



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**IRREVERSIBILIDADE E DEGRADAÇÃO DA ENERGIA
EM ATIVIDADES INVESTIGATIVAS**

**MATERIAL DIDÁTICO
PARA O PROFESSOR E PARA O ALUNO**

**CARLOS FREDERICO MARÇAL RODRIGUES
&
DEISE MIRANDA VIANNA**

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Carlos Frederico Marçal Rodrigues, apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014

SUMÁRIO

PARTE I: MATERIAL PARA O PROFESSOR	3
1. Introdução	3
2. Atividade 1: Moto-perpétuo	5
1. Objetivos.....	5
2. O texto	5
3. Realização da atividade	8
3. Atividade 2: Irreversibilidade no dia-a-dia.....	10
1. Objetivos.....	10
2. O vídeo	10
3. Realização da atividade	11
4. Atividade 3: Entropia.....	16
1. Objetivos.....	16
2. Modelo teórico.....	16
3. Realização da atividade	23
5. Atividade 4: Máquinas térmicas	26
1. Objetivos.....	26
2. O texto	27
3. Realização da atividade	28
PARTE II: MATERIAL PARA O ALUNO.....	31
PARTE III: REFERÊNCIAS.....	41

PARTE I: MATERIAL PARA O PROFESSOR

1. Introdução

Um ovo cru torna-se um ovo frito ao receber calor de uma frigideira, mas jamais se “desfrita” ao ser resfriado no interior de um congelador. Uma bola abandonada de certa altura repica algumas até repousar sobre o solo sem jamais atingir uma segunda vez a altura inicial. Um cubo de gelo se funde ao ser exposto à temperatura ambiente, mas a água jamais retoma a forma original se solidificada, a menos que seja utilizada uma fôrma. É a irreversibilidade que define o sentido privilegiado da passagem do tempo, que estabelece a diferença entre “passado” e “futuro”, “causa” e “efeito”. Entretanto, a reversão temporal dos fenômenos naturais, ainda que desafie ferozmente a experiência e o senso-comum, poderia ser feita de modo consistente com o princípio da conservação da energia ou primeira lei da Termodinâmica.

Do ponto de vista estritamente mecânico, nada impediria que a reversão temporal dos fenômenos físicos pudesse ser observada corriqueiramente. Uma vez que não há porque pôr em dúvida o princípio da conservação da energia, desde que admitamos que toda a energia associada a qualquer um desses sistemas possa ser sempre computada como energia mecânica, a reversão temporal é perfeitamente consistente. O repicar da bola, que retornaria à altura inicial todas as vezes, seria descrito apenas como sucessivas transformações de energia potencial gravitacional em energia cinética e vice-versa, de modo que um sentido preferencial do tempo não seria identificável. De fato, é possível interpretar as leis de conservação da mecânica como expressões de simetria: a conservação do momento linear como a homogeneidade do espaço, a do momento angular como a isotropia do espaço e a da energia mecânica como equivalência no sentido do tempo (MENEZES, 2005). Entretanto, basta realizar qualquer ação cotidiana, como fritar um ovo, para confirmar que existe mesmo um sentido único da passagem do tempo. Portanto, o estudo das leis de conservação da mecânica pura e simplesmente não é suficiente para uma compreensão ao menos razoável do mundo que nos cerca, seja numa cozinha, numa quadra de basquete, ou em qualquer outro lugar.

A impossibilidade de reverter no tempo os fenômenos cotidianos está fortemente ligada à contribuição de formas não mecânicas de energia. No caso da bola, em cada volta, energia mecânica é degradada nas interações a que se submete, entre as quais as mais importantes são com o solo, afinal nenhuma bola é perfeitamente elástica, e com o ar nos movimentos de descida e subida. A energia térmica, portanto, desempenha papel importante

na descrição da maioria dos fenômenos cotidianos e negligenciá-la é quase sempre adotar modelos vazios de significado prático.

Reconhecer a importância da degradação da energia é diferente de negar a conservação da energia, ao contrário, é a forma de enriquecer o conceito e colocá-lo de modo que possa realmente representar observações do mundo natural ao invés de apenas sistemas idealizados e, de algum modo, absurdos. A grande ênfase a este tipo de idealização que muitas vezes se dá no ensino médio afasta a Física da realidade do aluno e contribui para reforçar a visão da disciplina como um arcabouço de regras de cálculo pouco úteis ou que nada representam. Crianças que escorregam num brinquedo de pracinha e são lançadas com velocidades assassinas ou vasos de plantas que caem da janela e atingem o solo como balas de canhão têm pouca probabilidade de contribuir para uma construção útil do conceito de energia pelo aluno, pois são exemplos que não representam nada que se possa observar.

A irreversibilidade dos fenômenos naturais encontra forte conexão com a segunda lei da Termodinâmica e com os conceitos de rendimento e entropia. A ausência da segunda lei nas salas de aula, no entanto, é tradicional e notável, fato reconhecido explicitamente no próprio texto dos Parâmetros Curriculares Nacionais.

(...) A omissão dessa discussão da degradação da energia, como geralmente acontece, deixa sem sentido a compreensão da própria conservação da energia e dos problemas energéticos e ambientais do mundo contemporâneo. (BRASIL, 1999, p. 232)

Tradicionalmente, os livros didáticos apresentam o ciclo de Carnot de forma descontextualizada, com a exposição de um diagrama pressão \times volume acompanhado de observações não justificadas acerca da reversibilidade do ciclo e do limite de rendimento. Tais elementos “não são suficientes para que o estudante compreenda pontos cruciais no trabalho de Carnot: porquê o ciclo é reversível e o que lhe possibilita desenvolver a máxima eficiência” (AURANI, 1985). A prática de abordar a segunda lei dessa forma pode levar a duas consequências indesejáveis. A primeira é a memorização de uma regra de cálculo, o rendimento máximo teórico, desvinculada de seu significado físico. A segunda é a formação de uma imagem distorcida do ciclo reversível como uma máquina real e não como a idealização limítrofe que de fato é.

Os entraves matemáticos por detrás da segunda lei e o salto epistemológico entre as visões macro e microscópica do conceito de entropia não podem servir como justificativa para que o tema da irreversibilidade e da degradação da energia seja abandonado. Tampouco para que seja obscurecido por um conjunto de ferramentas de cálculo memorizadas que pouco ou nada dizem aos estudantes de nível médio a respeito da Natureza.

A sequência de quatro atividades que será proposta nas próximas seções tem como objetivo, portanto, conceituar as ideias representadas pelas duas primeiras leis da Termodinâmica, mais enfaticamente a segunda, a partir de problemas que tenham conexão com a realidade próxima do aluno, evitando um apelo demasiadamente forte, e possivelmente desnecessário, a formalismos matemáticos. Assim, o foco será o estudo da irreversibilidade dos fenômenos naturais e da degradação da energia, que tangencia os conceitos de rendimento e entropia. As quatro atividades são inter-relacionadas, mas não são fortemente interdependentes, o que sugere que podem ser aplicadas isoladamente ou em ordem diversa da sugerida, a depender das demandas do contexto escolar específico. As descrições das propostas das duas primeiras atividades podem ser encontradas também em um capítulo da obra publicada pelo grupo PROENFIS (RODRIGUES, 2012).

Estaremos satisfeitos se, ao final da aplicação da proposta, pudermos perceber que os alunos são capazes de reconhecer na primeira e na segunda leis da Termodinâmica, informalmente, a seguinte ideia:

A energia é sempre conservada, desde que sejam computadas todas as suas formas, mas a disponibilidade de energia tende a diminuir e é por isso que a Natureza não volta atrás.

2. Atividade 1: Moto-perpétuo

2.1 Objetivos:

Através da leitura e da discussão de um texto jornalístico, relacionar a questão da degradação da energia com o problema da geração de energia elétrica. Supõe-se como pré-requisito que os alunos tenham estudado a conservação da energia mecânica. O objetivo da atividade é fazer emergir o problema da degradação a partir de uma chamada a uma tomada de posição de cunho sócio-científico com relação à proposta de construção de um dispositivo de movimento perpétuo.

2.2 O texto

O texto sugerido, reproduzido no Material para o aluno (Parte II), é um recorte de uma reportagem publicada pelo jornal *O Estado de São Paulo* (KRITSCH, 2000) que relata o

projeto de construção de um máquina hidráulica para geração de energia elétrica na Ilha de Canárias, município de Araiões, Maranhão.

Na reportagem, são descritos os graves problemas enfrentados pela população da Ilha de Canárias devidos à escassez de energia elétrica. A comunidade conta com um único gerador a diesel e limitado suprimento de combustível, enviado por barco quinzenalmente pela prefeitura. O fornecimento de energia é restrito a algumas poucas horas por dia e em sistema de rodízio entre regiões diferentes da ilha. Não é possível manter geladeiras tradicionais em funcionamento e pequenos agricultores encontram dificuldades em implementar sistemas de irrigação.

Um mecânico amador residente na comunidade, Sr. Pedro Costa, após uma insistência de mais de uma década, consegue obter financiamento da própria comunidade e do governo municipal para a construção de uma máquina de movimento perpétuo que, segundo ele, resolveria o problema local de escassez de energia elétrica.

A crença na possibilidade de que aprimoramentos técnicos possam levar ao desenvolvimento de um dispositivo que funcione perpetuamente como um sistema fechado, ou seja, sem interagir com nenhum elemento externo, está ligada ao desconhecimento ou não compreensão da conservação da energia ou à simples convicção de que a degradação da energia possa ser integralmente eliminada de algum modo. Projetos de máquinas desse tipo datam de pelo menos 400 anos, alguns desenhos bem conhecidos podem ser encontrados até mesmo em Leonardo da Vinci.

Grosso modo, os dispositivos de movimento perpétuo podem ser divididos em duas classes:

1. Moto-perpétuo de primeira espécie: apresenta criação efetiva de energia, ou seja, o trabalho realizado pela máquina é maior que a energia potencial inicial. Máquinas desta espécie violam o princípio da conservação da energia.
2. Moto-perpétuo de segunda espécie: não apresenta criação efetiva de energia, mas pressupõe rendimento unitário em todos os processos de transformação envolvidos.

A máquina proposta pelo inventor é o exemplo mais comum de um dispositivo de movimento perpétuo: a roda desequilibrada. Os elementos principais da montagem, descritos no texto, podem ser esquematizados na forma mostrada na figura 2.1 a seguir.

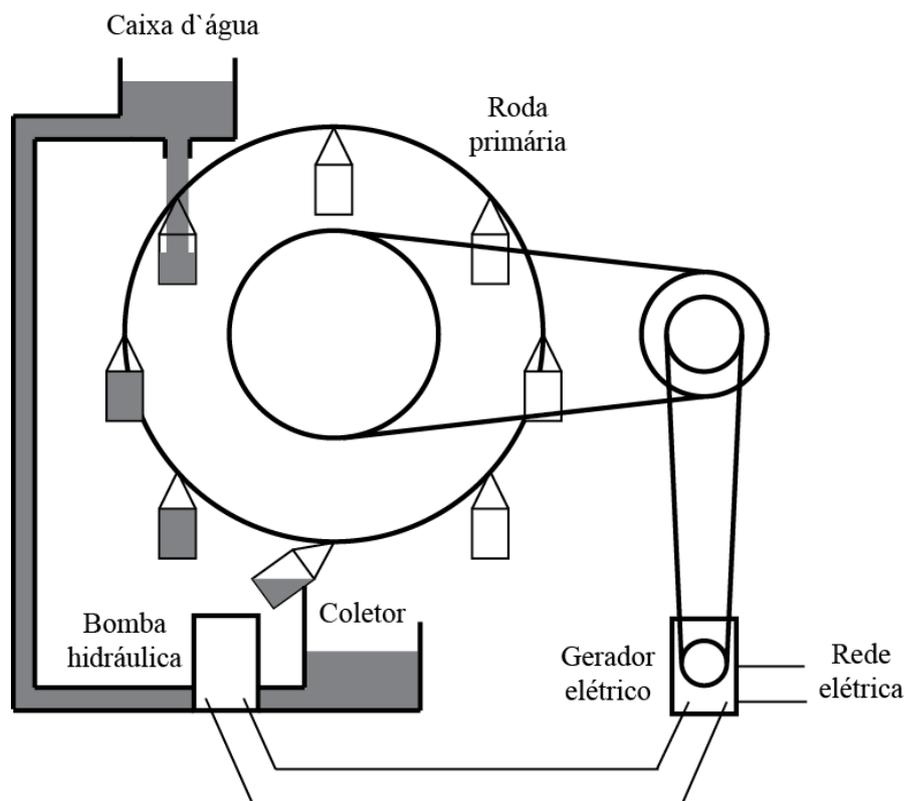


Figura 2.1: Moto-perpétuo

A partir da caixa d'água, um grande volume de líquido cai sob a ação da gravidade e preenche sucessivamente recipientes acoplados à roda primária. Com o movimento da roda, a água é abandonada no coletor abaixo e os recipientes sobem vazios do outro lado. O movimento da roda primária é transmitido às rodas de menor diâmetro através de correias, de modo que a frequência das rotações é aumentada na razão inversa dos diâmetros. A última roda aciona um gerador elétrico. Espera-se que o gerador alimente, simultaneamente, a rede elétrica e uma bomba hidráulica que seja capaz de recalcar toda a água de volta à caixa.

O projeto descrito é claramente um moto-perpétuo de primeira espécie, o que se evidencia na hipótese de que o gerador possa alimentar simultaneamente a rede e a bomba hidráulica. Ora, qualquer que seja a bomba utilizada, para que o sistema se sustente perpetuamente, deverá realizar trabalho sobre uma determinada massa de água igual a, no mínimo, a energia potencial gravitacional associada a essa mesma massa quando na caixa. Mas é justamente esta a quantidade máxima de energia que essa quantidade de líquido poderá oferecer à roda quando cair. Naturalmente, o aumento gradual da frequência nas rodas de diâmetros menores é compensado pela perda correspondente de torque, o que garante que a potência não será aumentada internamente.

Retiremos então do projeto a hipótese problemática, a de que o sistema possa fornecer energia elétrica efetivamente. Nesse caso, eliminaríamos a incômoda dificuldade de violar a conservação da energia e nossa máquina perderia o desconfortável título de moto-perpétuo de primeira espécie. Naturalmente, deixaríamos de ter também uma máquina comercialmente útil, pois o novo objetivo seria tão somente o de manter o movimento indefinidamente. Idealmente, teríamos um dispositivo que promoveria apenas a conversão entre formas diferentes de energia: de potencial gravitacional para cinética, para elétrica, para cinética e de volta à energia potencial gravitacional. Um ciclo fechado que se sustentaria não fosse a inevitável transformação de energia mecânica em formas menos nobres de energia. Os efeitos do ar sobre os movimentos da água e das rodas, as forças de atrito no movimento dos eixos, o deslizamento das correias sobre os discos, o aquecimento dos circuitos elétricos, as forças de viscosidade entre a água e a superfície dos tubos, interações que não podem ser inteiramente evitadas na prática e que impõem que o rendimento do sistema será inferior à unidade, inviabilizando o funcionamento da máquina, agora tornada um moto-perpétuo de segunda espécie.

Discussões como essa enriquecem o estudo do próprio conceito de energia, não no sentido de enfraquecer a noção de conservação, mas no sentido de torná-la plausível na interpretação do mundo cotidiano. Sistemas que conservam a energia mecânica inteiramente são idealizações limítrofes. Podem ser úteis num primeiro momento se entendidas como aproximações nos casos em que tais aproximações se apliquem, mas não devem encerrar o estudo do conceito, sob risco de desvincular a teoria irremediavelmente dos fenômenos que podemos observar em nossas casas. A degradação da energia e sua relação com a irreversibilidade dos processos naturais são necessárias para dar sentido ao próprio conceito de energia e de sua conservação.

2.3 Realização da atividade

Sugere-se que os alunos, organizados em pequenos grupos, leiam e discutam o texto e, em seguida, respondam às seguintes questões:

1. Se você fosse morador da ilha, incentivaria o projeto com ajuda financeira?
 - a. Caso afirmativo, por que?
 - b. Caso negativo, por que?

2. Caso o objetivo da máquina fosse apenas manter a roda em movimento e não fornecer energia elétrica às residências, poderia funcionar? Por que?

O professor deve circular entre os grupos de modo a estimular as discussões, mas evitando sempre a postura de árbitro externo que julga o “certo” e o “errado”. A primeira questão demanda uma tomada de posição dos estudantes como personagens inseridos em um contexto social controverso. É importante que seja mantido um ambiente de liberdade intelectual para que as discussões transcorram de forma frutífera. É igualmente importante que fique claro para o grupo que a tomada de posição deve ser consensual, ou seja, que não é admissível que os componentes do grupo apresentem posições finais conflitantes. O objetivo é estimular a controvérsia na expectativa de que as discussões que levam à sua solução possam também levar à consolidação do conceito de energia mecânica no arcabouço conceitual dos alunos. A segunda questão visa fazer emergir explicitamente o problema da degradação da energia ao tornar a máquina um moto-perpétuo de segunda espécie, o que espera-se também contribuir para a solução do problema estabelecido pela primeira.

É esperado que a posição inicial da maioria dos grupos seja favorável à construção da máquina, dado o envolvimento emocional do leitor com o problema social da ilha, criado pela forma como é apresentado na reportagem. É também esperado que a posição seja revista e modificada ao longo das discussões, especialmente aquelas criadas pela segunda questão ao trazer à tona o problema da degradação da energia. Assim, uma interferência muito incisiva do professor em estágios iniciais da discussão pode dificultar o bom aproveitamento da atividade caso seja vista pelos alunos como juízo de valor com relação a alguma posição defendida naquele momento pelo grupo ou parte dele. A postura do professor como fomentador de questionamentos e não portador de respostas é fundamental para a manutenção do ambiente encorajador que possibilita o surgimento das controvérsias sócio-científicas que desejamos criar. Até mesmo pequenas reações corporais espontâneas como olhares e sorrisos podem ser destruidoras da atividade, de modo que o professor deve estar atento à sua própria postura em sala constantemente.

3. Atividade 2: Irreversibilidade no dia-a-dia

3.1 Objetivos

O objetivo principal desta segunda atividade é situar o estudante nas questões da irreversibilidade dos processos naturais e da degradação da energia a partir da identificação atenta de regularidades em situações cotidianas. Uma vez que a segunda lei da Termodinâmica estabelece a seta do tempo, propomos inverter seu sentido, a partir da edição de vídeos, e verificar que o sentido invertido não pode corresponder ao comportamento da Natureza.

Espera-se que surjam da discussão entre os alunos duas conclusões. A primeira é a da necessidade da formalização de um conceito físico que dê conta da avaliação da “desordem” de um sistema no nível microscópico tanto no aspecto espacial quanto no cinético. Este conceito é a Entropia, que será abordada cuidadosamente na atividade 3 (seção 4 a seguir). A segunda conclusão é a da inevitabilidade da degradação da energia mecânica, evidentemente associada ao aumento da Entropia num processo irreversível, e que se relaciona à formulação macroscópica da segunda lei: a ideia de que não é possível, num sistema fechado, converter energia térmica em mecânica integralmente.

Supõe-se que estudos prévios de Mecânica e Termodinâmica já tenham sido realizados pelos alunos. Conceitos como energia mecânica e sua conservação, energia interna, calor e a primeira lei da Termodinâmica devem ser familiares aos estudantes neste estágio.

3.2 O vídeo

Foi feita a opção pela produção do vídeo da forma mais simples possível. A captação das imagens foi feita com a câmera de um *smartphone* e a edição das cenas e finalização do vídeo completo feitas com um computador pessoal. As cenas foram montadas para a filmagem com a utilização exclusiva de objetos encontrados normalmente em residências e não houve qualquer composição especial de cenário, ou seja, o ambiente é o de uma residência comum. Dois são os objetivos desta opção. O primeiro é aproximar a atividade da realidade do aluno enfatizando, no caráter amador da produção, o objetivo de examinar mais atentamente fenômenos do dia-a-dia. Uma produção mais cuidadosa do vídeo, com a utilização de equipamentos de filmagem e edição profissionais e um cenário controlado de estúdio ou laboratório, poderia criar uma impressão de artificialidade, deixando de atender à

proposta. O segundo é o de desenhar uma atividade que possa ser reproduzida sem grandes dificuldades por outros professores que desejem utilizá-la em suas aulas produzindo seus próprios vídeos e eventualmente fazendo uma escolha pela filmagem de outros fenômenos do cotidiano.

Todas as cenas foram disponibilizadas no YouTube e os links encontram-se no quadro 5.3 a seguir. No vídeo completo, de 11'40'' de duração, foram incluídas músicas de fundo extraídas da trilha sonora do filme “2001: Uma Odisséia no Espaço”. As músicas são de domínio público.

Vídeo completo	http://youtu.be/aWX1-awJ56c
Cena 1	http://youtu.be/3sNIRFIBu64
Cena 2	http://youtu.be/mkDoaRkAnvk
Cena 3	http://youtu.be/CHcU98k6mCA
Cena 4	http://youtu.be/3XVfQCS4fSs
Cena 5	http://youtu.be/EbKL9Xmgkdw
Cena 6	http://youtu.be/8YEAiq3_I9k
Cena 7	http://youtu.be/8L-G5p9tQfU
Cena 8	http://youtu.be/5wrkMQg-wO8

Quadro 5.3: *Links* para os vídeos no YouTube (acesso em 05/01/2014)

3.3 Realização da atividade

Os alunos devem assistir a uma sequência de cenas de vídeo divididos em pequenos grupos. As cenas são exibidas uma a uma e não como uma sequência contínua. Cada cena é apresentada em duas versões: uma no sentido natural do tempo e outra no sentido inverso. Os integrantes de cada grupo, ao final de cada cena, devem estabelecer uma discussão e identificar a versão “correta” apontando as razões que levaram a esta escolha. Em seguida, devem registrar suas conclusões por escrito respondendo algumas questões, propostas adiante no material do aluno (Parte II).

O papel do professor deve ser o de estimular as discussões sem oferecer em nenhum momento a resposta com relação ao vídeo “correto”. Em muitos casos, o sentido natural é óbvio pela experiência cotidiana, mas o isolamento dos reais motivos que levam à sua

identificação não é! Cabe ao professor estimular a explicitação e o registro formal destes fatores pelos alunos, rejeitando o argumento da obviedade e do senso-comum, fomentando um ambiente mais próximo daquele da investigação científica.

A seguir, é apresentada uma breve descrição das cenas do vídeo e são apontadas as expectativas com relação a cada uma delas.

Cena 1: Ovo



Figura 3.1: Ovo frito (<http://youtu.be/3sNIRFIBu64>)

A primeira cena mostra um ovo fritando numa frigideira. O objetivo é apresentar aos alunos uma situação de fácil identificação com o cotidiano e na qual o reconhecimento do sentido correto da passagem do tempo é óbvio. As discussões e interpretações da cena dependerão dos conhecimentos de Bioquímica dos alunos.

Ao assistir o vídeo, ficará claro que o sentido natural da passagem do tempo corresponde à versão 1.

Cena 2: Gelo



Figura 3.2: Gelo em fusão (<http://youtu.be/mkDoaRkAnvk>)

A segunda cena mostra um cubo de gelo que derrete sobre uma travessa metálica. A fusão foi acelerada com o uso de um secador de cabelo. Espera-se que o professor estimule a discussão sobre a possibilidade de promover o fenômeno inverso no interior de um *freezer*. É claro que a forma de cubo não seria refeita neste caso e caberá uma discussão sobre a impossibilidade da elevação espontânea da posição do centro de massa da água, que representaria ganho de energia mecânica.

Ao assistir o vídeo, ficará claro que o sentido natural da passagem do tempo corresponde à versão 2.

Cena 3: Café

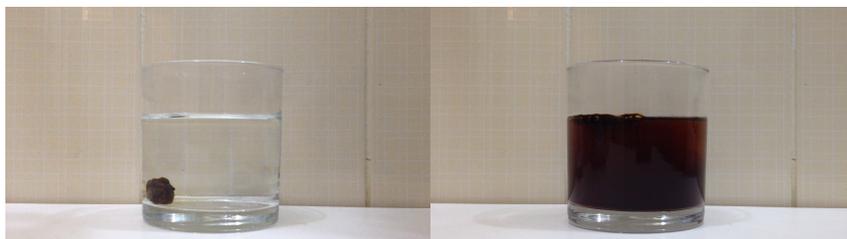


Figura 3.3: Café solúvel (<http://youtu.be/CHcU98k6mCA>)

Uma pequena quantidade de café solúvel é colocada no interior de um copo contendo água fervente e gradualmente se dissolve e difunde pelo líquido. O objetivo é a identificação de dois estados, um mais e outro menos ordenado, do sistema e o reconhecimento de que o menos organizado é o mais provável e, portanto, deve representar o estado final. Esta é uma primeira discussão no sentido do conceito de Entropia.

Para facilitar a percepção de um modelo microscópico, sugere-se que o aluno faça um desenho que mostre a localização das partículas que compõem o café nos instantes iniciais e nos instantes finais do vídeo.

Ao assistir o vídeo, ficará claro que o sentido natural da passagem do tempo corresponde à versão 2.

Cena 4: Spray

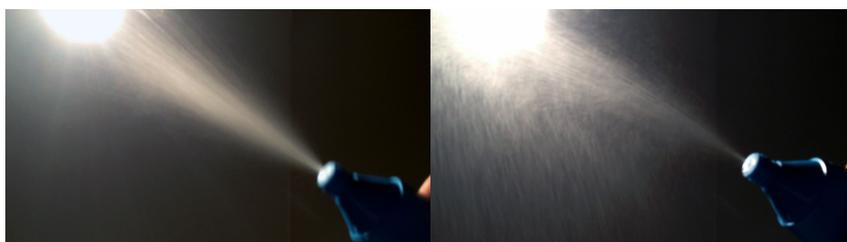


Figura 3.4: Desodorante spray (<http://youtu.be/3XVfQCS4fSs>)

Um desodorante spray é pressionado algumas vezes e observamos as gotículas do líquido se espalharem pelo ar em câmera lenta. Observa-se que o movimento das gotículas é ordenado próximo à saída do frasco e fortemente aleatório em pontos mais distantes. Espera-se caracterizar a noção de desordem no sentido cinético e não apenas espacial.

Para estimular a superação da noção estritamente espacial de “desordem” e o reconhecimento de seu caráter cinético, pede-se que o aluno faça um desenho mostrando uma

representação das velocidades das gotículas de desodorante nos instantes iniciais e nos instantes finais do vídeo.

Ao assistir o vídeo, ficará claro que o sentido natural da passagem do tempo corresponde à versão 1.

Cena 5: Bola 1



Figura 3.5: Primeira cena com a bola (<http://youtu.be/EbKL9Xmgkdw>)

Esta é a primeira de uma sequência de cenas cujo objetivo é estimular a discussão sobre a degradação da energia. Vê-se uma pessoa quicando uma bola algumas vezes contra o solo. É possível observar, na versão 1, que a velocidade média da bola na subida é superior à velocidade média na descida e identificar, a partir daí, que o sentido natural da passagem do tempo é o da versão 2. Espera-se que uma parcela significativa dos alunos não seja capaz de realizar corretamente a identificação. O professor não deve interferir de nenhuma forma até a exibição da cena seguinte.

Cena 6: Bola 2



Figura 3.6: Segunda cena com a bola (http://youtu.be/8YEAiq3_I9k)

Nesta cena, a mesma bola da cena anterior é abandonada uma única vez e repica no solo algumas vezes, atingindo alturas cada vez menores, até parar. Nesse caso, a identificação do sentido correto é mais direta pois a degradação da energia se expressa visualmente nas perdas graduais nas alturas atingidas pela bola. Espera-se que a discussão fomentada por esta cena crie o desejo de revisão da cena anterior pelos grupos que apresentaram dificuldades com a mesma.

Ao assistir o vídeo, ficará claro que o sentido natural da passagem do tempo corresponde à versão 1.

Cena 7: Pêndulo 1



Figura 3.7: Pêndulo de chumbo (<http://youtu.be/8L-G5p9tQfU>)

Um pêndulo, composto por barbante e peso de chumbo, é abandonado a partir do repouso, oscila algumas vezes e é recolhido aproximadamente na mesma posição inicial. Este é um processo praticamente reversível pois as perdas de energia mecânica em algumas poucas oscilações deste pêndulo não são significativas. Embora não seja impossível perceber que, na versão 1, as amplitudes de oscilação ficam gradualmente maiores, o que mostra que o sentido natural da passagem do tempo é o da versão 2, é esperado que a maioria dos alunos não consiga fazer a identificação por não saber, *a priori*, o que procurar nas imagens. Espera-se que surjam daí algumas discussões interessantes acerca da relação entre reversibilidade e conservação da energia mecânica.

Cena 8: Pêndulo 2



Figura 3.8: Pêndulo de papel (<http://youtu.be/5wrkMQg-wO8>)

O pêndulo utilizado agora é composto por barbante e bolinha de papel e é deixado a oscilar até atingir o repouso. A degradação da energia salta aos olhos, assim como na cena 6, e reforça a discussão nas relações com a cena 7 exibida anteriormente.

Ao assistir o vídeo, ficará claro que o sentido natural da passagem do tempo corresponde à versão 1.

A ficha entregue aos alunos traz também o pedido para que procurem relacionar as observações desta atividade com a atividade anterior (Moto-perpétuo, seção 2). É esperado que estabelecer a relação entre os vídeos de 5 a 8 e a questão da degradação da energia envolvida no problema do moto-perpétuo não constitua grande dificuldade. Formular a pergunta diretamente, no entanto, é importante no sentido de dar unidade à sequência de ensino, de modo que fique claro para o aluno que os fenômenos cotidianos analisados na segunda atividade e o problema tecnológico da primeira estão relacionados pelos mesmos princípios físicos.

4. Atividade 3: Entropia

4.1 Objetivos

Abordar explicitamente os conceitos de macroestado, microestado e entropia e a formulação da segunda lei da Termodinâmica a Boltzmann, ou seja, no contexto da Física Estatística. Para tanto, adota-se um modelo de sistema discreto binário proposto originalmente por Monteiro et. al. (2009) e propõe-se aos alunos uma atividade experimental aberta realizada com a utilização de material de baixo custo.

4.2 Modelo teórico

A tentativa de buscar na Mecânica as raízes da teoria do calor no final do século XIX, realizada por Maxwell e Boltzmann, entre outros, passa necessariamente por uma interpretação estatística do comportamento microscópico de sistemas de muitas partículas. Discutiremos aqui um modelo simplificado e limitado, mas que julgamos suficiente para nossos propósitos e que será a base da proposta da presente atividade.

Serão duas simplificações fundamentais. A primeira é a hipótese de que possamos descrever o sistema físico em estudo de modo discreto, isto é, vamos supor que qualquer estado observável do sistema possa ser descrito em termos de configurações enumeráveis de seus constituintes microscópicos. Ao estado observável atribuiremos o nome macroestado e a cada uma das configurações microestado. Supomos ainda que os microestados sejam equiprováveis, ou seja, não pode haver qualquer tipo de ação externa sobre o sistema que traga como consequência o surgimento de determinadas configurações preferenciais. A abordagem discreta não introduz grandes limitações no sentido das considerações, ao mesmo

tempo mais simples e gerais, que desejamos fazer e a extensão para o contínuo não é mais que um problema de manipulação matemática e pode ser encontrada em livros didáticos de Física Estatística. A segunda simplificação é a hipótese de que todos os estados sejam igualmente acessíveis, ou seja, não faremos considerações sobre as energias associadas aos microestados e uma possível condição com relação à energia total do sistema.

O ponto central é a ideia de que a probabilidade de ocorrência de determinado macroestado é função da multiplicidade de microestados a ele associada. Em outras palavras, uma vez que determinada observação macroscópica pode ser explicada por mais de uma configuração microscópica, a observação mais provável deve ser aquela que corresponde ao maior número de configurações possíveis. Adota-se aqui o exemplo de um sistema binário, ou seja, um sistema onde só há dois estados possíveis para cada constituinte microscópico, sugerido por Monteiro et al. (2009).

Considere uma caixa dotada de uma divisória de modo a definir dois compartimentos iguais. Um conjunto de N bolinhas será distribuído aleatoriamente entre os dois compartimentos de modo que a probabilidade de que uma bolinha seja encontrada à direita ou à esquerda seja exatamente $1/2$. Assim, o macroestado observável do sistema de N bolinhas pode ser definido, por exemplo, pelo número de bolinhas n encontradas à esquerda. Naturalmente, o número encontrado à direita seria simplesmente $n' = N - n$.

Cada macroestado do sistema pode estar associado a mais de um microestado. Chamaremos de $Z(n, N)$ a multiplicidade do macroestado com n bolinhas à esquerda num sistema composto por N bolinhas no total, ou seja, o número de microestados que correspondem a este estado observável macroscopicamente.

A figura 4.1 a seguir, de autoria própria, mostra a contagem da multiplicidade de cada macroestado deste sistema fictício com $N=1, 2, 3$ e 4 . Note que, quanto maior o número de bolinhas, maior o número de microestados possíveis. Note também que o macroestado com a maior multiplicidade, ou seja, associado ao maior número de microestados, é o estado central, isto é, aquele em que $n=N/2$. No caso de N ímpar existem, evidentemente, dois macroestados que compartilham a condição de máximo com $n=N/2 \pm 1/2$.

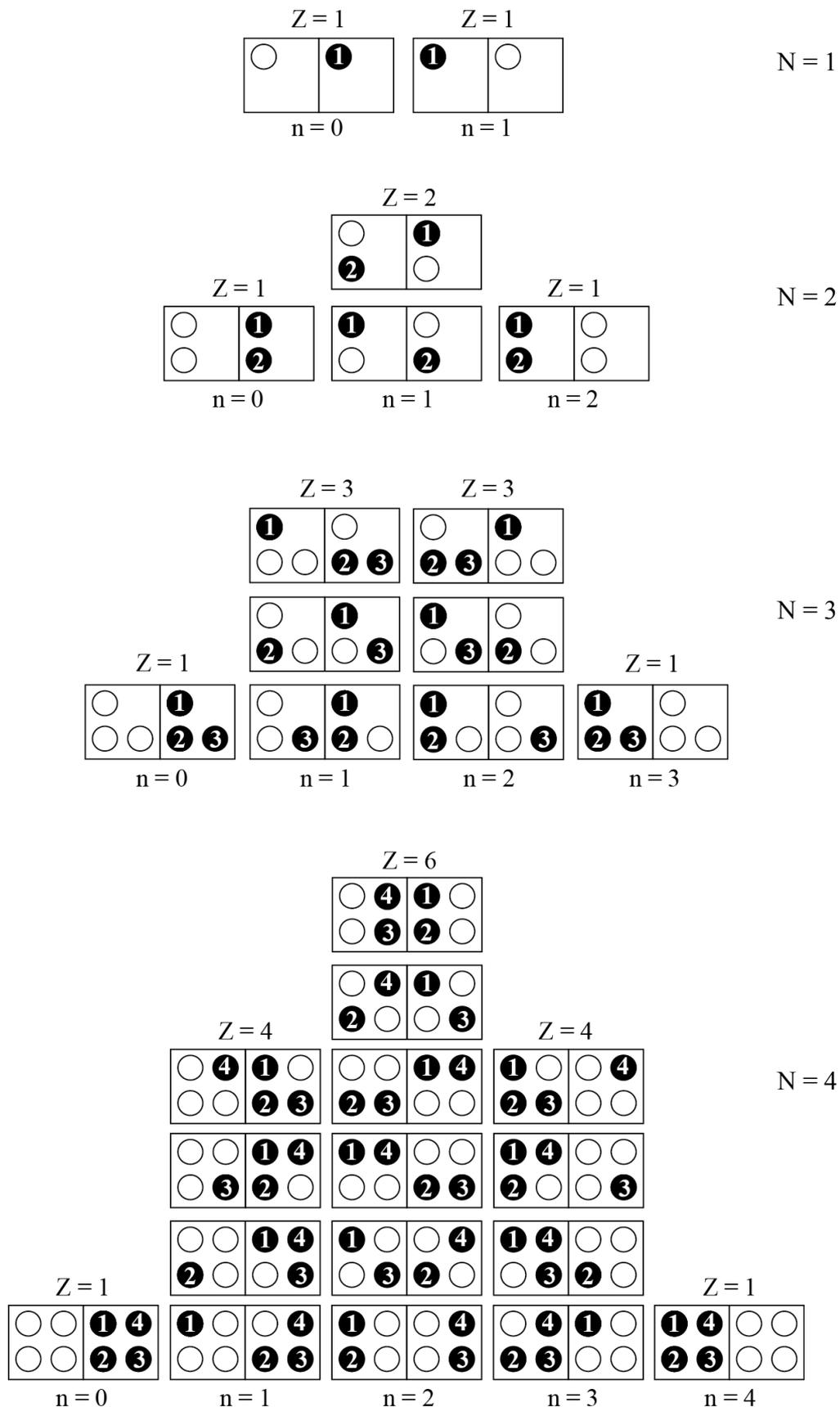


Figura 4.1: Sistema binário com $N=1, 2, 3$ e 4 .

Para um número genérico de bolinhas, não é difícil perceber que a multiplicidade $Z(n, N)$ de um macroestado em particular n é a combinação de N elementos tomados em grupos de n , ou seja:

$$Z(n, N) = C_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}$$

Lembrando que a soma das combinações, para todos os n , com $N \geq n \geq 0$, é uma identidade bem conhecida e vale 2^N , que corresponde ao número total de microestados.

A seguir, apresentamos os resultados para o caso com $N=40$, que serão particularmente úteis para a atividade 3 da seção 5.5. A tabela 4.1 e os gráficos da figura 4.4, produzidos a partir da equação acima com o auxílio de uma planilha eletrônica, representam a multiplicidade de cada estado e mostram que o estado $n=20$ é marcadamente mais provável que qualquer outro. Na tabela, suprimimos os estados de $n=21$ a $n=40$ por serem simétricos aos primeiros 20.

n	$Z(n)$	n	$Z(n)$
0	$1,00 \times 10^0$	11	$2,31 \times 10^9$
1	$4,00 \times 10^1$	12	$5,59 \times 10^9$
2	$7,80 \times 10^2$	13	$1,20 \times 10^{10}$
3	$9,88 \times 10^3$	14	$2,32 \times 10^{10}$
4	$9,14 \times 10^4$	15	$4,02 \times 10^{10}$
5	$6,58 \times 10^5$	16	$6,29 \times 10^{10}$
6	$3,84 \times 10^6$	17	$8,87 \times 10^{10}$
7	$1,86 \times 10^7$	18	$1,13 \times 10^{11}$
8	$7,69 \times 10^7$	19	$1,31 \times 10^{11}$
9	$2,73 \times 10^8$	20	$1,38 \times 10^{11}$
10	$8,48 \times 10^8$		

Tabela 4.1: Multiplicidade de estados de $n=0$ a $n=20$ para $N=40$.

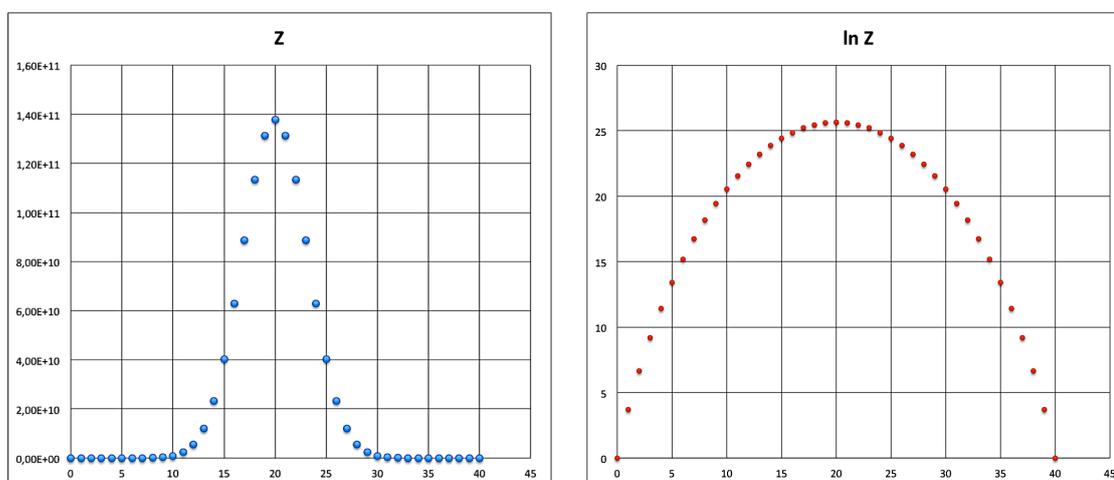


Figura 4.2: Gráficos de Z e $\ln Z$ em função de n para $N=40$.

Define-se a probabilidade (normalizada) de encontrar um dado macroestado n num conjunto com N bolinhas como o número de casos favoráveis, ou a multiplicidade daquele macroestado, dividida pelo número total de casos, ou o número total de microestados possíveis.

$$P(n, N) = \frac{Z(n, N)}{\sum_n Z(n, N)}$$

Lembrando que, no caso do nosso sistema binário, $Z(n, N)$ é a combinação de N elementos em grupos de n e que o somatório no denominador é 2^N .

Dessa forma, o valor esperado para a observação de n seria, evidentemente, a soma de todos os valores possíveis ponderada por suas probabilidades, ou seja

$$\bar{n}(N) = \sum_n P(n, N)n$$

Note que, no caso específico:

$$\bar{n} = \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^N \frac{N!}{n!(N-n)!} n = \frac{N}{2^N} \sum_{n=1}^N \frac{(N-1)!}{(n-1)!(N-n)!}$$

Com a substituição $i=n-1$:

$$\bar{n} = \frac{N}{2^N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(N-1)!}{i!(N-1-i)!} = \frac{N}{2^N} (2^{N-1}) = \frac{N}{2}$$

Este resultado está em acordo com a observação das construções da figura 4.1 e com os resultados da tabela 4.1 e dos gráficos da figura 4.2.

Define-se então a entropia de um certo estado n como uma função qualquer crescente com a multiplicidade daquele estado $S=f(Z)$ de modo a identificar as ideias apresentadas no contexto da Termodinâmica na seção anterior. A entropia de um sistema deve aumentar em processos irreversíveis, ou seja, o sistema busca naturalmente o macroestado mais provável.

Vale a pena adotar o logaritmo natural como esta função $f(Z)$. Há duas vantagens na escolha. A primeira é obter uma função mais suave e, portanto, de mais fácil visualização gráfica que $Z(n)$. A segunda, e mais importante, é garantir a aditividade da entropia. Evidentemente, num sistema composto por dois outros, $Z_{12}=Z_1Z_2$, por uma questão de análise combinatória, então as propriedades da função logaritmo garantem que $S_{12}=S_1+S_2$. Tradicionalmente, define-se a entropia, no contexto da Física Estatística, pela expressão a seguir, proposta no séc. XIX por Boltzmann:

$$S = k_B \ln Z$$

Onde $k_B \approx 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann, determinada experimentalmente.

A uma interpretação probabilística da entropia faz-se uma crítica imediata: a observação de um sistema fechado que tenha sua entropia reduzida no tempo não é impossível, é apenas muito improvável. Essa foi a posição adotada pelo próprio Boltzmann, mas é inegável que introduz dificuldades de ordem filosófica na interpretação da segunda lei da Termodinâmica como expressão do sentido único da passagem do tempo.

Coloca-se então a questão da natureza do tempo. Como discute Pereira Júnior (1997), o tempo pode ser entendido como uma entidade previamente existente, ou seja, independente dos processos físicos que evoluem no tempo. Isto é, seria possível estabelecer uma diferença objetiva entre o tempo em si e os processos temporais. No entanto, o tempo em si, como entidade independente, não é acessível pela experiência ao passo que processos temporais, como fenômenos físicos, podem ser vivenciados, estudados e compreendidos com mais facilidade. Assim, parece atraente uma concepção na qual o próprio tempo é uma construção humana baseada nas propriedades dos processos temporais. Desse ponto de vista, uma lei objetiva que imponha a não diminuição da entropia do Universo, ou de um sistema local fechado, se confunde com a própria construção do conceito de tempo.

Gostaríamos de estabelecer que um sistema físico qualquer possa ter seu estado, num determinado instante de tempo, representado por um valor de entropia, ainda que não seja humanamente possível calcular objetivamente esse valor. Qualquer transformação a que se submeta esse sistema e que tenha como consequência uma redução de entropia mostrará que há interações significativas com algum outro elemento que, ao ser incluído como parte do sistema, compensará a redução, fazendo com que a entropia total aumente ou permaneça constante no caso extremo. O problema é que a interpretação estatística admite flutuações que poderiam, com pequeníssima probabilidade, violar a concepção de tempo que gostaríamos de construir. Alia-se a esta crítica o fato de que reduções espontâneas de entropia em fenômenos macroscópicos jamais são observadas.

Uma expansão livre de um gás confinado numa caixa para uma sala evacuada é perfeitamente concebível, mas nunca foi registrada a ocorrência de um único evento no qual uma sala é espontaneamente evacuada porque todo o ar resolveu se concentrar na sala ao lado num processo que reduziria muito significativamente a entropia. É certamente mais confortável acreditar que a ocorrência de tal fenômeno é verdadeiramente impossível e não apenas incrivelmente improvável.

Uma forma de solucionar a questão e acomodar a interpretação probabilística às observações cotidianas dada pelo próprio Boltzman (PEREIRA JÚNIOR, 1997), é assumir que flutuações de redução de entropia são sempre microscópicas e não interferem diretamente no que observamos. Tomando o exemplo das 40 bolinhas do modelo aqui proposto, é importante notar que, se iniciamos com todas as bolinhas do mesmo lado (entropia mínima), esperamos observar um crescimento rápido no sentido da distribuição com 20 bolinhas de cada lado (entropia máxima), por mais que pudéssemos observar alguns eventos isolados de retorno a uma configuração imediatamente anterior. Entretanto, escolhemos uma condição inicial de baixa entropia propositalmente, de modo que pequenas flutuações não são significativas em comparação com a tendência geral de aumento.

Coloca-se então a questão do estado inicial do Universo ou, pelo menos, do canto do Universo em que vivemos. Para que observemos um Universo que caminha inexoravelmente no sentido do aumento da entropia, seria necessário que estivéssemos em uma região caracterizada por um valor total ainda distante do máximo, ou admitir que nossas possibilidades de observação não podem jamais constituir espaço amostral apreciável para que os efeitos asfixiantes de uma flutuação de entropia sejam verificados um dia.

Ainda que a questão da interpretação de processos temporais, representados pela lei da não redução da entropia, como construção do próprio conceito de tempo não seja inteiramente resolvida nem fisicamente nem filosoficamente, haja vista que discussões em torno dela atravessaram os séculos XIX e XX e perduram ainda hoje, reafirmo seu valor como reflexão no contexto da escola média. A mais cotidiana de todas as observações é aquela de que o tempo não volta atrás e, justamente por ser a mais cotidiana de todas as experiências, é muitas vezes relegada ao plano da obviedade. Ora, a discussão, mais ou menos fechada, acerca das relações entre energia, conservação, degradação, entropia e tempo, está na raiz de uma tentativa de compreensão do mundo que nos é mais próximo. Está na cozinha, na quadra de esportes, nos mais simples e mais complexos aparatos tecnológicos que utilizamos. Está até mesmo nas elucubrações existenciais de todos, na questão da inevitabilidade do tempo e finitude da vida. É fundamental, não apenas pelo valor intrínseco como fechamento da Termodinâmica e da Mecânica clássicas, mas como forma de aprofundar uma concepção de mundo que não se satisfaz de imediato com o que parece evidente.

4.3 Realização da atividade

O material físico a ser entregue aos alunos é um conjunto de quarenta bolinhas de gude e uma caixa dotada de uma divisória com uma fenda central de dimensões pouco maiores que as da bola de gude. A produção das caixas é simples e pode ser feita com diversos materiais diferentes. Sugerimos a tampa de uma caixa de papelão utilizada normalmente para acondicionar resmas de papel. A figura 4.3 a seguir mostra uma forma conveniente de produzir uma dessas caixas.



Figura 4.3: Produção do kit experimental

Os alunos devem receber, além do *kit*, material impresso contendo a proposta da atividade e as questões a serem respondidas pelo grupo. O material encontra-se Material para o aluno (parte II). As perguntas formuladas são as seguintes:

- 1) Se todas as bolinhas são colocadas do mesmo lado da caixa e ela é agitada:
 - a. Em qual lado da caixa você esperaria encontrar uma bolinha em particular após algum tempo? Do mesmo lado ou do outro? Por que?
 - b. Como você esperaria encontrar a distribuição do número de bolinhas entre os dois lados da caixa após algum tempo? Por que?
 - c. Você esperaria encontrar todas as bolinhas do mesmo lado da caixa uma segunda vez? Por que?

- 2) Você consegue encontrar relações entre esta experiência e algum ou alguns dos vídeos que assistimos na aula passada?
- 3) Você consegue encontrar relações entre esta experiência e o relato jornalístico sobre a construção da máquina na Ilha das Canárias?

O objetivo da questão 1a é a explicitação do fato de que os microestados possíveis são equiprováveis. É esperado que os alunos imaginem marcar uma das bolinhas com algo que tenham em mãos, como cola escolar ou corretor líquido, antes de proceder à agitação da caixa para que possam acompanhar o movimento de uma bolinha em particular. O fato de que esta bolinha específica pode estar em qualquer lado da caixa com igual probabilidade dado tempo suficiente não é evidente à primeira vista. Supondo, em primeira aproximação, que em cada “agitação” da caixa uma única bolinha, proveniente de qualquer lado, mude de lado, a probabilidade de mudança é de $1/40$. Esta aproximação poderia ser refinada levando em conta o fato de que a probabilidade de que a bolinha marcada mude do lado mais cheio para o mais vazio é maior que a probabilidade de que ocorra o inverso. Em todo caso, a bolinha marcada não deve mudar de lado muitas vezes, de modo que é necessário agitar a caixa por um intervalo de tempo relativamente longo para que se observe o que desejamos.

As questões 1b e 1c são o cerne da atividade. O objetivo é despertar uma discussão que pode levar à conclusão de que há um macroestado mais provável que qualquer outro, a saber, aquele em que há 20 bolinhas de cada lado, exatamente porque este possui a maior multiplicidade, ou seja, é a observação que corresponde ao maior número de microestados indistinguíveis e equiprováveis.

As perguntas 2 e 3 remetem às atividades anteriores (Irreversibilidade no dia-a-dia e Moto-perpétuo, seções 2 e 3, respectivamente) e tem, mais uma vez, o objetivo de dar unidade à sequência relacionando a irreversibilidade, agora vista em sua raiz microscópica, com os fenômenos do cotidiano e com o problema do moto-perpétuo.

O material mostrado na fotografia da figura 4.3 foi previamente testado antes de ser utilizado em sala de aula. A indexação do experimento foi feita com relação a turnos arbitrários de agitação. Foram feitos 30 turnos. Destes, uma bolinha previamente marcada foi vista 17 vezes do lado esquerdo da caixa e 13 do lado direito. A permanência da bolinha de um único lado foi relativamente longa (5 turnos em média), como esperado, o que pode dificultar um pouco a observação e a obtenção da resposta à questão 1a, dependendo do procedimento adotado pelos estudantes.

A figura 4.4 a seguir mostra a contagem do número de bolinhas de cada lado da caixa em função do número de turnos de agitação no pré-teste. A tendência ao estado com a distribuição igualitária (20/20) é bastante evidente.

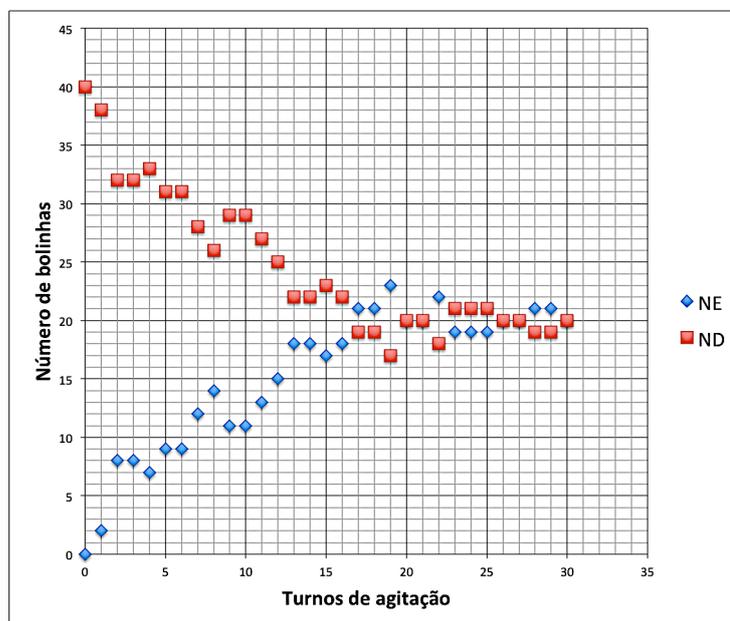


Figura 4.4: Pré-teste do experimento
(NE = número de bolas do lado esquerdo e ND = número de bolas do lado direito)

É claro que será sempre desejável que os estudantes espontaneamente sistematizem os dados da experiência na forma de uma tabela ou um gráfico, como o da figura 4.4. Entretanto, é objetivo da atividade que desenvolvam seus próprios métodos e cheguem às suas próprias conclusões. Caso haja a necessidade, dependendo do andamento da discussão no grupo, o professor pode sugerir o registro e a sistematização dos dados, mas nunca de forma a impor artificialmente uma metodologia.

Ao final do desenvolvimento da atividade, é necessário um momento de fechamento no qual o professor deve sistematizar os conceitos de macroestado, microestado e entropia e explicitar a segunda lei da Termodinâmica em termos deste último. Sugerimos um breve roteiro para esta sistematização pensada em termos dos resultados obtidos pelos estudantes durante a atividade.

1. Pedido para que os alunos exponham seus resultados.
2. Identificação do estado 20/20 como o mais provável.
3. Apelo aos conhecimentos prévios de Análise Combinatória dos alunos para responder às questões:
 - a. De quantas maneiras poderíamos obter o estado 0/40?

- b. De quantas maneiras poderíamos obter o estado 1/39?
 - c. De quantas maneiras poderíamos obter o estado 2/38?
4. Reconhecimento de que cada uma dessas maneiras tem a mesma probabilidade de ocorrer.
 5. Definição dos termos “macroestado”, “microestado” e “multiplicidade”.
 6. Projecção na lousa da tabela 4.1, que contém as multiplicidades dos macroestados do sistema de 40 bolinhas (o cálculo explícito é contraproducente a partir do estado 3/37).
 7. Definição da Entropia como proporcional ao logaritmo da multiplicidade.
 8. Apresentação da segunda lei da Termodinâmica como a lei da não redução da Entropia de um sistema fechado.
 9. Discussão com os alunos de possíveis relações entre os novos conceitos apresentados e as três atividades realizadas.
 10. Discussão com os alunos acerca da assimetria fundamental na passagem do tempo e sua possível relação com a segunda lei, incluindo a percepção do caráter probabilístico do conceito de Entropia no contexto da Física Estatística.

5 Atividade 4: Máquinas térmicas

5.1 Objetivos

O principal objetivo da atividade é a compreensão de que uma máquina térmica é um sistema em desequilíbrio e que a tendência natural de busca pelo estado de equilíbrio térmico é a razão de seu funcionamento. Deseja-se ainda que o estudante infira que tal sistema, mantido termicamente isolado do ambiente externo, eventualmente entraria em equilíbrio térmico e, portanto, não poderia funcionar continuamente. Isso é o mesmo que afirmar que a dissipação de energia térmica é inerente ao princípio de funcionamento da máquina e não apenas uma consequência de limitações ou imperfeições técnicas que sempre podem ser minoradas com o desenvolvimento de novas tecnologias. Em suma, o objetivo primeiro é o reconhecimento de que há uma limitação física ao rendimento das máquinas que é fundamentalmente diferente de uma limitação técnica.

Não temos como objetivo neste momento a formalização da segunda lei da Termodinâmica no cálculo do rendimento de uma máquina térmica e sua comparação com o rendimento máximo teórico associado ao ciclo reversível ou máquina ideal de Carnot. Caso o

professor julgue necessário, deverá fazê-lo num momento subsequente e talvez precise apelar para uma exposição teórica.

Afirmamos que o ponto no estudo da segunda lei, no contexto da máquina térmica, que merece o foco de nossas atenções neste momento é o fato de que há um rendimento máximo imposto pela Natureza que vai além de possíveis dificuldades técnicas e não necessariamente a operacionalização do cálculo deste limite. Acreditamos que desenvolver com o aluno o simples reconhecimento dessa limitação é suficiente numa perspectiva de ensino médio. A determinação matemática do limite e comparações quantitativas entre máquinas reais e o ciclo ideal podem ser deixadas à margem para serem retomadas por aqueles estudantes com interesse profissional na área de Ciência e Tecnologia em turmas específicas ou cursos de nível superior. De que forma poderíamos adequadamente abordar estes aspectos numa sequência investigativa é uma pergunta que escapa aos limites desta proposta, constituindo um possível caminho para desenvolvimentos futuros.

A contextualização histórica é um objetivo, embora não o principal, desta atividade. Ela permite, não apenas articular os conteúdos da Física com os da História dependendo do currículo dessa outra disciplina, como também reforçar uma concepção de progresso da ciência como empreendimento sócio-histórico localizado no tempo e no espaço. O aporte de elementos de História e Epistemologia nesta atividade, ainda que de forma secundária, pode ser importante no sentido do fomento a uma visão de ciência como atividade associada a expectativas e demandas sociais e econômicas de uma época.

5.2 O texto

O texto (vide Material para o aluno, parte II) é um recorte de trechos da obra “Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas próprias a desenvolver essa potência”, publicada pelo célebre engenheiro francês Sadi Carnot em 1824. Os trechos foram extraídos de citações feitas no corpo do texto da dissertação de mestrado de Katya Aurani (1985), traduzidos do francês original pela autora.

A aplicação de um texto de fonte primária é proposital e intenciona contribuir para evitar distorções comuns na abordagem tradicional dos livros didáticos. O texto original flexibiliza os conceitos e reforça a noção de que a ciência é uma representação da Natureza que, bem estabelecida em dado momento, é resultado de um processo de desenvolvimento.

Uma das distorções comuns que se deseja evitar é a imagem de que a máquina a vapor e as demais máquinas térmicas teriam derivado de um estudo já estabelecido da

Termodinâmica. Na verdade, o desenvolvimento da teoria se confunde com o aprimoramento técnico da máquina a vapor e com as demandas sociais e econômicas da Europa da primeira revolução industrial num processo em que ciência, tecnologia e sociedade se articulam e retroalimentam. O ensaio de Carnot mostra um exemplo de construção do conhecimento científico como processo que articula elementos da ciência, da tecnologia e da sociedade com rara clareza. No trecho abaixo, é nítido o fato de que, naquele momento, o desenvolvimento das máquinas suplantava o da teoria e que homens faziam esforços no sentido de generalizar a teoria para realimentar o desenvolvimento das máquinas.

É necessário estabelecer os princípios aplicáveis não somente às máquinas a vapor mas a todas as máquinas de calor, seja qual for a substância motora utilizada e qualquer que seja seu método de funcionamento. (Carnot, 1824 apud: AURANI, 1985, p. 30)

O aspecto da ciência em construção sobressai no texto no uso do conceito de calórico. Embora não seja o objetivo da atividade discutir a evolução do conceito de calórico ao conceito de calor, associada à primeira lei da Termodinâmica, é interessante oferecer aos estudantes a oportunidade do contato com um ensaio científico que representa claramente ciência em estágio de desenvolvimento. Discute-se o rendimento das máquinas a vapor, o estudo da Física para o aprimoramento técnico, num momento em que o conceito de calor como forma de energia ainda não se consolidara por completo. Há controvérsias com relação à interpretação de Carnot do conceito de calórico. Segundo Aurani (1985), a afirmativa usual de que o calórico era visto como fluido não parece condizente com alguns argumentos do francês e há pesquisadores que defendem a visão de que o calórico, em Carnot, seria um esboço do conceito de entropia e não de calor. Evitando uma discussão demasiadamente longa sobre o conceito de calórico num momento em que não se faz necessária em sala de aula, pois os objetivos da atividade são outros, assumimos a suficiência da inferência que esperamos da maioria dos alunos: a de tratar-se de um esboço da ideia que viria a se consolidar futuramente como o conceito de calor.

5.3 Realização da atividade

Após a leitura do texto, pede-se aos estudantes, organizados em pequenos grupos, que discutam e tentem encontrar respostas a duas perguntas incluídas no material, disponível no Material para o aluno (parte II), que reproduzimos abaixo.

1. O trabalho de Carnot foi escrito no auge da revolução industrial em 1824, momento em que as máquinas a vapor influenciavam e modificavam a sociedade e o ambiente de

forma muito significativa. Considerando as máquinas a combustão que temos hoje, dois séculos depois, seria possível, na sua opinião, conceber um motor que não desperdiçasse energia de nenhum modo e, portanto, não contribuísse para o aquecimento do ambiente?

- a. Em caso afirmativo, de que modo?
 - b. Em caso negativo, por que?
2. Você consegue estabelecer uma relação entre o ensaio de Carnot e a reportagem sobre o projeto da máquina na ilha de Canárias?

Foram agregados, na primeira pergunta, aspectos das relações entre ciência, tecnologia e sociedade: motores a combustão e aquecimento global, e de contextualização histórica, situando Carnot e as máquinas a vapor na revolução industrial. Espera-se assim que a questão se apresente ao estudante mais aberta e atraente do que seria uma pergunta direta sobre os processos técnicos descritos no texto. Deseja-se, é claro, que das discussões possa emergir o reconhecimento de que não há evolução tecnológica capaz de evitar o fato de que uma máquina térmica requer desequilíbrio para funcionar e de que as afirmações do cientista tem caráter geral e não se aplicam apenas às máquinas a vapor do séc. XIX.

A linguagem utilizada em um ensaio científico do séc. XIX pode ser de difícil compreensão para o aluno, a depender de sua bagagem cultural. Nesse caso, vai caber ao professor uma interferência mais incisiva nas discussões ao circular entre os grupos no sentido de esclarecer os aspectos fundamentais do funcionamento da máquina a vapor. Em particular, espera-se alguma dificuldade de compreensão com relação ao papel do condensador na máquina. Dificuldade crucial, uma vez que este é justamente o elemento da responsável pela dissipação da energia térmica. É esperado que uma possível dificuldade de compreensão do papel do condensador e, conseqüentemente, da noção de desequilíbrio térmico como princípio de funcionamento do sistema, noção que vem a ser o cerne da atividade, leve muitos grupos a aceitarem a suficiência de uma asserção como “o rendimento nunca é 100%” como solução para o problema proposto. Vale lembrar que o resultado da primeira atividade (Moto-perpétuo, seção 2) e o pedido de um comentário comparativo na segunda pergunta podem reforçar esta posição inicialmente. Caberá ao professor também estimular as discussões de modo que a leitura possa ser aprofundada e esta primeira resposta, caso surja, possa ser superada pelos estudantes.

Na figura 5.1 a seguir, apresentamos um esquema simplificado da máquina a vapor construído com base na descrição apresentada no texto. No sentido de esclarecer os princípios de funcionamento da máquina e, em particular, o papel do condensador, o professor poderia

requisitar a construção de um esquema deste tipo pelos estudantes ou oferecê-lo pronto, a depender da necessidade e do tempo hábil para as discussões.

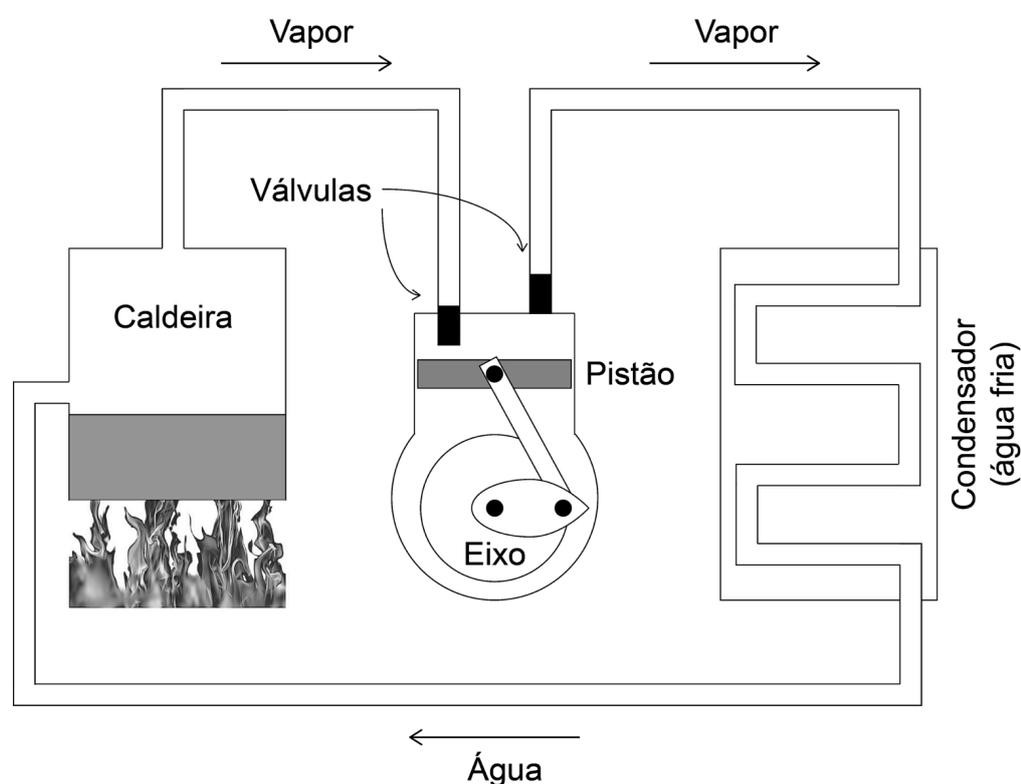


Figura 5.1: Diagrama esquemático simplificado de uma máquina a vapor.

É esperado que o professor seja requisitado pelos grupos no sentido de esclarecer o significado da palavra “calórico”. Este é um momento valioso que deve ser aproveitado para estabelecer discussões muito ricas acerca do processo de consolidação de conceitos científicos e, em particular, acerca da relação íntima entre o desenvolvimento da Termodinâmica e o contexto histórico da Europa entre os séculos XVIII e XIX. Sugere-se uma articulação entre os professores de Física e História da escola como forma de enriquecer a abordagem destas questões com os alunos.

PARTE II: MATERIAL PARA O ALUNO

Atividade 1

Texto adaptado do jornal *O Estado de São Paulo* de fevereiro de 2000.

Ilha das Canárias, no Maranhão, vive o sonho do moto-contínuo

Por: Rebeca Kritsch

ILHAS CANÁRIAS – Em uma das 80 ilhas do Delta do Parnaíba, entre os Estados do Maranhão e Piauí, o maranhense Pedro Oliveira Costa está tentando realizar um antigo sonho da humanidade: construir um motor contínuo. No sonho dele acreditaram a comunidade da ilha de Canárias e a prefeitura de seu município, Araiões, que juntas já investiram R\$ 30 mil no projeto.

“Acho a ideia meio antiga, mas se der certo é a salvação da Ilha de Canárias”, diz o secretário de Administração de Araiões, Rogério Fontenele Lima, de 43 anos. Atualmente a ilha recebe energia de um gerador.

O sistema idealizado por Costa, um mecânico autodidata, funciona com a força da água, armazenada em uma caixa com capacidade para 4.000 litros, a 13,5 metros de altura. Um cano de PVC despeja a água sobre a maior das rodas da engenhoca, com 6,5 metros de raio. Essa roda possui 47 canecas que podem receber, cada uma, 25 litros de água.

Carregadas sucessivamente, as canecas fazem a roda girar. Descem cheias e sobem vazias. O inventor calcula que, a partir de 20 canecas cheias, a roda passa a se mover sozinha.

A força do giro movimentava uma segunda roda, menor, ligada à primeira por uma correia. A segunda alimenta as subsequentes do sistema. Ao todo são 13, de peso e tamanho diferentes, ligadas por 10 correias. Enquanto a roda grande completa um giro, a menor delas completa 250, segundo o inventor. “Estamos usando as duas forças mais poderosas do mundo”, explica. “A força da gravidade e a da alavanca.”

A energia resultante do movimento vai acionar um gerador. Ele vai alimentar a comunidade e uma bomba, que recolocará a água despejada pelas canecas da roda grande na caixa. Essa bomba, segundo o inventor, tem força para colocar 250 mil litros de água por hora a 13,5 metros de altura.

“A roda de água na água funciona”, explica Costa, 53 anos. “Mas agora vamos fazer no lugar seco.”

Nem em filme!

Por enquanto, a ideia nem nos filmes funcionou. Em *Kenoma*, de Eliane Caffé, José Dumont acalenta sonho semelhante. Ele interpreta Lineu, que dedica a vida à tentativa de tornar viável o moto-perpétuo.

Visíveis do porto da ilha, as rodas de Costa de fato parecem saídas da ficção. A maior, já pintada de prateado, destaca-se inesperada entre a vegetação e as casas simples dos pescadores. A obra é o orgulho e a esperança dos moradores, os primeiros a acreditar no inventor. Para tirar a ideia do papel, juntaram entre eles R\$ 4 mil. A partir daí, a prefeitura resolveu financiar o experimento. Se funcionar, pode resolver um dos principais problemas de Araiões: o déficit de energia, fornecida para a cidade pelo Piauí.

“Quem diz que não vai funcionar é porque a fé é pouca”, diz Maria das Dores Oliveira, de 72 anos, que cedeu parte de seu quintal para a obra. “Vai ser uma energia de outro mundo”, entusiasma-se o filho dela, Antônio Claurete, de 34 anos, zelador do posto de saúde de Canárias.

Costa levou mais de 15 anos para convencer alguém a financiar o projeto. Ele teve a ideia de criar o moto-contínuo em 1983, quando perdeu uma safra de feijão por falta de água. Queria montar um sistema de irrigação alimentado por uma fonte de energia economicamente viável. Petróleo ou eletricidade convencional era muito caro. Começou, então, a desenvolver seu modelo com a ajuda de físicos, matemáticos e professores universitários, consultados quando havia chance.

Só dar a partida!

O inventor diz ter estudado os erros e acertos dos inventores que já tentaram construir o moto-contínuo e, por isso, dessa vez, a ideia ia funcionar: “Só vai precisar dar a partida”. Entre seu material de pesquisa ele guarda até mesmo um desenho de um dos primeiros modelos de moto-contínuo da história da humanidade, desenvolvido há 400 anos.

“É a invenção mais pesquisada do mundo inteiro”, diz Costa. “Mas os antigos nunca conseguiram porque não tinham o que existe hoje.” A bomba hidráulica, por exemplo. Disse o inventor: “O que era o mundo há 400 anos?!”.

Antes de executar a obra de Canárias, Costa produziu pequenos protótipos para demonstrar o princípio, com rodas de no máximo 3,6 metros de diâmetro. Ele conseguiu colocar as miniaturas em funcionamento, mas nenhuma delas gerou energia. “Não deram força porque eram pequenas”, justifica. “Não dá para usar a mesma alavanca para levantar um fusca e uma carreta”, argumenta.

O segredo de seu motor contínuo, segundo Costa, é justamente a dimensão do sistema. “Nunca tentaram usar a força da alavanca e da gravidade com uma roda de raio tão grande”, garante. Se o experimento der certo, ele pretende partir para proporções ainda maiores.

Rodízio

O moto-contínuo hidráulico de Canárias está quase pronto. A obra começou em fevereiro de 1999. Dez homens ajudaram Costa a erguer a estrutura. “Fui marceneiro, encanador, eletricista, torneiro, soldado e bombeiro”, conta. “Só assim para fazer aquela máquina.” Agora ele dá os retoques finais na pintura e aguarda a chegada do gerador, prometido para essa semana.

O inventor diz ter pedido um gerador de 120 kWAs, o qual, segundo ele, é suficiente para abastecer as 300 casas da ilha mais a população do Delta do Parnaíba, com 2.000 habitantes.

O atual gerador de energia de Canárias é de 40 kWAs, segundo Antônio José Reis, de 52 anos, líder da comunidade. A prefeitura envia de barco, a cada 15 dias, 500 litros de diesel para alimentá-lo. Os moradores nada pagam.

A produção atual é insuficiente. A oferta obriga os habitantes a fazer rodízio. Uma noite é a metade mais próxima do Piauí que recebe energia, das 18 às 22 horas. Na noite seguinte é a outra metade, apelidada de Maranhão. Quase ninguém tem geladeira – ao todo, na ilha, há 12 movidas a gás. Mas aparelho de TV e uma parabólica quase todos têm.

(...) Será mais um (...)

Reis torce pelo sucesso da invenção de Costa: “Canárias precisa muito de energia”. Mas diz que só acreditará no invento quando a máquina funcionar. “Eu confio e desconfio, porque nunca vi um negócio desses.”

E se o moto-contínuo não funcionar? “Se não der certo fica para museu”, diz Reis. “E teremos mais um inventor fracassado.”

QUESTÕES

1. Se você fosse morador da ilha, incentivaria o projeto com ajuda financeira?
 - a. Caso afirmativo, por que?
 - b. Caso negativo, por que?
2. Caso o objetivo da máquina fosse apenas manter a roda em movimento e não fornecer energia elétrica às residências, poderia funcionar? Por que?

Atividade 2

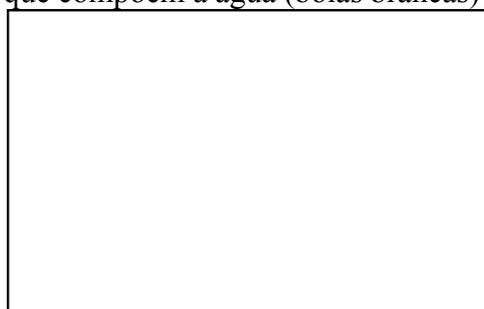
Observe algumas cenas que serão agora exibidas em vídeo. Cada cena será apresentada em duas versões, mas em uma delas há algo errado. Procure identificar, em cada caso, qual é a versão correta. Discuta com seus colegas e apresente também as razões que levaram você à identificação.

Cena 1	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Cena 2	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Cena 3	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Represente nas figuras abaixo algumas partículas que compõem o café (bolas pretas) e algumas que compõem a água (bolas brancas) nos instantes iniciais e finais da filmagem.



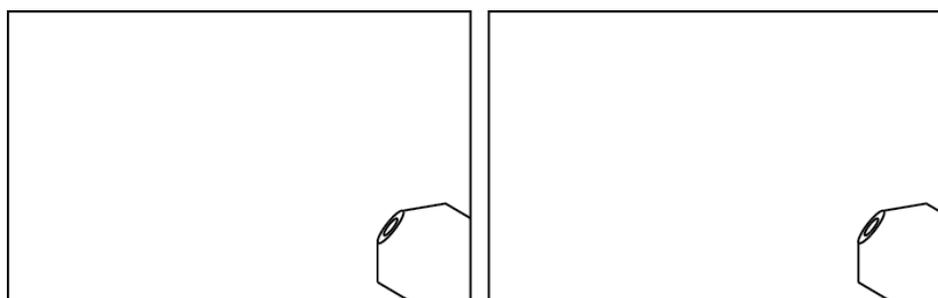
Instantes iniciais



Instantes finais

Cena 4	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Represente nas figuras abaixo algumas gotículas do desodorante e indique com setas a direção e o sentido do movimento de cada uma delas nos instantes iniciais e finais da filmagem.



Instantes iniciais

Instantes finais

Cena 5	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Cena 6	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Cena 7	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Cena 8	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

Você consegue estabelecer uma relação entre os vídeos a que assistimos e o texto sobre a construção do moto-perpétuo na ilha de Canárias?

Atividade 3

1. Objetivo:

O objetivo desta atividade é a observação e o estudo do comportamento de um conjunto de bolinhas de gude contido em uma caixa agitada.

2. Material:

Seu grupo deve receber:

- Uma caixa de papelão contendo uma divisória.
- Quarenta bolinhas de gude.

3. Questões:

1. Se todas as bolinhas são colocadas do mesmo lado da caixa e ela é agitada:
 - a. Em qual lado da caixa você esperaria encontrar uma bolinha em particular após algum tempo? Do mesmo lado ou do outro? Por que?
 - b. Como você esperaria encontrar a distribuição do número de bolinhas entre os dois lados da caixa após algum tempo? Por que?
 - c. Você esperaria encontrar todas as bolinhas do mesmo lado da caixa uma segunda vez? Por que?
2. Você consegue encontrar relações entre esta experiência e algum ou alguns dos vídeos que assistimos na aula passada?
3. Você consegue encontrar relações entre esta experiência e o relato jornalístico sobre a construção da máquina na Ilha das Canárias?

Atividade 4

Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas próprias a desenvolver essa potência

Sadi Carnot (1824)

(...)

O estudo desses engenhos (máquinas térmicas) é de grande interesse, a importância deles é enorme, seu uso está crescendo continuamente, e parecem destinados a produzir uma grande revolução no mundo civilizado.

A máquina a vapor já explora nossas minas, impele nossos navios, escava nossos canais e nossos rios, forja o ferro, talha a madeira, mói os grãos, fia e tece nossas roupas, transporta as cargas mais pesadas, etc. Parece que um dia servirá como motor universal e como substituto para a força animal, quedas d'água e correntes de ar.

Sobre o primeiro desses motores, apresenta a vantagem de economia, sobre os outros dois, a inestimável vantagem de poder ser usada a qualquer hora e lugar sem interrupção.

(...)

O mais importante serviço que a máquina a vapor prestou à Inglaterra é indubitavelmente o da exploração das minas, que havia declinado, e ameaçado cessar inteiramente, em consequência da dificuldade continuamente crescente de drenagem, e de elevar carvão. Devemos colocar em segundo lugar o benefício para a manufatura do ferro, tanto pela abundante reserva de carvão para substituir a madeira no momento em que esta tinha começado a se tornar escassa, quanto pelo uso de poderosas máquinas de todos os tipos que o uso da máquina a vapor tem permitido ou facilitado.

Ferro e calor são, como sabemos, os suportes, as bases das artes mecânicas. É duvidoso que haja na Inglaterra um único estabelecimento industrial cuja existência não dependa do uso desses agentes, e que não os empregue largamente. Privar a Inglaterra hoje de suas máquinas a vapor seria privá-la ao mesmo tempo de seu carvão e seu ferro. Seria secar suas fontes de desenvolvimento, arruinar tudo aquilo de que sua prosperidade depende, em resumo, aniquilar aquela potência colossal. A destruição de sua marinha, que ela considera sua mais forte defesa, seria talvez menos fatal.

(...)

O fenômeno da produção do movimento pelo calor não tem sido considerado de um ponto de vista suficientemente geral. Nós o temos considerado somente em máquinas cuja natureza e modo de ação não nos tem permitido absorver a total extensão das aplicações possíveis. Em tais máquinas o fenômeno é, de certa forma, incompleto. Torna-se difícil reconhecer suas leis e estudar seus princípios.

É necessário estabelecer os princípios aplicáveis não somente às máquinas a vapor mas a todas as máquinas de calor, seja qual for a substância motora utilizada e qualquer que seja seu método de funcionamento.

(...)

A produção de movimento nas máquinas a vapor é sempre acompanhada por uma circunstância em que devemos fixar nossa atenção. Essa circunstância é o restabelecimento do equilíbrio no calórico; isto é, sua passagem de um corpo em que a temperatura é mais ou menos elevada para outro em que a temperatura é mais baixa. O que acontece de fato em uma máquina a vapor efetivamente em funcionamento? O calórico desenvolvido na fornalha pelo efeito da combustão atravessa as paredes da caldeira, produz vapor, e de alguma forma incorpora-se a ele. Este último, carregando consigo o calórico, leva-o primeiramente ao cilindro onde desempenha sua função, e dali para o condensador, onde se liquefaz pelo contato com a água fria que aí se encontra. A água fria do condensador se apodera pois, como

resultado final, do calórico desenvolvido pela combustão. Ela se aquece por intermédio do calor, como se tivesse sido colocada diretamente sobre a fornalha. O vapor aqui é apenas um meio de transportar o calórico.

Reconhecemos facilmente nas operações que acabamos de descrever o reestabelecimento do equilíbrio no calórico, sua passagem de um corpo mais ou menos aquecido para um corpo mais frio. O primeiro desses corpos, no caso, é o ar aquecido na fornalha; o segundo é a água da condensação.

(...)

A produção da potência motriz é pois devida, nas máquinas a vapor, não a uma destruição real do calórico, mas a seu transporte de um corpo quente a um corpo frio, isto é, ao seu reestabelecimento de equilíbrio supostamente rompido por qualquer causa que seja, por uma ação química tal como a combustão, ou por qualquer outra.

De acordo com esse princípio, a produção de calor somente não é suficiente para dar origem à potência motriz; é necessário que haja frio; sem isso, o calor seria inútil.

(...)

[Caso o calórico pudesse ser devolvido à fonte quente sem interferência externa] seria não somente um movimento perpétuo, mas uma ilimitada produção de potência motriz sem consumo nem de calórico nem de qualquer outro agente que seja. Semelhante criação é inteiramente contrária às ideias aceitas até o presente momento, às leis da mecânica e da física bem estabelecida; ela é inadmissível.

(...)

De acordo com os princípios estabelecidos até o presente momento, podemos comparar com suficiente precisão a potência motriz do calor à de uma queda d'água. Cada uma delas tem um máximo que não podemos exceder, qualquer que seja, por um lado a máquina em que a água atua, e qualquer que seja, por outro lado, a substância em que o calor atua. A potência motriz de uma queda d'água depende de sua altura e da quantidade de líquido; a potência motriz do calor depende da quantidade de calórico usada, e do que pode ser chamada de altura de sua queda, isso quer dizer, a diferença de temperatura entre os quais a troca de calor se dá.

(...)

Na queda d'água a potência motriz é exatamente proporcional à diferença de níveis entre o reservatório mais alto e o mais baixo. Na queda do calórico a potência motriz indubitavelmente aumenta com a diferença de temperatura entre os corpos frio e quente; mas não sabemos se ela é proporcional a essa diferença.

QUESTÕES

1. O trabalho de Carnot foi escrito no auge da revolução industrial em 1824, momento em que as máquinas a vapor influenciavam e modificavam a sociedade e o ambiente de forma muito significativa. Considerando as máquinas a combustão que temos hoje, dois séculos depois, seria possível, na sua opinião, conceber um motor que não desperdiçasse energia de nenhum modo e, portanto, não contribuísse para o aquecimento do ambiente?
 - a. Em caso afirmativo, de que modo?
 - b. Em caso negativo, por que?

2. Você consegue estabelecer uma relação entre o ensaio de Carnot e a reportagem sobre o projeto da máquina na ilha de Canárias?

Trechos traduzidos por Katya Margareth Aurani a partir do fac-símile da edição de 1824 de *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les machines propres a développer cette puissance* de Sadi Carnot e incluído em sua dissertação de mestrado de título *Ensino de conceitos: estudo das origens da 2ª lei da Termodinâmica e do conceito de Entropia a partir do século XVIII* apresentada à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (USP) em 1985, p. 28-44

PARTE III: REFERÊNCIAS

AURANI, K. M. *Ensino de conceitos: estudo das origens da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII*. 1985. 113f. Dissertação (Mestrado em ensino de ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

BRASIL, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Brasília: Ministério da Educação, 1999.

KRITSCH, R. Ilha das Canárias, no Maranhão, vive o sonho do moto-contínuo. *O Estado de São Paulo*, caderno especial: Descobrimo o Brasil, São Paulo, p. D10-11, 13 fev. 2000.

Disponível em (página d10) [http://acervo.estadao.com.br/pagina/ - !/20000213-38834-nac-0214-cd2-d10-not](http://acervo.estadao.com.br/pagina/-!/20000213-38834-nac-0214-cd2-d10-not) (página d11) [http://acervo.estadao.com.br/pagina/ - !/20000213-38834-nac-0215-cd2-d11-not](http://acervo.estadao.com.br/pagina/-!/20000213-38834-nac-0215-cd2-d11-not) Acesso em 05/01/2014

MENEZES, L. C. A matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico, 1ª edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

MONTEIRO, M. A. A. GERMANO J. S. E., MONTEIRO, I. C. C., GASPAR, A. Proposta de atividade para abordagem do conceito de entropia. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 26, n. 2: p. 367-378, ago. 2009.

PEREIRA JÚNIOR, A. , Irreversibilidade física e ordem temporal na tradição bolzmanniana. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1997.

RODRIGUES, C. F. M. Irreversibilidade In: VIANNA, D. M. (org.) *Temas para o ensino de Física com abordagem CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade)*. Rio de Janeiro: Bookmakers, p.112-134, 2012. Disponível em <http://www.proenfis.pro.br> Acesso em 05/01/2014.