar as finalidades, delineadas nos PCNs, de formar um cidadão, atuando construtivamente conforme as mudanças culturais e tecnológicas, podendo usufruir dos avanços destas, superando mitos e refletindo sobre ideologias. Para tanto, a aprendizagem teria de ser crítica além de significativa.

Para alcançar a aprendizagem significativa de um determinado domínio de conhecimentos Moreira (2011) propõe a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). Sua elaboração contempla sete passos: (i) definição do tópico a ser abordado, (ii) criação de situações de aprendizagens, (iii) proposição de situação problema inicial, (iv) apresentação do conteúdo, (v) desenvolvimento do conteúdo com aspectos mais gerais e complexos, (vi) conclusão, retomando as características mais relevantes do conteúdo, (vii) avaliação.

A UEPS pode ser entendida como uma proposta para a elaboração de uma sequência didática - conjunto de atividades materializadas por meio da utilização de estratégias didáticas tais como: leitura, questionamentos, reflexão, pesquisa, experimentos reais e virtuais,

simulações, produções textuais, mapas conceituais, trabalho em grupo, entre outras, concebidas de maneira bem concatenada e implementadas com a mediação do professor por meio de intervenção escolar planejada, visando o ensino aprendizagem de determinado conteúdo de forma não tradicional, mais participativa/interativa e dinâmica (BRASIL, 2000; LEAL; RÔÇAS, 2013).

Zabala (1998), corrobora essa concepção ao afirmar que as sequências didáticas são um conjunto de atividades perfeitamente planejadas para atender determinados objetivos educacionais previamente constituídos; contendo estas um princípio, meio e fim já conhecido pelas partes integrantes deste processo.

As considerações teóricas acima apresentadas foram complementadas com as ideias de Paulo Freire, conhecido internacionalmente por seu método de alfabetização de adultos, utilizando os chamados temas geradores (FREIRE, 2003; COSTA, J. M.; PINHEIRO, N. A. M., 2013; MOURA, 2014). E também com uma importante contribuição de Joseph D. Novak, à aprendizagem significativa: os mapas conceituais (SOUZA; BORUCHOVITCH, 2010).

A reflexão sobre como se dá o processo de ensino-aprendizagem por meio da utilização destes referenciais teóricos, fundamentou a escolha das estratégias de ensino utilizadas na sequência didática, tais como: i) a consideração do universo vivencial dos alunos para criar situações de aprendizagem impregnadas de problematizações a serem resolvidas por estes que, neste caso, serão partícipes do processo de investigação, incentivando à motivação, ii) a contextualização, privilegiando a interdisciplinaridade, a história e filosofia da ciência e a reflexão sobre as relações da ciência, tecnologia, sociedade e ambiente, iii) a produção de mapas conceituais.

3.3 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica objetivou contextualizar nosso trabalho no contexto da pesquisa em Ensino de Física no Brasil. Para tanto, realizamos uma revisão sistemática (PEDUZZI; MARTINS; FERRERIA, 2012) nas revistas Caderno Brasileira de Ensino de Física (CBEF), Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF), Revista Brasileira de Pesquisa

em Educação em Ciências (RBPEC) e Investigações em Ensino de Ciências (IEC). Revisamos também as dissertações e materiais didáticos de dois cursos de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MPEF) bem conceituados na avaliação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES: o da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Quanto aos livros didáticos, utilizamos a revisão apresentada por Santos (2009) na sua tese de doutorado.

Considerando o grande número de artigos e dissertações a serem pesquisados, aplicamos um primeiro filtro, buscando selecionar apenas produções na grande área da termodinâmica. Para tanto, foi feita a leitura dos títulos e, quando não era possível filtrar, fazia-se a leitura do resumo e, se ainda não fosse suficiente, era feita a leitura integral do material. No caso das dissertações no filtro foi incluído também a EJA. Assim, revisamos 3.323 artigos, publicados desde 1979 até abril de 2017, sendo 851 (25,61%) na CBEF, 1.684 (50,68%) na RBEF, 396 (11,91%) na RBPEC e 392 (11,80%) na IEC. E 169 dissertações: 68 (40,23%) da UFRJ e 101 (59,77%) da UFRGS.

Após a aplicação deste primeiro filtro resultou que, dos 3.323 artigos apenas 82 (2,46%) tratam de termodinâmica: 23 (28,05%) publicados no CBEF, 54 (65,85%) na RBEF, 2 (2,44%) na RBPEC e 3 (3,66%) nas IEC. Das 169 dissertações apenas 23 (13,61%) tratam de termodinâmica ou EJA: 6 (26,09%) defendidas na UFRJ e 17 (73,91%) na UFRGS.

Com base nesses resultados aplicamos outros 4 (quatro) filtros, considerando:

1. Artigos sobre termodinâmica com elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC), mas que não abordam as temáticas de nossa sequência didática;
2. Artigos sobre termodinâmica que em geral não tratam de Ensino de Física nem abordam as temáticas de nossa sequência didática;
3. Artigos que relatam intervenções em sala, mas que não abordam as temáticas de nosso interesse;
4. Artigos que contemplam a realização de atividades experimentais, mas não abordam as temáticas de nosso interesse.

Após a aplicação desses filtros obtivemos que, dos 82 artigos: 10 (12,20%) correspondem ao primeiro filtro, 38 (46,34%) ao segundo, 14 (17,08%) ao terceiro e 9

(10,97%) ao quarto. Com base nesse resultado selecionamos para uma análise mais detalhada 11 (13,41%): 2 (8,69%) publicados no CBEF e 9 (16,66%) na RBEF.

Nessa análise levamos em consideração a revista e ano da publicação, título e autor do artigo, objetivos, referencial teórico de ensino-aprendizagem, metodologia, aplicação em sala de aula e se foca ou não na aprendizagem da segunda lei da termodinâmica e/ou entropia no Ensino Médio. Como resultados obtivemos que apenas dois artigos relatam aplicações em sala de aula: “*Um estudo a respeito das concepções alternativas sobre calor e temperatura*” (KÖHNLEIN, 2002) e “*Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no Ensino Médio*” (SOUZA; DIAS; SANTOS, 2013). Quanto ao aspecto de focar ou não na aprendizagem da segunda lei da termodinâmica e/ou entropia para no ensino médio, apenas três fizeram isso, sendo um deles o último citado acima e os outros dois: “*Facilitando a Compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica*” (OLIVEIRA; DECHOUM, 2003) e “*Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica*” (NÓBREGA; FREIRE; PINHO, 2013).

No que diz respeito às 23 dissertações previamente selecionadas, utilizando os mesmos filtros aplicados na revisão dos artigos, foi verificado que todas foram implementadas em sala de aula, pré-requisito para a conclusão do mestrado profissional. Porém, destas apenas 4 (17,4%) abordam os temas de nosso interesse, sendo três defendidas na UFRGS e uma na UFRJ. São elas respectivamente: (i) “*Uso de animações visando a aprendizagem significativa de Física Térmica no ensino médio*” (GONÇALVES, 2005), (ii) “*Física térmica: uma Abordagem Histórica e Experimental*” (MICHELENA, 2008), (iii) “*Utilizando demonstrações em vídeo para o Ensino de Física no Ensino Médio*” (CARLI, 2014), e (iv) “*Irreversibilidade e degradação da energia numa abordagem para o ensino médio*” (RODRIGUES, 2014).

É importante registrar que dessas 23 dissertações há somente 5 (21,74%) voltadas para a EJA e que nenhuma aborda os temas de nosso interesse. Essa constatação nos motivou para desenvolver nosso trabalho, que possivelmente seja o primeiro a tratar da segunda lei da termodinâmica e da entropia na EJA.

Para caracterizar a abordagem da Termodinâmica nos livros didáticos de Ensino Médio utilizamos a revisão feita por Santos (2009), cujos resultados apresentamos no Quadro 1, abaixo:

Quadro 1 - Abordagem dada à termodinâmica por livros-textos de Física do Ensino Médio

LIVRO / AUTOR	Abordagem predominante da Termodinâmica			Abordagem do conceito de Entropia	
	Micro/CM	Macro/LG	Hist/Tec	Macro/FN	Micro/DES
Penteado		x			x
Beatriz Alvarenga		x	x		x
Alberto Gaspar		x	x		x
Sampaio e Calçada		x			x
Toscano		x			x
PSSC	x				
GRAF		x	x	x	

Fonte: SANTOS, 2009

LEGENDA

Micro/CM – abordagem microscópica baseada na teoria cinético-molecular da matéria.

Macro/LG – abordagem macroscópica / Lei dos Gases.

Hist/Tec - abordagem fundada em elementos históricos e da tecnologia.

Macro/FN – abordagem macroscópica fenomenológica.

Micro/DES – abordagem microscópica que associa entropia à desordem.

Conforme o acima exposto, a revisão sistemática da literatura mostrou-se um instrumento eficaz que permitiu traçar um perfil tanto dos artigos, publicados nas principais revistas de ensino do país, sobre as temáticas de nosso interesse, quanto das dissertações de dois cursos bem conceituados de mestrado profissional em Ensino de Física. Ela mostra a carência de estudos e pesquisas sobre a segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia no Ensino Médio e da aplicação destes em sala de aula, assim justificando a pertinência da nossa proposta de intervenção didática na EJA.

A intervenção consiste em uma sequência didática constituída de dez aulas em cujo planejamento consideramos o exposto no presente e anteriores capítulos. Para sua execução elaboramos um texto de apoio (Apêndice C), intitulado “*A Segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia*” no qual são contemplados os conteúdos conceituais da proposta e elementos de interdisciplinaridade, de História e Filosofia da Física, relações Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente, entre outros. Ele foi concebido como um guia para desenvolver a sequência, pressupondo a criação de situações de aprendizagem para poder esgotar o conteúdo desta. No Quadro 2 apresentamos a síntese do planejamento realizado.

Quadro 2 – Síntese do planejamento da sequência didática

(continua)

Aula	Descrição geral / conteúdos	Metodologia e ferramentas
Primeira	Apresentação da sequência didática. Pré-teste.	Diálogo e aplicação do pré-teste. Pincel, apagador, aparelho data show e cópias do texto de apoio.
Segunda	Máquinas térmicas. Princípios de funcionamento e elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e das relações de Ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (CTSA).	Aula dialogada mediante o texto de apoio. Desenvolvimento de atividades de investigação interdisciplinar, reflexão e interpretação de esquemas e figuras. Pincel, apagador, aparelho data show e texto de apoio.
Terceira	O ciclo de Carnot.	Aula dialogada mediante o texto de apoio. Interpretação de gráficos para desenvolvimento de atividades investigativas e obtenção de equações. Reprodução de vídeo e simulação. Pincel, apagador, aparelho data show e texto de apoio.
Quarta	A segunda lei da termodinâmica. Entropia.	Aula dialogada mediante o texto de apoio. Desenvolvimento de atividades de investigação mediante interpretação de figuras, esquemas e gráficos.

Quadro 2 – Síntese do planejamento da sequência didática

(conclusão)

Aula	Descrição geral / conteúdos	Metodologia e ferramentas
		Pincel, apagador, aparelho data show e texto de apoio.
Quinta	A entropia em processos irreversíveis.	Aula dialogada mediante o texto de apoio. Leitura e interpretação de figuras, construção de gráficos e análise de situações cotidianas. Pincel, apagador, aparelho data Show, texto de apoio.
Sexta	Interpretação estatística da entropia	Aula dialogada mediante o texto de apoio. Interpretação das formulações termodinâmica e estatística. Análise dos limites de sua validade. Pincel, apagador, aparelho data show, texto de apoio e texto complementar.
Sétima	O plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS. Cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos.	Interpretação e análise de processos em planos termodinâmicos. Pincel, apagador e aparelho data show.
Oitava	A entropia em sistemas abertos.	Leitura, reflexão e interpretação da entropia negativa descrita no livro <i>“What Is Life? & Mind and Matter”</i> (<i>O que é a vida? O aspecto físico da célula viva</i>). Pincel, apagador, aparelho data show e trechos retirados do livro.
Nona	Aula integradora: construção de um mapa conceitual.	Construção de mapa conceitual. Pincel, apagador e folhas A4.
Décima	Aplicação do pós-teste.	Aplicação do pós-teste. Pincel, apagador e cópias do Pós-teste.

Fonte: Autoria própria, 2016.

4 IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Neste capítulo é feito um relato da implementação, em outubro de 2016, do produto educacional (apêndice A).

4.1 Primeira aula - Apresentação da sequência didática. Pré-teste.

Começamos a aula explicando nossa proposta de trabalho, destacando a importância da participação e empenho da turma para alcançar seus objetivos. Muitos alunos afirmaram gostar da ideia de sair das aulas de pincel, lousa e contas. Outros poucos, porém, acharam isso estranho por, seguramente, estarem habituados com as aulas tradicionais. Mas, de forma geral, todos os trinta e três alunos presentes se comprometeram em participar ativamente. Em seguida entregamos a cada discente o texto de apoio.

Em consonância com os referenciais teóricos, usamos um pré-teste (Apêndice B) e a técnica do grupo nominal para levantar o conhecimento prévio dos alunos. Esta última foi bastante utilizada no desenvolvimento das aulas seguintes.

O pré-teste foi aplicado individualmente com duração de vinte minutos. Ele é constituído por sete questões subjetivas que abordam de forma muitas vezes implícita, conceitos chaves para o desenvolvimento da sequência didática como: temperatura, calor, primeira lei da termodinâmica, processos reversíveis e irreversíveis, difusão, teoria cinético molecular, rendimento das máquinas térmicas, segunda lei da termodinâmica e entropia em sistemas isolados e abertos. Inicialmente muitos alunos ficaram apreensivos, indagando como iriam responder questões de uma matéria que eles ainda não viram. Aproveitamos a ocasião para explicar a importância do conhecimento prévio do aprendiz no processo de ensino aprendizagem.

Concluimos a aula com a discussão do pré-teste. Os alunos relataram como haviam respondido cada pergunta e nós realizamos as intervenções necessárias. Na maioria das vezes, após questioná-los, respondiam corretamente. Diziam que se soubessem o que a questão requeria, teriam respondido corretamente. Isso nos leva a inferir que eles têm dificuldades

com a leitura e a interpretação de um texto. Constatamos também a falta de concentração. Algumas questões foram não respondidas por desatenção do aluno.

Posteriormente, ao proceder a correção de cada um dos pré-testes respondidos pela turma, vimos que os trinta e três alunos responderam corretamente a questão de número um, ao responder que no processo de estabelecimento do equilíbrio térmico da xícara com café e o copo com refrigerante e gelo, há uma transferência de calor daquele para este.

A segunda pergunta, apenas onze responderam de forma positiva, relatando que a primeira lei da termodinâmica não contradiz a situação exposta na questão um, pois esta lei não trata da transferência de calor. Os demais não obtiveram êxito. Esta foi a questão que teve mais respostas negativas.

A terceira pergunta, vinte e seis responderam corretamente, afirmando não ser possível, atingido o equilíbrio térmico, naturalmente os corpos voltarem a suas temperaturas iniciais, justificando desconhecerem tal processo. Os demais indicaram a mesma resposta, mas não justificaram. A quarta pergunta, dezoito responderam com êxito argumentando a distinção de processo irreversível do reversível. A quinta pergunta, vinte e quatro alunos acertaram argumentando que o gás da segunda seringa, iria expandir-se por todo seu volume, sob a justificativa do aumento do volume, diminuição da pressão e ser um processo ser irreversível. As respostas acima apresentadas, indicam, implicitamente, que estes alunos possuem certa noção de processos reversíveis, reversíveis e segunda lei da termodinâmica.

A sexta questão, vinte e nove responderam corretamente afirmando que todas as máquinas se aquecem. Esta resposta, junto ao fato deles saberem que quanto maior o aquecimento maior a perda de calor, mostra, mesmo que implicitamente, eles possuem noção do conceito de eficiência da máquina térmica. Eles não conseguiram justificar adequadamente se este fato tinha alguma relação com a segunda lei da termodinâmica.

A última questão, vinte alunos responderam corretamente, afirmando que toda a energia elétrica que as máquinas recebiam não era utilizada integralmente para a realização da tarefa, pois sempre há perdas em qualquer processo. Novamente eles mostraram possuírem conhecimentos prévios sobre o rendimento, segunda lei da termodinâmica, desperdício de energia e entropia.

Com isso, após a correção dos pré-testes e os resultados das discussões em grupo anteriormente mencionada, conseguimos dimensionar detalhadamente os conhecimentos prévios dos alunos antes de iniciarmos o desenvolvimento do conteúdo da sequência didática.

4.2 Segunda aula - Máquinas térmicas. Princípios de funcionamento e elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e das relações de Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA).

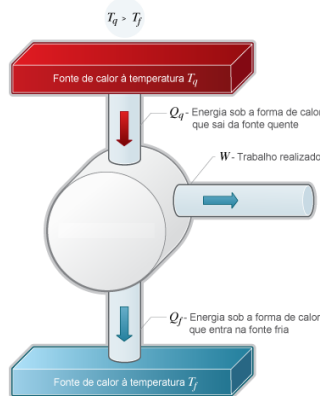
Esta aula foi desenvolvida a partir da leitura, iniciada por nós e continuada pelos alunos, dos quatro primeiros parágrafos do texto de apoio. Ela foi complementada com a discussão concomitante de situações de aprendizagem. Assim, para buscar o envolvimento da turma e verificar suas competências relacionadas ao uso de códigos e linguagens na interpretação de informações textuais, os alunos foram questionados sobre a relação entre o surgimento das máquinas térmicas e a revolução industrial. Isso possibilitou estabelecer uma relação com a disciplina História Geral, destacando o importante papel do surgimento e aperfeiçoamento das máquinas térmicas para alavancar a revolução industrial, revelando elementos das relações CTSA e da história da Física. Na ocasião, os alunos de imediato responderam segundo as ideias postas no primeiro parágrafo do texto de apoio. A discussão tornou-se polêmica com o surgimento de duas correntes, uma a favor do desenvolvimento capitalista e outra defendendo o sustentável. Tivemos que intervir para sistematizar a discussão que foi muito proveitosa.

Em seguida foi apresentada outra situação para discutir sobre a relação entre os conhecimentos científicos e tecnológicos. Indagamos se o conhecimento científico sempre é produzido primeiramente em centros de estudos para só depois ser aplicado ao desenvolvimento de tecnologias? Ou poderá primeiro surgir a tecnologia e só depois o conhecimento científico? As respostas foram praticamente coincidentes: o conhecimento científico é produzido primeiro para só depois ser aplicado no desenvolvimento de tecnologias. Colhido este resultado, criticamos esta relação linear unidirecional que concebe o conhecimento científico premissa e, portanto, primeiro que o tecnológico. Apresentamos dois momentos na história da Física em que a tecnologia surgiu primeiro que o conhecimento

científico: a criação das máquinas térmicas e o uso da luneta por Galileu antes de dispor da teoria sobre a formação de imagens. Apesar da nossa explicação, os alunos contra-argumentaram, dizendo que tais exemplos são exceções e não a regra.

Com base no terceiro parágrafo e na Figura 14 do texto de apoio os alunos não tiveram dificuldades em compreender, o princípio, segundo Carnot, de funcionamento da máquina térmica e o conceito de seu rendimento – $\eta = W/Q_H$, onde $W = Q_H - Q_C$.

Figura 14 – Máquina térmica

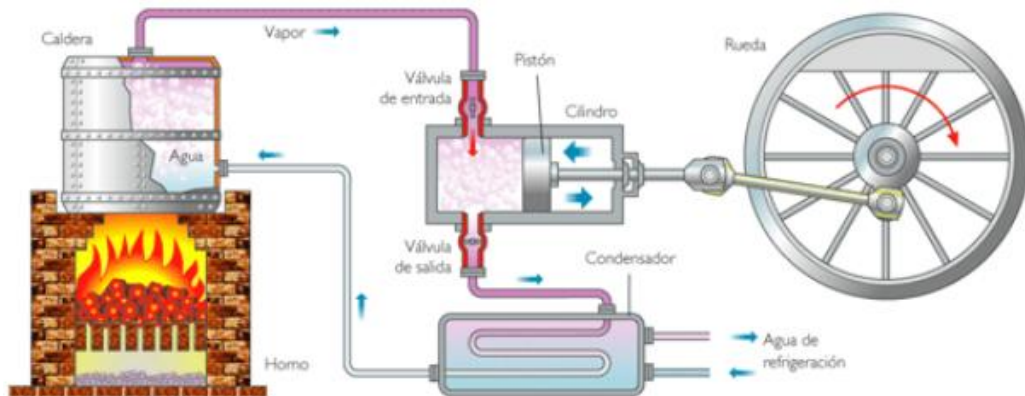


Fonte: GADELHA, 2014.

Aqui ainda explicamos que Carnot, apesar de acreditar na teoria do calórico e de seu princípio de conservação, chegou a entender o princípio de funcionamento das máquinas térmicas, pois para ele o cerne do assunto estava na direção do fluxo de calor entre as fontes a diferentes temperaturas. Comentamos que a teoria do calórico era uma das duas teorias que, naquela época, explicava a natureza do calor a partir de uma concepção materialista, segundo a qual o calor era considerado uma substância fluída, imponderável e elástica, cujas partículas se repeliam mutuamente. A outra concepção, dinâmica, hoje aceita, concebe o calor como movimento.

Para contextualizar o conteúdo desse parágrafo projetamos na lousa a Figura 15 e questionamos sobre o que ela representa.

Figura 15 – Esquema de funcionamento de uma máquina térmica



Fonte: SANTOS, 2016.

Os alunos prontamente explicaram o funcionamento dessa máquina térmica, começando pelo aquecimento da água na caldeira, passando em forma de vapor a alta pressão e temperatura pela tubulação e válvula de entrada até chegar ao cilindro empurrando o pistão que provoca movimento circular sobre a roda que realizará alguma tarefa e, em seguida, o vapor transforma-se em água ao baixar a pressão dentro do cilindro, devido ao aumento do volume interno ao realizar trabalho. Em seguida esta água chega, ao passar pela válvula de saída e tubulação, ao condensador que irá refrigerar a água e depois reinjetá-la na caldeira. Disseram se tratar de algum tipo de máquina térmica como as utilizadas nos trens de antigamente.

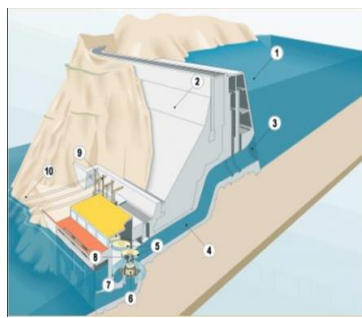
Eles não tiveram dificuldades em explicar corretamente o conteúdo do quarto parágrafo, que trás uma analogia entre o funcionamento da máquina térmica e a máquina hidráulica o que contextualizamos, projetando na lousa a Figura 16, a qual apresenta três diferentes recortes de uma hidroelétrica.

Figura 16 – Esquema de funcionamento de uma hidroelétrica



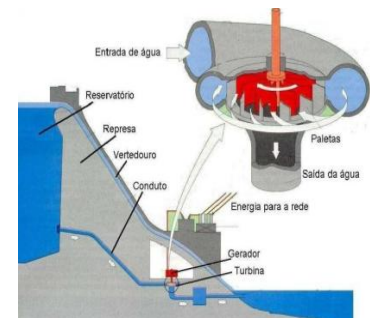
16 A

Fonte: ALVES, 2016.



16 B

Fonte: ENERGIA, 2009.



16 C

Fonte: VIRTUOS, 2011.

Perguntamos do que tratavam as figuras 5A, 5B e 5C. As duas primeiras os alunos de imediato afirmaram se tratar de uma hidroelétrica sob diferentes perspectivas, detalhando suas partes. Quanto à última, demoraram um pouco para responder, chegando apenas a afirmar ser o mecanismo de ativação do funcionamento da hidroelétrica, o que não está de todo errado. Na ocasião, discutimos esta afirmação, explicando o funcionamento deste gerador. Questionados sobre a possível semelhança entre a ativação do funcionamento da figura 5C e as máquinas térmicas, eles lembraram a leitura do texto de apoio. Confirmaram a existência de tal semelhança, dizendo que a primeira utiliza a diferença do desnível da água enquanto a segunda a diferença de temperaturas. Para fechar esta discussão perguntamos qual a principal diferença entre o funcionamento dessas máquinas. Como eles não conseguiram enxergar a diferença, intervimos pedindo que pensassem em termos de conservação do recurso que permite o funcionamento delas. Após refletiram, disseram que parte do calor que ativa a máquina térmica é perdido, mas não conseguiram dizer que, na máquina hidráulica não há perda da água. Coube a nós essa explicação.

4.3 Terceira aula - O ciclo de Carnot

Começamos a aula com uma recapitulação sobre os processos isotérmico e adiabático do gás ideal, sintetizada no Quadro 3 (RAMALHO JÚNIOR; FERRARO; SOARES, 2007).

Quadro 3 – Síntese dos processos isotérmicos e adiabáticos do gás ideal

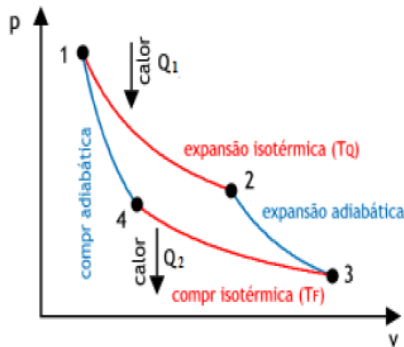
Processos	Expressões
Isotérmico	$P.V = n.R.T$ (Equação de estado do gás ideal) Para a temperatura constante, temos que: $P.V = \text{constante (K)}$
Adiabático	Como não há troca de calor com o meio, isso implica em $Q = 0$, logo: $P.V^\gamma = \text{constante (K)}$ (Lei de Poisson) Onde $\gamma = c_p/c_v$

Fonte: Autoria própria, 2016.

Em seguida orientamos a leitura do quinto e sexto parágrafos do texto de apoio que apresentam o ciclo de Carnot. Na sua análise, realizada com base na Figura 17, os alunos

identificaram as isotermas e adiabáticas, os processos de compressão e expansão, relacionando-os com as variações da pressão e do volume, as quantidades de calor e o trabalho realizado pelo gás. Os questionamos por que as curvas adiabáticas possuem inclinações mais acentuadas que as isotérmicas. Eles apresentaram algumas respostas, mas nenhuma bem sucedida.

Figura 17 – Ciclo de Carnot do plano PV



Fonte: MSPC, 2008.

Diante dessa situação, apresentamos um exemplo quantitativo das expansões isotérmica e adiabática do ar até um mesmo volume, como mostrado na Tabela 1. Com base nesse exemplo os alunos compreenderam que a queda de pressão na expansão adiabática é maior que na isotérmica devido a que o expoente no volume na primeira, γ , é maior que na segunda, 1.

Tabela 1 - Exemplo comparativo – isotérmica vs. adiabática

Isotérmicas	Adiabáticas
$P = K/V$ Sendo $K = 10$ e $V = 2$ l, tem-se: $P = 10/2$ $P = 5$ atm	$P = K/V^\gamma$ Sendo $K = 10$, $V = 2$ l e $\gamma = c_p/c_v = 1,4$ tem-se: $P = 10/2^{1,4} = 10/2,64$ $P = 3,79$ atm

Fonte: Autoria própria, 2016.

Feito isso, retomamos a expressão do rendimento das máquinas térmicas e da de Carnot em particular. Em seguida questionamos sobre um suposto valor comercial desta última. Eles responderam que seria grande, mostrando ter conhecimento de que o rendimento

da máquina de Carnot é o maior possível, comparado com o de qualquer outra máquina, funcionando com os mesmos valores da temperatura que ela. Imediatamente propusemos calcular o maior rendimento possível da máquina de vapor apresentada na aula anterior, supondo uma temperatura ambiente de 300 K e da caldeira de 373 K. Aplicando a equação do rendimento da máquina de Carnot os alunos não tiveram dificuldades para obter o resultado de $\eta = 19,57\%$. Na ocasião discutimos as causas desse baixo valor do rendimento.

Em seguida discutimos o conceito de motor-contínuo de segunda espécie. Para tanto, os questionamos da possibilidade de uma máquina térmica real chegar a um rendimento de cem por cento - converter todo o calor em trabalho - e sendo possível, que implicações isso teria nas equações do rendimento de uma máquina qualquer e a de Carnot?

Os alunos responderam a primeira afirmando sua impossibilidade, justificando sempre haver perda térmicas. A segunda, porém, necessitaram de nossa mediação. Assim, os questionamos para que o rendimento seja igual a um (cem por cento), o que deveria acontecer na equação (1) e (2) do texto de apoio - equações do rendimento?

Após pensarem, alguém falou que bastava tirar a razão Q_2/Q_1 e T_2/T_1 . Explicamos que não poderia simplesmente desaparecer com estes termos, mas foi lançada a ideia de zerá-lo. Daí surgiu à proposição de que para isso acontecer, Q_2 e T_2 teria de ser zero.

Feito isso, investigamos as consequências das ações acima descritas. Para tanto, voltamos para a Figura 1 do texto de apoio e solicitamos que indicassem nesta figura e a desenhasse novamente. Desta forma, responderam que implicaria no desaparecimento da parte inferior (fonte fria) desta. Quanto ao rendimento, afirmaram que seria máximo uma vez que não haveria desperdícios. Assim, eles caracterizam conceitualmente o motor-perpetuo de segunda espécie.

Concluimos a aula exibindo dois vídeos. O primeiro, com duração de quatro minutos e cinco segundos, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=Knpk9Hmn4kQ>, traz uma simulação do funcionamento de um motor de combustão interna (ciclo de Otto). O segundo, com duração de um minuto e dezessete segundos, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sEf8va1S7Sw>, mostra uma micro câmera filmando o funcionamento no interior do mesmo motor real. Apresentamos também a simulação da

combustão em um motor que funciona segundo o ciclo de Otto, disponibilizada na página do Centro de Referência para o Ensino de Física (CREF): <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/simulacoes/termodinamica/motor.html>.

Os alunos ficaram satisfeitos com essas visualizações, por elas ter atendido um assunto de seu interesse. Na ocasião destacamos a dimensão CTSA. Discutimos assuntos tais como fontes de energia, resíduos poluentes, rendimento e degradação da energia. Propiciamos a atribuição de significado nesse contexto tecnológico do motor aos conceitos de pressão, volume, temperatura, ignição, expansão e compressão. Explicamos que a numeração 1.0, 1.4, 1.8 ou 2.0, exibida em alguns carros, está relacionada com o volume máximo, em litros, de aspiração da mistura de ar e combustível, pelo cilindro do motor (DARDE, 2004).

4.4 Quarta aula - A segunda lei da termodinâmica. Entropia

Iniciamos a aula com a leitura do sétimo, oitavo e nono parágrafos, que tratam, respectivamente, da formulação da segunda lei da termodinâmica por Clausius e por Kelvin-Planck, do conceito de entropia de Clausius nos processos reversíveis em sistemas isolados e das relações entre entropia, temperatura, trabalho e rendimento.

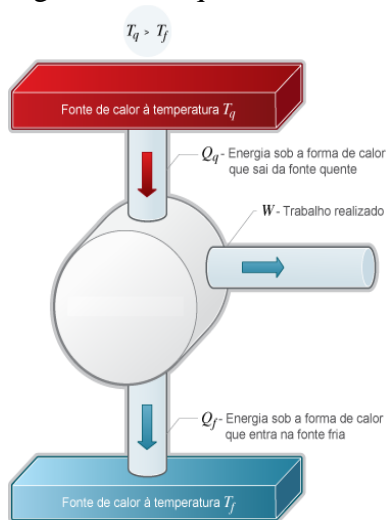
Na leitura do sétimo parágrafo falamos do funcionamento das máquinas térmicas. Solicitamos exemplos do sentido preferencial do fluxo de calor. Alguns alunos lembraram da primeira questão do pré-teste, sobre a troca de calor entre uma xícara com café quente e um copo com refrigerante e gelo, próximo dela. Outros se referiram ao esfriamento espontâneo de uma máquina. Julgamos mais interessante, a citação que fizeram da máquina térmica representada na Figura 1 do texto de apoio que utilizamos para fazer uma síntese dos processos apresentados neste parágrafo.

Perguntamos o que haviam entendido da formulação de Kelvin-Planck. Para nossa surpresa, responderam muito bem ao questionamento. Este resultado, talvez, advenha da informação clara e objetiva transmitida pelo texto de apoio e de ter discutido o conceito de motor-contínuo de segunda espécie na aula passada.

Para destacar a importância e necessidade da segunda lei da termodinâmica e consequentemente do conceito de entropia, questionamos se a primeira lei da termodinâmica poderia mostrar em que direção ocorrem espontaneamente os fenômenos na natureza e, em particular, o do intercâmbio de energia entre dois corpos a temperaturas diferentes? Os alunos não tiveram dificuldades para responder esse questionamento.

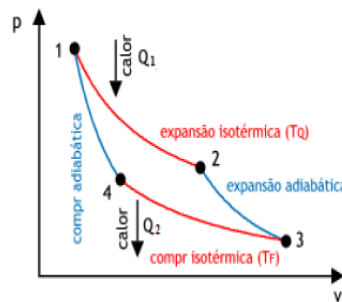
Em seguida, propusemos discutir com base nas quatro figuras abaixo, retiradas do texto de apoio, as condições em que acontece o fluxo de calor no estabelecimento do equilíbrio térmico e nas máquinas térmicas e o conceito de moto perpétuo de segunda espécie. A discussão mostrou que os alunos não têm dificuldades no entendimento dos assuntos colocados em pauta.

Figura 1 – Máquina térmica



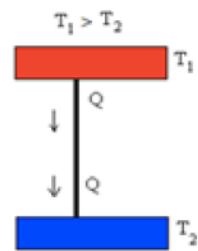
Fonte: GADELHA, 2014.

Figura 2 – Ciclo de Carnot do plano PV



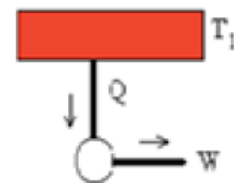
Fonte: MSPC, 2008.

Figura 3 – Fluxo de calor



Fonte: Autoria própria, 2016.

Figura 4 – Moto perpétuo



Fonte: Autoria própria, 2016.

Concluída essa discussão começamos a introduzir o conceito de entropia. Para tanto igualamos as expressão do rendimento da máquina de Carnot ao de outra qualquer. E, utilizando a Figura 2, obtivemos que:

$$1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_2/T_1 \quad (22)$$

$$Q_2/T_2 - (Q_1/T_1) = 0 \quad (23)$$

$$S_2 - S_1 = 0 \quad (24)$$

$$\Delta S_{\text{ciclo}} = 0$$

Com base na equação (24) explicamos que a entropia, S , é uma função de estado. Dizemos que Clausius generalizou esse resultado particular, obtido para o ciclo de Carnot, para qualquer ciclo termodinâmico, demonstrando que a entropia é uma função, cuja variação não depende do processo através do qual o sistema passa de um estado termodinâmico para outro. Destacamos que a variação da entropia num ciclo qualquer é igual a zero e que a quantidade de calor não é uma função de estado.

Para propiciar a compreensão de que a entropia expressa a perda da capacidade de realizar trabalho, o que pode ser entendido como uma degradação da energia, escrevemos as equações do rendimento da máquina de Carnot e da entropia. Em seguida, questionamos sobre o que teria de acontecer para que o valor da entropia fosse mínimo. A turma respondeu que bastava aumentar a temperatura. Diante desta resposta, perguntamos qual a implicação no rendimento da máquina do aumento da temperatura do reservatório quente? Eles responderam prontamente que o rendimento também aumentaria. Seguimos adiante indagando-os, sobre a relação entre S , η e T ? Após alguns minutos, revendo o que havíamos registrado na lousa, alguns alunos disseram que, quanto maior T_1 , maior seria η e menor seria S . Os demais alunos concordaram. Então, questionamos se, dito isso, existe alguma relação entre S e η ? Um grupo maior de alunos respondeu que sim, quanto maior S menor será η , e vice-versa.

A partir das respostas dos alunos a nossos questionamentos, concluimos a aula realizando uma síntese das relações entre as grandezas temperatura, trabalho, rendimento e entropia, destacando o significado físico desta última.

4.5 Quinta aula - A entropia em processos irreversíveis

Esta aula foi implementada a partir da leitura do décimo parágrafo do texto de apoio, que discorre sobre o aumento da entropia em processos irreversíveis, tomando como exemplo

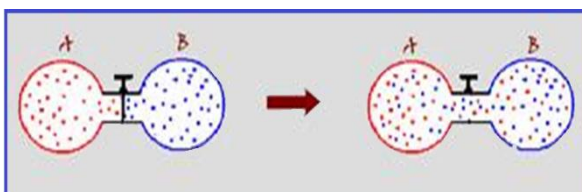
o estabelecimento do equilíbrio térmico entre dois corpos a temperaturas diferentes. Com este, a turma discutiu e relembrou conceitos como morte térmica do sistema termodinâmico, segunda lei, máquinas térmicas, relação entre trabalho, rendimento e entropia.

Após a leitura fizemos uma recapitulação da segunda lei da termodinâmica, e do conceito de entropia. Destacamos que a primeira pode ser formulada como a afirmação de que num sistema isolado quando acontece um processo irreversível a segunda aumenta. Em seguida, calculamos junto a turma a variação da entropia no processo de estabelecimento do equilíbrio térmico conforme o texto de apoio: $\Delta S_{AB} = \Delta Q (T_A - T_B) / T_B \cdot T_A$. Os alunos não sentiram muitas dificuldades para acompanhar o desenvolvimento matemático necessário para obter e interpretar essa expressão mediante nossa mediação.

Continuamos a aula explicando que existe um procedimento mais geral para calcular a variação da entropia em processos irreversíveis, nos quais $\Delta S > \Delta Q/T$. Dizemos que não o utilizamos no exemplo anterior para evitar o uso de uma ferramenta matemática não contemplada no Ensino Médio. Ele se baseia na propriedade da entropia de ser uma função de estado. E consiste em calcular a variação da entropia num processo reversível, adequadamente escolhido, através do qual o sistema termodinâmico transita entre os mesmos estados termodinâmicos que no processo irreversível. Destacamos que no caso do processo reversível $\Delta S = \Delta Q/T$.

Em seguida, apresentamos um exemplo: o cálculo da variação da entropia na difusão de gases, fenômeno irreversível presente no universo vivencial dos alunos. Dizemos que no lugar de gases reais analisaríamos dois gases ideais que, após abrir a válvula, se difundem isotermicamente como mostrado na Figura 18, utilizada como recurso de visualização e interpretação do fenômeno.

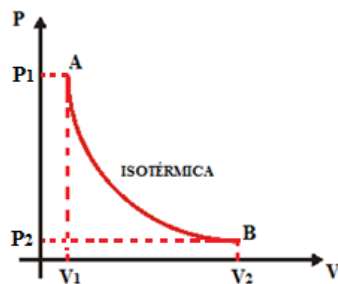
Figura 18 – Difusão gasosa



Fonte: BOCAFOLI, 2005.

Explicamos que, como na difusão dos gases a temperatura permanece constante, segundo o procedimento anteriormente descrito, para calcular a variação da entropia quando esse fenômeno acontece, podemos escolher o processo reversível de expansão isotérmica do gás ideal. Propiciamos uma discussão, como resultado da qual, os alunos conseguiram representar esse processo num plano de volume X pressão (Figura 19), não tendo dificuldades em indicar os valores da pressão e do volume antes e depois da expansão.

Figura 19 – Expansão isotérmica do gás ideal

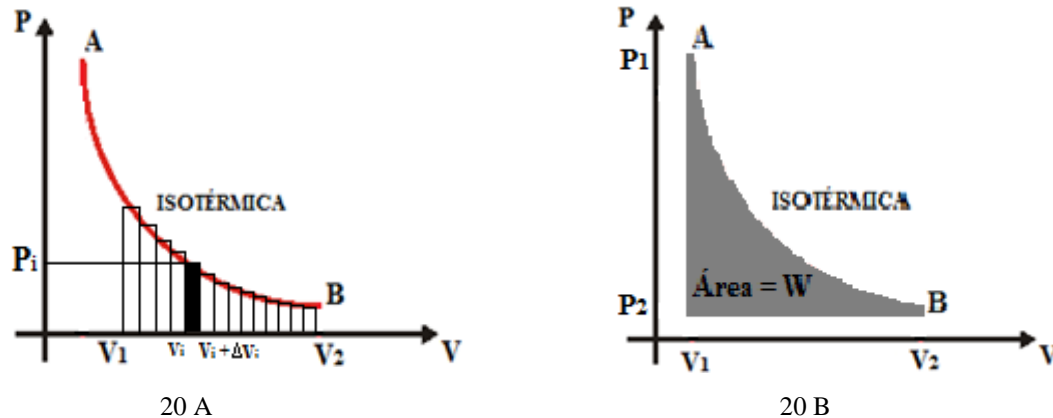


Fonte: Autoria própria, 2016.

Continuando a aula, afirmamos que a quantidade de calor necessária para que essa expansão isotérmica aconteça se pode calcular com base na primeira lei da termodinâmica: $\Delta U = Q - W$. Lembramos que a energia interna do gás ideal só depende da temperatura e, conseqüentemente, num processo isotérmico sua variação é igual a zero: $\Delta U = 0$. Assim, a quantidade de calor, Q , é igual ao trabalho, W , realizado pelo gás ideal: $Q = W$. Portanto, o cálculo de Q se reduz ao cálculo da área sob a isoterma entre os volumes antes e depois da expansão. Na ocasião, repetimos que tal cálculo implicaria no uso de uma ferramenta matemática não contemplada no Ensino Médio, o cálculo integral, cujo fundamento, no caso que nos ocupa, aproveitaríamos para ilustrar.

Para tanto, explicamos, apoiados na Figura 20, que para uma variação muito pequena do volume, ΔV , a pressão, P , aproximadamente, permanece constante. Assim, se dividimos a variação do volume, antes e depois da expansão, nessas pequenas variações, o cálculo da área sob a isoterma, será aproximadamente igual à soma das áreas, $W_i = P_i \Delta V_i$, dos retângulos de lados P_i e ΔV_i . Desta maneira obtivemos a expressão: $W = \sum P_i \Delta V_i$. Destacamos que quanto menor ΔV_i melhor seria a aproximação. Os alunos não tiveram dificuldades para acompanhar essa exposição.

Figura 20 – Cálculo do trabalho na expansão isotérmica do gás ideal.



Fonte: Autoria própria, 2016.

Finalizamos a explicação dizendo que, como na expansão isotérmica reversível o gás ideal realiza trabalho ($W > 0$), a entropia aumenta ($S = Q/T = W/T > 0$). E, esse aumento será igual ao que tem lugar no processo irreversível da difusão, pois em ambos os processos o sistema termodinâmico transita pelos mesmos estados inicial e final.

Concluimos a aula destacando que apenas havíamos ilustrado como calcular a variação da entropia nesse exemplo de processo irreversível, demonstrando que ela aumenta. Enfatizamos que a determinação do valor dessa variação da entropia implicaria no cálculo da área sob a isoterma entre o volume inicial e final, o que exigia o uso do cálculo integral.

4.6 Sexta aula - Interpretação estatística da entropia

Conduzimos esta aula a partir da leitura dos dois últimos parágrafos do texto de apoio. Neles a interpretação estatística da entropia é apresentada extremamente resumida, sem revelar consistentemente os significados dos conceitos nos quais se fundamenta. Isso responde, como indicamos anteriormente, a nossa concepção desse texto como um guia para desenvolver a sequência didática, que precisa ser complementado com a criação de novas situações de aprendizagem. Assim, iniciamos a aula discutindo o paradoxo de Loschmidt: como explicar a irreversibilidade de processos em sistemas macroscópicos se o comportamento individual das partículas componentes desses sistemas é reversível (PESSOA JÚNIOR, 2008). Argumentamos a necessidade de uma abordagem estatística, baseada na

teoria das probabilidades, para estudar o comportamento de sistemas formados por um número muito grande, da ordem do número de Avogadro, de partículas. Explicamos que as leis que descrevem o comportamento desses sistemas são qualitativamente diferentes das que descrevem o comportamento individual das partículas que os compõem. Ao contrário do que pensávamos, os alunos afirmaram terem compreendido, sem muitas dificuldades, nossa explicação.

Continuamos a aula questionando sobre a diferença entre os conceitos de entropia propostos por Boltzmann e Clausius. Os alunos afirmaram que a concepção de Clausius é determinista, não fala de probabilidade. A de Boltzmann apresenta esta dimensão.

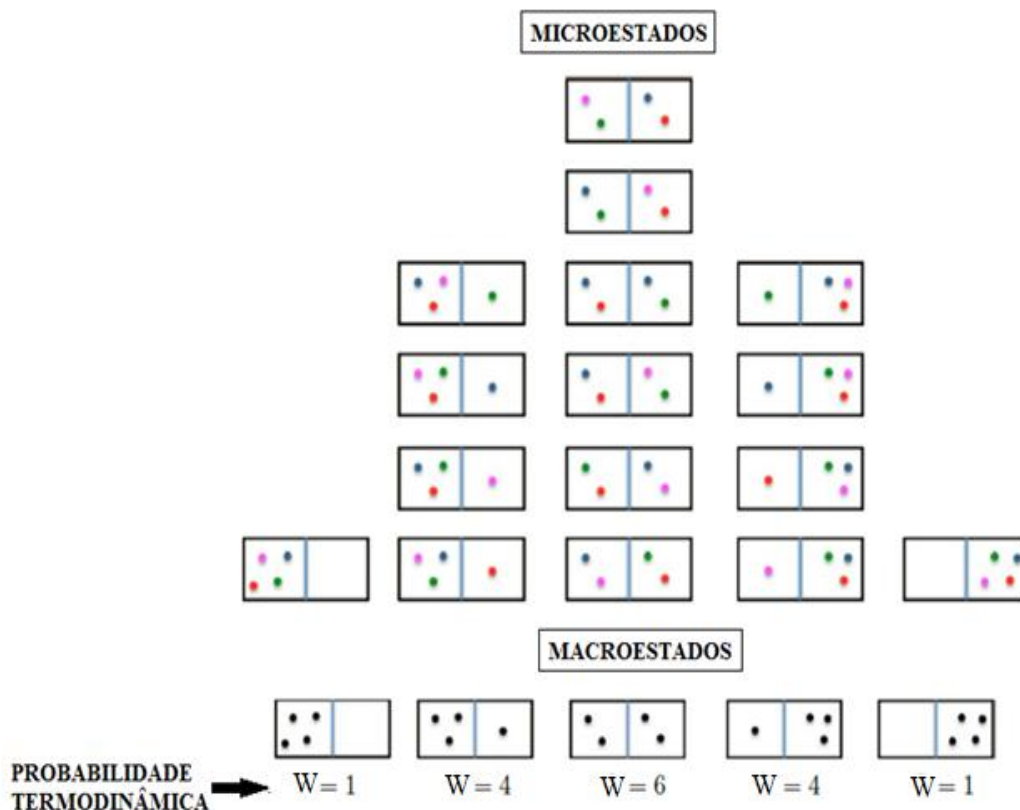
Questionados sobre a presença de palavras, novas para eles, nos dois parágrafos que haviam acabado de ler, as mais indicadas foram: estados microscópicos e macroscópicos, peso estatístico e probabilidade termodinâmica.

Em seguida começamos a explicar esses conceitos, acompanhando a apresentação que fizemos deles no capítulo 2. Assim, analisamos um sistema formado por quatro partículas, que, na ocasião, diferenciamos pela cor e não por números, como no capítulo 2. Projetamos na lousa a Figura 21 que mostra as dezesseis maneiras possíveis de distribuir quatro partículas entre as duas metades do recipiente que as contem (MOURA; AGUIAR, 2016). Chamamos de microestado a cada uma dessas configurações. Dizemos que os macroestados são caracterizados pela quantidade de partículas em cada uma das metades do recipiente. Definimos o conceito de probabilidade termodinâmica (W) como sendo o número de microestados através dos quais se pode realizar um determinado macroestado. Com base na figura ilustramos esse conceito. Em diálogo com os alunos discutimos a relação entre as probabilidades matemática e termodinâmica. Assim, por exemplo, concluímos que a probabilidade matemática do macroestado no qual há três partículas na metade direita é igual a $4/16$ e a de no qual há a mesma quantidade (duas) em ambas as metades $6/16$. Dessa maneira mostramos que quanto maior a probabilidade termodinâmica maior a probabilidade matemática do macroestado. Destacamos que o macroestado que se realiza tendo todas as partículas numa das metades do recipiente é muito grande ($2/16$). Dizemos que isso acontece porque o número de partículas do sistema que escolhemos para ilustrar os conceitos é apenas 4 e, portanto, o número de microestados possíveis é muito pequeno ($2^4 = 16$). No caso de sistemas macroscópicos reais o número de partículas é da ordem de 10^{23} e o de microestados

possíveis de $2^{10(\text{exp.23})}$. Consequentemente a probabilidade de tal estado é praticamente igual à zero: $2/2^{10(\text{exp.23})}$.

Os alunos relataram que a Figura 21 foi fundamental para o entendimento destes conceitos, uma vez que a mesma permitiu visualizar de forma concreta o que a eles, imediatamente depois da leitura do texto de apoio, pareceu um tanto abstrato.

Figura 21 - Formas possíveis de distribuir quatro partículas entre as duas metades do recipiente.



Fonte: Adaptado de MOURA; AGUIAR, 2016.

Após essa apresentação do conceito de probabilidade termodinâmica discutimos a expressão de Boltzmann da entropia presente no texto de apoio. Dissemos que, como o macroestado mais provável é aquele que tem a maior probabilidade termodinâmica, esta poderia ser considerada a grandeza física que indicaria a direção em que acontecem os fenômenos na natureza e, conseqüentemente, dar uma interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica diretamente em termos dela. Justificamos que para conservar o caráter aditivo da entropia, presente na interpretação termodinâmica desse conceito para sistemas

compostos por dois subsistemas, cuja probabilidade termodinâmica seria o produto das probabilidades dos subsistemas ($W = W_1 W_2$), a entropia (S) se define como: $S = k \ln W$

Onde $K = 1, 38 \cdot 10^{-23}$ J/k é a constante de Boltzmann. Em seguida calculamos a entropia do sistema composto por dois subsistemas, $S_{\text{sist.}}$, conforme segue:

$$S_{\text{sist.}} = k \ln W_1 W_2 = K (\ln W_1 + \ln W_2) = K \ln W_1 + K \ln W_2$$

$$S_{\text{sist}} = S_1 + S_2 \quad (25)$$

Na apresentação acima a maior dificuldade da turma foi em lembrar que o logaritmo do produto é igual à soma dos logaritmos. Ela foi sanada ao realizarmos uma brevíssima revisão das propriedades dos logaritmos.

Resumimos a discussão, enfatizando que, quando acontece um processo irreversível a entropia aumenta, passando o sistema de um estado de menor para outro de maior probabilidade. No estado de equilíbrio termodinâmico o qual se realiza com o maior número possível de microestados a entropia alcança seu valor máximo.

Concluída essa apresentação da interpretação estatística da entropia, criticamos uma abordagem desta apontada em muitos livros didáticos, que a define como sinônimo de desordem. Ressaltamos que nesta definição não é previamente definido o que se entende por desordem, o que a torna inconsistente. Utilizamos um exemplo para mostrar as limitações dessa concepção ou, melhor dizendo, metáfora: se pegarmos dois copos com água, um deixado sobre a mesa e o outro levado ao congelador e, após triturar a água congelada, a lançamos ao chão, se comparamos a entropia do gelo triturado com a da água no copo, com base na definição desta como uma medida da desordem, deveríamos inferir que a entropia dos pedaços de gelo é maior que a da água. No entanto é o contrário. Assim, não faz sentido falar em entropia relacionada a tal “desordem” de poucos objetos macroscópicos que não interagem entre si e cujo estudo, portanto, dispensa a estatística.

Pedimos aos alunos verificar se essa metáfora aparecia no livro adotado pela escola. Constataram, espantados, que o livro se quer mencionava a entropia. No entanto, nele são contemplados outros assuntos diretamente relacionados com a nossa proposta de sequência didática tais como: as relações CTSA, a história da revolução industrial e o surgimento das

máquinas térmicas, a turbina a vapor, o calórico, a primeira e segunda lei da termodinâmica e refrigeração e o motor a explosão interna.

Em seguida começamos a discutir os limites de validade da segunda lei da termodinâmica. Fizemos referência ao artigo de Einstein (1905), intitulado “*Sobre o movimento de pequenas partículas em suspensão dentro de líquidos em repouso, tal como exigido pela teoria cinético-molecular do calor*”, no qual sugere a possibilidade do não cumprimento da segunda lei da termodinâmica no movimento browniano.

Ao expor estas ideias, os alunos ficaram empolgados por mencionarmos Einstein. Perguntaram sobre algumas de suas ideias, querendo saber um pouco mais de sua vida. Comentaram sua celebre foto com a língua para fora. Ficaram surpresos com a possibilidade de não cumprimento de uma lei que consideravam perfeita e universal. Disseram que só Einstein mesmo para descobrir algo assim, corroborando a fama do cientista.

Continuamos a exposição igualando as variações da entropia no processo de transferência de calor entre dois corpos a temperaturas diferentes, calculadas segundo Clausius e Boltzmann, conforme apresentado no capítulo 2 (TELESNIN, 1973). Junto com os alunos obtivemos a expressão $W_B/W_A = e^{(\Delta Q/K) (T_A - T_B / T_B T_A)}$, já demonstrado no capítulo dois desta dissertação. Depois calculamos a relação W_B/W_A para dois valores de ΔQ : 10^{-7} J e $12 \cdot 10^{-19}$ J, considerando em ambos os casos $T_A = 300\text{K}$ e $T_B = 301\text{K}$. Para $\Delta Q = 10^{-7}$, o resultado foi $W_B/W_A \cong e^{10(\text{exp. } 12)} \cong 1000^{10(\text{exp. } 10)}$ e para $\Delta Q = 12 \cdot 10^{-19}$ J foi $W_B/W_A \cong 2,71$. Durante essa apresentação enfatizamos que as probabilidades termodinâmicas, W_A e W_B , indicam a quantidade de microestados, através dos quais se realizam os macroestados dos corpos com as temperaturas de 301 K e 300 K, respectivamente.

Explicamos que o primeiro resultado indica que há $1000^{10(\text{exp. } 10)}$ casos de transferência de 10^{-7} J do corpo com temperatura de 301 K para o corpo com temperatura de 300 K corresponde apenas um caso de transferência da mesma quantidade de calor do corpo com 300 K para o corpo com temperatura de 301 K. Portanto, a probabilidade do calor ser transferido do corpo com menor temperatura para o de maior temperatura é praticamente igual à zero. Porém, não impossível.

A fim de verificar se os alunos haviam compreendido o significado do resultado anterior, os questionamos como poderiam interpretar o segundo resultado. Responderam que a

julgar pela forma como interpretamos o primeiro resultado, o segundo indica que aproximadamente a cada três casos de transferência de $12 \cdot 10^{-19}$ J do corpo mais quente para o mais frio corresponde um caso de transferência dessa mesma quantidade de calor do mais frio para o mais quente, o que representa uma probabilidade significativamente grande desse processo acontecer se comparado ao exemplo anterior. Com isso, percebemos que de fato compreenderam a análise destes resultados.

Desta forma chegamos à conclusão de que a segunda lei da termodinâmica é eminentemente estatística. Para sistemas envolvendo pequenas quantidades de calor e, portanto, formados por um número pequeno de partículas ela não se aplica. No exemplo que acabamos de apresentar o valor de $12 \cdot 10^{-19}$ J de energia é aproximadamente igual à adquirida por um elétron numa diferença de potencial de 10 V.

Discorremos ainda, brevemente, sobre a terceira lei da termodinâmica que estabelece que quando o sistema se aproxima da temperatura do zero absoluto, sua entropia tem um valor mínimo, $S = 0$ K/J. Esta lei harmoniza com a ideia de que o estado termodinâmico que corresponde ao zero absoluto se realiza de uma única forma ou, em outras palavras, sua probabilidade termodinâmica é igual a um (HENRIQUE, 2017).

Durante o acima exposto os alunos novamente tiveram dificuldades com as propriedades dos logaritmos que conseguimos contornar. Afirmaram não conseguir, sem nossa ajuda, atribuir os significados antes aludidos à razão W_B/W_A .

Fechamos esta aula propondo a realização em casa da atividade individual que segue abaixo (Apêndice D):

Considerando os conceitos já vistos como de Teoria cinético molecular (TCM), Segunda lei da termodinâmica, entropia, processos reversíveis e irreversíveis; preencha as lacunas que seguem no texto adaptado de “*Cecília, o perfume e a segunda lei da termodinâmica*” (SOUZA; DIAS; SANTOS, 2013), abaixo, e faça a crítica solicitada no último parágrafo.

Kara e os processos reversível e irreversível

Imagine uma garotinha chamada Kara brincando em cima da cama com o estojo de maquiagem e perfumes de sua mãe e, sem querer, realiza o trabalho de entornar o perfume de

melhor fragrância que rapidamente difunde, por todo o quarto, seu aroma. Este é considerado um processo _____ (reversível ou irreversível), pois a probabilidade de todas as moléculas gasosas difundidas em suspensão no ar do quarto voltarem a ser líquidas e serem postas novamente no frasco é _____ (zero ou praticamente zero) por cento, uma vez que o sistema _____ (dispõe ou não dispõe) de energia para realizar tal trabalho, assim pode-se dizer que a entropia deste sistema _____ (aumentou ou diminuiu).

Agora, se a Kara realiza o trabalho entornar o estojo de maquiagem espalhando pelo chão e cama os lápis, batom, blush, rímel, delineador e corretivo, ela _____ (dispõe ou não dispõe) de energia para realizar o trabalho de por todos os objetos novamente em seus lugares, caracterizando um processo _____ (irreversível ou reversível), escapando assim de uma possível punição por sua traquinagem, o que seria _____ (possível ou impossível) no primeiro caso. Logo a entropia, neste caso, teria _____ (aumentado, diminuído ou inalterado).

Considerando a TCM e o conceito de entropia, critique o que poderia estar errado no segundo parágrafo, uma vez comparado ao primeiro. Dica: lembre-se de considerar a entropia em um sentido não macroscópico.

4.7 Sétima aula - O plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS. Cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos.

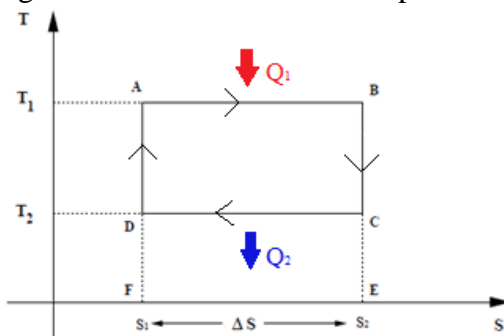
Começamos a aula com a revisão da atividade proposta no final da aula passada. Os alunos ficaram com dúvidas apenas em duas ocasiões: i) na segunda lacuna que indagava se, a probabilidade das moléculas gasosas difundidas no ar do quarto voltarem a ser líquidas e regressar ao frasco, é zero ou praticamente zero e ii) criticar o que poderia estar errado no segundo parágrafo comparado ao primeiro, considerando a TCM e o conceito de entropia.

A primeira delas, sanamos ao relembrarmos as conclusões a que chegamos nas últimas situações trabalhadas na aula passada. Os alunos viram que não seria zero e sim praticamente zero. Quanto à segunda, independentemente de ter realizado a crítica, pediram para respondermos. Perguntamos se eles haviam escrito algo argumentando que no segundo

parágrafo se consideram poucos corpos macroscópicos sem interação, não permitindo a análise se seu comportamento segundo a TCM e a entropia de Boltzmann, ao contrário da situação exposta no primeiro parágrafo. Responderam que haviam argumentado neste sentido. Depois, realizamos uma rápida conferência verbal de todas as respostas e, realizando os ajustes quando necessário, em seguida demos andamento à aula.

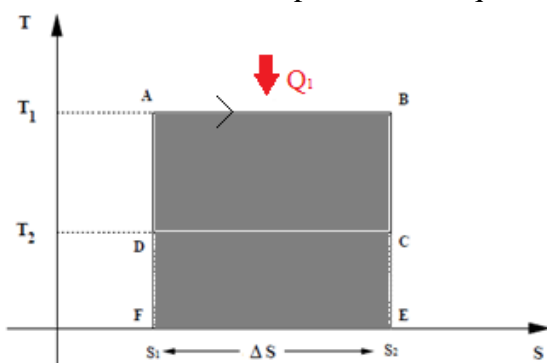
Com base na Figura 22 explicamos o ciclo de Carnot no plano termodinâmico de temperatura vs. entropia (TS). Mostramos, apoiados nas Figuras 23 e 24, como calcular, dispensando o uso do cálculo integral, as quantidades de calor envolvidas no ciclo: Q_1 será igual à área da figura regular limitada pelo contorno ABEFA e Q_2 a da figura limitada pelo contorno DCEFD (OLIVEIRA; DECHOUM, 2003).

Figura 22 – Ciclo de Carnot no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

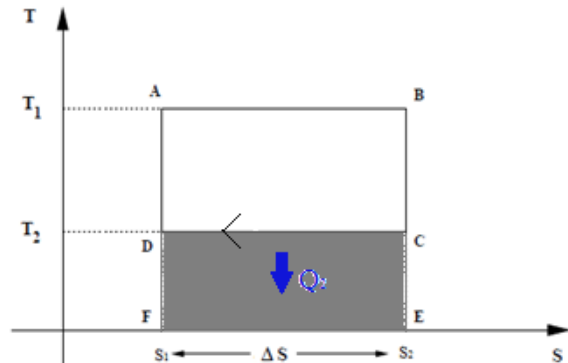
Figura 23 – Cálculo da quantidade de calor fornecida pela da fonte quente



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

$$Q_1 = (S_2 - S_1) \cdot T_1$$

Figura 24 – Cálculo da quantidade de calor transferida à fonte fria



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

$$Q_2 = (S_2 - S_1) \cdot T_2$$

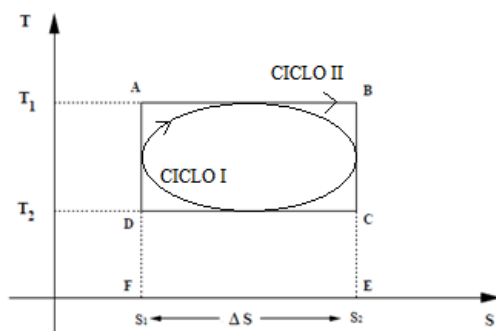
Até este ponto do desenvolvimento da aula, os alunos não encontraram dificuldades. Disseram que desta forma o cálculo da quantidade de calor era mais fácil, quando comparado com o que ilustramos anteriormente na aula 5.

Utilizamos o cálculo de Q_1 e Q_2 para demonstrar que o rendimento do ciclo de Carnot só depende da temperatura dos reservatórios de calor. Junto com os alunos realizamos o desenvolvimento que segue abaixo:

$$\begin{aligned}\eta &= W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 \\ \eta &= [T_1 (S_2 - S_1) - T_2 (S_2 - S_1)] / T_1 (S_2 - S_1) \\ \eta &= (T_1 - T_2) (S_2 - S_1) / T_1 (S_2 - S_1) \\ \eta &= 1 - T_2 / T_1\end{aligned}\quad (26)$$

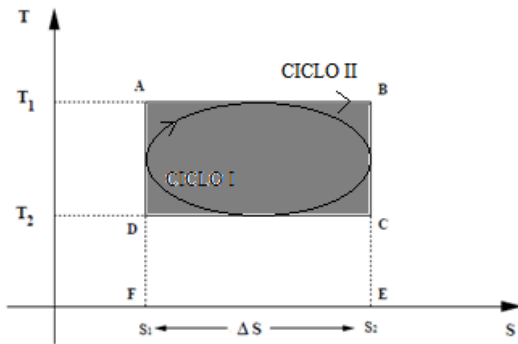
Continuamos a aula mostrando como a representação do ciclo de Carnot no plano TS facilita também a demonstração de que seu rendimento é o maior possível (OLIVEIRA; DECHOUM, 2003). Para tanto, utilizamos as Figura 25, 26, 27, 28 e 29 com base nas quais, comparando as áreas limitadas pelos ciclos, numericamente iguais aos trabalhos, e as correspondentes às quantidades de calor fornecidas pelas fontes quentes, chegamos a essa afirmação.

Figura 25 – Ciclos de Carnot, II, e outro qualquer, I.



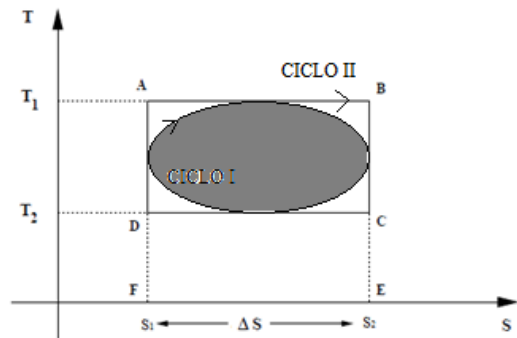
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Figura 26 – Área limitada pelo ciclo de Carnot



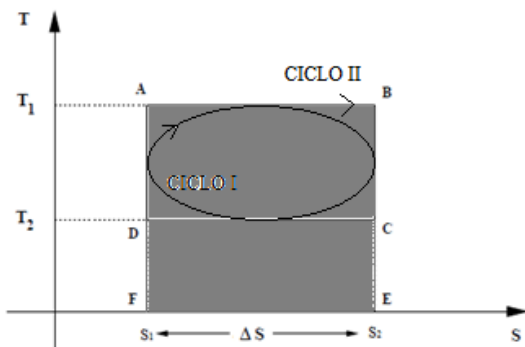
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Figura 27 – Área limitada por um ciclo diferente do de Carnot



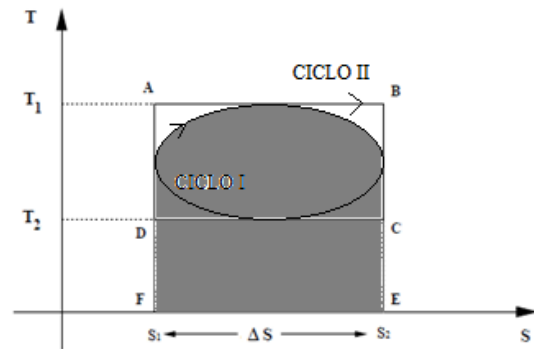
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Figura 28 – Quantidade de calor da fonte quente no ciclo de Carnot



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Figura 29 – Quantidade de calor da fonte quente em um ciclo qualquer



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Na ocasião, para analisar e comparar as áreas utilizamos as expressões da Figura 30 que seguem abaixo:

Figura 30 – Rendimento dos ciclos de Carnot e outro qualquer

$$\eta_{\text{CICLO II}} = \frac{\text{Área do Ciclo II}}{\text{Área sob } T_1} \quad \eta_{\text{CICLO I}} = \frac{\text{Área do Ciclo I}}{\text{Área sob } T_1}$$

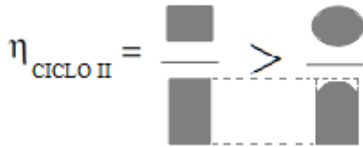
O numerador (trabalho) é dado pela área destacada na Figura 26 e denominador (quantidade de calor da fonte quente) pela área destacada na Figura 28.

O numerador (trabalho) é dado pela área destacada na Figura 27 e denominador (quantidade de calor da fonte quente) pela área destacada na Figura 29.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Logo mais, fizemos com a turma a comparação entre os rendimentos da Figura 30, que resultou na construção da Figura 31.

Figura 31 – Comparativa do rendimento do ciclo I e ciclo II segundo suas áreas

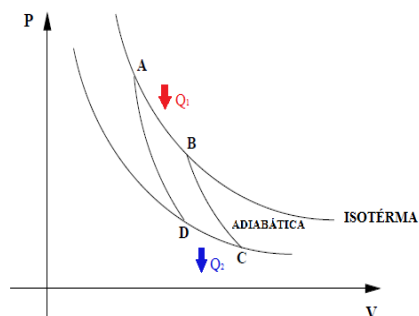
$$\eta_{\text{CICLO II}} = \frac{\text{área do ciclo I}}{\text{área do ciclo II}} > \frac{\text{área do ciclo II}}{\text{área do ciclo I}}$$


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Durante o desenvolvimento acima os alunos demonstraram interesse e empolgação. Relataram gostar de trabalhar com gráficos, o que somente acontecia nas aulas de Física e Matemática. Como esperado, não tiveram grandes dificuldades até definirmos o rendimento dos ciclos I e II. O inesperado surgiu aqui. Eles sabiam que o rendimento do ciclo de Carnot, deveria ser maior que o de qualquer outro, mas não conseguiram enxergar este resultado imediatamente ao comparar suas eficiências conforme apresentado na Figura 31. Perguntavam como poderiam saber qual é o maior rendimento se nas expressões desta figura não tem números, só desenhos. Explicamos, voltando às Figuras 26 e 27 e quantificando alguns valores nestes gráficos para, em seguida, comparar as áreas das figuras contidas nas expressões. Feito isso, afirmaram ter compreendido.

Para concluir a discussão, destacamos que para obter os resultados anteriores, representando o ciclo de Carnot no plano de pressão vs. volume (PV), Figura 32, teríamos, como mencionado em aulas anteriores, que determinar áreas de figuras irregulares, o que só seria possível utilizando o cálculo integral.

Figura 32 – Ciclo de Carnot no plano PV

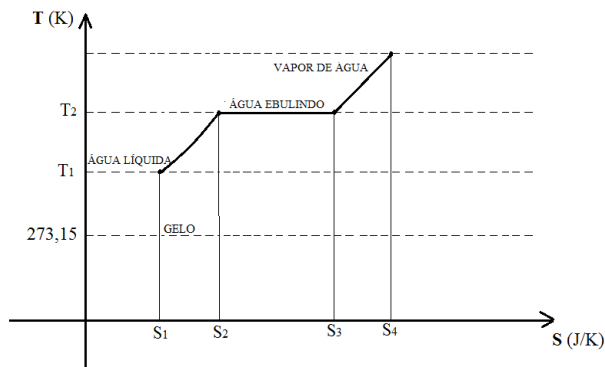


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Vale ressaltar que a simbologia utilizada para demonstrar que o rendimento do ciclo de Carnot é o maior possível mostrou-se um bom recurso didático que cativou a atenção e o interesse dos alunos.

Concluimos a aula mostrando o uso da entropia em processos tecnológicos. Apresentamos o diagrama do processo de aquecimento da água e de seu vapor em uma caldeira industrial (Figura 33). Explicamos que as áreas das figuras regulares abaixo das curvas indicam a quantidade de calor necessária para obter vapor de água a determinada temperatura (TELESNIN, 1973).

Figura 33 – Carta entrópica da água



Fonte: TELESNIN, 1973.

Dissemos que gráficos como o apresentado acima para a água são chamados de cartas entrópicas das substâncias, destacando sua importância nos cálculos de instalações termoenergéticas. Indicamos as mudanças de fase e questionamos sobre a quantidade de calor necessária para que ocorram. Discorremos que, sabendo a quantidade de calor a ser fornecida à substância, pode-se planejar todo o processo tecnológico e estudar sua viabilidade econômica e ambiental.

Durante essa apresentação os alunos não enfrentaram dificuldades. Afirmaram que parecia mais uma revisão. Disseram que a novidade desta aula é analisar os ciclos termodinâmicos no plano TS, destacando suas vantagens, quando comparado com o PV.

4.8 Oitava aula - A entropia em sistemas vivos

Implementamos esta aula baseados no livro *What Is Life? & Mind and Matter (O que é a vida? O aspecto físico da célula viva)* de Schrödinger (1944). Em resposta à preocupação dos alunos de ser necessário ler um livro inteiro para estudar o assunto, explicamos que nos limitaríamos à leitura de trechos do sexto capítulo - Ordem, desordem e entropia. Os alunos gostaram da nossa proposta.

Inicialmente, para problematizar a afirmação de que a entropia sempre tende a aumentar, projetamos na lousa o texto abaixo:

Os seres vivos no processo de seu desenvolvimento criam estruturas cada vez mais organizadas. Assim, por exemplo, acontece quando duas pequenas células ao se fundirem iniciam o processo que, após as quarenta semanas seguintes, termina com o nascimento de uma criança. E, se acompanharmos sua evolução veremos a formação de sofisticadas estruturas que na velhice passarão a se degradar levando-o à morte. Então, como pensar a situação posta acima em termos da entropia?

Os alunos não enxergaram contradição entre a afirmação de que a entropia sempre tende a aumentar e a constatação no acima exposto de que pode diminuir. Cogitaram que o caso apresentado poderia se tratar de exceção da regra. Dissemos que seus argumentos não estavam, no todo, equivocados, mas havia detalhes que posteriormente analisaríamos. Explicamos que tratar da entropia em sistemas vivos implica num trabalho interdisciplinar, uma vez que serão necessários alguns conhecimentos básicos das ciências biológicas. Dissemos que anteriormente havíamos analisado em sistemas isolados e em equilíbrio térmico. Condições que não se cumprem nos seres vivos, caracterizados por interagir com seu meio em estado de desequilíbrio térmico.

Antes de iniciar a leitura do texto, apresentamos Schrödinger, afinal os alunos estariam lendo uma “fonte primária” de um cientista que desempenhou um importante papel na história da Física Moderna e ganhou o prêmio Nobel em 1933. Os alunos disseram nunca ter ouvido falar nele, mas em Física Moderna sim. Gostaram de saber um pouco mais de história da Física.

Em seguida distribuimos um texto com trechos do conteúdo do livro que seguem abaixo. O projetamos na lousa e procedemos a sua leitura dialogada, analisando parágrafo a parágrafo.

“Quando um sistema não-vivo é isolado ou colocado em um ambiente uniforme, usualmente todo o movimento cessa depressa... Depois disso, todo o sistema minguia para um bloco inerte e morto de matéria. É atingido um estado permanente, no qual não ocorre nenhum evento observável. O físico dá a esse estado o nome de equilíbrio termodinâmico ou estado de "entropia máxima"... Na teoria, muito frequentemente não se trata de equilíbrio absoluto nem verdadeiramente de entropia máxima...”

“E por evitar o rápido decaimento no estado inerte de “equilíbrio” que um organismo parece tão enigmático... Como um organismo vivo evita o decaimento? A resposta óbvia é: comendo, bebendo, respirando e (no caso das plantas) assimilando. O termo técnico é metabolismo. A palavra grega quer dizer troca ou câmbio...”

Após a leitura destes dois parágrafos, discutimos seu conteúdo. Perguntamos aos alunos se nos trechos lidos havia alguma informação nova para eles, se havia dúvida em alguma parte. A turma respondeu que não. Achamos prudente fazer um único questionamento. Perguntamos como poderiam explicar a passagem, no final do primeiro parágrafo, no qual o autor diz que o estado de equilíbrio térmico é sinônimo de entropia máxima. Alguns alunos lembraram a aula na qual abordamos as relações entre η , T , W e S e responderam que chegando ao equilíbrio térmico não haveria mais como realizar trabalho, logo seu rendimento seria zero e a entropia máxima. Em seguida continuamos a leitura dos trechos seguintes.

“O que é então esse algo tão precioso contido em nosso alimento, e que nos livra da morte?... tudo o que acontece na Natureza significa um aumento da entropia da parte do mundo onde acontece. Assim, um organismo vivo aumenta continuamente sua entropia - ou, como se poderia dizer, produz entropia positiva - e, assim, tende a se aproximar do perigoso estado de entropia máxima, que é a morte. Só posso me manter distante disso, isto é, vivo, através de um processo contínuo de extrair entropia negativa do ambiente, o que é algo muito positivo, como já veremos. Um organismo se alimenta, na verdade, de entropia negativa... o

essencial no metabolismo é que o organismo tenha sucesso em se livrar de toda a entropia que ele não pode deixar de produzir por estar vivo.”

Concluída a leitura, pedimos que os alunos lessem mais uma vez, mas agora silenciosamente e destacando as informações que julgam ser mais importantes. Solicitamos que verbalizassem uma síntese do que haviam entendido. Afirmaram que a entropia em nosso corpo está constantemente aumentando nos levando à morte. Para não morreremos, temos que nos alimentar, o que significa consumir entropia negativa.

Destacamos que os alimentos evoluíram de uma unidade menor, a semente, para estruturas mais complexas, bem definidas e organizadas, ou seja, de baixa entropia. Por isso para nos livrar da morte, causada pelo aumento da entropia que constantemente estamos produzindo, é necessário nos alimentar da entropia negativa que os alimentos possuem. Pedimos para pensar nisso como uma espécie de balanço energético.

Explicamos que para produzir os alimentos que irão diminuir nossa entropia positiva, se pensamos em termos de balanço energético, alguém tem que aumentar sua entropia já que estamos produzindo entropia negativa. Este alguém seria o ambiente onde estão sendo cultivados os alimentos. Eles estão constantemente extraíndo entropia negativa do ambiente para si, ao retirar daquele todas as propriedades necessárias para seu desenvolvimento. Por sua vez, nós fazemos a mesma coisa com os alimentos, extraíndo sua entropia negativa para nosso desenvolvimento. Porém, há um momento que não mais conseguimos diminuir nossa entropia e chegamos ao estado que encerra o ciclo de vida (a morte), a partir do qual a matéria que constitui nosso corpo servirá de fonte de entropia negativa para o ambiente.

Dito isso, um aluno perguntou se todos os alimentos possuem entropia negativa? Respondemos que assim como nós, à medida que os alimentos vão envelhecendo (amadurecendo) sua entropia aumenta. Continuamos a aula, lendo o seguinte parágrafo:

“... Muito mais importante para nós aqui é a relação com o conceito estatístico de ordem e desordem, relação essa que foi revelada pelas investigações de Boltzmann e Gibbs em física estatística. Essa é também uma relação quantitativa exata, expressa por

$$entropia = k \log D,$$

onde k é a constante de Boltzmann ($= 3.2983.10^{-24}$ cal./°C) e D uma medida quantitativa da desordem atômica do corpo em questão...A desordem que ela indica é em parte aquela devida ao movimento térmico, em parte aquela que consiste em diferentes tipos de átomos ou moléculas serem misturados ao acaso em lugar de estarem bem separados...

Finalizado a leitura deste parágrafo, decidimos não abrir perguntas para a turma, tendo em vista que o conhecimento abordado já havia sido tratado em nossas aulas através do texto de apoio das situações de aprendizagem que o complementaram. Preocupamo-nos em esclarecer a crítica que em outra aula fizemos sobre a utilização da desordem para definir a entropia. Lembramos que este livro é de divulgação científica, escrito para leitores leigos. Então seu autor buscou recursos didáticos para transmitir sua ideia. Chamamos a atenção que muito embora tenha usado tal termo ele é cauteloso ao extremo, deixando bem claro que a desordem a que se refere é a nível atômico/celular e ainda a relaciona ao movimento térmico. Logo depois, demos comunidade a leitura:

“Como poderíamos expressar em termos da teoria estatística a maravilhosa faculdade do organismo vivo, pela qual ele atrasa o decaimento no equilíbrio termodinâmico (morte)? Dissemo-lo antes: "Ele se alimenta de entropia negativa", como se atraísse um fluxo de entropia negativa para si mesmo, afim de compensar o aumento de entropia que produz por viver e, assim, manter-se em um nível de entropia estacionário e bem baixo.

Se D é uma medida de desordem, sua recíproca, $1/D$, pode ser considerada uma medida direta de ordem. Já que o logaritmo de $1/D$ é apenas o negativo do logaritmo de D , podemos escrever a equação de Boltzmann como:

$$- (\text{entropia}) = k \log (1/D)$$

Neste ponto, mostramos, e os alunos entenderam, como chegar a essa expressão utilizando as propriedades do logaritmo da seguinte forma:

$$\begin{aligned} k \cdot \log(1/D) &= k (\log 1 - \log D) = k (0 - \log D) \\ - k \log D &= - \text{entropia} \end{aligned} \tag{27}$$

Em seguida foi lido o último parágrafo:

“Daqui, a esquisita expressão “entropia negativa” pode ser substituída por uma melhor: entropia, tomada com o sinal negativo, é ela mesma uma medida de ordem. Assim, a forma pela qual um organismo se mantém estacionário em um nível razoavelmente alto de ordem (= nível razoavelmente baixo de entropia) realmente consiste em absorver ordem de seu meio ambiente... Na verdade, no caso de animais superiores, conhecemos bem o tipo de ordem da qual se sustentam, ou seja, o estado extremamente bem ordenado da matéria em compostos orgânicos mais ou menos complexos que lhes servem de alimento. Depois de utilizá-lo, devolvem-no em uma forma muito degradada - não inteiramente degradada, todavia, pois plantas ainda podem usá-lo. (Estas, é claro, têm na luz solar seu fornecimento mais potente de “entropia negativa”)”.

Após constatar que os alunos haviam compreendido o conteúdo desse parágrafo, apresentamos exemplos de processos nos quais a entropia diminui: o acima aludido sobre o cultivo de plantas e a formação de estrelas a partir da poeira cósmica.

Após apresentar esses exemplos, lembramos que na aula de número seis havíamos chegado à conclusão de que a entropia sempre tende a aumentar. Ressaltamos que tal afirmação é válida para sistemas isolados. Dizemos que muito embora tenhamos chegado a esta conclusão, vimos que isso não proíbe a diminuição da entropia de um dos subsistemas que integram o sistema total. Os alunos disseram que haviam entendido, acrescentamos que, em geral o assunto que acabávamos de discutir não é abordado nos livros didáticos. Assim, demos por encerrado esta aula.

4.9 Nona aula - Aula integradora: construção de um mapa conceitual

Nesta aula realizamos uma revisão, de forma não convencional, dos conteúdos ministrados na sequência didática. Os alunos elaboraram um mapa conceitual, recurso didático que, ao exigir a sistematização de informações o torna uma possível ferramenta de avaliação da aprendizagem (SOUZA; BORUCHOVITCH, 2010). Nós já havíamos utilizado esse recurso com a turma antes da presente proposta de intervenção. Iniciamos a atividade questionando a cerca dos conteúdos anteriormente estudados, sintetizando e registrando suas

respostas na lousa no formato de mapa conceitual. A princípio eles ficaram indecisos. Argumentaram que havíamos visto muitas coisas. Pedimos para lembrarem dos primeiros conteúdos desenvolvidos no texto de apoio. Responderam que foi a segunda lei da termodinâmica e a entropia. Um aluno disse que bastava olhar o título do texto. Perguntamos: quais cientistas estudaram estes conceitos? Como eles os definiram qualitativamente e quantitativamente? Que estudos antecederam estes conceitos? O que diziam tais conceitos? Por que estas temáticas estavam em estudo? Que implicações tinham para a sociedade da época? Pouco tempo depois de apresentadas estas perguntas, o aluno antes mencionado verbalizou que as respostas seguiam a ordem dos parágrafos do texto de apoio. Em seguida os demais alunos conseguiram organizar suas ideias e encontrar palavras e ideias chaves que foram dando corpo na lousa ao mapa conceitual, que foi concluído individualmente por eles sem grandes dificuldades utilizando esta sistemática. Para que verificassem a construção dos seus mapas apresentamos um (apêndice E), que havíamos elaborado para auxiliá-los em caso de necessidade. Alguns expressaram preocupação. Seus mapas estavam um pouco diferente do que acabamos de apresentar. Dissemos que este era apenas um dos muitos exemplos possíveis. Destacamos que o importante era que os conceitos estiveram logicamente relacionados, atendendo a um objetivo de inteligibilidade dos fenômenos que exigiram sua construção.

Após recolher os mapas, informamos que no prazo de uma semana aplicaríamos um pós-teste. Dissemos que eles responderiam individualmente no tempo de uma aula. Gostaram de saber que teriam esse tempo para se preparar para a avaliação. Queixaram-se de não dispor da possibilidade de consultar suas anotações. Alegaram ser muito conteúdo para estudar. Para acalmá-los, lembramos que esta não seria a única avaliação. Outras três também seriam consideradas: o texto "*Kara e os processos reversíveis e irreversíveis*", a construção do mapa conceitual e a continua participação nas situações de aprendizagens discutidas nas aulas.

4.10 Décima aula - Aplicação do pós-teste

Aplicamos o pós-teste (Apêndice F) passado uma semana da nona aula. Ele é constituído de dez questões subjetivas, algumas das quais presentes no pré-teste, contemplado

todos os conteúdos abordados na sequência didática. Apenas quatro alunos dos trinta e três não conseguiram responder todas as perguntas no tempo estabelecido. Disseram que o teste não estava difícil. Expressaram ter dificuldade para escrever, mesmo sabendo, as respostas.

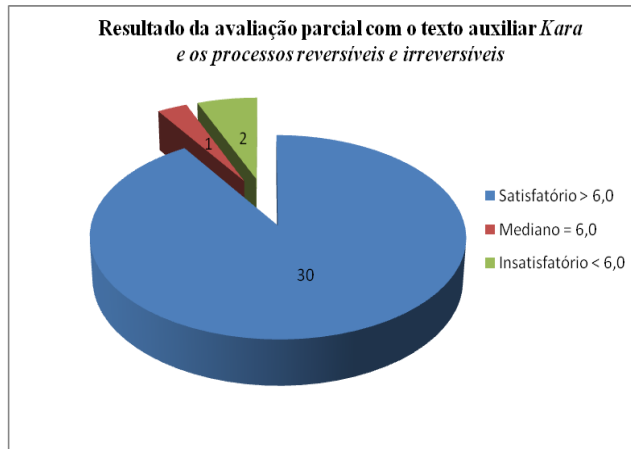
5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados das avaliações realizadas durante a implementação da sequência didática consideramos que seu objetivo de constituir-se numa proposta de superação do ensino tradicional foi alcançado.

Ela suscitou a motivação da turma pelo ensino de Física. O problema da assiduidade, que antes era considerável, foi minimizado significativamente a ponto dos alunos dizer que só vieram aquele dia à escola por causa da nossa aula. Eles participaram ativamente nas discussões das situações de aprendizagem propostas o que contribuiu para o desenvolvimento de suas estratégias argumentativas na sustentação de sugestões de solução que, em algumas ocasiões, eram bem diferentes, propiciando o exercício da crítica, um dos objetivos da educação científica. Portanto, podemos dizer que as transposições didáticas dos conteúdos conceituais da sequência, como, por exemplo, a interpretação estatística da entropia e o cálculo da sua variação em processos reversíveis e irreversíveis, foram adequadamente concebidas. Elas contemplaram também os conteúdos procedimentais e atitudinais na sua estreita relação com os conceituais, propiciando alcançar competências relacionadas com o uso das linguagens da Física e da Matemática e com a atribuição de significados histórica e filosoficamente contextualizados à segunda lei da termodinâmica e à entropia. Num mundo no qual estão presentes diferentes formas de saber e de pautas para alcançar o desenvolvimento desejado para nosso país, a discussão sobre a natureza do conhecimento científico e sobre as relações CTSA resultou muito pertinente.

As considerações acima expressam os resultados da nossa observação e reflexão sobre cada uma das aulas da sequência didática. Avaliações mais específicas, como a realizada com base no texto auxiliar "*Kara e os processos reversíveis e irreversíveis*" mostraram um bom entendimento dos alunos. Esta, em particular, indicou que esses conceitos no âmbito da teoria cinético molecular, contextualizada numa possível situação cotidiana, que propiciou também uma crítica à metáfora da entropia como desordem, foram compreendidos pela imensa maioria da turma conforme resultado exposto no Gráfico 1 abaixo.

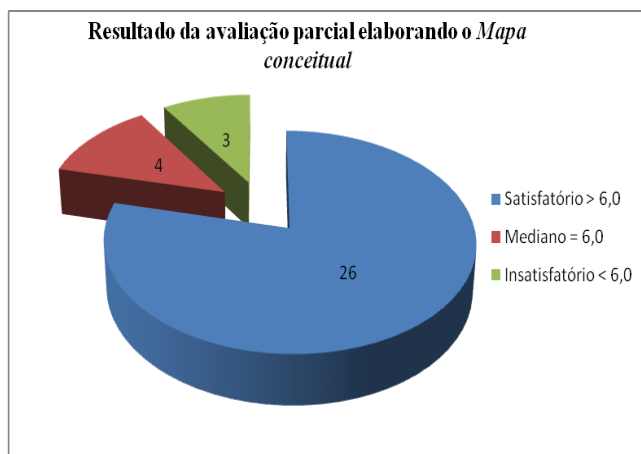
Gráfico 1 - Resultado da avaliação parcial com o texto auxiliar *Kara e os processos reversíveis e irreversíveis*



Fonte: Autoria própria, 2017.

O mapa conceitual, elaborado individualmente pelos alunos, corroborou sua eficácia como ferramenta de avaliação. Mostrou que estes desenvolveram competências relacionadas com a sistematização e hierarquização de informações num domínio específico de conhecimentos. E, quando comparado com outros anteriores, indica progressão no aprimoramento dessas competências. O Gráfico 2 abaixo expõe este resultado.

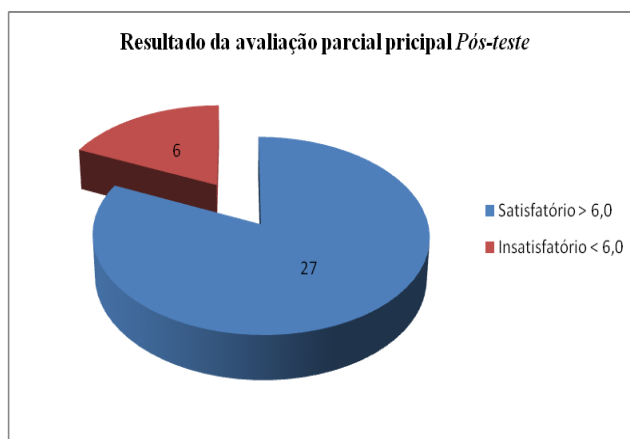
Gráfico 2 - Resultado da avaliação parcial elaborando o Mapa conceitual



Fonte: Autoria própria, 2017.

E, na aplicação do pós-teste, 27 dos 33 alunos que o responderam alcançaram resultados aceitáveis. Apenas em duas questões eles enfrentaram mais dificuldades: argumentação da pertinência da primeira lei da termodinâmica para explicar o estabelecimento do equilíbrio térmico e da relação entre a entropia e a probabilidade termodinâmica. Essas dificuldades estão mais relacionadas com as fragilidades dos alunos na produção textual do que com o entendimento conceitual. Oralmente eles responderam essas questões corretamente. O Gráfico 3 abaixo traduz detalhadamente esta conclusão.

Gráfico 3 - Resultado principal do Questionário de avaliação da implementação da sequência didática



Fonte: Autoria própria, 2017.

Para finalizar apresentamos os resultados da aplicação de um questionário, composto por dez questões, visando conhecer as opiniões dos alunos sobre a implementação da sequência didática (Apêndice G). Na primeira questão, a maioria respondeu que não gostavam de estudar Física por se tratar de uma disciplina chata e cheia de contas. Na segunda, a maioria afirmou estudar Física porque a escola obrigava. Outros, por ser necessário para o Exame Nacional do Ensino Médio (Enem). Na terceira, todos afirmaram que a forma como foi apresentado o conteúdo da sequência didática facilitou sua compreensão. Na quarta, afirmaram que as situações de aprendizagem apresentadas, a partir de contextos reais ou próximos a eles, contribuíram significativamente para o melhor entendimento da matéria, passando a perceber que a Física esta mais presente em seu cotidiano. Na quinta, quase todos avaliaram que foi melhor a forma como a segunda lei da termodinâmica e a entropia foram

ensinadas se comparada a outros conteúdos ministrados anteriores. Alguns assinalaram que foi bom, mas muito trabalhoso.

Na sexta, todos afirmaram que a forma como foi apresentado o conteúdo, os motivou e incentivou sua ativa participação nas aulas. Na sétima, responderam ter gostado da forma como foram avaliados. Na oitava, expressaram que gostariam que conteúdos anteriores à nossa proposta tivessem sido ensinados e avaliados da mesma forma. Na nona, que perguntava se tendo passado por esta experiência mudaram sua opinião quanto ao gosto por estudar Física, 25 alunos responderam positivamente e 8 disseram aprovar a metodologia, mas que não gostavam mesmo da matéria em si. A última era um questão aberta na qual os alunos podiam expressar-se livremente sobre a aplicação do produto educacional. Seguem, abaixo, alguns depoimentos dos alunos:

“As aulas foram mais agitadas, gostei muito. Saímos daquela chatice só conta, conta, conta e vimos a Física aplicada.”

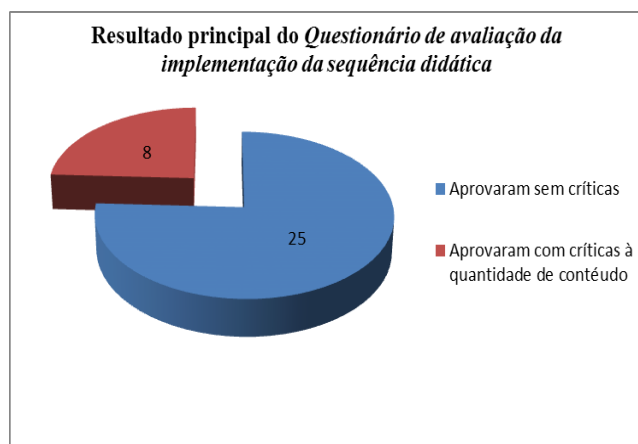
“Nunca tinha aprendido assim, para falar a verdade acho que nunca tinha aprendido Física. Mas agora consigo ver ela na minha vida.”

“Gostei desse modo de aulas, só acho que poderia diminuir o ritmo dos assuntos passados. Na minha opinião, foi muita coisa em pouco tempo.”

“Foi muito divertido, gostei muito aprender assim...”

Desta forma, o Gráfico 4 abaixo trás o principal resultado deste questionário.

Gráfico 4 - Resultado da avaliação parcial principal Pós-teste



Fonte: Autoria própria, 2017.

Diante dessas respostas e depoimentos dos alunos verificamos que a turma aprovou a implementação da sequência didática. Parece pertinente refletir sobre o questionamento relacionado com a quantidade de conteúdo desta, o que não parece comprometer sua viabilidade.

REFERÊNCIAS

ALVES, Jaqueline. Quais impactos ambientais que uma Usina Hidrelétrica gera? Existe Maneira mais Sustentável? Disponível em: < <http://www.naturezabelavida.com.br/o-que-e-uma-usina-hidreletrica-quais-impactos-ambientais-que-uma-usina-hidreletrica-gera-existe-maneira-mais-sustentavel-de-gerar-energia-eletrica/>>. Acesso em 05 mai. 2016.

AUSUBEL, David. Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva. Lisboa: Paralelo Editora, 2002. 222 p.

AUSUBEL, David, NOVAK, Joseph; HANESIAN, Helen. Psicologia educacional. Rio de Janeiro: Interamericana. Tradução para o português do original Educational psychology: a cognitive view. 1980. 625 p.

BACHELARD, Gaston. A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Tradução Esteia dos Santos Abreu. - Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. 316p

BOCAFOLI, Francisco. Tipos de transformações gasosas. Disponível em: < <http://fisicaevestibular.com.br/novo/fisica-termica/termodinamica/tipos-de-transformacoes-gasosas/>> Acesso em 14 mai. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Câmara da Educação Básica. Resolução CNE/CEB nº 2, de 04 de abr de 1998. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Fundamental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 04 de abr de 1998. Seção I – p. 31. Disponível em: < http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/rce_b02_98.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2016.

_____. Conselho Nacional de Educação. Câmara da Educação Básica. Resolução CNE/CEB nº 3, de 05 de ago de 1998. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 05 de ago de 1998. Seção I – p. 21. Disponível em:< http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/rceb03_98.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2016.

_____. Conselho Nacional de Educação. Câmara da Educação Básica. Resolução CNE/CEB nº 3, de 16 de junho de 2010. Institui Diretrizes Operacionais para a Educação de Jovens e Adultos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jun. 2010. Seção 1, p. 66. Disponível em:<<http://mobile.cnte.org.br:8080/legislacao-externo/rest/lei/70/pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2016.

_____. Lei no 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 1996. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394.htm>. Acesso em: 03 nov. 2016.

_____. Ministério da Educação. Base nacional comum curricular. Brasília, DF: MEC, 2015. Disponível em: < <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/> >. Acesso em: 10 dez. 2016.

_____. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros curriculares nacionais. Brasília: MEC/SEF, 1996. 126p.

CARLI, Eloir. Utilizando demonstrações em vídeo para o Ensino de Física no Ensino Médio. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

COVOLAN, S. C. T.; SILVA, D. A entropia no ensino médio: Utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução do conceito. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 1, p. 98-117, 2005. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5274414.pdf>>. Acesso em 11 mai. 2016.

COSTA, J. M.; PINHEIRO, N. A. M. O ensino por meio de temas- geradores: a educação pensada de forma contextualizada, problematizada e interdisciplinar. *Imagens da Educação*, v. 3, n. 2, p. 37-44, 2013. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:tbqp4o3QOxUJ:periodicos.uem.br/ojs/index.php/ImagensEduc/article/viewFile/20265/pdf+&cd=2&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=br&client=firefox-b>>. Acesso em: 17 jan. 2017. Acesso em 08 abr. 2016.

CUNHA, J. A. R.; SANTOS, O. P.; QUEIROZ, J. R. O. O ensino de entropia com enfoque da história da ciência. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação e Ciências – IX ENPEC, Novembro de 2013. Disponível em:<<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/resumos/R1522-1.pdf>>. Acesso em 26 mar. 2016.

DARDE, P. Máquinas térmicas a combustão interna de Otto. Disponível em: <<HTTP://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/simulacoes/termodinamica/motor.html>>. Acesso em 05 mai. 2016.

EINSTEIN, A. Sobre o movimento de pequenas partículas em suspensão dentro de líquidos em repouso, tal como exigido pela teoria cinético-molecular do calor. 1905. In: STACHEL, John (org.). O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física. Rio de Janeiro: UFRJ, 2001, p. 103 – 116.

ELNISMO, G. R. In Cylinder Video (How a 4 stroke engine works). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sEf8va1S7Sw>. Acesso em 05 jul. 2016.

ENERGIA, Portal. Funcionamento da energia hídrica e Barragens Hidroelétricas. Disponível em: < <https://www.portal-energia.com/funcionamento-da-energia-hidrica-barragens-hidroelectricas/>>. Acesso em 05 mai. 2016.

FOGAÇA, J. Trocas de Calor. Disponível em: < <http://escolakids.uol.com.br/trocas-de-calor.htm>>. Acesso em 11 abr. 2016.

FRAGA, N. I. L. Estado da arte na educação em ciência, tecnologia, sociedade e ambiente no brasil. *Ciência & Ensino*, vol. 1, número especial, novembro de 2007. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:monKNNABgpAJ:143.0.232.35/ojs/index.php/cienciaensino/article/download/145/111+&cd=4&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=br&client=firefox-b>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

FREIRE. Paulo. *Pedagogia da autonomia*. 27ª ed. São Paulo: Paz e Terra. 2003. 148p.

FRIEDRICH, M. et al. Trajetória da escolarização de jovens e adultos no Brasil: de plataformas de governo a propostas pedagógicas esvaziadas. *Ensaio: aval. pol. públ. Educ.*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 67, p. 389-410, abr./jun. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ensaio/v18n67/a11v1867>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

GADELHA, Nayra. Máquinas Térmicas-físico química. Disponível em: < http://www.ebah.com.br/content/ABAAABY_0AE/maquinas-termicas-fisico-quimica>. Acesso em 03 mai. 2016.

GONÇALVES, Leila. Uso de animações visando a aprendizagem significativa de Física Térmica no ensino médio. 2005. 97 f. Dissertação (Mestrado em Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de física*. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009 vol 2.

HENRIQUE, D. Físicos provam que é impossível esfriar um objeto até o zero absoluto. Disponível em: <<http://socientifica.com.br/2017/03/fisicos-provam-que-e-impossivel-esfriar-um-objeto-ate-o-zero-absoluto/>>. Acesso em 11 jun. 2016.

IVEL, A. Funcionamento Do Motor Em 3D. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Knpk9Hmn4kQ>. Acesso em 05 jul. 2016.

KÖHNLEIN, Janete. Um estudo a respeito das concepções alternativas sobre calor e temperatura. *Revista Brasileira de Investigação em Educação em Ciências*, 2(3)84-96, 2002. Disponível em: < <https://seer.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/2336/1736>>. Acesso em: 16 mar. 2016.

LEAL, C. A.; RÔÇAS. G. Sequência Didática. . Disponível em: <http://www.ifrj.edu.br/webfm_send/5416>. Acesso em 25 de set. 2017.

LIMA, Eduardo. Conforto térmico em residências como uma proposta de contextualização para o ensino de termodinâmica no ensino médio. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado em Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MENEZES, Luis. O novo público e a nova natureza do ensino médio. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9800/11372>>. Acesso em 19 de set. 2017.

MICHELENA, Juleane. Física térmica: uma abordagem histórica e experimental. 2008. 9125 f. Dissertação (Mestrado em Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa Crítica. *Indivisa. Boletín de Estudios e Investigación*, nº 6, pp. 83-101, 2005, com o título Aprendizaje Significativo Crítico. 1ª edição, em formato de livro, 2005; 2ª edição 2010; ISBN 85-904420-7-1.

_____. Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas V e unidades de ensino potencialmente significativas. 2012. Disponível em: < <http://www.faatensino.com.br/wp-content/uploads/2014/04/Aprendizagem-significativa-Organizadores-pr%C3%A9vios-Diagramas-V-Unidades-de-ensino-potencialmente-significativas.pdf#page=41>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

_____. Teorias de Aprendizagem. 2 ed. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 2011.

_____. Unidades de Enseñanza Potencialmente Significativas - UEPS. *Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review – V1(2)*, pp. 43-63, 2011. Disponível em: < http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID10/v1_n2_a2011.pdf >. Acesso em: 22 mai. 2016.

MONTEIRO, J. A. A.; GERMANO, J. S. E.; MONTEIRO, I. C. C.; GASPAR, A. Proposta de atividade para abordagem do conceito de entropia. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 26, n. 2: p. 367-378, ago. 2009. Disponível em: < <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2009v26n2p367/12753>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

MOURA, M.; AGUIAR, C. E. Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/Entropia_2a_Lei.pdf>. Acesso em 02 e 04 jun. 2016.

MOURA, Vera. Educação de Jovens e Adultos: as contribuições de Paulo Freire. 2014. 87 f. Monografia (Pós-graduação *latu senso* em Gestão Escola) – Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, 2014.

MSPC. Termodinâmica 05-10 Ciclos. Disponível em: < <http://www.mspc.eng.br/termo/termod0510.shtml>> Acesso em 07 mai. 2016.

NÓBREGA, M. L.; FREIRE JR, O.; PINHO, S. T. R..Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 2, 3601 (2013). Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n3/a26v35n3.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

OLIVEIRA, P. M. C; DECHOUM, K. Facilitando a Compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 25, no. 4, Dezembro, 2003. Disponível em: < http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/v25_359.pdf>. Acesso em: 15, 17 e 22 jun. 2016.

PCN – Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Brasília: Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica, 2000.

PEDUZZI, Luiz; MARTINS, André; FERRERIA Juliana. Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino. 1ed. Natal: EDUFRN, 2012. 374 p.

PESSOA JÚNIOR, Osvaldo. Filosofia da Física Clássica. Departamento de Filosofia. FFLCH, IFUSP. 2008. 143 p.

PERRENOUD, Philippe. 10 Novas Competências para Ensinar; trad. Patrícia Chittiono. – Porto Alegre: Artmed – 2008. 192p.

PROYEC, P. C. A. Esquema-central #hidroeléctrica sobre los componentes #estructurales y técnicos. Disponível em: <https://twitter.com/proyec_plus/status/559346750490955776>. Acesso em 29 jun. 2016.

RAMALHO JÚNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. Os fundamentos da física 2: Termologia, Óptica e Ondas. 9. Ed. São Paulo: Moderna, 2007.

RIBEIRO, Renato. Motores de carro e rendimento. Disponível em: <<https://www.em.com.br/app/noticia/especiais/educacao/enem/2015/07/20/noticia-especial-enem,670313/motores-de-carro-e-baixo-rendimento.shtml>>. Acesso em 20 set. 2017.

RICARDO, E. C. Educação CTSA: obstáculos e possibilidades para sua implementação no contexto escolar. Ciência & Ensino, vol. 1, número especial, novembro de 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238679155_EDUCACAO_CTSA_OBSTACULOS_E_POSSIBILIDADES_PARA_SUA_IMPLMENTACAO_NO_CONTEXTO_ESCOLAR>. Acesso em: 19 jul. 2016.

RODRIGUES, Carlos. Irreversibilidade e degradação da energia numa abordagem para o ensino médio. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, Rogério. Máquinas Térmicas. Disponível em: <<https://aprendafisica.wordpress.com/tag/maquinas-termicas/>>. Acesso em 03 mai. 2016.

SANTOS, Zanoni T. Saraiva. Ensino de Entropia: um enfoque histórico e epistemológico. 2009. 166 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SCHRÖDINGER, Erwin. O que é a vida? O aspecto física da célula viva. 1943. Fundação Editora UNESP. Brasil, São Paulo: 1997. 194 p. Cambridge University Press.

SCRIVANO et al. Ciência, transformação e cotidiano: ciências da natureza e matemática ensino médio: Educação de jovens e adultos. 1 ed. São Paulo: Globo, 2013. 362 p.

SOUZA, N. S; BORUCHOVITCH, E. Mapas conceituais e avaliação formativa: tecendo aproximações. Educ. Pesqui. vol.36 n° 3. São Paulo Sept./Dec. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-97022010000300010>. Acesso em: 27 jun. 2016.

SOUZA, P. V. S; DIAS, P.M.; SANTOS, F. M. P. Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, 2502 (2013). Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n2/22.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

STRELHOW, T. B. Breve história sobre a Educação de Jovens e Adultos no Brasil. Revista HISTEDBR On-line, Campinas, n.38, p. 49-59, jun. 2010 - ISSN: 1676-2584. Disponível em: < http://www.histedbr.fe.unicamp.br/revista/edicoes/38/art05_38.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2017.

TELESNIN, R. Vladimirovich. Molekulyarnaya fizika. 2^a ed. dop. ysheb. Posobie dlya univercitetov. Moscou. Chkola Vischaia. 1973.

VIRTUOUS. Grupo. Como funciona uma usina hidrelétrica. Disponível em: <http://www.laifi.com/laifi.php?id_laifi=898&idC=12516#>. Acesso em 05 mai. 2016.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. 10. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, 2003. vol 2.

ZABALA, Antoni., A prática educativa: como ensinar Trad. Ernani F. da Rosa – Porto Alegre: ArtMed, 1998.

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA: UMA PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

TIAGO MARTINS MOURA

Material instrucional vinculado à dissertação de mestrado apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, no pólo 09, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio López Ruiz.

MOSSORÓ

2017

Apresentação

O presente Produto Educacional, requisito parcial para a obtenção do título de mestre no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, no polo da UFERSA, foi concebido como um texto de apoio ao professor. Ele é resultado do trabalho desenvolvido neste programa de pós-graduação com bolsa de demanda social da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Foi aplicado no bloco B1, turno noturno, no Centro de Educação de Jovens e Adultos (CEJA) Professor Alfredo Simonetti, em Mossoró/RN.

É pertinente mencionar que para uma melhor implementação deste produto educacional, o professor deverá elaborar um planejamento de assuntos, a serem ministrados anteriormente à aplicação da presente proposta de sequência didática, que contemple, entre outros, conceitos tais como: equilíbrio térmico, temperatura, calor, fundamentos da teoria cinético molecular, processos termodinâmicos do gás ideal, energia interna, trabalho e a primeira lei da termodinâmica

O principal referencial teórico utilizado foi à teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, complementada com as contribuições Paulo Freire, Joseph Novak e Marco Antônio Moreira.

A sequência didática proposta tem como base o texto de apoio intitulado “*A Segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia*”, de autoria própria, cuja discussão, parágrafo a parágrafo, pressupõe a criação de situações de aprendizagem, visando a participação dos alunos. Neste sentido, o aluno: lê, discute, expõe suas reflexões sobre a situação problema apresentada, investiga para solucionar a situação proposta, constrói mapa conceitual para articular e consolidar os conceitos/ideias chaves, assiste a pequenos vídeos de simulações, é convidado a criticar outros textos e resolve problemas clássicos desta temática encontrados em livros de ensino médio.

A sequência didática como um todo, incluindo a aplicação de pré-teste, desenvolvimento da mesma, avaliações dos alunos e pós-teste, terá a duração de 10 aulas de 50 minutos cada. Neste tempo serão trabalhados os seguintes eixos/temáticas: interdisciplinaridade, elementos de história da Física e das relações Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente - CTSA, e conteúdos conceituais tais como: primeira lei da

termodinâmica, máquinas térmicas, ciclos de Carnot e Otto, diferentes enunciados da segunda lei da termodinâmica, entropia segundo Clausius, Boltzmann, e Schrödinger (em sistemas aberto/vivos), que podem ser sintetizados no Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – Distribuição das aulas, descrição geral e recursos didáticos

Aulas	Descrição geral	Recursos didático
Primeira	Apresentação da sequência didática. Pré-teste.	Pincel, apagador, cópias do pré-teste, aparelho data show e cópias do texto de apoio para leitura.
Segunda	Máquinas térmicas. Princípios de funcionamento e elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e das relações de Ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (CTSA).	Pincel, apagador, aparelho data show e texto de apoio.
Terceira	O ciclo de Carnot.	Pincel, apagador, aparelho data show, vídeos de demonstração e simulação, internet e texto de apoio.
Quarta	A segunda lei da termodinâmica. Entropia.	Pincel, apagador, aparelho data show e texto de apoio .
Quinta	A entropia em processos irreversíveis.	Pincel, apagador, aparelho data show, texto de apoio e texto auxiliar.
Sexta	Interpretação estatística da entropia	Pincel, apagador, aparelho data show e texto de apoio.
Sétima	O plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS. Cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos.	Pincel, apagador e aparelho data show.
Oitava	A entropia em sistemas abertos.	Pincel, apagador, aparelho data show, livro “ <i>What Is Life? & Mind and Matter</i> ” (“ <i>O que é a vida? O aspecto físico da célula viva</i> ”) e cópias do texto com recorte de livro.
Nona	Aula integradora: construção de um mapa conceitual.	Pincel, apagador e folhas A4.
Décima	Aplicação do pós-teste.	Pincel, apagador e cópias do Pós-teste.

Fonte: Autoria própria, 2016.

A Sequência didática

Primeira aula: Apresentação da sequência didática. Pré-teste

Este é o momento reservado para conversar com a turma sobre como serão desenvolvidas as próximas dez aulas, solicitando o seu envolvimento e ativa participação na implementação da proposta de sequência didática.

Em seguida, será solicitado aos alunos que respondam individualmente o questionário pré-teste (Apêndice B). Para tanto lhes será dado vinte minutos. Este questionário é constituído por sete questões subjetivas. As mesmas abordam, de forma muitas vezes implícita, conceitos chaves para o desenvolvimento da sequência didática como: temperatura, calor, primeira lei da termodinâmica, processos reversíveis e irreversíveis, difusão, teoria cinético molecular, rendimento das máquinas térmicas, segunda lei da termodinâmica e entropia em sistemas isolados e abertos.

Ao finalizar a aplicação do pré-teste, os questionários serão recolhidos. Feito isso, é projetado na lousa o mesmo questionário. Agora, o professor propiciará uma discussão dialogada, mediante a técnica do grupo nominal, sobre como eles responderam a cada item. Poderão surgir repostas totalmente diferentes para o mesmo item ou ausência de resposta. Neste caso o professor deverá intervir, fazendo as mediações necessárias de acordo com as repostas apresentadas e o perfil da turma. Assim, finaliza a primeira aula.

Segunda aula: Máquinas térmicas. Princípios de funcionamento e elementos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e das relações de Ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (CTSA).

Esta aula tem início com a apresentação do texto de apoio, de autoria própria, intitulado “*A segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia*” (Apêndice C).

A partir da leitura deste texto o professor apresentará situações de aprendizagem, visando revelar elementos de HFC e de CTSA, nele (texto) implícitas. Para tanto, o professor solicitará aos alunos que releiam, individualmente, os quatro primeiros parágrafos do texto,

que lhes deve ser entregue com pelo menos uma semana de antecedência. Durante a leitura serão destacados aspectos, objetos de posterior discussão coletiva em sala de aula, tais como: referências sobre história da ciência, relações ciência, tecnologia, sociedade e ambiente e o princípio de funcionamento das máquinas térmicas. Para trabalhar os dois primeiros parágrafos, que discorrem sobre o surgimento, papel e evolução das primeiras máquinas térmicas na revolução industrial, bem como os objetivos destes cientistas, da época, ao estudar estas máquinas, será feito o seguinte questionamento:

Com base na leitura realizada e seu conhecimento de mudo, qual a relação entre o surgimento das primeiras máquinas térmicas e o desenvolvimento da revolução industrial, tendo em vista a necessidade da sociedade daquela época?

Neste momento o professor de Física tem a oportunidade de relacionar o conteúdo da sua aula com a disciplina de História Geral, destacando o importante papel do surgimento e aperfeiçoamento das máquinas térmicas para alavancar a revolução industrial, que teve início na Inglaterra. Nesse contexto, serão revelados e discutidos elementos das relações CTSA e da história da Física. Assim, o questionamento acima torna-se mais significativo e os alunos induzidos, através da mediação do professor e da leitura dos dois primeiros parágrafos do texto, a refletir sobre essas duas dimensões importantes no ensino de Física. Na ocasião, será discutida também a relação mais específica entre os conhecimentos científicos e tecnológicos. Neste sentido, o professor irá apresentar a seguinte situação problema:

O conhecimento científico e tecnológico sempre é produzido primeiramente em centros de estudos para só depois serem aplicados ao desenvolvimento de tecnologias? Ou poderá primeiro surgir a tecnologia e só depois haver um estudo e sistematização deste conhecimento científico, tecnológico contido naquela tecnologia? Cite pelo menos dois exemplos de sua resposta.

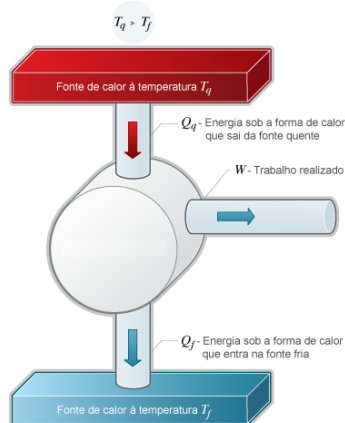
A prática vai mostrar ao professor que a imensa maioria dos alunos acreditam firmemente que primeiro surge o conhecimento científico para só depois ele ser aplicado ao desenvolvimento de tecnologias. Assim sendo, cabe ao professor criticar essa relação linear unidirecional desses dois tipos de conhecimentos. Neste sentido, deve ser relatado pelo

menos dois momentos da história da ciência em que a tecnologia surgiu primeiro que o conhecimento científico: a criação das máquinas térmicas que deu origem a boa parte da termodinâmica e o uso da luneta por Galileu antes de dispor, a partir de Kepler, de uma teoria sobre a formação de imagens.

Em seguida o professor fará com os alunos uma leitura dialogada do terceiro e quarto parágrafo que trata do princípio de funcionamento das máquinas térmicas.

O terceiro parágrafo retrata as conclusões de Carnot a cerca do funcionamento da máquina térmica, conforme Figura 1 do texto de apoio, sistematizando os primeiros conhecimentos que fundamentaram o desenvolvimento da segunda lei da termodinâmica.

Figura 1 – Máquina térmica



Fonte: GADELHA, 2014.

Feito isso, o professor segue a aula para explicar o princípio de funcionamento das máquinas térmicas, segundo a figura mencionada. Assim, ele irá explicar que a Figura 1 é uma representação de um esquema de funcionamento de uma máquina térmica. Ela possui duas fontes de calor a diferentes temperaturas, sendo que a fonte quente (T_q) fornece certa quantidade de calor (Q_q) que será parcialmente convertida em trabalho (W) mecânico e o restante (Q_f) será descartado na fonte fria (T_f), logo podemos escrever a seguinte expressão para o rendimento de uma máquina térmica.

$$\eta = W / Q_1 \quad (1)$$

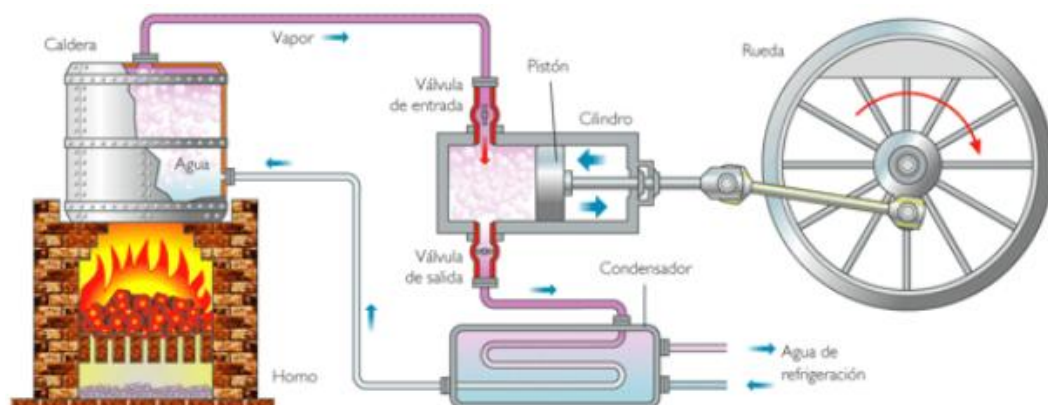
Neste momento, é de fundamental importância, para contribuir com a compreensão do entendimento da natureza do conhecimento científico, que o professor esclareça que muito embora Carnot tenha se fundamentado na teoria do calórico, suas conclusões sobre o funcionamento das máquinas térmicas estavam corretas. Neste momento, é importante que o professor comente que a teoria do calórico era uma das duas teorias que, naquela época, explicava a natureza do calor. Era uma concepção materialista, segundo a qual o calor era uma substância fluída, imponderável e elástica, cujas partículas se repeliam mutuamente.

O professor deve justificar para os alunos que Carnot consegue explicar corretamente o princípio de funcionamento das máquinas térmicas, mesmo tendo aderido à teoria do calórico e ao seu princípio de conservação, pois para ele o cerne deste conhecimento estava na direcionalidade do fluxo de calor entre as fontes a diferentes temperaturas.

Para tornar o conhecimento acima mais significativo, o professor irá contextualizar o funcionamento das máquinas térmicas através da ilustração, projetada na lousa, de um esquema da máquina a vapor, Figura 1, cujo funcionamento é análogo ao da máquina representada na Figura 1 do texto de apoio, já discutido anteriormente.

Como situação de aprendizagem, é solicitado que os alunos verbalizem o que a figura abaixo representa e como se dá seu funcionamento.

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma máquina térmica



Fonte: SANTOS, 2016.

Depois de registrada algumas das respostas verbalizadas, é feita às intervenções cabíveis, o professor explicará que esta figura representa uma máquina a vapor, cujo funcionamento se inicia com o aquecimento da água na caldeira (fonte quente) que gradativamente será transformada em vapor a alta pressão que será conduzido, por meio da tubulação, até o cilindro, passando pela válvula de entrada. Este vapor realiza trabalho mecânico sobre o pistão, cujo movimento oscilatório é transmitido em forma de movimento circular para realizar determinada tarefa. A explicação deverá destacar também o caráter cíclico do funcionamento da máquina, dizendo que, pela válvula de saída, é descartado o vapor que foi transformado em água ao baixar a pressão dentro do cilindro, devido à expansão do volume interno ao movimentar o pistão, no momento da realização de trabalho. Esta água chega, por meio da tubulação, ao condensador que irá refrigerar a água que em seguida será reinjetada na caldeira, fechando o ciclo.

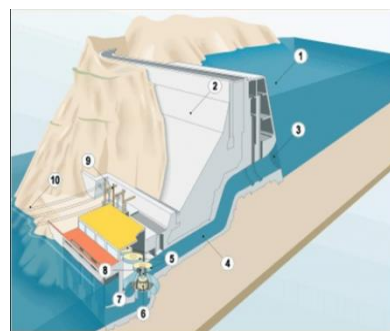
O quarto parágrafo apresenta uma analogia entre o funcionamento da máquina térmica e a máquina hidráulica. Para ampliar esta ideia, o professor irá projetar na lousa a Figura 2, que representa três diferentes recortes (2 A, 2 B e 2 C) de uma hidroelétrica, e questionar a turma conforme questões norteadoras que seguem.

Figura 2 – Esquema de funcionamento de uma hidroelétrica



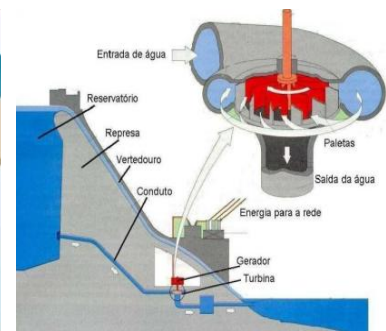
2 A

Fonte: ALVES, 2016.



2 B

Fonte: PROYEC, 2016.



2 C

Fonte: VIRTUOS, 2016.

- 1) *Do que trata cada uma das figuras acima?*
- 2) *Há alguma semelhança entre a ativação do funcionamento da máquina na Figura C e as máquinas térmicas? Caso sim, qual?*
- 3) *Qual a principal diferença entre o funcionamento da máquina na Figura C e as máquinas térmicas?*

Neste momento, o professor deverá, caso verifique a dificuldade dos alunos em responder aos questionamentos, sugerir que os mesmos releiam o quarto parágrafo cujo conteúdo apresenta uma analogia entre o funcionamento da máquina térmica e a máquina hidráulica.

O professor irá utilizar esta situação de aprendizagem para que os alunos percebam, assim como Carnot, a semelhança que há entre o funcionamento das máquinas térmicas e hidráulicas. Enquanto aquela usa a diferença de temperatura, esta o desnível da água. Sendo a principal diferença que, na primeira não há conservação do calor enquanto na segunda há a conservação do fluxo de água.

Terceira aula: O ciclo de Carnot

Esta aula é iniciada com uma breve revisão sobre processos termodinâmicos: isovolumétrico, isobárico e em especial o isotérmico e adiabático.

O Quadro 2, abaixo, resume as expressões destas últimas transformações.

Quadro 2 – Síntese dos processos isotérmicos e adiabáticos do gás ideal

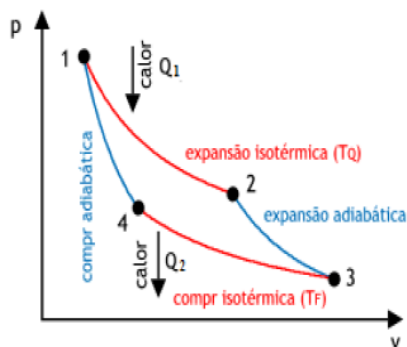
Processos	Expressões
Isotérmico	$P.V = n.R.T$ (Equação de estado do gás ideal) Para a temperatura constante, temos que: $P.V = \text{constante (K)}$
Adiabático	Como não há troca de calor com o meio, isso implica em $Q = 0$, logo: $P.V^\gamma = \text{constante (K)}$ (Lei de Poisson) Onde $\gamma = c_p/c_v$

Fonte: A autoria própria, 2016.

Feito isso, o professor solicitará que a turma leia o quinto e sexto parágrafo do texto que discutem o ciclo de Carnot e seu rendimento. Ele destacará que se pode demonstrar que há um rendimento máximo a ser alcançado pelas máquinas térmicas: o da máquina que

funciona segundo o ciclo de Carnot, que é composto por duas curvas isotérmicas e duas adiabáticas conforme Figura 2 do texto de apoio.

Figura 2 – Ciclo de Carnot do plano PV



Fonte: MSPC, 2008.

Em seguida, o professor irá explorar informações contidas neste gráfico, representando o Ciclo de Carnot e utilizando-o para contextualizar duas áreas de conhecimentos do ensino médio: Linguagens e códigos e Ciências da natureza.

O desenvolvimento de competências e habilidades nessas áreas está previsto nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs e PCNs+). Pretende-se que o aluno seja capaz de ler, articular e interpretar símbolos e códigos em diferentes linguagens e representações: sentenças, equações, esquemas, diagramas, tabelas, gráficos e representações geométricas; reconhecendo, transpondo e utilizando adequadamente na forma oral e escrita símbolos, códigos e nomenclatura da linguagem científica, visando sua constituição em um cidadão crítico-reflexivo e participativo no desenvolvimento técnico-científico-social.

Para o professor explorar, juntamente com a turma, informações contidas no gráfico, segue abaixo algumas situações a ser investigadas.

- 1) *Que aspectos no gráfico caracterizam estar havendo uma expansão isotérmica de 1 para 2?*
- 2) *Que aspectos no gráfico caracterizam está havendo uma expansão adiabática de 2 para 3?*

- 3) *Que aspectos no gráfico caracterizam está havendo uma compressão isotérmica de 3 para 4?*
- 4) *Que aspectos no gráfico caracterizam está havendo uma compressão adiabática de 4 para 1?*
- 5) *Por que as curvas adiabáticas possuem inclinações mais acentuadas que as isotérmicas?*

O professor deverá intervir na discussão destas questões, caso haja a necessidade, orientando sempre a leitura do gráfico, indicando a quantidade de calor Q_1 que é injetada no sistema e apontando a expansão isotérmica de 1 para 2 cuja temperatura é constante. Mostrar que há um aumento do volume e conseqüentemente diminuição da pressão, conforme é percebido nos eixo horizontal e vertical do gráfico. Este mesmo raciocínio deve ser utilizado para responder aos itens dois, três e quatro.

O item cinco, que explora o porquê da inclinação mais acentuada nas curvas adiabáticas se comparadas com as isotermas, é o que mais exige dos alunos, por isso a necessidade de revisar processos termodinâmicos no início desta aula culminando na sistematização do Quadro 2.

Neste sentido, faz-se necessário que o professor exponha na lousa o seguinte raciocínio.

Nos processos isotérmicos, sabe-se que a temperatura (T) é constante, logo a relação funcional entre a pressão (P) e o volume (V) do gás ideal será:

$$P.V = n.R.T \text{ (Equação geral do gás ideal)}$$

$$P = K / V, \text{ onde } K = nRT, \text{ uma constante}$$

Nos processos adiabáticos não há troca de calor com o meio externo, logo temos que $Q = 0$, assim, pode-se demonstrar que para o gás ideal,teremos que:

$$P.V^\gamma = \text{constante (K) (Lei de Poisson)}$$

$$P.V^\gamma = K, \text{ mas } \gamma = (c_p/c_v) > 1$$

Onde c_p e c_v são as capacidades caloríficas do gás ideal a pressão e volume constantes, respectivamente. Logo:

$$P = K / V^{(c_p/c_v)}$$

Assim, fica respondido o item cinco, já que percebemos que as isotermas possuem denominador com expoente um e as adiabáticas expoente maior que um, o que justifica sua maior inclinação.

Para tornar esta conclusão mais concreta para o aluno, o professor apresentará um exemplo quantitativo que segue na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Exemplo comparativo – isotérmica vs. adiabática

Isotérmicas	Adiabáticas
$P = K/V$	$P = K/V^\gamma$
Sendo $K = 10$ e $V = 2$ l, tem-se:	Sendo $K = 10$, $V = 2$ l, $\gamma = (c_p/c_v) = 1,4$, tem-se:
$P = 10/2$	$P = 10/2^{1,4} = 10/2,64$
$P = 5$ atm	$P = 3,78$ atm

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na sequência, como visto na aula anterior, destaca-se que Carnot consegue explicar corretamente o princípio de funcionamento das máquinas térmicas, mesmo tendo aderido à teoria do calórico e ao seu princípio de conservação, pois para ele o cerne deste conhecimento estava na direcionalidade do fluxo de calor entre as fontes a diferentes temperaturas. Ele mostrou como calcular a eficiência de uma máquina térmica qualquer e, após criar seu próprio ciclo, demonstrou que a eficiência de sua máquina térmica ideal, a que funciona segundo o ciclo dele, é a máxima possível, é função exclusiva das diferentes temperaturas dos reservatórios quente e frio. Tais eficiências são representadas conforme equações abaixo.

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1$$

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = 1 - Q_2 / Q_1 \quad (2)$$

$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = W / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1$$

$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = 1 - T_2 / T_1 \quad (2.1)$$

Ainda com relação à eficiência das máquinas térmicas, o professor apresentará a seguinte situação problema.

*Imagine uma máquina térmica que funcione utilizando o ciclo de Carnot. Ela seria muito comercializada? Por quê? **Dica:** pense que implicações a mesma teria quanto ao rendimento e trabalho.*

Para mediar à solução da situação apresentada acima, o professor deverá contextualizar uma situação onde os alunos consigam visualizar mais significativamente o conteúdo almejado. Para tanto, o professor deverá citar o seguinte exemplo: *Imagine uma máquina a vapor qualquer, por exemplo, a representada pela Figura 1 que já vimos, sabe-se que a temperatura ambiente local é 300K e que a temperatura na caldeira é de aproximadamente 373K. Vamos verificar qual a eficiência desta máquina.*

$$\eta = 1 - T_2 / T_1$$

$$\eta = 1 - 300 / 373$$

$$\eta = 19,57\%$$

Assim, é visto que a mesma possui uma baixa eficiência, uma vez comparado ao rendimento da máquina térmica ideal de Carnot que é uma referência para avaliar a eficiência das máquinas térmicas reais.

Feita esta mediação, os alunos irão verbalizar suas respostas quanto à situação anteriormente proposta, em seguida o professor deverá questioná-los da possibilidade de uma máquina real possuir rendimento 100% e que implicações isso teria nas equações um e dois do texto de apoio.

O professor continuará a discussão, argumentando que chegar ao motor de segunda espécie implicará em Q_2 ou T_2 igual a zero, logo a quantidade de calor quente (Q_1) ou a

temperatura da fonte quente (T_1) será integralmente convertida em trabalho (W) não havendo absolutamente nenhum desperdício. Neste momento, o professor deverá demonstrar esta conclusão na lousa utilizando as equações (1) e (2) do texto de apoio. Este resultado implica em negar o princípio de funcionamento das máquinas térmicas, uma vez que ele afirma haver uma parcela de desperdício.

Assim, esta máquina térmica, se materializada, seria a ideal para uso da população, uma vez que ela possuirá um rendimento de cem por cento.

Para fechar esta aula, será reproduzido dois vídeos, um com duração de 4 minutos e 05 segundos que poder ser encontrado em <https://www.youtube.com/watch?v=Knpk9Hm4kQ>, cujo conteúdo trás uma simulação e demonstração do funcionamento de um motor a combustão interna (ciclo de Otto) e outro com 1 minuto e 17 segundos, encontrado em <https://www.youtube.com/watch?v=sEf8va1S7Sw>, cujo conteúdo mostra uma micro câmera filmando o funcionamento no interior do mesmo motor real. Havendo tempo é interessante visitar também a página do CREF da UFRGS <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/simulacoes/termodinamica/motor.html>, a qual possui uma simulação da combustão em um motor, que funciona segundo o ciclo de Otto.

Ao fim, o professor deverá solicitar que os alunos verbalizem quais relações eles conseguem concatenar entre o que eles viram nos vídeos e simulações e aula que foi ministrada.

Depois que escutar as várias respostas, o professor deverá orientar uma discussão no sentido de explorar as etapas de funcionamento do motor, destacando e mostrando os quatro tempos do mesmo e suas relações com as grandezas pressão, volume, temperatura, explosão, compressão, exaustão entre outras coisas. Em seguida o professor reproduzirá novamente o vídeo, pausando durante a discussão se necessário, para que os alunos possam, após esta discussão, verificar o que foi debatido.

Quarta aula: A segunda lei da termodinâmica. Entropia

Dando continuidade a leitura do texto de apoio, os alunos irão ler o sétimo parágrafo cujo conteúdo apresenta Clausius e suas conclusões - uma das primeiras formulações da

segunda lei da termodinâmica. Posteriormente, ainda neste parágrafo, tem-se a formulação Kelvin-Planck para esta mesma lei.

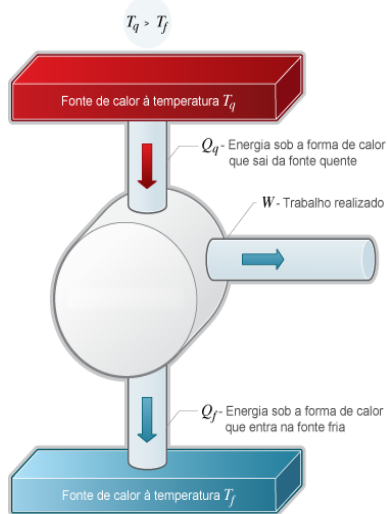
É pertinente, neste momento, contextualizar a necessidade de se criar a segunda lei da termodinâmica e conseqüentemente o conceito de entropia. Para tanto, é exposta a seguinte situação problema:

A primeira lei da termodinâmica, expressa o princípio de conservação da energia nos fenômenos térmicos, abordando como a energia interna de um sistema pode ser alterada mediante dois processos qualitativamente diferentes: o calor e o trabalho. Poderia esta mesma lei mostrar em que direção ocorre tais fenômenos, em particular, a intercâmbio de energia entre dois corpos a temperaturas diferentes?

Através desta situação problema os alunos serão levados a refletir sobre a importância e limites da primeira lei da termodinâmica. Neste sentido, o professor terá que conduzir a discussão mostrando a necessidade da formulação de outra lei que venha mostrar a direção em que ocorrem os processos naturais e conseqüentemente como acontece o intercâmbio de energia térmica nestes processos. Esta outra lei é a segunda lei da termodinâmica.

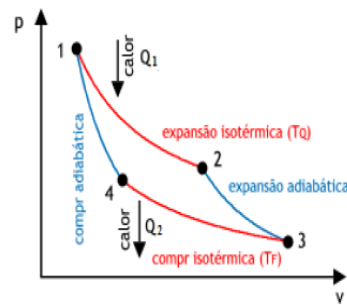
Para contribuir com o desenvolvimento da discussão acima proposta, segue abaixo uma situação de aprendizagem na qual os alunos são levados a investigar, através das quatro figuras que segue abaixo, retiradas do nosso texto de apoio, bem como dos questionamentos que o professor poderá propor a turma. Tais perguntas trazem o conteúdo do parágrafo lido e o conhecimento a ser interpretado das figuras em questão.

Figura 1 – Máquina térmica



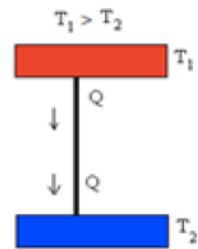
Fonte: GADELHA, 2014.

Figura 2 – Ciclo de Carnot do plano PV



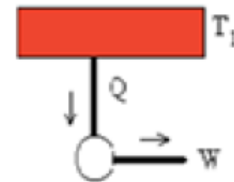
Fonte: MSPC, 2008.

Figura 3 – Fluxo de calor



Fonte: Autoria própria, 2016.

Figura 4 – Motor perpétuo



Fonte: Autoria própria, 2016.

- 1) De acordo com a Figura 3 do texto de apoio, está ocorrendo fluxo de calor? Caso sim, qual a condição para que isso ocorra? E em que direção está ocorrendo este fluxo?
- 2) Como estaria esta direção na Figura 1 e 2 do texto de apoio?
- 3) Qual a diferença entre a Figura 1 e 3 do texto de apoio?
- 4) A Figura 3 do texto de apoio pode ser considerada uma máquina térmica? Por quê?
- 5) Como poderíamos transformar a Figura 3 do texto de apoio em uma máquina térmica (elabore um desenho para ilustrar sua resposta)?
- 6) Com o passar do tempo como iria ficar a Figura 3 do texto de apoio (elabore um desenho para ilustrar sua resposta)?
- 7) Qual a diferença entre a Figura 1 e 4 do texto de apoio?
- 8) Analisando o funciona a máquina representada pela Figura 4 do texto de apoio, como você descreveria seu funcionamento? Qual seria o seu rendimento? Você conhece uma máquina que na prática tenha este funcionamento? Seria possível construir, na prática, esta máquina? Por quê?

Ao apresentar tais questionamentos o professor está criando um ambiente para discussão e reflexão sobre as formulações da segunda lei da termodinâmica segundo Clausius e Kelvin-Planck, o conceito e funcionamento das máquinas térmicas e motor-contínuo de segunda espécie.

Concluída esta discussão, o professor lerá o oitavo parágrafo para a turma. Este, mostra a obtenção do conceito de entropia por Clausius nos processos reversíveis em sistemas isolados. A mesma é feita na lousa de acordo com o exposto no texto. O professor deverá detalhar cada etapa da demonstração dialogando com a turma, uma vez que, em geral, os alunos têm muita dificuldade no desenvolvimento algébrico. É importante que o professor repasse esta explicação mais uma vez.

Segue abaixo a demonstração a ser desenvolvida.

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = 1 - Q_2/Q_1$$

$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = 1 - T_2/T_1$$

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = \eta_{\text{máq. de Carnot}}$$

$$1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_2/T_1$$

$$Q_2/T_2 = Q_1/T_1 \quad (3)$$

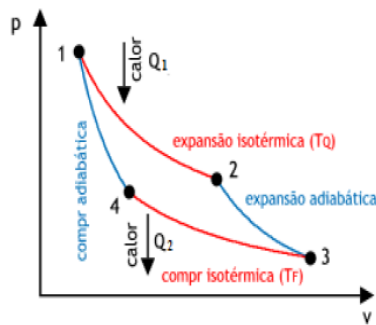
$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2 \quad (4)$$

$$S = Q/T \quad (5)$$

Assim, pode-se dizer que a entropia está relacionada diretamente com a quantidade de calor e temperatura; e indiretamente com o rendimento e trabalho. Ao analisar, no final desta aula, sua relação com tais grandezas, ver-se que a entropia é uma forma de perda da capacidade de realização do trabalho de um sistema termodinâmico ou a degradação da energia do mesmo, que se traduz na diminuição do rendimento e temperatura deste sistema levando-o a morte térmica – equilíbrio termodinâmico.

Feito isso, é de suma importância o professor explicar que a entropia é uma função de estado. Esta explicação será feita através da Figura 2 do texto de apoio e das equações (4) e (5) demonstradas acima.

Figura 2 – Ciclo de Carnot do plano PV



Fonte: MSPC, 2008.

Segundo equação (4), desenvolvida a partir da Figura 2, temos que:

$$Q_1 / T_1 = Q_2 / T_2$$

Logo:

$$Q_2 / T_2 - (Q_1 / T_1) = 0$$

A equação acima dá origem, através da equação (5), à:

$$S_2 - S_1 = 0 \quad (6)$$

Clausius generaliza esse resultado para qualquer ciclo termodinâmico, demonstrando que a entropia é uma função de estado, isto é, a variação da entropia independe do processo, através do qual o sistema passa de um estado termodinâmico para outro.

Vale salientar que a quantidade de calor Q não é uma função de estado, pois depende do processo mediante o qual o sistema termodinâmico passa de um estado para outro. Já a entropia, representada pela razão entre a quantidade de calor, Q , e a temperatura, T , na qual a transferência de energia entre os sistemas termodinâmicos está ocorrendo, esta sim, como fora dito, é uma função de estado.

Ou seja:

$$\Delta S_{\text{ciclo}} = 0 \quad (7)$$

Feita esta explicação sobre a entropia como função de estado, o professor irá, através das situações problemas apresentadas abaixo e da leitura do nono parágrafo que trata das

relações entre entropia, temperatura, trabalho e rendimento; retomar a equação (5) que define a entropia em processos reversíveis para solucionar as situações de aprendizagem proposta a seguir.

- 1) *Para que o η de uma máquina térmica seja máximo, qual deverá ser a temperatura de sua fonte quente?*
- 2) *Em uma situação hipotética determinada máquina térmica atinge o η máximo. Neste caso, o que acontece com a entropia S ?*
- 3) *Não havendo muita diferença quantitativa entre as temperaturas da fonte quente e da fonte fria de uma máquina térmica, em que isso implicaria em termos de seu η ?*
- 4) *Com relação ao item 3, isso teria alguma implicação na entropia? Caso sim, qual?*
- 5) *Em termos de trabalho realizado pela máquina do item 3, o que você poderia dizer se comparado com o trabalho realizado pela máquina do item 1?*

Ao desenvolver tais situações de aprendizagem, o professor está propiciando um ambiente de investigação no qual os alunos serão levados a relacionar tais grandezas citadas e as consequências destas relações. Para tanto, eles terão de refletir, sistematizar e propor soluções. Logo, este momento torna-se dinâmico, participativo e interacionista, alicerçando significativamente o desenvolvimento destes alunos.

Quinta aula: A entropia em processos irreversíveis

Esta aula tem por objetivo discutir a entropia em processos irreversíveis. Para tanto, o professor deve explicar que o cálculo da entropia nestes processos, para os quais $dS > dQ/T$, está fundamentada na ideia da entropia ser uma função de estado e que para processos reversíveis a $dS = dQ/T$. Sendo assim, para calcular a entropia em processos irreversíveis, busca-se um processo reversível, através do qual o sistema termodinâmico transita entre os mesmos estados termodinâmicos que no processo irreversível.

Dito isto, os alunos são orientados a ler o décimo parágrafo e interpretar sua Figura 5 que discorre sobre o aumento da entropia no estabelecimento do equilíbrio térmico.

Concluída a leitura, o professor irá introduzir uma breve recapitulação sobre o significado físico da entropia e em seguida propor uma situação investigativa para os alunos.

Até o momento já vimos que a entropia é um conceito físico que expressa a perda da capacidade do sistema para realizar trabalho ou a degradação da energia de um sistema termodinâmico. Esta afirmação pode ser verificada, com as devidas adequações, na Figura 5 do texto de apoio.

Figura 5 – Estabelecimento do equilíbrio térmico



Fonte: Autoria própria, 2016.

Após os alunos refletirem a cerca do discurso tecido sobre o sentido físico da entropia e interpretarem a figura em questão, o professor irá propor a seguinte situação de aprendizagem.

- 1) *O que a Figura 5 pretende ilustrar?*
- 2) *Depois de algum tempo o que irá acontecer com ambos os corpos? O que isso representa?*
- 3) *É possível, naturalmente, após atingir o equilíbrio térmico, a corpo A voltar a ter uma temperatura maior que a do corpo B? Por quê?*
- 4) *O ilustrado na Figura 5 está realizando trabalho? Justifique sua resposta?*
- 5) *Ao colocarmos, entre os dois blocos, algum dispositivo que utilize uma substância para realização de trabalho, o que estaremos construindo?*
- 6) *Pode o novo dispositivo montado deixar de realizar trabalho? Caso sim, quando isso acontece?*

7) *No momento em que não for mais possível a realização de trabalho por este dispositivo (devido os corpos terem atingido o equilíbrio térmico), o que acontece com as temperaturas dos dois corpos? E seu rendimento? E a entropia?*

Ao investigar com os alunos as soluções para tais situações, o professor estará mostrando que a entropia indica também a direção em que acontecem os fenômenos irreversíveis num sistema isolado - no sentido que a entropia aumenta. Este é o momento oportuno para diferenciar processos reversíveis de irreversíveis e discorrer sobre a seta do tempo – origem e morte de sistemas térmicos e/ou universo.

Uma vez discutido qualitativamente, através do experimento da Figura 5 mediante a situação problemática investigada, o aumento da entropia em processos irreversíveis; agora o professor deverá demonstrar o mesmo, mas de forma quantitativa. Para tanto, o professor irá calcular a variação da entropia nesse processo de estabelecimento do equilíbrio térmico da seguinte forma.

Observando a Figura 5 e utilizando as conclusões que chegamos às aulas anteriores, teremos que:

$$S_A = \Delta Q_A / T_A \quad \text{e} \quad S_B = \Delta Q_B / T_B \quad (5)$$

Como a pequena variação de quantidade de calor (ΔQ_A) que o corpo A está transferindo é a mesma que o corpo B está recebendo (ΔQ_B), pois o sistema formado pelos dois corpos é isolado, podemos escrever que $\Delta Q_A = \Delta Q_B = \Delta Q$. Logo as equações acima podem ser rescritas da seguinte forma:

$$S_A = \Delta Q / T_A \quad \text{e} \quad S_B = \Delta Q / T_B$$

E, considerando o calor recebido por B como positivo e o cedido por A como negativo, a variação da entropia (ΔS_{AB}), será:

$$\Delta S_{AB} = S_B - S_A$$

Ao substituírmos S_A e S_B da expressão acima pelo que definimos anteriormente, termos:

$$\Delta S_{AB} = \Delta Q / T_B - \Delta Q / T_A$$

$$\Delta S_{AB} = \Delta Q (1 / T_B - 1 / T_A)$$

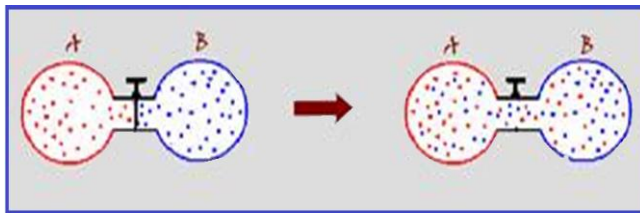
$$\Delta S_{AB} = \Delta Q (T_A - T_B) / T_B \cdot T_A \quad (8)$$

Como T_A é maior que T_B , conseqüentemente, $(T_A - T_B)$ é maior que zero. Portanto, no processo de estabelecimento do equilíbrio térmico a entropia aumenta ($\Delta S_{AB} > 0$).

O professor poderá ainda demonstrar que o mesmo resultado ocorre no processo da difusão gasosa. Para tanto, ele deverá desenvolver a seguinte situação.

Imagine um recipiente com dois compartimentos interligados por uma válvula. Em cada compartimento há igual quantidade de diferentes gases ideais. Em um dado momento abre-se a válvula e os gases se difundem isotermicamente. A Figura 3 trás a situação descrita.

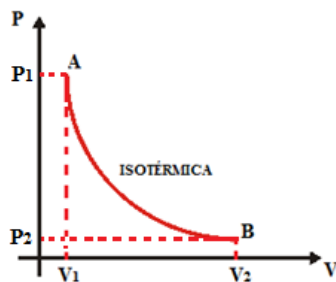
Figura 3 – Difusão gasosa



Fonte: BOCAFOLI, 2005.

A situação acima descrita deverá ser convertida para linguagem gráfica, cabendo ao professor fazer esta transposição didática utilizando conceitos gráficos, além dos de pressão, volume, temperatura, quantidade de calor, trabalho, difusão e entropia. Ao realizar esta tarefa com os alunos, o gráfico elaborado deve ser o representado pela Figura 4 que segue abaixo.

Figura 4 – Gráfico da difusão gasosa apresentada



Fonte: Autoria própria, 2016.

Sabemos que a primeira lei da termodinâmica nos diz que $\Delta U = Q - W$. Como em um processo isotérmico do gás ideal sua energia interna não varia, isso implica em $\Delta U = 0$, logo: $Q = W$.

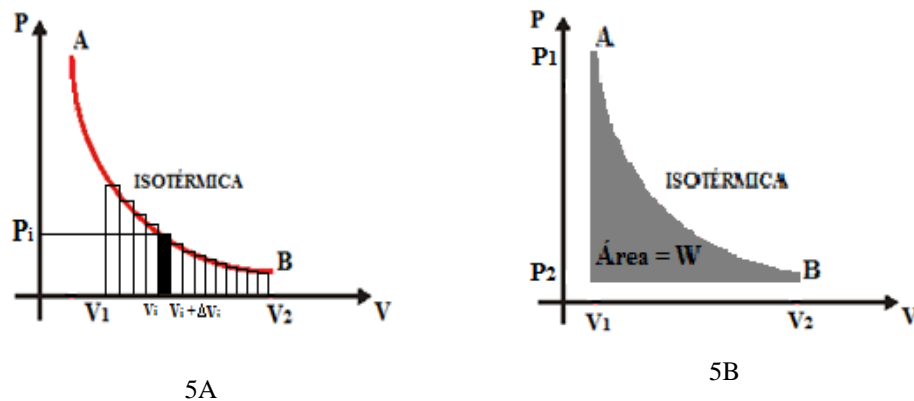
Se considerarmos partes infinitesimais da ΔV de modo a considerar sua projeção, na isoterma, sendo uma reta, neste caso, podemos considerar a pressão constante, logo podemos escrever $W_i = P\Delta V_i$.

Aplicando $W_i = P\Delta V_i$ para cada pedacinho infinitesimal que constituem a isoterma, ao fim tem-se:

$$W \cong \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P_i \Delta V_i \quad \text{ou apenas} \quad W \cong \sum_{i=1}^n P_i \Delta V_i$$

Assim, esta somatória será aproximadamente igual à área da figura formada entre a isoterma e o eixo V no intervalo de V_1 até V_2 . O gráfico abaixo, ilustrado pela Figura 5, representa o raciocínio aplicado. Este mesmo procedimento é aplicado ao longo de toda a isoterma constituída de vários pedacinhos infinitesimais.

Figura 5 – Gráfico da difusão gasosa considerando infinitesimais ΔV_i



Fonte: Autoria própria, 2016.

Assim, se pode mostrar que $Q/T = W/T > 0$ e, com base nessa análise, concluir que na difusão dos gases, que é um processo irreversível, a entropia aumenta. Dessa maneira podemos exemplificar como se calcula a entropia em processos irreversíveis.

Sexta aula: Interpretação estatística da termodinâmica

Nesta aula será discutida a interpretação estatística da entropia, uma vez que sistemas termodinâmicos estão constituídos por um número enorme de partículas o que justifica seu estudo com base na teoria das probabilidades de um ponto de vista estatístico.

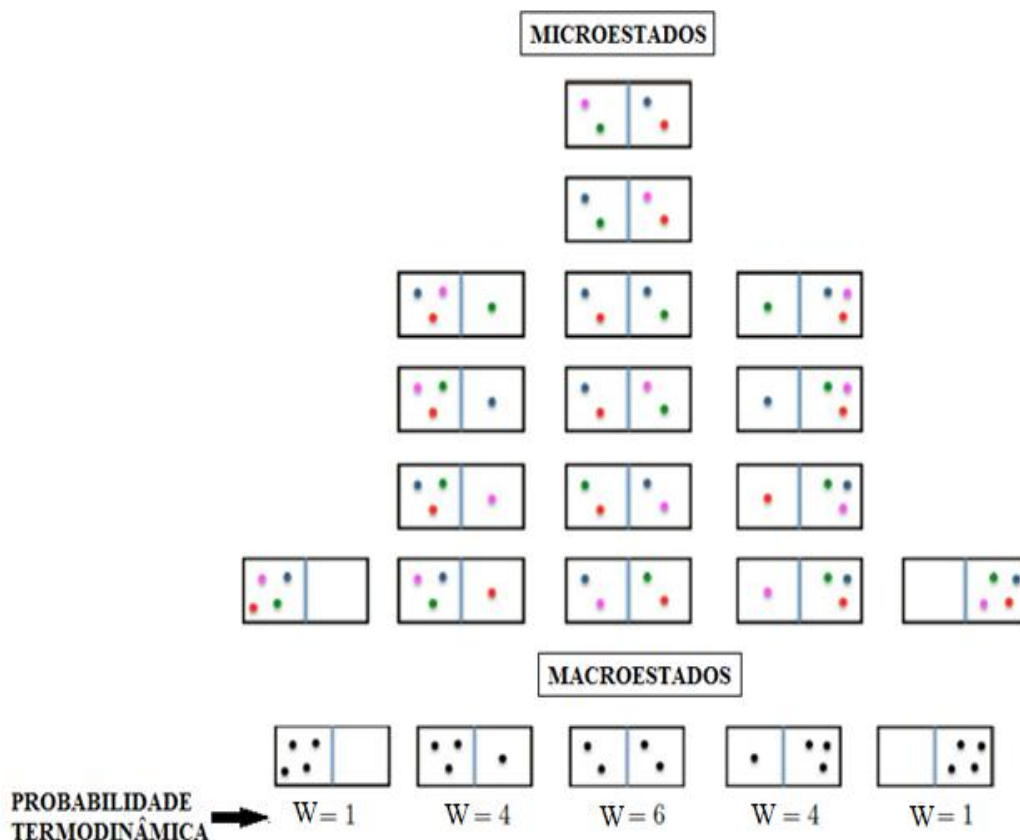
Para iniciar esta aula o professor irá fazer uma leitura dialogada dos dois últimos parágrafos do texto que consideram sistemas termodinâmicos com grandes números de partículas e a definição da entropia em um sentido probabilístico conforme enunciado por Ludwig Boltzmann. Feito isso, o professor irá apresentar a seguinte situação desencadeadora para a turma.

Pelo que acabamos de ler, há alguma diferença entre o conceito de entropia proposto por Boltzmann e o de Clausius? Caso sim, cite-a?

Este primeiro momento da aula tem o objetivo de diagnosticar que percepção os alunos obtiveram da leitura dos parágrafos indicados se comparados com o conceito de entropia que eles apreenderam anteriormente. Concluído este momento, o professor deverá questionar a turma se há alguma palavra lida que é nova e/ou não compreendem seu significado físico. A experiência mostra que, em geral, aparecem respostas como: arranjos espaciais, energias das partículas, estados microscópicos, estados macroscópicos e peso estatístico ou probabilidade termodinâmica, sendo as mais comuns às quatro últimas.

Desta forma, faz-se necessário o professor esclarecer tais conceitos. Para tanto, o mesmo deverá explorá-los através da Figura 6, onde há um sistema formado por quatro partículas de diferentes cores. *Vejamos de quantas maneiras distintas se podem distribuí-las entre as duas metades deste volume.* Este seria um dos primeiros problemas a ser lançado para a turma.

Figura 6 – Síntese – Microestado, macroestado e probabilidade termodinâmica



Fonte: Adaptado de MOURA; AGUIAR, 2016.

A resposta seria dezesseis, conforme representado na figura acima.

Em seguida o professor deve explicar que, nesta figura, cada uma das configurações é denominada microestado. Portanto, ao sistema constituído por quatro partículas correspondem dezesseis microestados possíveis. Os macroestados são caracterizados pela quantidade de partículas em cada uma das metades do volume. Assim, há o macroestado no qual na metade esquerda do volume há uma partícula e na metade direita três partículas. A esse macroestado correspondem quatro microestados. E, conseqüentemente, a probabilidade matemática de se realizar esse macroestado será de $4/16$. Ao macroestado no qual há a mesma quantidade (duas) de partículas em ambas as partes do volume correspondem seis microestados, e sua probabilidade matemática será igual a $6/16$. O número de microestados através dos quais se pode realizar um determinado estado macroscópico se denomina peso estatístico ou probabilidade termodinâmica (W). E, como se pode inferir dos exemplos anteriormente analisados, quanto maior for o peso estatístico maior será a probabilidade matemática desse

estado macroscópico. Isso pressupõe que a probabilidade de todos os microestados é a mesma.

A probabilidade do estado no qual todas as partículas se encontram em uma das metades do volume, no caso do sistema constituídos por 4 partículas, é bastante grande ($2/16$) se comparada, por exemplo, o número de partículas característico dos sistemas macroscópicos: o número de Avogadro: $6,02 \cdot 10^{23}$. Nesse caso a probabilidade desse macroestado é praticamente zero: $2/2^{6,02 \cdot 10^{23}}$, mas ainda sim existente.

Na tentativa de verificar se os alunos compreenderam o explicado acima, o professor deverá questioná-los da seguinte forma:

Quais os estados termodinâmicos menos prováveis de acontecer na Figura 6? Por quê?

Quais os estados termodinâmicos mais prováveis de acontecer na Figura 6? Por quê?

Ao analisa-la, vê-se que os estados menos prováveis são aqueles representados por $W = 1$ e o mais provável, aquele com $W = 6$. É de extrema importância que o professor deixe claro que muito embora os macroestados de menor probabilidade termodinâmica tenham, a eles associados, apenas um microestado e ao de maior probabilidade termodinâmica seis microestados, isso não quer dizer que os primeiros não ocorram. Eles são apenas menos prováveis de acontecerem.

Com base no anteriormente exposto poderemos considerar a probabilidade termodinâmica como a grandeza física que indica a direção em que acontecem os fenômenos na natureza e, conseqüentemente, dar uma interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica diretamente através dela.

Deste modo, o professor deverá destacar que a probabilidade termodinâmica (W) resulta do produto de suas componentes espaciais W_{esp} por suas componentes de velocidades W_{vel} . Assim sendo, se definimos a entropia como o logaritmo neperiano da probabilidade termodinâmica, ela será uma grandeza aditiva. Isso quer dizer que no caso de um sistema formado por dois subsistemas A e B, conforme vimos na aula anterior - Figura 3, a

probabilidade termodinâmica do sistema será igual ao produto das probabilidades termodinâmicas dos subsistemas:

$$W_{\text{sist.}} = W_A \cdot W_B \Rightarrow \ln W_{\text{sist.}} = \ln W_A \cdot W_B$$

$$\ln W_{\text{sist.}} = \ln W_A + \ln W_B$$

Ao multiplicar ambos os lados da equação acima pela constante de Boltzman, obtemos que a entropia do sistema é igual à soma das entropias dos subsistemas:

$$K \cdot \ln W_{\text{sist.}} = K \cdot \ln W_A + K \cdot \ln W_B \quad \text{ou} \quad S_{\text{sist.}} = K \cdot \ln(W_A \cdot W_B) \quad (9)$$

Como, segundo Boltzmann a entropia é definida como sendo:

$$S = K \cdot \ln W \quad (10)$$

Logo:

$$S_{\text{sist.}} = S_A + S_B$$

Algumas vezes a entropia é comparada a desordem, é importante perceber que tal palavra, ao ser utilizado, não é previamente conceituada. Utiliza-se esta metáfora, talvez, pelo fato de quanto mais maneiras (microestados) diferentes se tem para configurar (não organizar) um sistema, maior será a probabilidade termodinâmica do mesmo e conseqüentemente maior será sua entropia.

Esta metáfora tem suas limitações. Por exemplo: Se pegarmos dois copo com água. Um é deixado sobre a mesa e o outro leva ao congelador. Depois de congelada, este gelo é triturado e lançado ao chão. Comparando a entropia do gelo triturado no chão com da água no copo sobre a mesa, se considerarmos esta ideia de desordem, será inferido que a entropia formada pelos pedaços de gelo é maior que a da água. No entanto é o contrário.

Outra limitação desta metáfora é o fato dela ser sempre utilizada com um número de corpos considerados muito pequeno, quando comparado ao número de partículas que constituem os corpos macroscópicos. Isso praticamente invalida o tratamento estatístico da situação.

Explicado isso, o professor solicitará que os alunos verifiquem se essa metáfora aparece no livro adotado pela escola para corroborar sua crítica. Para encerrar esta crítica, o professor deverá referenciar o artigo de Einstein (1905), intitulado “*Sobre o movimento de pequenas partículas em suspensão dentro de líquidos em repouso, tal como exigido pela teoria cinético-molecular do calor*”, no qual sugere a possibilidade do não cumprimento da segunda lei da termodinâmica no movimento browniano.

Dito isto, em seguida o professor fará uma análise, do ponto de vista estatístico, da variação da entropia no processo de estabelecimento do equilíbrio termodinâmico. Para tanto, ele desenvolverá o seguinte raciocínio na lousa.

Na aula cinco, foi visto com base nas ideias de Clausius, que a variação da entropia no processo de estabelecimento do equilíbrio térmico é dada pela equação (7) que mostra o aumento da entropia ($\Delta S_{AB} > 0$), uma vez que T_A é maior que T_B .

Continuando a aula o professor irá calcular a variação da entropia utilizando as formulações de Clausius e de Boltzmann, visando refletir sobre os limites de validade da segunda lei da termodinâmica. Para tanto, segue o seguinte desenvolvimento inicial conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Entropia de Clausius e Boltzmann

Clausius	Boltzmann
$\Delta S_{AB} = \Delta Q (T_A - T_B / T_B T_A)$ (8)	$S_{sist} = K \cdot \ln(W_A / W_B)$ (9)

Fonte: Autoria própria, 2016.

Considerando o exposto acima, igualando a variação da entropia calculada segundo Clausius e Boltzmann, temos:

$$\Delta Q (T_A - T_B / T_B T_A) = K \cdot \ln (W_B / W_A)$$

$$(\Delta Q / K) (T_A - T_B / T_B T_A) = \ln (W_B / W_A)$$

$$e^{(\Delta Q / K) (T_A - T_B / T_B T_A)} = e^{\ln (W_B / W_A)}$$

$$W_B / W_A = e^{(\Delta Q / K) (T_A - T_B / T_B T_A)} \quad (11)$$

A partir desta equação o professor deverá inferir limites de validade para a segunda lei da termodinâmica. Neste sentido, ele desenvolverá dois exemplos que seguem abaixo.

Situação 1: Determinado sistema termodinâmico, a atingir seu equilíbrio térmico, possui um corpo A a 301k e outro B a 300k. Supondo, que a variação da quantidade de calor seja de 10^7 J. Calcule a razão entre as probabilidades termodinâmicas deste sistema.

$$W_B/W_A = e^{(\Delta Q/K) (T_A - T_B / T_B T_A)}$$

$$W_B/W_A = e^{(10(\exp.(-7)) / 1,38.10(\exp.(-23))) (301 - 300 / 301.300)}$$

$$W_B/W_A \cong e^{10 (\exp.12)}$$

Este resultado mostra uma probabilidade ínfima (mas existente) de ocorrência do fluxo de calor ser transferido do corpo com menor temperatura para o de maior temperatura. Vê-se que há $2,7^{1.000.000.000.000}$ casos de transferência de 10^7 J do corpo com temperatura de 301 K para o corpo com temperatura de 300 K corresponde apenas um caso de transferência da mesma quantidade de calor do corpo com 300 K para o corpo com temperatura de 301 K. Por esta razão, o que para Clausius era impossível - a transferência de calor do corpo frio para o quente -, para Boltzman não era, mas sim, de uma probabilidade praticamente zero de acontecer, o que conceitualmente não é a mesma coisa.

Concluindo este exemplo, o professor deverá mostra outro exemplo, mas agora considerando um sistema com muito menos quantidade de calor se comparado ao anterior. Vejamos.

Situação 2: Determinado sistema termodinâmico, a atingir seu equilíbrio térmico, possui um corpo A a 301k e outro B a 300k, supondo que a variação da quantidade de calor seja de 12.10^{-19} J. Calcule a razão entre as probabilidades termodinâmicas deste sistema.

$$W_B/W_A = e^{(\Delta Q/K) (T_A - T_B / T_B T_A)}$$

$$W_B/W_A = e^{(12.10(\exp.(-19)) / 1,38.10(\exp.(-23))) (301 - 300 / 301.300)}$$

$$W_B/W_A = e^{9,559.10(\exp.(-1))}$$

$$W_B/W_A \cong e^1$$

$$W_B/W_A = 2,71$$

Este resultado nos mostra que, aproximadamente a cada três casos de transferência de $12 \cdot 10^{-19}$ J do corpo mais quente para o mais frio corresponde um caso de transferência dessa mesma quantidade de calor do mais frio para o mais quente. Assim, chegamos à conclusão de que a segunda lei da termodinâmica é eminentemente estatística. Para sistemas envolvendo pequenas quantidades de calor e, portanto, formados por um número pequeno de partículas ela não se aplica. No exemplo que acabamos de apresentar o valor de $12 \cdot 10^{-19}$ J de energia é aproximadamente igual à adquirida por um elétron numa diferença de potencial de 10 V.

O professor poderá ainda tecer breves comentários sobre a terceira lei da termodinâmica que estabelece que quando o sistema se aproxima da temperatura do zero absoluto, sua entropia tem um valor mínimo, $S = 0$ K/J. Esta lei harmoniza com a ideia de que o estado termodinâmico que corresponde ao zero absoluto se realiza de uma única forma ou, em outras palavras, sua probabilidade termodinâmica é igual a 1 (um), como $\ln 1 = 0$, consequentemente $S = 0$ J/K. Relatamos ainda que este assunto raramente é tratado nos livros didáticos da Educação Básica. Feito este discurso, os alunos afirmaram terem compreendido a ideia de entropia mínima, de Nernst, uma vez que a mesma não contradiz o raciocínio baseado nas relações anteriormente vistas sobre entropia.

Para fechar esta aula o professor deverá entregar a cada aluno a atividade abaixo (Apêndice D). Serão dados 8 minutos para os alunos realizarem esta tarefa. O objetivo da mesma é aplicar/contextualizar e sintetizar principalmente alguns conceitos desenvolvidos nesta aula, mas também em aulas anteriores.

Considerando os conceitos já vistos como de Teoria cinético molecular (TCM), Segunda lei da termodinâmica, entropia, processos reversíveis e irreversíveis; preencha as lacunas que seguem no texto abaixo e faça a crítica solicitada no último parágrafo.

Kara e os processos reversível e irreversível

Imagine uma garotinha chamada Kara brincando em cima da cama com o estojo de maquiagem e perfumes de sua mãe e, sem querer, realiza o trabalho de entornar o perfume de melhor fragrância que rapidamente difunde, por todo o quarto, seu aroma. Este é considerado um processo _____ (reversível ou irreversível), pois a probabilidade de todas as

moléculas gasosas difundidas em suspensão no ar do quarto voltarem a ser líquidas e serem postas novamente no frasco é _____ (zero ou praticamente zero) por cento, uma vez que o sistema _____ (dispõe ou não dispõe) de energia para realizar tal trabalho, assim pode-se dizer que a entropia deste sistema _____ (aumentou ou diminuiu).

Agora, se a Kara realiza o trabalho entornar o estojo de maquiagem espalhando pelo chão e cama os lápis, batom, blush, rímel, delineador e corretivo, ela _____ (dispõe ou não dispõe) de energia para realizar o trabalho de por todos os objetos novamente em seus lugares, caracterizando um processo _____ (irreversível ou reversível), escapando assim de uma possível punição por sua traquinagem, o que seria _____ (possível ou impossível) no primeiro caso. Logo a entropia, neste caso, teria _____ (aumentado, diminuído ou inalterado).

Considerando a TCM e o conceito de entropia, critique o que poderia estar errado no segundo parágrafo, uma vez comparado ao primeiro. **Dica:** lembre-se de considerar a entropia em um sentido não macroscópico.

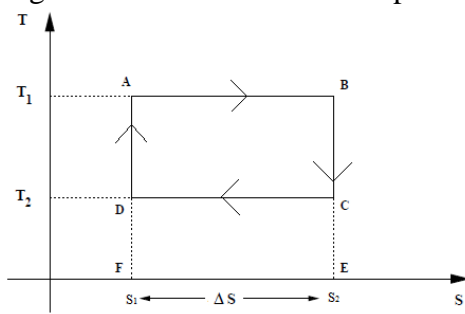
Após os alunos entregarem a avaliação, o professor deverá proceder à correção da mesma, discutindo cada item. Assim os alunos poderão verificar e discutir suas respostas.

Sétima aula: O plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS. Cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos.

Considerando que na aula de número cinco foi visto o cálculo da entropia em processos irreversíveis a partir de processos reversíveis representados no plano termodinâmico de pressão e volume (PV), nesta aula pretende-se significar a entropia em processos tecnológicos, mostrando a praticidade em se utilizar outro plano termodinâmico: de temperatura e entropia (TS).

Neste sentido, o professor deverá mostrar aos alunos o ciclo de Carnot no plano TS representado pela Figura 7.

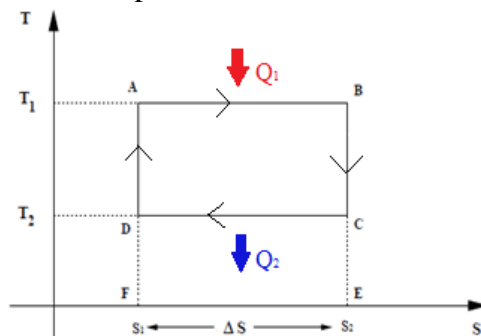
Figura 7 – Ciclo de Carnot no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

O professor deverá detalhar mais o gráfico da figura acima de modo que o mesmo venha indicar, conforme Figura 8 abaixo, a quantidade de calor fornecida pela fonte quente do sistema (parte superior) e a quantidade de calor cedida à fonte fria (parte inferior do gráfico).

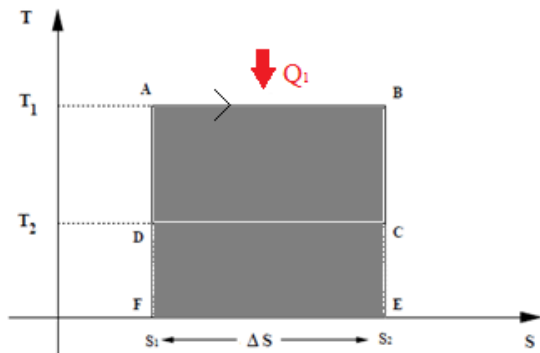
Figura 8 – Representação das fontes de calor no ciclo de Carnot no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Assim, o professor poderá mostrar, conforme Figura 9, que a área da figura regular limitada pelo contorno ABEFA é numericamente igual à quantidade de calor fornecida pela fonte quente, Q_1 , e a área da figura limitada pelo contorno DCEFD é igual à quantidade de calor cedida à fonte fria, Q_2 , conforme Figura 10.

Figura 9 – Representação da área da quantidade de calor da fonte quente



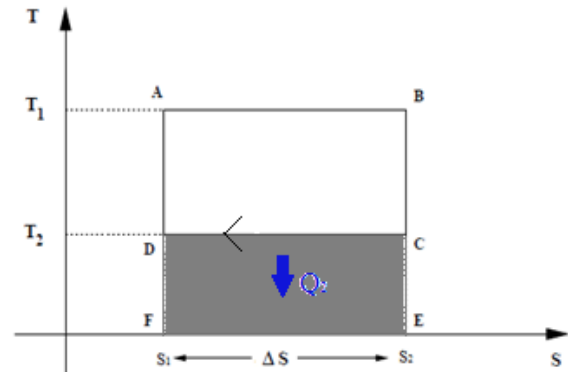
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

$$A_{\text{retângulo}} = \text{Base} \cdot \text{altura}$$

$$Q_1 = (S_2 - S_1) \cdot T_1$$

$$\text{Equivalente a } \Delta S = Q/T$$

Figura 10 – Representação da área da quantidade de calor da fonte fria



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

$$A_{\text{retângulo}} = \text{Base} \cdot \text{altura}$$

$$Q_2 = (S_2 - S_1) \cdot T_2$$

$$\text{Equivalente a } \Delta S = Q/T$$

Da aula de número dois sabe-se que $\eta = W / Q_1$ e da aula de número três temos que $W = Q_1 - Q_2$, logo:

$$\eta = [T_1 (S_2 - S_1) - T_2 (S_2 - S_1)] / T_1 (S_2 - S_1)$$

$$\eta = (T_1 - T_2) (S_2 - S_1) / T_1 (S_2 - S_1)$$

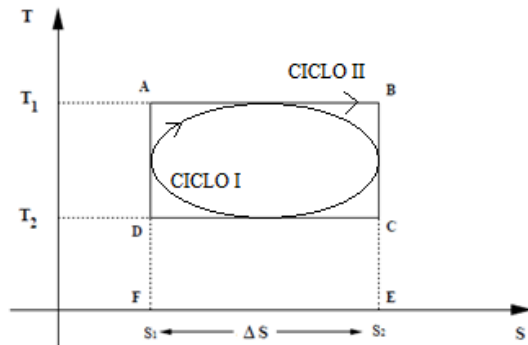
$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1$$

$$\eta = 1 - T_2 / T_1 \quad (12)$$

Este é o rendimento da máquina térmica de Carnot, o maior possível a ser atingido por qualquer máquina que opere em um ciclo entre dois reservatórios de calor com temperaturas T_1 e T_2 . O ciclo de Carnot, representado no plano TS é mais fácil de trabalhar já que, em cada etapa (duas isotermas e duas adiabáticas) uma de suas variáveis se mantém constante e o cálculo de seu rendimento não depende da substância de trabalho utilizada no ciclo.

Outra forma de visualizar o mesmo resultado é analisando a Figura 11 que trás o ciclo de Carnot e um ciclo qualquer, ambos no plano TS.

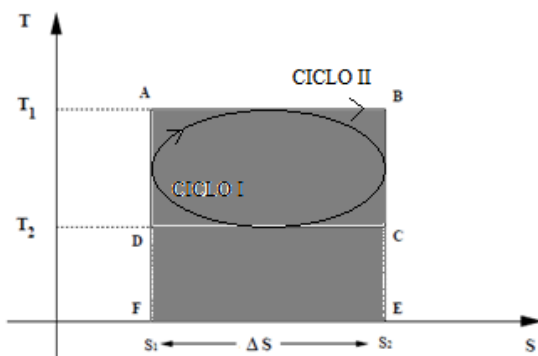
Figura 11 – Ciclo de Carnot e ciclo genérico no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

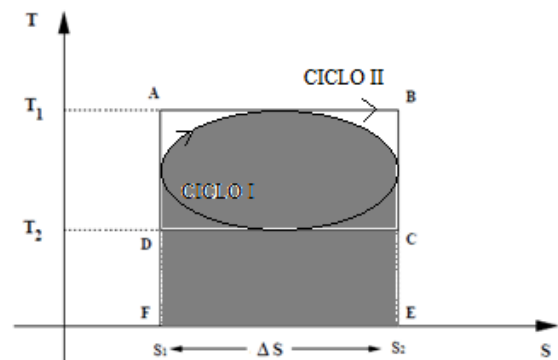
Ao comparar o rendimento dos dois ciclos, com uma breve inspeção visual, ver-se que o rendimento do ciclo II (Carnot) tem maior rendimento que o ciclo I (qualquer). Este resultado pode ser inferido apenas comparando suas áreas e aplicado ao conceito de rendimento, $\eta = W / Q_1$. Sabemos que o trabalho será a diferença de áreas das quantidades de calor de cada ciclo (conforme visto anteriormente). Assim, através da análise da Figura 12 e Figura 13 poderemos verificar este resultado.

Figura 12 – Área formada pelo ciclo de Carnot no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Figura 13 – Área formada pelo ciclo genérico no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Por meio da expressão geral do rendimento das máquinas térmica e uma simples inspeção visual das Figuras 12 e 13, poderemos mostrar que o rendimento segundo o ciclo de

Carnot, se comparado a qualquer outro ciclo, será superior. A Figura 14 ilustra este resultado de forma não tradicional e mais intuitiva.

Figura 14 – Rendimento dos ciclos de Carnot e outro qualquer

$$\eta_{\text{CICLO II}} = \frac{\text{Área Destacada}}{\text{Área Total}} \quad \eta_{\text{CICLO I}} = \frac{\text{Área Destacada}}{\text{Área Total}}$$

O numerador (trabalho) é dado pela área ABCDA na Figura 16 e denominador (quantidade de calor da fonte quente) pela área destacada na mesma figura.

O numerador (trabalho) é dado pela área da elipse na Figura 17 e denominador (quantidade de calor da fonte quente) pela área destacada na mesma figura.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Pensando em fechar este momento procedemos a Figura 15, a qual compara o rendimento do ciclo II e ciclo I.

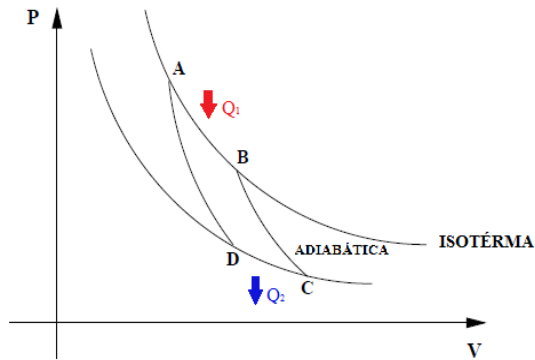
Figura 15 – Comparativa do rendimento do ciclo I e ciclo II segundo suas áreas

$$\eta_{\text{CICLO II}} = \frac{\text{Área Destacada}}{\text{Área Total}} > \frac{\text{Área Destacada}}{\text{Área Total}}$$

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Este resultado vem ratificar que a máquina operando sob o ciclo que Carnot é a que possui maior rendimento. Este resultado não poderia ser inferido tão facilmente no plano PV, representado pela Figura 16, uma vez que o mesmo trás figuras irregulares, cujas áreas só seriam possível determinar, utilizando o cálculo integral.

Figura 16 – Ciclo de Carnot no plano PV

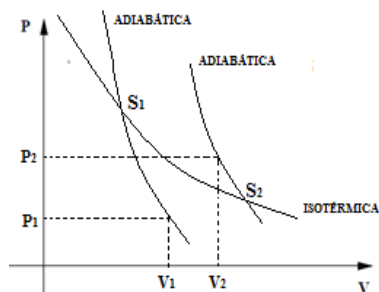


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

Neste caso, para simplificar, considerando como substância de trabalho o gás ideal, tem-se que considerar as curvas AB e CD descritas pela equação $PV = \text{constante}$ devido ser uma isotermia e as curvas BC e DA descritas, por ser adiabáticas, pela equação $PV^\gamma = \text{constante}$, onde γ é igual à razão entre os calores específicos a pressão e volume constantes. Para obter o rendimento da máquina de Carnot a partir destas informações, é necessário calcular as áreas de figuras irregulares limitadas por essas quatro curvas. E isso implica, como foi dito acima, o uso do cálculo integral.

Neste tipo de gráfico a entropia é igual em todos os pontos de cada curva adiabática, já a variação da entropia é representada pela diferença das entropias de cada adiabática cortado pela isotérmica conforme Figura 17 que segue abaixo.

Figura 17 – Variação da entropia no plano PV

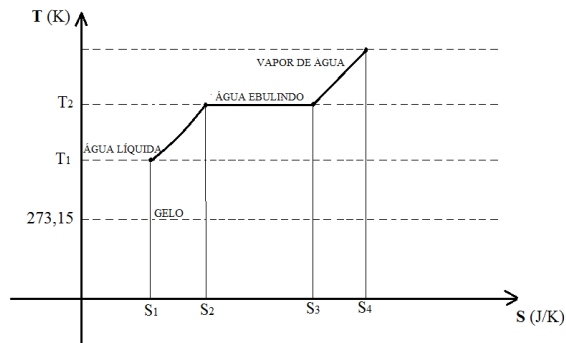


Fonte: Autoria própria, 2017.

Deste modo fica evidente a inequívoca praticidade em se trabalhar com diagramas no plano TS se comparado ao PV.

Em processos tecnológicos o conhecimento da relação entre a entropia e a temperatura é utilizado para calcular a quantidade de calor envolvida nesses processos. A Figura 18, mostra o diagrama que representa o processo de aquecimento da água e de seu vapor numa caldeira.

Figura 18 – Carta entrópica da substância água



Fonte: TELECNIN, 1973.

Conforme demonstrado anteriormente, as áreas das figuras regulares abaixo das curvas indicam a quantidade de calor necessária para obter vapor de água a determinada temperatura com fins tecnológicos. Gráficos, como o apresentado acima para a água, são chamados de cartas entrópicas das substâncias. Elas são de fundamental importância nos cálculos de instalações termo energéticas.

Oitava aula: A entropia em sistemas vivos

Nas aulas anteriores vimos aspectos fundamentais do conceito de entropia. Na sexta aula foi visto a interpretação estatística da entropia segundo Boltzmann, conseqüentemente os conceitos de microestados, macroestados e probabilidade termodinâmica e algumas limitações de aplicabilidade. Na sétima aula viu-se o cálculo da entropia em fenômenos naturais e tecnológicos, mas estes, em sistemas fechados, ou seja, em equilíbrio com o meio em que se encontra.

Nesta aula será discutida a lei do crescimento da entropia no contexto dos sistemas abertos como, por exemplo, nos seres vivos. Começaremos, dizendo que, até o momento, foi

visto que a tendência natural da entropia é a de seu aumento, mas, ao observar a evolução dos seres vivos, parece que há um não cumprimento dessa lei, haja vista que no processo de desenvolvimento da vida a tendência dominante é a criação de estruturas cada vez mais organizadas e, conseqüentemente, a diminuição da entropia.

Dito isto, o professor irá apresentar a turma o livro escrito em 1943 pelo Físico Erwin Schrödinger, ganhador do prêmio Nobel de 1933, cujo título original é “*What Is Life? & Mind and Matter*”, traduzido para o português com o título “*O que é a vida? O aspecto físico da célula viva*”. É um livro de ciência escrito para o leitor leigo, um tipo de divulgação científica da época.

O capítulo seis deste livro será utilizado como estratégia didática para desenvolvimento desta aula. Tal capítulo trata, entre outras coisas, da definição de entropia em sistemas vivos e abertos, ou seja, aspecto Físico da célula viva. Discutir esta temática implica em um trabalho interdisciplinar, pois o professor precisará de alguns conhecimentos das ciências biológicas para desenvolver esta aula. Em geral, a Física limita-se a tratar de problemas em condições específicas – sistemas isolados e em equilíbrio térmico -, nesta abordagem tais condições de contorno são rompidas ao tratarmos de sistemas que interagem com seu meio e estão em desequilíbrio térmico.

É no capítulo seis – Ordem, desordem e entropia - que o autor introduz a ideia da diminuição da entropia ou entropia negativa, além de outros conceitos que já estudamos. Para trabalhá-lo, o professor poderá distribuir cópias deste capítulo do livro para os alunos ler em pequenos grupos ou projetá-lo na lousa ou ainda, para ser mais prático, fazer a leitura dialogada apenas dos cinco trechos recortados deste capítulo que segue abaixo. Este é um momento ímpar, onde os alunos terão acesso a uma fonte primária do assunto tratando, vão ler um texto de um prêmio Nobel de Física.

“Quando um sistema não-vivo é isolado ou colocado em um ambiente uniforme, usualmente todo o movimento cessa depressa... Depois disso, todo o sistema minguava para um bloco inerte e morto de matéria. É atingido um estado permanente, no qual não ocorre nenhum evento observável. O físico dá a esse estado o nome de equilíbrio termodinâmico ou estado de "entropia máxima"... Na teoria, muito freqüentemente não se trata de equilíbrio absoluto nem verdadeiramente de entropia máxima...”

“E por evitar o rápido decaimento no estado inerte de “equilíbrio” que um organismo parece tão enigmático... Como um organismo vivo evita o decaimento? A resposta óbvia é: comendo, bebendo, respirando e (no caso das plantas) assimilando. O termo técnico é metabolismo. A palavra grega quer dizer troca ou câmbio...”

“O que é então esse algo tão precioso contido em nosso alimento, e que nos livra da morte?... tudo o que acontece na Natureza significa um aumento da entropia da parte do mundo onde acontece. Assim, um organismo vivo aumenta continuamente sua entropia - ou, como se poderia dizer, produz entropia positiva - e, assim, tende a se aproximar do perigoso estado de entropia máxima, que é a morte. Só posso me manter distante disso, isto é, vivo, através de um processo contínuo de extrair entropia negativa do ambiente, o que é algo muito positivo, como já veremos. Um organismo se alimenta, na verdade, de entropia negativa... o essencial no metabolismo é que o organismo tenha sucesso em se livrar de toda a entropia que ele não pode deixar de produzir por estar vivo.”

“... Muito mais importante para nós aqui é a relação com o conceito estatístico de ordem e desordem, relação essa que foi revelada pelas investigações de Boltzmann e Gibbs em física estatística. Essa é também uma relação quantitativa exata, expressa por

$$\text{entropia} = k \log D,$$

onde k é a constante de Boltzmann (= 3.2983,1024 cal./°C) e D uma medida quantitativa da desordem atômica do corpo em questão...A desordem que ela indica é em parte aquela devida ao movimento térmico, em parte aquela que consiste em diferentes tipos de átomos ou moléculas serem misturados ao acaso em lugar de estarem bem separados...”

Nesta passagem, em especial, o professor deverá chamar a atenção dos alunos quanto ao fato de Schrödinger ter utilizado as palavras ordem e desordem, uma vez que na aula de número seis esta ideia foi criticada. Lembrem-se que este é um livro tipo divulgação científica daquela época, é a ciência escrito para o leitor leigo, como dito anteriormente. Então seu autor buscou recursos didáticos para que pudesse transmitir sua ideia a qualquer leitor, percebam que muito embora tenha usado tais termos ele é cauteloso ao extremo deixando bem claro que esta desordem a que se refere é a nível atômico/celular e ainda o relaciona com ao movimento

térmico e não como ver se frequentemente a grande maioria dos livros tratando esta desordem a nível macroscópico.

“Como poderíamos expressar em termos da teoria estatística a maravilhosa faculdade do organismo vivo, pela qual ele atrasa o decaimento no equilíbrio termodinâmico (morte)? Dissemo-lo antes: "Ele se alimenta de entropia negativa", como se atraísse um fluxo de entropia negativa para si mesmo, afim de compensar o aumento de entropia que produz por viver e, assim, manter-se em um nível de entropia estacionário e bem baixo.

Se D é uma medida de desordem, sua recíproca, $1/D$, pode ser considerada uma medida direta de ordem. Já que o logaritmo de $1/D$ é apenas o negativo do logaritmo de D , podemos escrever a equação de Boltzmann como:

$$-(\text{entropia}) = k \log (1/D).$$

Neste momento, antes de prosseguir a leitura, o professor deverá questionar a turma sobre como chegar a esta expressão. É esperado que os alunos consigam, acompanhando o texto de Schrödinger, desenvolver o seguinte raciocínio:

Sendo a entropia = $k \cdot \log D$, onde D é a desordem, então o oposto de D é a ordem, representada por $(1/D)$, logo, se queremos definir o conceito de “entropia da ordem” vamos ter que:

$$k \cdot \log(1/D) = k (\log 1 - \log D) = k(0 - \log D) = -k \log D = -\text{entropia}$$

Assim, se pode discutir com os alunos a expressão $-(\text{entropia}) = k \log (1/D)$, que Schrödinger apresentou diretamente no seu texto.

Feito isso, o professor deverá retomar a leitura do parágrafo em questão.

Daqui, a esquisita expressão “entropia negativa” pode ser substituída por uma melhor: entropia, tomada com o sinal negativo, é ela mesma uma medida de ordem. Assim, a forma pela qual um organismo se mantém estacionário em um nível razoavelmente alto de ordem (= nível razoavelmente baixo de entropia) realmente consiste em absorver ordem de

seu meio ambiente... Na verdade, no caso de animais superiores, conhecemos bem o tipo de ordem da qual se sustentam, ou seja, o estado extremamente bem ordenado da matéria em compostos orgânicos mais ou menos complexos que lhes servem de alimento. Depois de utilizá-lo, devolvem-no em uma forma muito degradada - não inteiramente degradada, todavia, pois plantas ainda podem usá-lo. (Estas, é claro, têm na luz solar seu fornecimento mais potente de “entropia negativa).”

Durante a leitura destes fragmentos do texto de Schrödinger o professor deverá se preocupar em saber se os alunos estão conseguindo dar-lhe significados. A situação de aprendizagem criada com base nessa leitura dialogada propicia o desenvolvimento de competências como as declaradas no PCNEM e PCN+ no eixo códigos e linguagens.

Ao concluir esta reflexão o professor deverá citar outros exemplos de entropia negativa, como os que seguem abaixo, e em seguida solicitar à turma que verbalizem outros exemplos.

Ao plantar sementes, dias depois, após as mesmas serem cultivadas e receber luz solar, serão vegetais, sistemas biológicos mais desenvolvidos que o conjunto de moléculas original (sementes), ou seja, a entropia associada a estas moléculas que viraram plantas diminuiu, mas para que isso tenha acontecido à entropia de outra coisa tem que ter aumentado, neste caso foi à entropia do ambiente em que a planta está sendo cultivada. Assim, novamente a entropia total, que é formada pelos subsistemas sementes e ambiente, tende a aumentar.

Constantemente estamos tentando baixar a entropia que nosso corpo produz diariamente a mediada nos mantemos vivos (envelhecemos). Fazemos isso consumindo matéria que possui baixa entropia (como citado no exemplo anterior – vegetais, frutas e outras). Assim, baixamos nossa entropia à custa do aumento da entropia do meio ambiente que nos proporciona tais alimentos, logo podemos afirmar que a entropia do universo (cosmo) é não decrescente.

Outro exemplo do não crescimento da entropia está no processo de formação de estrelas a partir da poeira cósmica, uma vez que inicialmente tem-se uma infinidade de partículas dispersas (poeira cósmica) que forma um astro mais complexamente desenvolvido que desencadeia várias reações em seu núcleo.

Feito isso, o professor deverá lembrar a turma que na aula de número seis chegamos a conclusão de que a entropia sempre tende a aumentar. Muito embora, tenhamos chegado a esta conclusão, ela não proíbe a diminuição da entropia de um dos subsistemas que integram o sistema total. Assim, não é errado dizer que a entropia pode diminuir, muito embora praticamente nenhum livro de Física do ensino médio tenha esta afirmação.

Nona aula: Aula integradora: construção de um mapa conceitual

Esta aula é destinada a construção de um mapa conceitual dos temas visto e discutidos no texto de apoio e desenvolvidos em sala de aula. A elaboração deste mapa será conduzida pelo professor, mas materializada pelas sistematizações de ideias/palavras-chaves apresentadas pelos alunos sobre as principais temáticas trabalhadas na sequência didática.

Para desenvolver a aula integradora com esta abordagem, é de suma importância que a turma já tenha trabalhado com este tipo de instrumento em aulas anteriores, não sendo este, seu primeiro contato com a elaboração de mapas conceituais.

O professor deverá conduzir o início da construção do mapa e, posteriormente, acompanhar o desenvolvimento deste por cada aluno. Para tanto, a turma será questionada da seguinte forma.

1. Quais os dois principais conceitos desenvolvidos na sequência didática?

Após chegar a resposta: segunda lei da termodinâmica e entropia, o professor deverá registrá-la na lousa e em seguida continuar com outros questionamentos. As respostas dos alunos serão sintetizadas e registradas no mapa em desenvolvimento na lousa. Feito isso, os alunos terão de continuar sozinhos, aplicando o mesmo raciocínio ou outro que desenvolvam, para concluir e aperfeiçoar seus mapas. Segue abaixo algumas indagações que o professor deverá utilizar para atingir seu objetivo.

2. Quais cientistas estudaram estes conceitos?

3. Como eles os definiram qualitativamente e quantitativamente?

4. Que estudos antecederam estes conceitos?

5. *O que diziam tais conceitos?*
6. *Que cientista(s) estava(m) por trás destes conceitos?*
7. *Por que estavam estudando esta(s) temática(s)?*
8. *Que implicações tais estudos tinham para a sociedade da época?*

Durante a elaboração deste mapa é importante que o professor percorra a sala, verificando o processo de produção destes mapas. Se julgar necessário, poderá fazer orientações individuais.

O apêndice E trás uma proposta deste mapa conceitual. Neste sentido, o professor, caso perceba que a turma está com muitas dificuldades na elaboração do mapa, deverá mostrar este apêndice como exemplo, facilitando assim o progresso desta atividade.

Décima aula: Aplicação do pós-teste

Esta será a última aula da aplicação deste produto educacional. A mesma é reservada para aplicação do pós-teste (Apêndice F).


O objetivo desta avaliação, associada à atividade baseada no texto intitulado “*Kara e os processos reversíveis e irreversíveis*”, a construção do mapa conceitual e a continua observação do envolvimento e desenvolvimento dos alunos nas situações de aprendizagens apresentadas é verificar a eficiência e consequente viabilidade da aplicação deste produto educacional e das estratégias de aprendizagem utilizadas.

A aplicação deste apêndice deverá ser respondida individualmente, sem consulta e, se possível, após alguns dias, uma semana, por exemplo, da última aula. Os alunos necessitam deste tempo para solidificar ainda mais os conteúdos ministrados revendo as várias situações de aprendizagem apresentadas.

Esta avaliação é constituída de dez questões subjetivas, contemplando todos os conteúdos abordados na sequência didática apresentada. Algumas delas estiveram presentes no pré-teste, voltam agora com sutis ajustes, para tentar diagnosticar a evolução conceitual dos alunos após aplicação do produto educacional. É importante lembrar professor, que estas

informações a cerca de como e quando ocorrerá a aplicação deste pós-teste deverá ser informada a turma antes desta aula, por exemplo, no final da aula nove, para que os alunos tomem ciência de como e quando será sua última avaliação.

APÊNDICE B – PRÉ-TESTE

	<p style="text-align: center;"> ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO E DA CULTURA – SEEC SUBCOORDENADORA DE EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS – SUEJA CENTRO DE EDUCAÇÃO JOVENS E ADULTOS (CEJA) PROFESSOR “ALFEDRO SIMONETTI” Dr. João Marcelino, s/n - Santo Antônio, Mossoró/RN, 59611-112 cejamossoro@bol.com.br </p>
---	---

PRÉ-TESTE

Aluno: _____

1. Ao deixar em cima de uma mesa uma xícara com café quente próxima a um copo com refrigerante gelado, conforme figura ao lado, passado algumas horas o que vai acontecer com o café? E com o refrigerante? Como isso aconteceu?

Figura 1 – Transferência de energia



Fonte: FOGAÇA, 2016.

2. A situação acima contradiz a 1ª lei da termodinâmica ($\Delta U = Q - W$)? Justifique sua resposta.

3. Você acha que a situação descrita no item 1, naturalmente, poderá retornar ao seu estado inicial, ou seja, você acha que naturalmente, após horas próximos um ao outro, em algum momento o café poderá voltar a ser quente e o refrigerante gelado? Comente sua resposta?

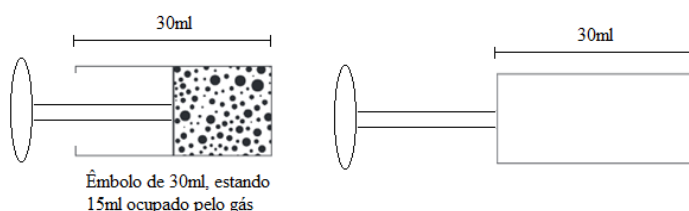
4. Quais dos processos abaixo você acha que depois de acontecer, NÃO poderá retornar a situação inicial e por quê? E qual deles poderá retornar a situação inicial e como isso acontece?

- a) Gelo que se funde em ambiente hermético e em seguida solidifica-se
- b) Ovo sendo frito
- c) Animal em decomposição

d) Esticar objeto de borracha em seguida soltar

5. Imagine a seguinte situação: você possui uma seringa de 30 ml com metade dela ocupada por um gás conforme primeira figura abaixo, daí você puxa o êmbolo até o limite (30 ml), conforme última figura abaixo. Como você acha que o gás ficará distribuído quando você puxar o êmbolo. Preencha a última figura para representar seu pensamento nesta situação e justifique sua resposta.

Figura 2 – Seringa de 30ml com gás



Fonte: Autoria própria, 2016.

6. Ao utilizar seu carro, motocicleta, ventilador, computador, celular ou mesmo geladeira você percebe se estes aparelhos esquentam, mesmo que pouco? Alguns esquentam mais que outros? Isso tem alguma relação com a 2ª lei da termodinâmica? Caso sim, qual a relação?

7. Você acha que toda energia elétrica, por exemplo, que um ventilador, ar condicionado, geladeira consomem é utilizada ou convertida totalmente só para, no caso do ventilador girar as elicies, do ar condicionado, refrigerar o ambiente e da geladeira refrigerar o interior da mesma? Justifique sua resposta?

APÊNDICE C – TEXTO DE APOIO

A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA

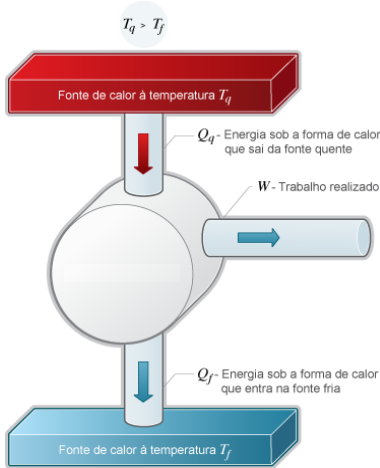
Por Tiago Martins Moura

As máquinas térmicas desempenharam papel fundamental na revolução industrial, período no qual a produção artesanal perde espaço para produção mecanizada: mais rápida, barata, padronizada e capaz de transportar grandes volumes, atendendo assim, as necessidades econômicas e sociais do século XVIII.

Na Inglaterra, por exemplo, a substituição da madeira pelo carvão, como fonte de energia, exigiu a obtenção deste em minas cada vez mais profundas e, conseqüentemente, resolver o problema da inundação destas. Essa necessidade influenciou a invenção das máquinas térmicas como a de Thomas Savery, Thomas Newcomen e James Watt, dentre outras. Porém, tais máquinas foram construídas sem dispor de uma sistematizada fundamentação teórica sobre o calor. Isso incentivou cientistas, daquela época, a estudar o funcionamento das máquinas térmicas, para: *i)* aumentar sua eficiência e *ii)* determinar qual o máximo rendimento que elas poderiam alcançar.

Neste sentido, destaca-se o Físico, Matemático e Engenheiro Francês Nicolas Léonard Sadi Carnot ao publicar seu livro intitulado *“Reflexões sobre potência motriz do fogo e sobre as máquinas adequadas ao desenvolvimento dessa potência”*. Nesta obra, Carnot demonstrou que a máquina, ao expandir sua substância de trabalho no reservatório quente e posterior resfriamento, no reservatório frio, produz certos movimentos que podem ser aproveitados para realizar determinadas tarefas (trabalho), sendo impossível não haver perdas neste processo cíclico. Este era o princípio de funcionamento da máquina térmica, representado na Figura 1.

Figura 1 – Máquina térmica

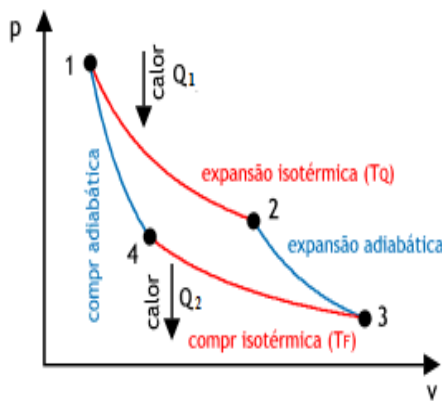


Fonte: GADELHA, 2014.

Logo, para Carnot, há uma semelhança entre o funcionamento das máquinas térmicas e as hidráulicas. Nestas, a diferença de altura (desnível), entre dois pontos, possibilita à queda d’água realizar o trabalho de girar uma roda ou, nos dias de hoje, um gerador de hidroelétrica. Enquanto que naquelas, é a diferença de temperatura entre os reservatórios quente e frio que possibilita a realização de trabalho.

Carnot demonstrou que o rendimento de uma máquina térmica ideal que funcionasse segundo o ciclo por ele proposto, constituído de duas isotermas e duas adiabáticas é o máximo possível e não depende da substância de trabalhoutilizada, mas somente das temperaturas dos reservatórios quente e frio. Na Figura 2 é apresentado o ciclo de Carnot, considerando como substância de trabalho o gás ideal. As curvas vermelhas representam as isotermas e as azuis adiabáticas. O rendimento da máquina de Carnot se calcula como sendo:

Figura 2 – Ciclo de Carnot no plano PV



Fonte: MSPC, 2008.

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1$$

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = 1 - Q_2 / Q_1 \tag{1}$$

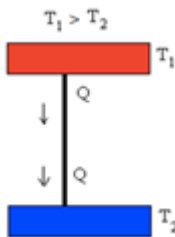
$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = W / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1$$

$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = 1 - T_2 / T_1 \tag{2}$$

Onde W é o trabalho realizado pela substância de trabalho, Q₁ o calor fornecido pela fonte quente à substância de trabalho, no caso o gás ideal, Q₂ o calor cedido pela substância de trabalho à fonte fria, T₁ e T₂ as temperaturas da fonte quente e fria respectivamente.

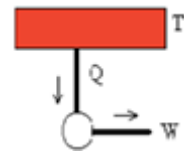
O Físico e Matemático Alemão, Rudolf Julius Emanuel Clausius, ao estudar detalhadamente os trabalhos de Carnot indicou que espontaneamente o fluxo de calor, em todos os processos naturais, segue um sentido preferencial: dos corpos mais quentes para os mais frios. Esse fluxo de calor, nas máquinas térmicas, é gerado entre os reservatórios quente e frio, ocorrendo, conseqüentemente, a realização de trabalho. A existência desta direção privilegiada dos processos espontâneos na natureza constitui uma das primeiras formulações (Figura 3) da Segunda lei da Termodinâmica. Outra formulação dessa lei é a de Kelvin-Planck, que afirma a impossibilidade de existir um processo cíclico cujo único resultado seja a transformação de todo calor absorvido Q da fonte térmica em trabalho W (Figura 4).

Figura 3 – Fluxo de calor



Fonte: Autoria própria, 2016.

Figura 4 – Motor perpetuo



Fonte: Autoria própria, 2016.

Partindo da expressão (2) do rendimento da máquina de Carnot, Clausius obteve uma grandeza física que permite indicar quantitativamente essa direção privilegiada em que acontecem espontaneamente os processos na natureza. Ele a chamou de entropia (S) que em grego significa *em transformação*. Em processos reversíveis seu valor é zero, pois trata-se uma função de estado. Combinando as expressões do rendimento de uma máquina térmica qualquer (1) e a de Carnot (2), teremos:

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = 1 - Q_2/Q_1$$

$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = 1 - T_2/T_1$$

$$\eta_{\text{máq. qualquer}} = \eta_{\text{máq. de Carnot}}$$

$$1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_2/T_1$$

$$Q_2/T_2 = Q_1/T_1 \quad (3)$$

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2 \quad (4)$$

$$S = Q/T \quad (5)$$

O sentido físico da entropia pode ser inferido a partir das seguintes considerações:

- Para que o η seja máximo, a temperatura da fonte quente deverá ser a maior possível. Neste caso, a S será mínima, como podemos inferir de (2) e (5).

- Sendo a temperatura da fonte quente à mínima possível, ocorre o inverso: o η será mínimo e S máxima, logo, haverá uma diminuição no rendimento, que se traduz na perda da possibilidade de utilizar a energia da fonte térmica para realizar trabalho, ou seja, se diz que houve uma degradação da energia. O aumento da entropia implica na diminuição da capacidade de utilizar a energia para realizar trabalho.

A entropia indica também a direção em que acontecem os fenômenos irreversíveis num sistema isolado - no sentido que a entropia aumenta. Esta afirmação será ilustrada através de um exemplo: o estabelecimento do equilíbrio térmico entre dois corpos num sistema isolado. Neste processo, tem-se um sentido preferencial do fluxo de calor conforme postulado por Clausius e esquematizado abaixo.

Figura 5 – Estabelecimento do equilíbrio térmico



Fonte: Autoria própria, 2016.

Observando a Figura 5, utilizando as considerações citas e expressão (5), teremos:

$$S_A = Q_A / T_A \quad \text{e} \quad S_B = Q_B / T_B$$

Como a quantidade de calor (Q_A) que o corpo A está transferindo é a mesma que o corpo B está recebendo (Q_B), podemos escrever que $Q_A = Q_B = Q$, e:

$$S_A = Q / T_A \quad \text{e} \quad S_B = Q / T_B \quad (6)$$

Logo a variação da entropia (ΔS_{AB}), será:

$$\Delta S_{AB} = S_B - S_A$$

$$\Delta S_{AB} = Q / T_B - Q / T_A$$

$$\Delta S_{AB} = Q (1 / T_B - 1 / T_A)$$

$$\Delta S_{AB} = Q (T_A - T_B / T_B T_A) \quad (7)$$

Como a T_A é maior que T_B , conseqüentemente $(T_A - T_B)$ é maior que zero. Portanto, no processo de estabelecimento do equilíbrio térmico a entropia aumenta.

Os sistemas termodinâmicos são constituídos por um número enorme de partículas. Isso possibilita que as grandezas físicas que caracterizam os estados desses sistemas, como a temperatura, volume, pressão e a entropia, entre outras, possam ser interpretadas, utilizando a teoria das probabilidades. No caso específico da entropia o físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann, em sua obra *"Sobre a relação entre a Segunda lei da termodinâmica e a Teoria das probabilidades, respectivamente as leis sobre o equilíbrio térmico"* conclui que as transformações que conduzem ao equilíbrio térmico, associadas ao aumento da entropia são equivalentes às transformações de um estado mais improvável (início do processo) a um estado mais provável (fim do processo – equilíbrio térmico). Para que tais transformações aconteçam é necessária uma mudança nos arranjos espaciais e das energias das partículas que formam o sistema. A quantidade desses arranjos, também chamados de estados microscópicos, que correspondem a um determinado estado macroscópico chama-se de peso estatístico ou probabilidade termodinâmica e se representa pela letra W . Com base nesse conceito Boltzmann define estatisticamente a entropia S como:

$$S = k \ln W \quad (8)$$

Onde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann.

Com base na expressão (7) a formulação da segunda lei da termodinâmica pode ser expressa da seguinte forma: todos os processos na natureza acontecem na direção em que aumenta a probabilidade do estado termodinâmico.

Para saber mais:

OLIVEIRA, P. M. C; DECHOUM, K. Facilitando a Compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 25, no. 4, Dezembro, 2003. Disponível em: < http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/v25_359.pdf>.

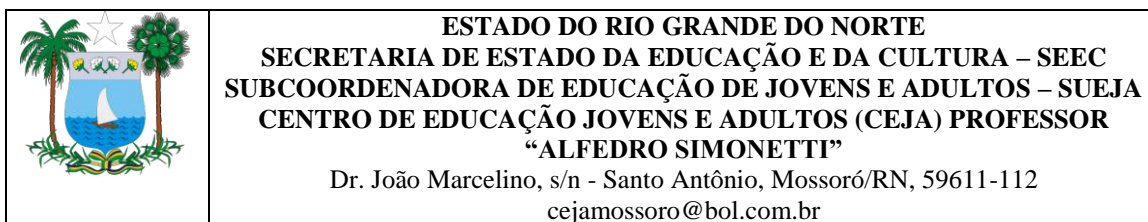
SOUZA, P. V. S.; DIAS, P.M.; SANTOS, F. M. P. Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 2, 2502 (2013). Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n2/22.pdf>>.

COVOLAN, S. C. T; SILVA, D. A entropia no ensino médio: Utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução do conceito. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 1, p. 98-117, 2005. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5274414.pdf>>.

CUNHA, J. A. R.; SANTOS, O. P.; QUEIROZ, J. R. O. O ensino de entropia com enfoque da história da ciência. *Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação e Ciências – IX ENPEC*, Novembro de 2013. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/resumos/R1522-1.pdf>>.

MONTEIRO, J. A. A.; GERMANO, J. S. E.; MONTEIRO, I. C. C.; GASPAR, A. Proposta de atividade para abordagem do conceito de entropia. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 26, n. 2: p. 367-378, ago. 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2009v26n2p367/12753>>.

APÊNDICE D – ATIVIDADE PROPOSTA COM TEXTO AUXILIAR



ATIVIDADE COM TEXTO “KARA E OS PROCESSOS REVERSÍVEL E IRREVERSÍVEL”

Aluno: _____ **NOTA** _____

Considerando os conceitos já vistos de TCM, segunda lei da termodinâmica, entropia, processos reversíveis e irreversíveis, preencha as lacunas que seguem no texto abaixo.

Kara e os processos reversível e irreversível

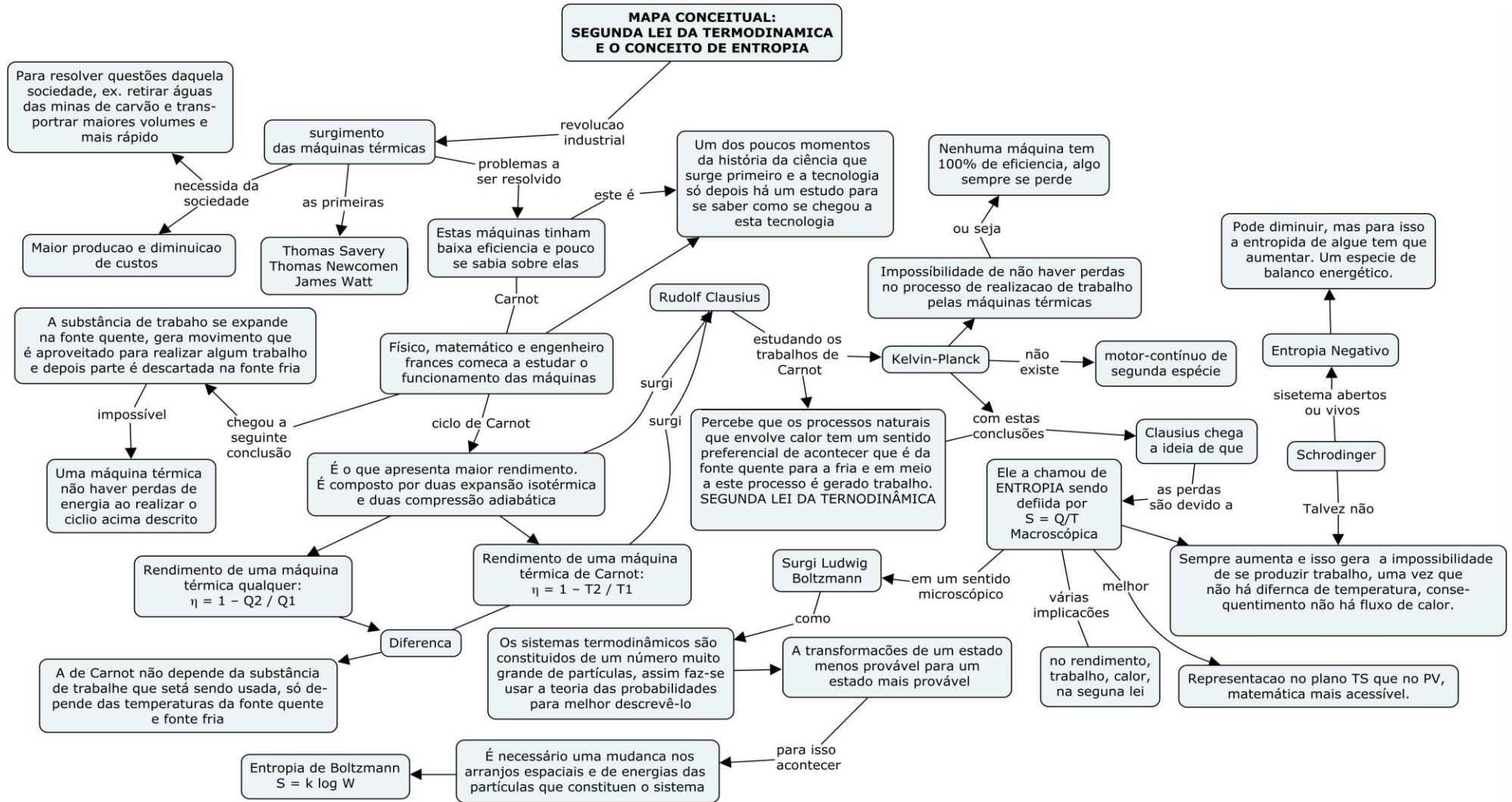
Imagine uma garotinha chama Kara brincando em cima da cama com o estojo de maquiagem e perfumes de sua mãe e, sem querer, realiza o trabalho de entornar o perfume de melhor fragrância que rapidamente difunde, por todo o quarto, seu aroma. Este é considerado um processo _____ (reversível ou irreversível), pois a probabilidade de todas as moléculas gasosas difundidas em suspensão no ar do quarto voltarem a ser líquidas e serem postas novamente no frasco é _____ (zero ou praticamente zero) por cento, uma vez que o sistema _____ (dispõe ou não dispõe) de energia para realizar tal trabalho, assim pode-se dizer que a entropia deste sistema _____ (aumentou ou diminuiu).

Agora, se a Kara realiza o trabalho entornar o estojo de maquiagem espalhando pelo chão e cama os lápis, batom, blush, rímel, delineador e corretivo, ela _____ (dispõe ou não dispõe) de energia para realizar o trabalho de por todos os objetos novamente em seus lugares, caracterizando um processo _____ (irreversível ou reversível), escapando assim de uma possível punição por sua traquinagem, o que seria


_____ (possível ou impossível) no primeiro caso. Logo a entropia, neste caso, teria _____ (aumentado, diminuído ou inalterado).

Considerando a TCM e o conceito de entropia, critique o que poderia estar errado no segundo parágrafo, uma vez comparado ao primeiro. **Dica:** lembre-se de considerar a entropia em um sentido não macroscópico.

APÊNDICE E - PROPOSTA DE MAPA CONCEITUAL A SER DESENVOLVIDO NA AULA INTREGADORA



APÊNDICE F - PÓS-TESTE

	<p>ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO E DA CULTURA – SEEC SUBCOORDENADORA DE EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS – SUEJA CENTRO DE EDUCAÇÃO JOVENS E ADULTOS (CEJA) PROFESSOR “ALFEDRO SIMONETTI” Dr. João Marcelino, s/n - Santo Antônio, Mossoró/RN, 59611-112 cejamossoro@bol.com.br</p>
---	---

PÓS-TESTE

Aluno: _____ **NOTA** _____

1. Ao deixar em cima de uma mesa uma xícara com café quente próxima a um copo com refrigerante gelado, passado algumas horas o que vai acontecer com o café? _____ . E com o refrigerante? _____ . Como isso aconteceu? _____

Figura 1 – Transferência de energia



Fonte: FOGAÇA, 2016.

2. Você acha que a situação descrita na questão 1, naturalmente, poderá retornar ao seu estado inicial, ou seja, você acha que naturalmente, após horas próximos um ao outro, em algum momento o café poderá voltar a ser quente e o refrigerante gelado? _____ . Explique sua resposta? _____

3. A situação descrita no item 1 contradiz a 1ª lei da termodinâmica ($\Delta U = Q - W$)? Justifique sua resposta. _____

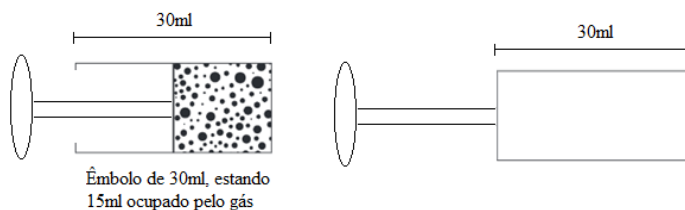
4. Quais dos processos abaixo você acha que, depois de acontecer, NÃO poderá retornar a situação inicial? _____ . Por quê? _____

E qual deles PODERÁ retornar a situação inicial?_____ . Como isso acontece?_____

- a) Queima de madeira
- b) Evaporar água em ambiente hermético e condensá-la
- c) Deformar mola em pequena variação de comprimento em seguida liberá-la
- d) Animal ou vegetal crescendo

5. Imagine a seguinte situação: você possui uma seringa de 30 ml com metade dela ocupada por um gás conforme primeira figura abaixo, daí você puxa o êmbolo até o limite (30 ml), conforme última figura abaixo. Como você acha que o gás ficará distribuído quando você puxar o êmbolo. Preencha a última figura para representar seu pensamento nesta situação e justifique sua resposta.

Figura 2 – Seringa de 30ml com gás



Fonte: Autoria própria, 2016.

6. Ao utilizar seu computador, celular ou mesmo geladeira você percebe se estes aparelhos esquentam, mesmo que pouco?_____. Isso tem alguma relação com a 2ª lei da termodinâmica?_____. Caso sim, qual a relação?_____

7. Você acha que toda energia elétrica, por exemplo, que um ventilador, ar condicionado, geladeira consomem é utilizada ou convertida totalmente só para, no caso do ventilador girar

as elicies, do ar condicionado, refrigerar o ambiente e da geladeira refrigerar o interior da mesma?_____. Justifique sua resposta? _____

_____.

8. Após estudar a entropia, como você a descreveria?_____

_____.

_____. Qual a relação entre η , T e S?_____

_____.

A entropia sempre aumenta mesmo?_____. Justifique sua resposta?_____

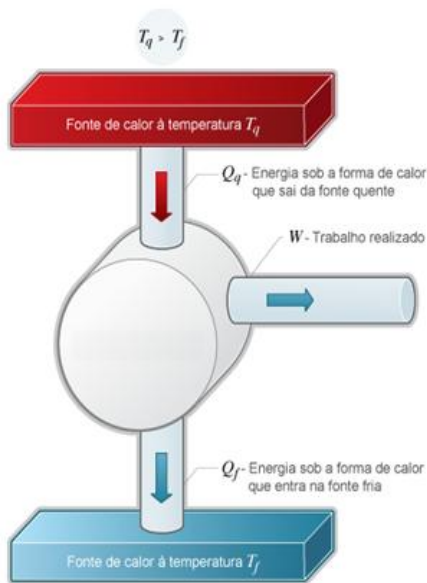
_____.

_____.

9. Sobre o funcionamento do item representado na figura abaixo:

a. A Figura 3 ao lado é a representação de:

Figura 3 - _____



Fonte: GADELHA, 2014.

b. Como funciona o item representado na figura ao lado? _____

_____.

c. Qual a condição básica para o funcionamento do item representada na figura ao lado?_____

_____.

d. É possível existir na prática um dispositivo semelhante à ao lado, mas sem ter a parte inferior (Q_f e T_f)?_____. Por que? _____


_____.

_____.

10. Vimos que para ocorrer transformações num sistema termodinâmico é necessária uma mudança nos arranjos espaciais e das energias das partículas que formam o sistema. A quantidade desses arranjos, também chamados de estados microscópicos, que correspondem a um determinado estado macroscópico chama-se probabilidade termodinâmica e se representa pela letra W . Se aumentarmos essa W o que irá acontecer com a entropia do sistema termodinâmico, conforme estabelecido por Boltzmann ($S = k \cdot \log W$)? _____ . Justifique sua resposta. _____

O que isso implicaria em que no rendimento de uma máquina? _____

APÊNDICE G - QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

	<p>ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO E DA CULTURA – SEEC SUBCOORDENADORA DE EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS – SUEJA CENTRO DE EDUCAÇÃO JOVENS E ADULTOS (CEJA) PROFESSOR “ALFEDRO SIMONETTI” Dr. João Marcelino, s/n - Santo Antônio, Mossoró/RN, 59611-112 cejamossoro@bol.com.br</p>
---	---

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

OPCIONAL - Aluno(a): _____

- 1) Antes da aplicação deste projeto você gostava de aprender Física?
- 2) Por que você acha que estudamos Física na Escola?
- 3) Você acha que a forma como foi apresentada o conteúdo nestas dez aulas pode facilitar sua compreensão?
- 4) Você acha que as situações de aprendizagem apresentadas nestas aulas a partir de situações reais ou próxima a você contribuiu para seu melhor entendimento da matéria? Agora você percebe que a Física esta mais presente em seu cotidiano? Antes destas aulas, você percebia que a Física estavam nas situações apresentadas?
- 5) Como você avalia a forma como os conteúdos segunda lei da termodinâmica e entropia forma ensinados se comparados a forma como foram ensinados os conteúdos anteriores?
 Melhor Mesma coisa Pior Outros: _____
- 6) A forma como os conteúdos segunda lei da termodinâmica e entropia forma ensinados, fez você participar mais das aulas, lhe motivou mais se comparados a forma como foram ensinados os conteúdos anteriores?
 Sim Não Parcialmente: _____

7) A forma como você foi avaliado nos conteúdos sobre a segunda lei da termodinâmica e entropia se comparados a forma que você foi avaliado nos conteúdos anteriores foi:

Melhor Mesma coisa Pior Outros: _____

8) Você preferiria que os conteúdos anteriores tivessem sido ensinados e avaliados da mesma forma que os conteúdos da segunda lei da termodinâmica e entropia?

Sim Não Parcialmente: _____

9) Agora tendo vivenciado a experiência deste projeto, sua opinião mudou em alguma coisa a cerca de sua resposta da questão de número um?

10) Este espaço é reservado para você fazer qualquer comentário a cerca destas dez ultimas aulas de Física; o que você gostaria que melhorasse, mudasse, elogio, reclamação, enfim qualquer sugestão ou observação que você queira deixar. _____
