

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

**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

© 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.
64 f. : il.

Orientador: Carlos Antonio López Ruiz.
- Universidade Federal Rural do Semi-árido, ,
2017.

1. . 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.

SUMÁRIO

Apresentação	4
A Sequência didática	6
Primeira aula: Apresentação da sequência didática. Pré-teste.....	6
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).	6
Terceira aula: O ciclo de Carnot.....	11
Quarta aula: A segunda lei da termodinâmica. Entropia.....	16
Quinta aula: A entropia em processos irreversíveis.....	20
Sexta aula: Interpretação estatística da entropia.....	25
Sétima aula: O plano termodinâmico de temperatura e entropia – TS. Cálculo da quantidade de calor em processos tecnológicos.....	32
Oitava aula: A entropia em sistemas vivos.....	38
Nona aula: Aula integradora: construção de um mapa conceitual.....	43
Décima aula: Aplicação do pós-teste.....	44
APÊNDICE A – PRÉ-TESTE	45
APÊNDICE B – TEXTO DE APOIO	47
APÊNDICE C – ATIVIDADE PROPOSTA COM O TEXTO AUXILIAR	53
APÊNDICE D – PROPOSTA DE MAPA CONCEITUAL A SER DESENVOLVIDO NA AULA INTREGADORA	55
APÊNDICE E – PÓS-TESTE	56
REFERÊNCIAS	60
PARA SABER MAIS	61

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 à 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 A). 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 respostas 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 B).

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 mundo, 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.

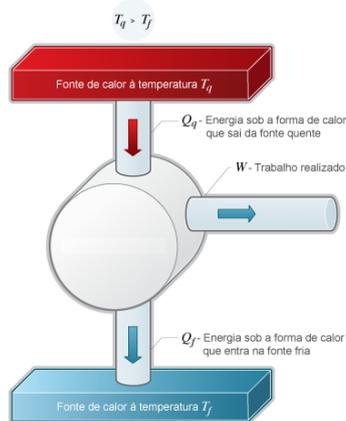
A prática vai mostrar ao professor que a imensa maioria dos alunos acreditam firmemente que primeiro surge o conhecimento científico para só depois ele ser aplicado ao desenvolvimento de tecnologias. Assim sendo, cabe ao professor criticar essa relação linear unidirecional desses dois tipos de conhecimentos.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

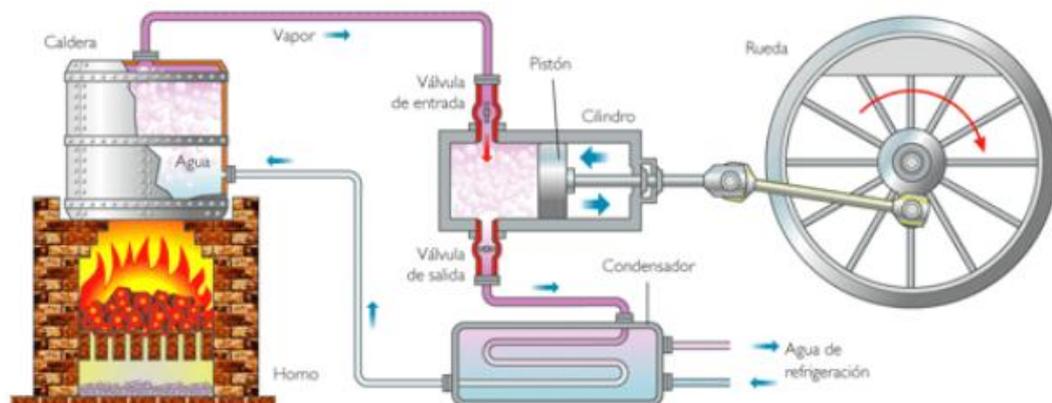
funcionamento das máquinas térmicas estavam corretas. Neste momento, é importante que o professor comente que a teoria do calórico era uma das duas teorias que, naquela época, explicava a natureza do calor. Era uma concepção materialista, segundo a qual o calor era uma substância fluída, imponderável 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.

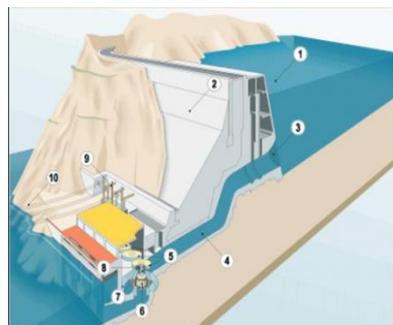
O quarto parágrafo apresenta uma analogia entre o funcionamento da máquina térmica e a máquina hidráulica. Para ampliar esta ideia, o professor irá projetar na lousa a Figura 2, que representa três diferentes recortes (2 A, 2 B e 2 C) de uma hidroelétrica, e questionar a turma conforme questões norteadoras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

Figura 2 – Esquema de funcionamento de uma hidroelétrica



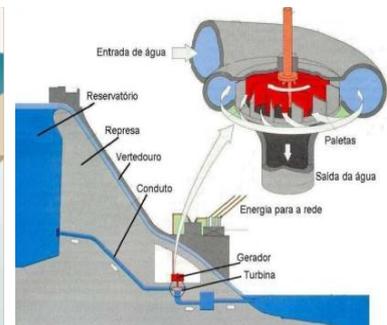
2 A

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.

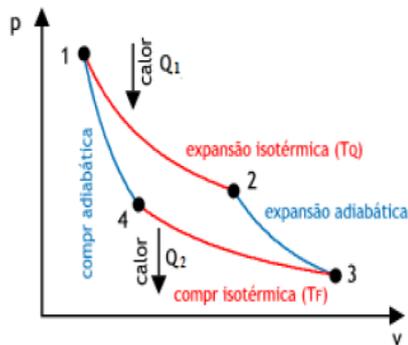
Quadro 2 – Síntese dos processos isotérmicos e adiabáticos do gás ideal

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: 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:

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

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

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 referencia 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 este 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.

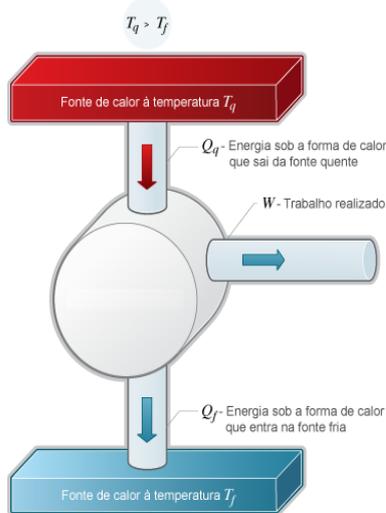
É pertinente, neste momento, contextualizar a necessidade de se criar a segunda lei da termodinâmica e conseqüentemente o conceito de entropia. Para tanto, é exposta a seguinte situação problema:

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 consequentemente como acontece o intercâmbio de energia térmica nestes processos. Esta outra lei é a segunda lei da termodinâmica.

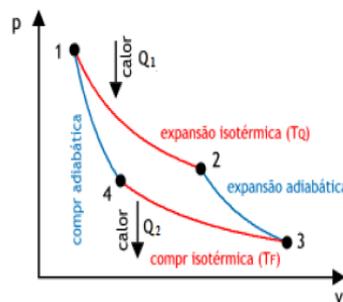
Para contribuir com o desenvolvimento da discussão acima proposta, segue abaixo uma situação de aprendizagem na qual os alunos são levados a investigar, através das quatro figuras que segue abaixo, retiradas do nosso texto de apoio, bem como dos questionamentos que o professor poderá propor a turma.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

Figura 1 – Máquina térmica



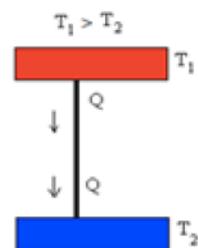
Fonte: GADELHA, 2014.

Figura 2 – Ciclo de Carnot do plano PV



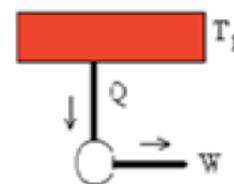
Fonte: MSPC, 2008.

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) *Analizando 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.

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

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

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

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

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

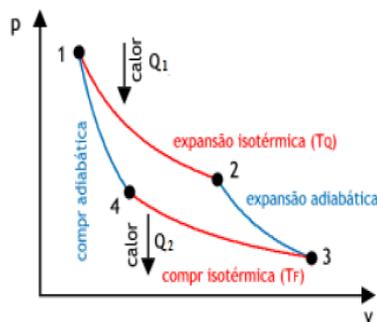
$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2 \quad (4)$$

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

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:

$$S_2 - S_1 = 0 \tag{6}$$

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:

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

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

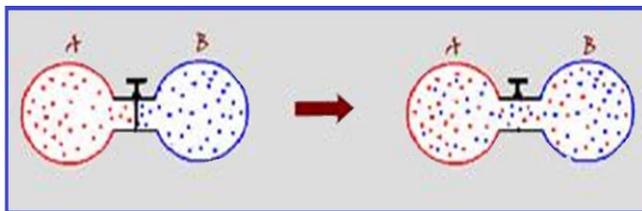
$$\Delta S_{AB} = \Delta Q (T_A - T_B) / T_B \cdot T_A \quad (8)$$

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.

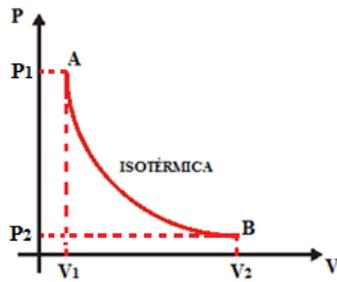
Figura 3 – Difusão gasosa



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: $Q = W$.

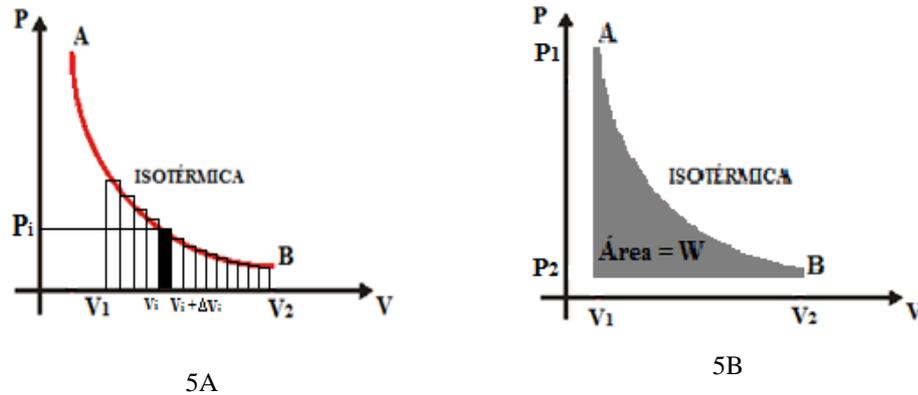
Se considerarmos partes infinitesimais da ΔV de modo a considerar sua projeção, na isoterma, sendo uma reta, neste caso, podemos considerar a pressão constante, logo podemos escrever $W_i = P\Delta V_i$.

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.

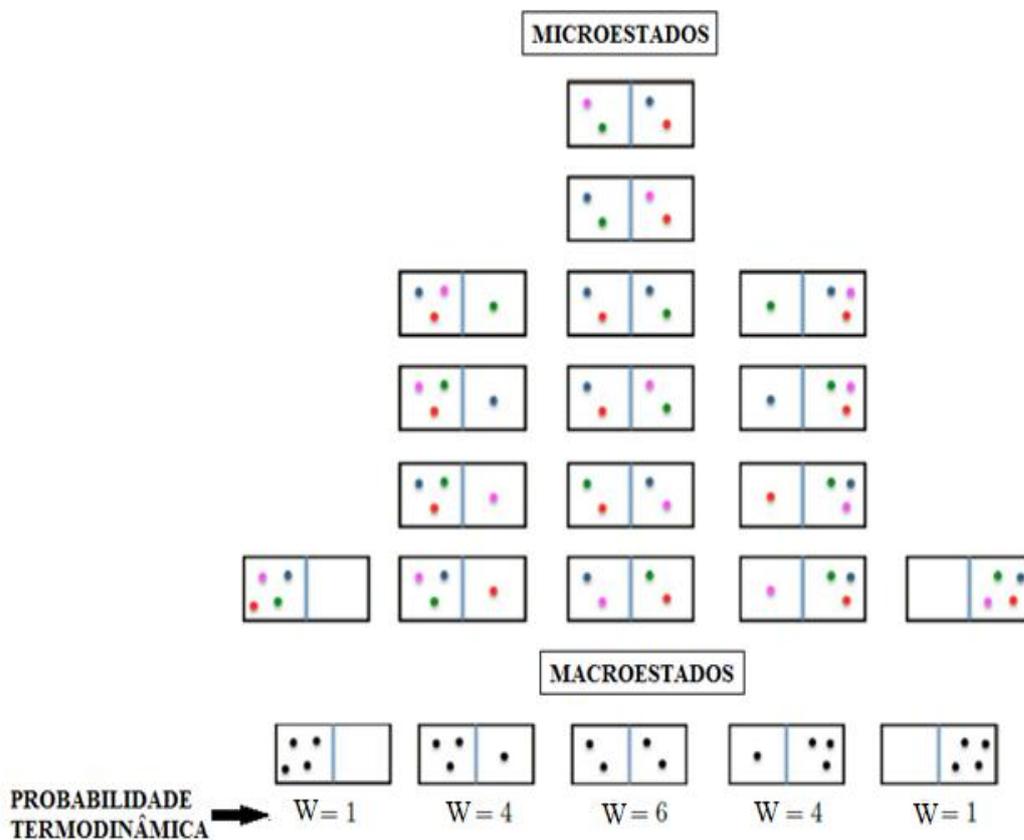
Pelo que acabamos de ler, há alguma diferença entre o conceito de entropia proposto por Boltzmann e o de Clausius? Caso sim, cite-a?

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. *Vejam 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:

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

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 Boltzman, 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	Boltzman
$\Delta S_{AB} = \Delta Q (T_A - T_B / T_B T_A)$ (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 Boltzman, 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.

Concluído 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 $\ln 1 = 0$, conseqüentemente $S = 0$ 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 C). 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.

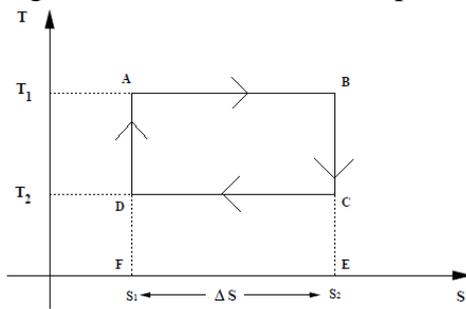
Após os alunos entregarem a avaliação, o professor deverá proceder à correção da mesma, discutindo cada item. Assim os alunos poderão verificar e discutir suas respostas.

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.

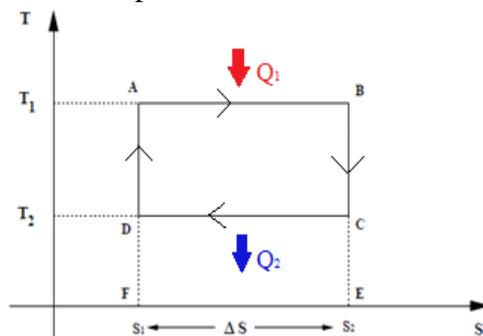
Figura 7 – Ciclo de Carnot no plano TS



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).

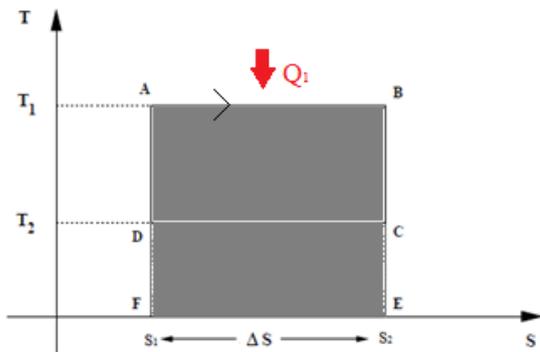
Figura 8 – Representação das fontes de calor no ciclo de Carnot no plano TS



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



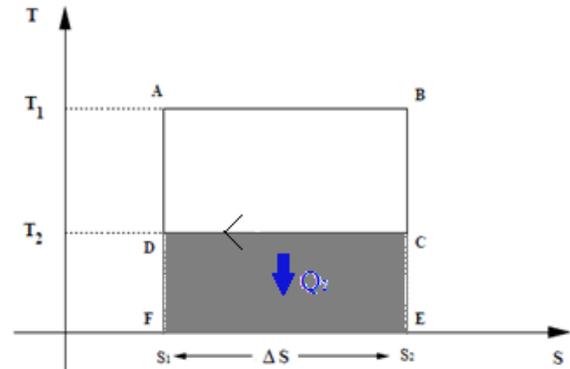
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

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

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

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

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:

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

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

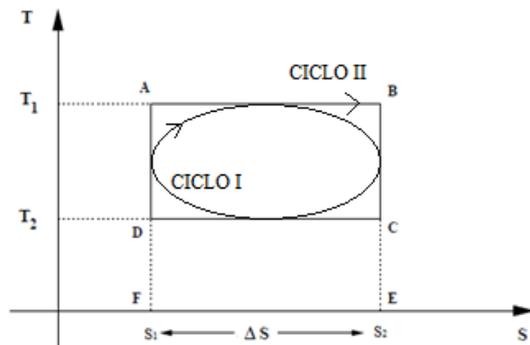
$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1$$

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

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.

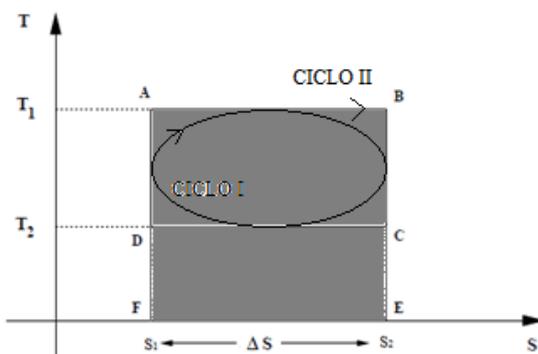
Figura 11 – Ciclo de Carnot e ciclo genérico no plano TS



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

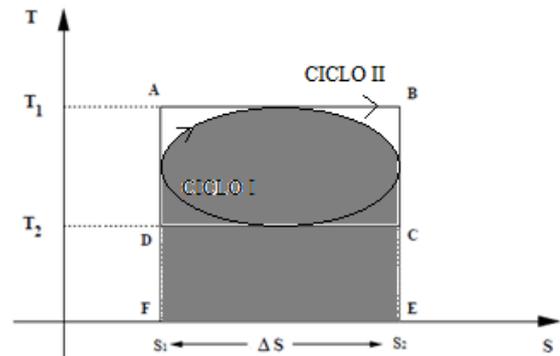
Ao comparar o rendimento dos dois ciclos, com uma breve inspeção visual, ver-se que o rendimento do ciclo II (Carnot) tem maior rendimento que o ciclo I (qualquer). Este resultado pode ser inferido apenas comparando suas áreas e aplicado ao conceito de rendimento, $\eta = W / Q_1$. Sabemos que o trabalho 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

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

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.

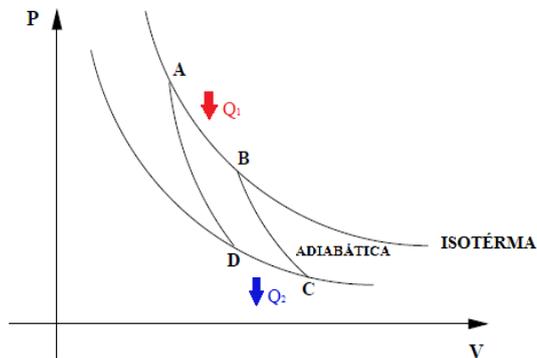
Figura 15 – Comparativa do rendimento do ciclo I e ciclo II segundo suas áreas

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

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

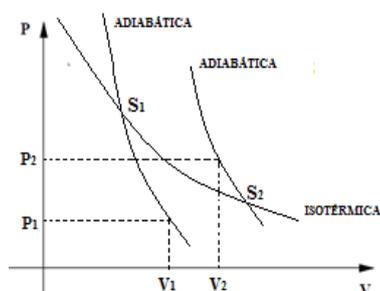


Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; DECHOUM, 2003.

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 isoterma 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

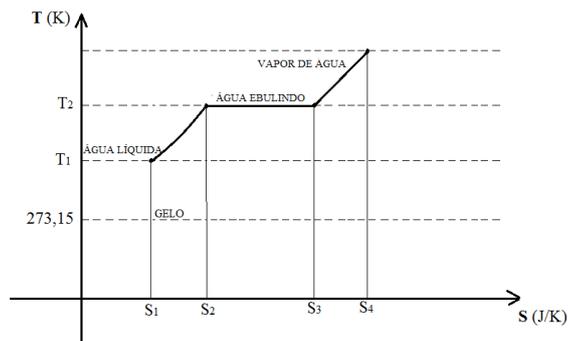


Fonte: Autoria própria, 2017.

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 míngua 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 ($= 3.2983,1024 \text{ cal.}^\circ\text{C}$) 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 se 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 D 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 E).

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 ocorrera 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 A – 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.

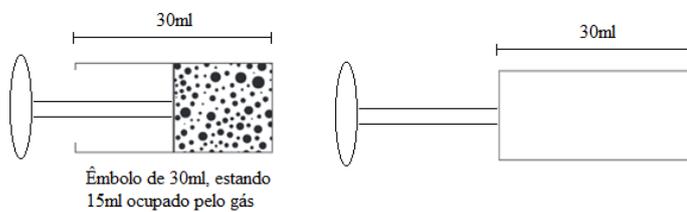
3. Você acha que a situação descrita no item 1, naturalmente, poderá retornar ao seu estado inicial, ou seja, você acha que naturalmente, após horas próximos um ao outro, em algum momento o café poderá voltar a ser quente e o refrigerante gelado? Comente sua resposta?

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 B – TEXTO DE APOIO

A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E O CONCEITO DE ENTROPIA

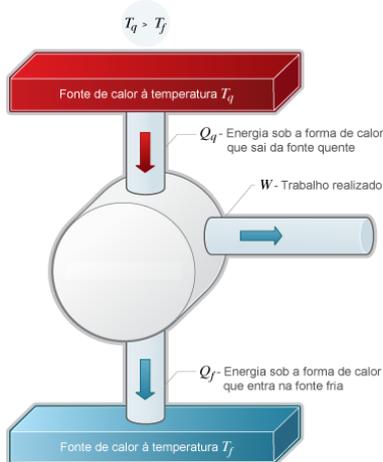
Por Tiago Martins Moura

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

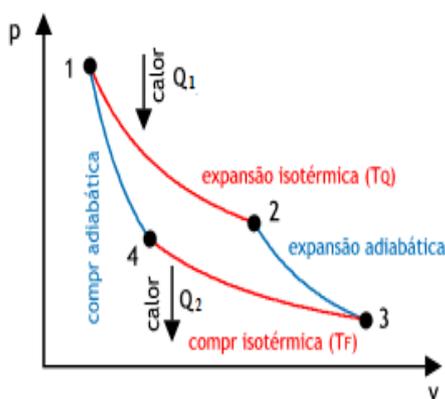


Fonte: GADELHA, 2014.

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 trabalho utilizada, 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.

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

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

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

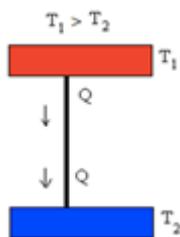
$$\eta_{\text{máq. de Carnot}} = 1 - T_2 / T_1 \quad (2)$$

Onde W é o trabalho realizado pela substância de trabalho, Q_1 o calor fornecido pela fonte quente à substância de trabalho, no caso o gás ideal, Q_2 o calor cedido pela substância de trabalho à fonte fria, T_1 e T_2 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

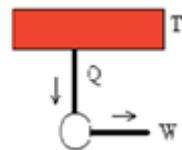
todos os processos naturais, segue um sentido preferencial: dos corpos mais quentes para os mais frios. Esse fluxo de calor, nas máquinas térmicas, é gerado entre os reservatórios quente e frio, ocorrendo, conseqüentemente, a realização de trabalho. A existência desta direção privilegiada dos processos 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 C – ATIVIDADE PROPOSTA COM TEXTO AUXILIAR

	<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>
---	---

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 - 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? _____

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. _____

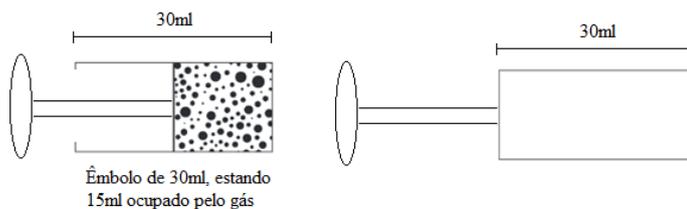
4. Quais dos processos abaixo você acha que, depois de acontecer, NÃO poderá retornar a situação inicial? _____

 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? _____

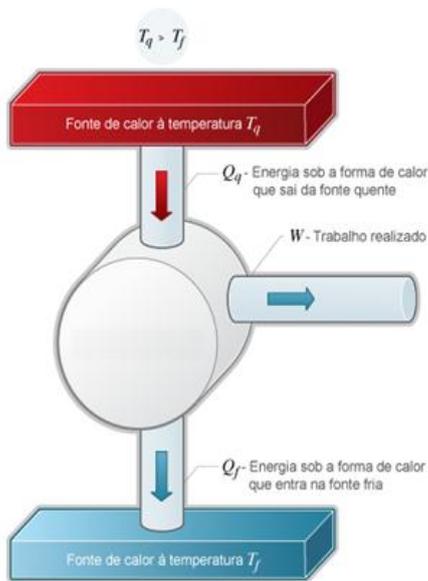
_____.

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

_____.

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

Figura 3 - _____



Fonte: GADELHA, 2014.

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

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? _____

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.

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.

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

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.

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.

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

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.

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

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.

PARA SABER MAIS

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.

BRASIL. 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.

_____. 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.

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](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.

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/cienciaeensino/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.

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://societificacom.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.

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

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.

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, 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.

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.

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

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

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.

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_IMPLMNTACAO_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.

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.

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.