



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
NUMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO**

CARLOS FREDERICO MARÇAL RODRIGUES

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador (es): Deise Miranda Vianna

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014

IRREVERSIBILIDADE E DEGRADAÇÃO DA ENERGIA NUMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO

Carlos Frederico Marçal Rodrigues

Orientador(es): Deise Miranda Vianna

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Presidente, Profa. Dra. Deise Miranda Vianna
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Vitorvani Soares
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profa. Dra. Marília Paixão Linhares
Instituto de Física
Universidade Estadual do Norte Fluminense

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

R696	<p>Rodrigues, Carlos Frederico Marçal. Irreversibilidade e degradação da energia numa abordagem para o ensino médio / Carlos Frederico Marçal Rodrigues . – Rio de Janeiro, 2014. 141 f. : il. ; 30 cm .</p> <p>Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientadora: Dra. Deise Miranda Vianna. Bibliografia: f. 129-131</p> <p>1. Ensino de Física. 2. Termodinâmica. 3. Energia. 4. Irreversibilidade. 5. Atividades Investigativas. I. Vianna, Deise Miranda. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Física. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 530.07</p>
------	---

Dedico esta dissertação
aos alunos do Colégio Pedro II,
do passado, do presente e do futuro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à professora Deise Miranda Vianna, não apenas pelo trabalho de orientação, imprescindível e decisivo, mas também pelas lições em muitas outras esferas. Pela paciência admirável e pela postura ética e humana diante do trabalho na academia, especialmente no trato com alunos e orientandos. Não há como mensurar o valor do que aprendi nesse convívio e o respeito e a admiração que dele derivam.

Aos alunos do Colégio Pedro II, Unidade Escolar São Cristóvão III (hoje Campus São Cristóvão III), que cursaram a segunda série do ensino médio no ano de 2012 nas turmas em que tive o prazer de lecionar. Agradeço pelo carinho sempre presente e pelo empenho e dedicação na participação na aplicação das atividades que fazem parte deste trabalho.

À professora Maria Luiza de Araújo Marçal, minha mãe, pelo apoio constante e incondicional em todos os momentos ao longo de pouco mais de três décadas.

A Artur Goulart Rodrigues, meu filho, por ensinar-me, do alto de seus quatro anos de vida, que, mesmo nos piores momentos, as grandes questões são quase sempre as mais simples.

Aos colegas do grupo PROENFIS pelas discussões em oficinas, corredores e mesas de bar, fundamentais na construção de uma visão do ensino de Física hoje muito diferente da que trazia comigo três anos atrás.

Ao colega Jean Coelho Ferreira, licenciando em Física pela UFRJ, pelo inestimável apoio nas aplicações de algumas das atividades.

Agradeço aos professores Vitorvani Soares e Marília Paixão Linhares por aceitarem gentilmente o convite da Comissão Deliberativa do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UFRJ para fazer parte da banca examinadora.

Nada do que foi será
de novo do jeito que já foi um dia
(Lulu Santos e Nelson Motta)

RESUMO

IRREVERSIBILIDADE E DEGRADAÇÃO DA ENERGIA NUMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO

Carlos Frederico Marçal Rodrigues

Orientador (es): Deise Miranda Vianna

Apresenta-se uma proposta de abordagem didática do tema da irreversibilidade dos processos naturais e suas relações com a degradação da energia e com a segunda lei da Termodinâmica com vistas a utilização em salas de aula do ensino médio. É proposta uma sequência de quatro atividades de ensino por investigação que tem como objetivo uma abordagem deste tema com enfoque CTS e em conexão com aspectos da vivência cotidiana do aluno. Também é apresentada a análise qualitativa de episódios de discussão selecionados a partir da aplicação teste, realizada em uma escola da rede federal de ensino. Esta análise procurou valorizar o desenvolvimento, no aluno, de habilidades associadas à capacidade de argumentar. Mostra-se que as quatro atividades aqui descritas são ricas em possibilidades de aprendizagem de conceitos físicos relevantes, além de contribuírem para a construção, por parte dos alunos, de uma visão adequada de desenvolvimento científico.

Palavras - chave: Atividades Investigativas, CTS, Argumentação, Irreversibilidade, Energia, Termodinâmica.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014

ABSTRACT

IRREVERSIBILITY AND DEGRADATION OF ENERGY IN A HIGH SCHOOL APPROACH

Carlos Frederico Marçal Rodrigues

Supervisor (s): Deise Miranda Vianna

We present a tentative approach for teaching the subject of irreversibility of natural processes and its relationships with the degradation of energy and the second law of Thermodynamics with the intent of usage in high school classes. It is proposed a sequence of four investigative activities that aims to approach the topic with emphasis on STS and connections with aspects of student's daily life. We also present a qualitative analysis of discussion episodes selected from test classes performed in a federal school. This analysis aims to value the development of skills associated with argumentation. It is shown that the activities are rich in learning opportunities of relevant physical concepts and contribute to forming a proper view of scientific development.

Keywords: Investigative Activities, STS, Argumentation, Irreversibility, Energy, Thermodynamics.

Rio de Janeiro
Janeiro de 2014

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Escolha do tema.....	13
3. Referencial teórico.....	17
3.1. Enculturação científica.....	17
3.2. Enfoque CTS.....	19
3.3. Atividades investigativas.....	22
3.4. Argumentação.....	27
3.5. Elementos de sociologia da ciência.....	32
4. Irreversibilidade.....	37
4.1. Considerações iniciais.....	37
4.2. Irreversibilidade e degradação da energia.....	37
4.3. Máquinas térmicas.....	41
4.4. Modelo microscópico.....	48
5. Sequência de atividades.....	55
5.1. Vista panorâmica.....	55
5.2. Atividade 1: Moto-perpétuo.....	56
5.3. Atividade 2: Irreversibilidade no dia-a-dia.....	58
5.4. Atividade 3: Entropia.....	64
5.5. Atividade 4: Máquinas térmicas.....	70
6. Aplicação e análise de resultados.....	74
6.1. Dinâmica de aplicação e análise.....	74
6.2. Atividade 1: Moto-perpétuo.....	76
6.3. Atividade 2: Irreversibilidade no dia-a-dia.....	86
6.4. Atividade 3: Entropia.....	100
6.5. Atividade 4: Máquinas térmicas.....	113
7. Considerações finais.....	124
8. Referências bibliográficas.....	129
Anexo 1: Material para o aluno.....	132

1. INTRODUÇÃO

O professor de Física e o pesquisador do ensino de Física são pessoas diferentes. São diferentes porque enxergam horizontes diferentes. O do professor é ensinar, e seu movimento é alimentado pela satisfação de ver o aluno aprender. O do pesquisador é produzir novas ideias e, quem sabe, contribuir com o que se sabe sobre o aluno. O professor de ofício tem seus dois pés fincados na sala de aula, que vive diária e intensamente, que é sua opção de vida, sua segunda casa, ganha-pão, fonte de suas dores e prazeres, fracassos e realizações. O pesquisador tem seus olhos voltados para a sala de aula, mas tem os pés fora dela. O professor é micro, o pesquisador é macro.

Este trabalho foi escrito por um professor.

Uma década e meia de vivência de sala de aula levaram esse professor ao longo de um caminho de reflexão sobre sua prática. Reflexão que deriva da constatação que todo professor de Física já pôde fazer: de que o ensino dessa disciplina fracassa. Fracassa miseravelmente. Os pesquisadores do ensino, que se utilizam de outros métodos, também conhecem esse histórico fracasso e vem registrando-o em trabalhos e publicações bem fundamentados há pelo menos quatro décadas, tomando como marco nacional a realização do I SNEF em 1970 na Universidade de São Paulo.

O caminho de reflexão desse professor se divide em três momentos. O primeiro é o do deslocamento da responsabilidade, o discurso do “a culpa é do aluno”, que enche o ambiente das escolas nas salas de descanso, nos corredores. É uma crença que conforta, que mantém o desânimo sob controle, que dá forças para seguir em frente no exercício do magistério, na rotina da carga de aulas semanais que beira a insalubridade. O segundo momento é o da aceitação do fracasso no nível pessoal, é o momento em que o discurso, quase sempre limitado ao foro íntimo, torna-se “a culpa é minha”. Mas há um terceiro momento, que é o impulso que move a busca por alternativas ao insucesso, o momento da percepção de que alunos e professores estão, no fundo, no mesmo barco. Vivemos todos nas escolas a insistência antipática em objetivos e métodos que já não satisfazem mais a ninguém. Há muito tempo. É o momento do “a culpa deve ser do sistema”.

Nada representa tão bem o sentimento do professor em sua convivência com seus alunos quanto a máxima de que o que ensinamos é diferente do que eles aprendem. A maioria dos professores tem a tendência de reproduzir em suas salas os métodos aos quais foram expostos quando alunos. Não necessariamente por comodismo, mas simplesmente porque faziam parte daquele pequeno mas sempre presente grupo de estudantes que conseguem

encantar-se pela Física quando parece impossível, o pequeníssimo grupo para o qual os métodos tradicionais simplesmente funcionam. E por isso tornaram-se professores de Física. Mas, se não houver um ponto de ruptura, esta lógica segue em frente e uma nova geração de professores vai selecionar mais um pequeno grupo que resiste ao sistema. E vai deixar a maioria de fora do acesso a uma formação científica mínima. Esse processo também é bem conhecido dos pesquisadores do ensino (McDERMOTT, 1993).

Na lógica do professor, a busca por alternativas começa pelo problema do interesse do aluno. É preciso encontrar um meio de estimular sua participação nas aulas de Física. É preciso envolvê-lo, despertar-lhe a curiosidade, o desejo de conhecer, de investigar e, é claro, de ler e estudar. A busca passa em seguida pelo problema da utilidade. De que modo o que supomos saber ensinar pode ser útil para o aluno quando deixar a escola? Não apenas o aluno futuro físico ou engenheiro, mas qualquer aluno, qualquer que seja sua escolha profissional quando egresso da escola como cidadão de nível médio. De que modo a Física pode contribuir para a vida do cidadão comum? Porque é a esse que devemos nossa atenção, esforço e estudo em primeiro lugar. Basta de Física para físicos! Esses podem aprender seu ofício na universidade, instruídos por pessoas mais interessadas nesse tipo de formação e capacitadas a oferecê-la. Nosso desafio deve ser outro: o de humanizar a Física, abrir as caixas-pretas, tirar o conhecimento científico das mãos exclusivas do especialista e oferecer ao menos um primeiro vislumbre aos outros mortais. Ciência inacessível soa como mágica. Não deve ser assim.

É então que o professor remove um de seus pés da sala de aula. Só um, suas raízes são firmes. E o faz porque acredita que o contato com a pesquisa em ensino, de resultados tão evoluídos nas academias, mas tão ausentes das escolas, pode contribuir para encontrar rumos melhores para sua atividade de escolha. Soluções são desenhadas no horizonte, mas há muito trabalho a fazer. Novas perspectivas para o ensino de ciências ganham força no país com imposições governamentais. Com o enfraquecimento e, quem sabe, o fim próximo do exame vestibular. Com novas formas de avaliar e as pressões que acarretam sobre as escolas, que começam a pensar em se refazer, se adequar. Pressões que podem ou não deflagrar mudanças que são tardias, que estão atrasadas em um par de décadas pelo menos. É cedo. Mas há horizontes.

Este trabalho resulta do contato de um professor por convicção com o estudo dessas novas perspectivas para o ensino de Física em seu retorno à universidade. Deriva de sua insatisfação pessoal com os resultados de seu trabalho de moldes tradicionais em sala de aula e da crença na alternativa da enculturação científica. Da defesa de que o ensino de ciências

deve contemplar aquilo que a ciência realmente é: um empreendimento humano que responde a relações complexas e não lineares com a tecnologia e com a sociedade, que se constrói gradualmente e se transforma no tempo. Um esforço coletivo no sentido da solução de problemas de origens múltiplas, que vem a sedimentar ideias, conceitos e técnicas, do mesmo modo como deve ser, guardadas as proporções, uma sala de aula.

Esta é uma proposta de trabalho prático, de aporte direto possível numa sala de aula do ensino médio. Não poderia ser de outro modo pois quem a construiu não tira seus pés de lá, não os dois ao mesmo tempo. É também uma proposta limitada. Uma sequência de apenas quatro aulas que pode auxiliar algum professor na abordagem, de uma forma um pouco diferente daquela que encontramos nos livros didáticos, de um tópico muito específico da Física: a segunda lei da Termodinâmica. Não é necessariamente uma solução para as dificuldades que cercam o ensino desse tema, mas pode ajudar.

No próximo capítulo, apresento os motivos que levaram à escolha da segunda lei da Termodinâmica como tema da Física para este trabalho. No terceiro capítulo, faço uma revisão acerca do referencial teórico adotado, isto é, discuto a proposta de atividades investigativas com enfoque CTS numa perspectiva de enculturação científica. Segue, no capítulo 4, uma breve revisão dos temas da irreversibilidade e da degradação da energia e as relações com a segunda lei da Termodinâmica. No capítulo 5, apresento propostas de trabalho para quatro atividades construídas de acordo com o tema e com o referencial adotado.

As quatro atividades foram postas em prática no mês de dezembro do ano de 2012 em turmas da segunda série do Ensino Médio do Colégio Pedro II, Campus São Cristóvão III (então Unidade Escolar São Cristóvão III), escola federal de ensino regular localizada na zona norte do Rio de Janeiro. Uma análise qualitativa de alguns recortes de transcrições dos registros em áudio das atividades é apresentada no capítulo 6, seguida de algumas considerações finais no capítulo 7. Uma análise que pode indicar que ao menos vale a tentativa. E se este trabalho, que surge motivado por questionamentos da prática de sala de aula, e então vai à universidade, puder retornar à sala de aula, terá cumprido seu papel.

2. ESCOLHA DO TEMA

A negligência com relação a determinados temas da Física nas escolas por motivos alheios à própria Física ou ao seu valor pedagógico é muito bem conhecida dos professores. As justificativas são variadas mas quase sempre passam por “os alunos não entendem isso” e “isso não cai no vestibular”. Alguns desses temas são usualmente previstos no planejamento da escola para as últimas semanas do ano letivo propositalmente, para que o argumento da falta de tempo hábil justifique sua supressão em nome de outros temas “mais importantes”. Importância é um conceito relativo. De todos os temas da Física básica, é provável que o mais maltratado no ensino médio pelos argumentos, verossímeis ou não, da incompreensão dos alunos, pouca cobrança no vestibular e da falta de tempo hábil, seja a segunda lei da Termodinâmica.

Defendo que o estudo da segunda lei não é secundário e não pode ser relegado a segundo plano. A razão de sua importância está na relação íntima que apresenta com uma observação do mundo natural das mais cotidianas: a irreversibilidade.

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, por exemplo. Um copo de vidro se desfaz em muitos pedaços ao se chocar com o solo, mas os pedaços jamais recompõem o copo ao serem recolocados sobre a mesa. 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.

Podemos dizer, de forma mais geral, que todas as leis físicas fundamentais que discutimos até agora, em particular as leis do movimento, são reversíveis: nada nelas permite distinguir um sentido de sucessão de eventos (sentido do tempo) do sentido inverso. O que determina então o sentido do tempo? Qual é a origem física da distinção entre passado e futuro?

A resposta às questões acima está relacionada com a 2a. lei da Termodinâmica. (NUSSENZVEIG, 2002, p. 206)

A irreversibilidade dos fenômenos naturais está ligada à inevitabilidade da degradação da energia. Se todos os sistemas mecânicos com os quais convivemos no dia-a-dia fossem conservativos, isto é, se a energia mecânica fosse sempre conservada, o mundo seria bem diferente do que conhecemos. Um jogador de basquete não precisaria aplicar qualquer força vertical à bola para que voltasse às suas mãos, bastaria abandoná-la e esperar que retornasse naturalmente à altura inicial. Não adiantaria esfregar as mãos num dia frio para aquecê-las. Num mundo inteiramente conservativo, teríamos bastante dificuldade em projetar algum

mecanismo de frenagem para qualquer meio de transporte, seja carro, barco, bicicleta ou patins.

Nos processos mais claramente irreversíveis, são mais significativas as parcelas de energia que não integram a energia mecânica. (...) Ainda que denominemos como 'perdas' as energias que assumem formas menos organizadas, tais como o calor, há uma consagrada convicção de que a soma do conjunto de todas as energias sempre se conserva. (MENEZES, 2005, p. 56)

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.

O estudo da irreversibilidade e da degradação da energia é fundamental, não apenas no contexto da Termodinâmica, mas também da Mecânica, além de constituir conhecimento básico fundamental para uma compreensão melhor do mundo que nos cerca. No texto dos Parâmetros Curriculares Nacionais podemos encontrar o reconhecimento da tradicional supressão do tema nas escolas e das consequências desta prática.

(...) 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)

A ausência da segunda lei da Termodinâmica nas salas de aula é tradicional e notável e encontra suporte na forma como o assunto é tratado nos livros didáticos. A maioria dos livros didáticos de Física para o ensino médio (embora não todos) traz a segunda lei como um apêndice, texto complementar, seção opcional, do capítulo inteiramente dedicado à primeira lei. Em alguns livros, o tema aparece em material anexo, como CD ou caderno complementar.

A que se pode atribuir a negligência com o assunto dada sua importância, apontada inclusive nos parâmetros do MEC? Acredito que a resposta esteja nas dificuldades matemáticas inerentes ao conceito de entropia, tanto no tratamento macroscópico (Termodinâmica) quanto no microscópico (Física Estatística). De acordo com pesquisa realizada por Santos e Pernambuco (2008), a maioria dos livros didáticos opta por apresentar

a segunda lei da Termodinâmica a partir do viés macroscópico, ou seja, do rendimento do ciclo de Carnot, mas apresenta o conceito de entropia em sequência associando-o com a palavra “desordem” de forma abrupta e sem conceituação adequada.

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 escolha do tema para este trabalho emerge de uma insatisfação pessoal com a forma como estes assuntos são tratados no ensino médio, tanto nos livros didáticos quanto nas salas de aula. Surge como uma tentativa de busca de solução para a abordagem de questões fundamentais que não se deixa intimidar pelo monstro matemático que espreita à margem.

A proposta que será feita nos próximos capítulos 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 deixa de ser a segunda lei *per se* e se transforma no estudo da irreversibilidade dos fenômenos naturais e da degradação da energia, que tangencia os conceitos de rendimento e entropia.

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.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Enculturação científica

Os objetivos e o currículo da escola não atendem apenas a aspectos intrínsecos, dependem fundamentalmente da forma como a escola se relaciona com fatores extrínsecos e, portanto, se modificam de acordo com transformações maiores na sociedade. A escola está inserida num dado momento histórico de um dado país e, portanto, não é, nem pode ser, imune ao diálogo com aspectos políticos, econômicos, culturais e sociais. Como mostra Krasilchik (2000), num ensaio que considera o período entre as décadas de 1950 e 1990, é possível traçar um paralelo entre as tendências na pesquisa em ensino, e também nas políticas governamentais para a Educação, e movimentos maiores associados a demandas políticas, econômicas e sociais.

A década de 1950 foi um marco importante para o ensino de ciências, com o surgimento de projetos muito conhecidos na área dos quais, no caso da Física, o mais notório é o Physical Science Study Committee (PSSC). No período do pós-guerra e da guerra fria, a preocupação das nações desenvolvidas, em especial dos Estados Unidos, com o desenvolvimento científico e tecnológico, associado às corridas armamentista e espacial, se reflete numa orientação educacional para a formação de uma elite intelectual que pudesse alavancar esse desenvolvimento. Naturalmente, essa tendência emana para países em desenvolvimento sob influência norte-americana e, no caso do Brasil, vem ao encontro da demanda nacional de cientistas e engenheiros num momento de busca de industrialização e auto-suficiência. Essas tendências influenciam ainda hoje a construção de currículos nas escolas e a orientação metodológica de professores, fortemente marcada por uma visão comportamentalista (KRASILCHIK, 2000). No Brasil, a perspectiva que ainda permeia a escola e a prática do professor é aquela da transmissão acrítica de conhecimentos, que coloca o profissional no papel de organizador de informações e facilitador da aprendizagem.

Em 1996, num momento em que o Brasil já vivia um Estado democrático, ocorre a promulgação da nova Lei de Diretrizes e Bases (LDB), seguida pela publicação dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), em 1999, e das Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+), em 2002, que mostram que as expectativas com relação à educação básica no país mudaram. A escola vem deixando de ser vista como formadora de uma elite intelectual e as políticas governamentais procuram expandir o acesso escolar a todos. A nova lei estabelece claramente que a educação básica

tem função terminal, deve habilitar o cidadão para a prática social e não apenas para a continuidade de estudos. Não é possível definir com clareza se as tendências preconizadas pelo discurso oficial serão não mais que exercício de retórica ou se deflagrarão transformações efetivas na escola. Entretanto, é inegável que o ensino de ciências vem sendo carregado de expectativas sociais diferentes, que não mais concordam com a transmissão de conhecimentos estanques, o que se evidencia no trecho dos PCN citado a seguir.

(...) o aprendizado deve contribuir não só para o conhecimento técnico, mas também para uma cultura mais ampla, desenvolvendo meios para a interpretação de fatos naturais, a compreensão de procedimentos e equipamentos do cotidiano social e profissional, assim como para uma articulação de uma visão do mundo natural e social. (BRASIL, 1999, p. 208)

Essas tendências para o ensino de ciências no país, evidenciadas pelos documentos oficiais, mostram forte relação com uma perspectiva, que se desenvolve desde a década de 1960 no campo da pesquisa, referida aqui como “Enculturação Científica”. Como mostraram Sasseron e Carvalho (2011), em seu trabalho de revisão do tema, vários termos diferentes tem sido usados para designar o ensino de ciências que se preocupa com a formação do cidadão para a ação em sociedade: Enculturação Científica, Letramento Científico ou Alfabetização Científica, cujas diferenças são sutilezas que, em alguns casos, podem ser atribuídas à tradução. A escolha pelo primeiro visa marcar uma adesão pessoal ao fomento à formação de uma cultura científica como objetivo maior de qualquer ação em sala de aula.

Ainda de acordo com Sasseron e Carvalho (2011), a elaboração de propostas de aulas que visem a Alfabetização Científica, ou Enculturação Científica como preferimos, deve considerar três eixos estruturantes:

- Compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais.
- Compreensão da natureza das ciências e dos fatores éticos e políticos que circundam sua prática.
- Entendimento das relações existentes entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente.

Entendemos que os três eixos devem permear as atividades de sala de aula simultaneamente pois não são excludentes, são complementares. Desejamos que o aprendizado abarque sim o exame de conceitos específicos fundamentais da Física, mas não nos satisfaz a contemplação de ideias fechadas desvinculadas do processo que as consolida. Esse processo não é isento, é localizado na História e se articula com o desenvolvimento da tecnologia e da sociedade.

Resta saber como estabelecer um processo de ensino-aprendizagem que promova verdadeiramente enculturação científica. Em primeiro lugar, é preciso considerar o papel preponderante das relações CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) e realizar uma ampliação de foco de estudos. Em seguida, deslocar o papel do aluno na sala de aula, de receptor passivo de conhecimentos escolares para sujeito ativo na construção do conhecimento. Por fim, valorizar o discurso do aluno relativizando-o a partir da compreensão de que se localiza no tempo e no espaço, evitando o julgamento dicotômico do “certo” e do “errado” e zelando pela manutenção de um ambiente saudável e encorajador que estimule a participação efetiva de todos.

A figura 3.1 abaixo resume os aspectos subjacentes ao objetivo maior da Enculturação Científica.

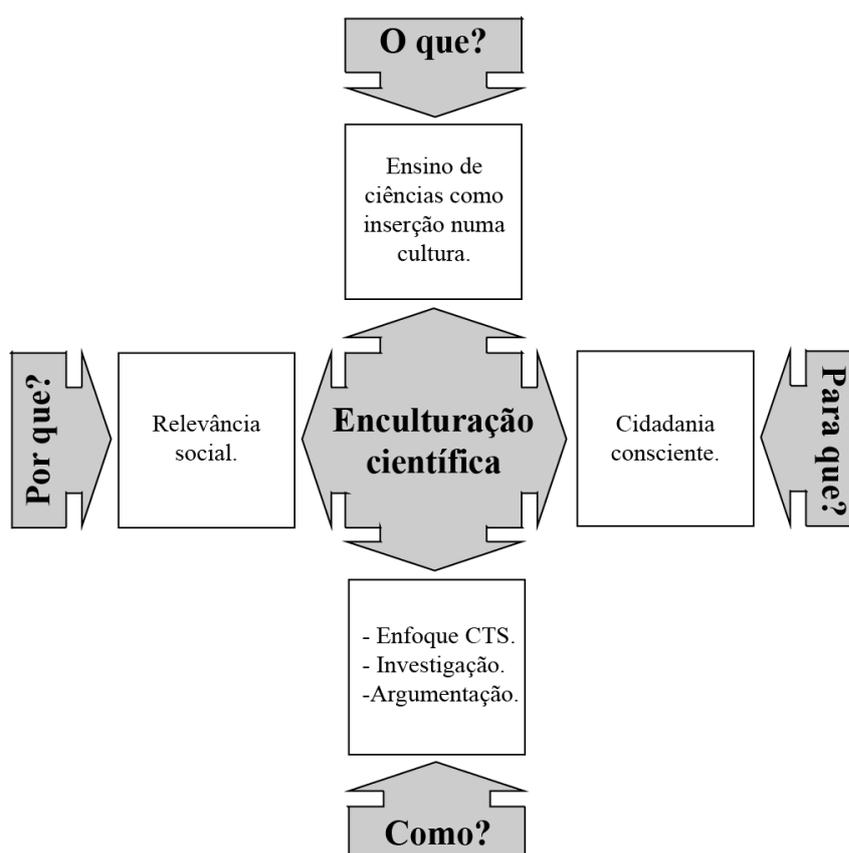


Figura 3.1: Enculturação Científica

3.2 Enfoque CTS

O enfoque CTS surge neste trabalho como forma de deslocar o ensino da Física de um viés orientado ao interesse em carreiras específicas nas áreas de Ciência e Tecnologia para um orientado à participação efetiva de todos os estudantes com suas diferenças de interesses

peçoais. Se acreditamos que o ensino da Física no nível médio deve atender ao objetivo maior da formação de uma cultura científica e não necessariamente ao de uma preparação prévia, e talvez precoce, para instrução superior em determinada área, devemos considerar outros aspectos da ciência que não apenas seus produtos, teóricos ou práticos, acabados e descontextualizados.

Uma das expectativas com relação a uma abordagem com enfoque CTS é a de um indicativo de solução para o problema da crescente falta de interesse do estudante nas aulas de Física no ensino médio. Desejamos que o contato do aluno com essa disciplina em sua vida escolar não represente, no futuro, apenas uma vaga lembrança de estudo mnemônico ou exercício de álgebra. Para tanto, é necessário ter em mente a questão da relevância do que se ensina, no sentido da relevância para o aluno e para a visão que tem do mundo, e não apenas no sentido da relevância para a estrutura interna de uma teoria. Tornar a ciência relevante e significativa para o estudante pode ser feito ligando-a aos fenômenos sociais e à sua vivência cotidiana (CACHAPUZ et. al, 2008).

O estudante está inserido num mundo onde se articulam três espaços: o social, o artificialmente construído e o natural. O segundo é a Tecnologia e o estudo do terceiro é a Ciência. Seus esforços no sentido de uma compreensão desse mundo levam em conta os três espaços de forma integrada (AIKENHEAD, 1996). O enfoque CTS representa então uma ampliação de perspectiva, da que vê apenas a Ciência *per se*, para a que atribui centralidade às relações entre os três espaços. O enfoque CTS desloca o protagonismo do conteúdo específico e de seu especialista, o professor, para o aluno e a forma como compreende o mundo a sua volta.

Não deriva da instrução tradicional o posicionamento crítico diante do desenvolvimento tecnocientífico. Esperamos, como educadores, que sejamos capazes de contribuir para a formação de uma cidadania plena, o que requer uma visão de ciência e tecnologia como aspectos articulados a outros que compõem uma sociedade, em oposição à de atividades neutras e fechadas em si mesmas. É requerido do cidadão contemporâneo a capacidade de se posicionar ou, em alguns casos, participar em tomadas de decisão de cunho tecnocientífico e interesse social. A formação oferecida pela escola média nas áreas de ciências pode contribuir para empoderar o cidadão para esse posicionamento crítico, não apenas com conhecimentos técnicos específicos, mas principalmente com uma visão de ciência como atividade humana. O trecho citado a seguir resume essas questões.

Também é esperado da ciência CTS que preencha um vazio crítico no currículo tradicional – a responsabilidade social na tomada coletiva de decisões em questões relacionadas a ciência e tecnologia. Essas questões requerem uma mistura harmoniosa de uma elite técnico-científica com uma cidadania informada e atenta. (AIKENHEAD, 1996 – tradução nossa)

Para o planejamento de uma atividade que seja verdadeiramente relevante para o aluno levando em conta as articulações entre os três espaços, Aikenhead (1996) sugere uma sequência a ser observada. A figura 3.2 a seguir resume essa sequência. A atividade deve se iniciar com um problema que surge no espaço social e exige, para o seu entendimento, o contato com algum tipo de tecnologia, ainda que superficialmente. Problemas tecnológicos são quase sempre relacionados a questões sociais e tem maior potencial para atrair o interesse do estudante que questões de ciência pura tradicional. A ciência tradicional surge como forma de compreender o problema tecnológico de modo a permitir que o estudante retorne ao exame da tecnologia e, por fim, possibilite a reconsideração ou tomada de posição no espaço social.

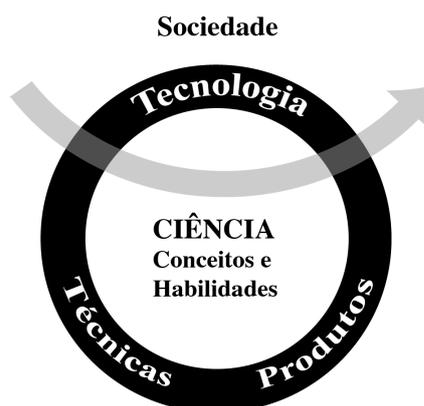


Figura 3.2: Atividade CTS. Adaptada de Ainkenhead (1996).

A inserção do enfoque CTS pode ser feita no currículo de ciências de diversas formas ou em diversos níveis. Nos dois lados da moeda estão: a proposta na qual as relações CTS são breves comentários motivadores em aulas orientadas apenas aos produtos da ciência e a proposta na qual as relações CTS são o único conteúdo considerado e os aspectos específicos da ciência são quase inteiramente abandonados. Não é preciso ser extremista. Podemos classificar, como sugere Aikenhead (1996), o nível de inserção CTS no currículo em oito categorias. Não há julgamento de valor. É claro que qualquer inserção é melhor que nenhuma, tendo em vista os objetivos já explicitados, mas não necessariamente a categoria 8 é mais desejável que a 1. Cada proposta de trabalho que se predisponha a incorporar elementos CTS deve se adequar a uma série de contingências que se relacionam também às demandas específicas da escola onde será aplicada. O quadro 3.1 abaixo é um resumo dessa lista de categorias.

Categoria		Características
1	Motivação através de conteúdo CTS.	Menção breve de conteúdo CTS como forma de atrair o interesse do aluno.
2	Inserção casual de conteúdo CTS.	Estudo curto de conteúdo CTS atrelado ao conteúdo científico.
3	Inserção proposital de conteúdo CTS.	Estudo sistemático e coerente de conteúdo CTS atrelado ao conteúdo científico.
4	Disciplina através de conteúdo CTS.	Conteúdo CTS como organizador do conteúdo científico de uma disciplina.
5	Ciência através de conteúdo CTS.	Conteúdo CTS como organizador do conteúdo científico.
6	Ciência com conteúdo CTS.	Foco no conteúdo CTS. O estudo do conteúdo específico enriquece a aprendizagem.
7	Inserção de ciência em conteúdo CTS.	Foco no conteúdo CTS. O conteúdo específico é mencionado mas não é abordado sistematicamente.
8	Conteúdo CTS.	São estudadas questões tecnológicas ou sociais maiores. O conteúdo específico, quando citado, serve apenas para indicar um <i>link</i> com a ciência.

Quadro 3.1: Categorias de inserção CTS no currículo. Adaptado a partir de Ainkenhead (1996).

Dada a realidade de grande parte das escolas brasileiras, que contam com listas de conteúdo programático bem definidas *a priori* em função de pressões extrínsecas de diversas ordens (documentos oficiais e conteúdo programático de concursos, entre outras), avalio que a inserção do enfoque CTS até a categoria 3 pode ser feita sem grandes dificuldades ou pontos de resistência. Da categoria 4 em diante, seria necessário contar com um projeto de escola receptivo a uma reformulação curricular mais profunda. Há escolas desse tipo no país, mas estão longe de configurarem maioria. Por outro lado, inserções das formas 1 e 2 representam não mais que ações motivacionais e são, portanto, insuficientes para uma proposta séria de enculturação científica. A sequência de atividades que apresentaremos adiante, no capítulo 5, se situa na categoria 3 uma vez que a proposta é motivada por um desejo de aplicação prática direta em sala de aula.

3.3 Atividades investigativas

O ponto de partida de uma atividade investigativa é a proposição de um problema. A construção de novos conhecimentos decorre da investigação de possíveis soluções. Nessa

perspectiva, a solução de problemas não pode ser encarada como um momento desvinculado daquele da aprendizagem de conteúdos. Fazer essa separação, como muitas vezes ocorre na prática de sala de aula, tende a produzir uma visão deformada do que é Ciência (AZEVEDO, 2004).

Para o espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma pergunta. Se não há pergunta, não pode haver conhecimento científico. Nada é evidente. Nada é gratuito. Tudo é construído. (BACHELARD, 1993, p. 18)

Dada a centralidade da proposição do problema no projeto de uma atividade investigativa, faz-se necessário definir com mais cuidado o que se quer dizer com problema. Um problema, em oposição a um exercício de aplicação, possibilita o levantamento e teste de hipóteses. Portanto, não pode ser apenas uma situação de desconforto ou desequilíbrio causada pela existência de uma lacuna a ser preenchida. Um problema não pode vir acompanhado de uma trilha de raciocínio determinada e supostamente conhecida pelo estudante que leve a uma única solução aceitável, isto é, um problema deve ser aberto.

Um problema é uma situação, quantitativa ou não, que pede uma solução para a qual os indivíduos implicados não conhecem meios ou caminhos evidentes para obtê-la. (Krulik e Rudnik, 1980 apud: WILSEK e TOSIN, 2009)

Pode-se estabelecer uma lista de características que sirvam como critérios que determinam o que se pode considerar como um problema autêntico (JIMENEZ, 2010):

- Não tem uma solução imediata nem óbvia.
- É relevante para o alunado, está situado num contexto da vida real.
- Requer processos de indagação para sua solução.
- É aberto, no sentido de pouco estruturado, como são os problemas da vida real.

Ao preconizar a construção do conhecimento a partir da solução de problemas sugere-se implicitamente a coerência entre o desenvolvimento cognitivo do aluno e o processo histórico de consolidação do conhecimento científico. Entretanto, é desnecessário, e possivelmente ingênuo, esperar que o estudante reproduza integralmente e autonomamente os processos pelos quais passa um cientista profissional. Os objetivos e métodos do cientista são muito diversos daqueles do estudante. O que se espera é uma mudança de papéis e atitudes do professor e do aluno. Ao propiciar e valorizar a participação na solução do problema, consideram-se os conhecimentos que derivam da experiência cotidiana e agrega-se valor à empreitada trazendo interesse, envolvimento e empenho. O conhecimento ganha nova dimensão quando se relaciona à experiência pessoal e ao esforço próprio. Ao pôr em prática suas habilidades de forma crítica, ainda que não inteiramente autônoma, o aluno pode superar

a perspectiva do mero cumprimento de obrigações escolares e criar envolvimento emocional com o processo de aprendizagem.

O papel do professor numa atividade investigativa é primordialmente o de propor um problema cuidadosamente escolhido e formulado de modo a propiciar a investigação no sentido do conhecimento que se deseja construir, mas vai além. Muitas vezes, o conflito entre hipóteses excludentes não é reconhecido imediatamente pelos alunos nas discussões em classe (CAPECHI e CARVALHO, 2006) e cabe ao professor explicitar e estimular as discussões. A participação do professor é indispensável, tanto no decorrer das discussões quanto nos momentos de sistematização de conhecimentos, mas seu papel deve ser o de portador de boas perguntas e não o de detentor de respostas. O argumento da autoridade, que emana da postura tradicional do professor em uma aula de viés comportamentalista, destrói as possibilidades abertas por um problema investigável pois anula sua força motriz: se há uma única resposta correta e se essa resposta é conhecida, então não há o que investigar. O aluno diria, imbuído de razão inquestionável: “Ora, conte-me a resposta e poupe-me o esforço!”

De volta à questão da formulação do problema, vale ressaltar que, embora almeje-se a investigação, não é necessário que a solução requeira sempre um passo manipulativo concreto, isto é, o problema pode mas não precisa ser experimental. Pode ser mediado por diversos recursos diferentes dependendo dos objetivos e da disponibilidade. Entre eles, podemos citar: experimentos reais, textos, vídeos, simulações de computador, experimentos mentais, problemas de papel e lápis. Uma atividade investigativa não requer necessariamente o uso de experimentos e, inversamente, do uso de experimentos não decorre necessariamente que a atividade seja investigativa. Resumimos no quadro 3.2 a seguir uma classificação possível de atividades investigativas. Das classes apresentadas, nos interessam mais diretamente as questões abertas e o laboratório aberto.

Atividade	Característica principal
Demonstração investigativa	Demonstração que parte de um problema ou fenômeno a ser estudado e leva à investigação a respeito desse fenômeno.
Laboratório aberto	Um problema cuja solução exige manipulação experimental.
Questão aberta	Questão conceitual relacionada ao dia-a-dia do aluno que pode estar ligada a conceitos discutidos previamente.
Problema aberto	Similar à questão aberta, mas exige a matematização de resultados.

Quadro 3.2: Atividades investigativas. Adaptado a partir de (AZEVEDO, 2004)

Uma questão aberta é um problema conceitual que se relaciona à experiência prévia do aluno e que pode estar associada a conteúdos já abordados. Pode ser agregada a recursos diversos como vídeos, textos ou experimentos mentais e, caso vinculada a conteúdos anteriores, pode servir como avaliação ou até mesmo questão de prova. Constitui uma boa oportunidade para explorar habilidades associadas ao domínio da linguagem escrita, de modo que é importante que a solução de uma questão aberta seja acompanhada de registro formal em papel. No contexto do presente trabalho, as atividades 1, 2 e 4, que serão descritas, respectivamente, nas seções 5.2, 5.3 e 5.5, são questões abertas.

Nota-se que o uso do laboratório é apenas uma dentre muitas possibilidades de construção de uma atividade investigativa. Não é necessariamente a melhor nem a mais adequada em qualquer caso, pois adequação é dependente de contexto. É comum atribuir-se ao laboratório o papel de solução última para todas as dificuldades do ensino da Física e à sua ausência a gênese das mesmas dificuldades. Pesquisas (BORGES, 2002) tem mostrado que, a depender da proposta e do planejamento das atividades experimentais, o laboratório pode servir para difundir uma visão deturpada da atividade do cientista, além de não contribuir efetivamente para a construção de conhecimentos.

O objetivo mais comum das atividades de laboratório, nas escolas onde tais atividades existem, é o de verificar ou comprovar teorias já estudadas. A prática tem, portanto, objetivo ilustrativo e é, em conteúdo, redundante às aulas teóricas. O sucesso de uma atividade assim planejada não é apenas garantido pela proposta, é imposto por ela. Os alunos tendem a manipular medidas quando os resultados parecem não concordar com o esperado, afinal, o resultado pode influir na nota. A análise dos desvios e erros, que poderia enriquecer sobremaneira a prática é quase sempre impossível (pela manipulação de dados) ou simplesmente deixada de lado com a justificativa da falta de tempo hábil.

O uso de uma sequência de procedimentos pré-determinada sedimenta a falsa percepção da existência de um único método a que se possa chamar de científico, método esse que poderia ser resumido em uma lista ordenada de ações claras e infalíveis. Contribui para a concepção errônea de que a observação experimental é inteiramente isenta e não problemática, ou seja, desconsidera de que aquilo que observamos é dependente do que trazemos conosco e do que esperamos observar. Contribui, portanto, para uma visão empírico-indutivista ingênua da Ciência, na qual observações experimentais conduzem direta e linearmente, independentemente dos estudos anteriores e questionamentos de quem observa,

à exposição de verdades inequívocas pré-existentes, que aguardavam à sombra serem trazidas a público pelo experimentador.

É igualmente comum a crença de que a promoção de atividades experimentais depende da existência de um espaço físico especialmente preparado para esse fim. Acredito, inversamente, que uma boa atividade experimental não depende de um laboratório formal em grande parte das situações (embora não em todas). Experimentos úteis podem ser produzidos com materiais de baixo custo encontrados em casa ou na escola, com resultados muitas vezes mais marcantes para o aluno que os obtidos com equipamentos caros, complicados e na maioria das vezes, distantes de sua vivência.

Estamos interessados, portanto, não em qualquer laboratório, mas no laboratório aberto, no qual os alunos não recebem instruções com relação aos procedimentos que devem adotar e não conhecem de antemão os resultados a que devem chegar. Não é nem sequer necessário que haja um resultado único, conhecido pelo professor, a ser atingido. Deseja-se que os estudantes desenvolvam sua própria metodologia, guiados pela busca de solução para um problema proposto, de forma não linear formulando, testando, descartando e reformulando hipóteses e procedimentos. Nessa perspectiva, entendemos que o processo é tão importante quanto o produto (AZEVEDO, 2006).

O quadro 3.3 abaixo mostra as diferenças entre um laboratório tradicional, entendido como um exercício, e um laboratório aberto no qual se promove uma atividade investigativa, entendido como um problema. Note que as duas colunas representam extremos de um contínuo de possibilidades.

Aspectos	Laboratório Tradicional	Atividades Investigativas
Quanto ao grau de abertura	Roteiro pré-definido Restrito grau de abertura	Variado grau de abertura Liberdade total no planejamento
Objetivo	Comprovar leis	Explorar fenômenos
Atitude do estudante	Compromisso com o resultado	Responsabilidade na investigação

Quadro 3.3: Contínuo problema-exercício. (BORGES, 2002)

Uma forma de refinar um pouco mais o entendimento do caminho que vai de um extremo a outro é classificar a atividade de acordo com o grau de abertura em três aspectos fundamentais: problemas, procedimentos e conclusões. No quadro 3.4 abaixo, reproduzimos uma forma de proceder a esta classificação. Note que, evidentemente, o uso tradicional do

laboratório escolar, ao qual nos referimos anteriormente, corresponde ao nível de investigação 0.

Nível de investigação	Problemas	Procedimentos	Conclusões
Nível 0	Dados	Dados	Dados
Nível 1	Dados	Dados	Em aberto
Nível 2	Dados	Em aberto	Em aberto
Nível 3	Em aberto	Em aberto	Em aberto

Quadro 3.4: Níveis de investigação no laboratório de ciências. (TAMIR, 1991 apud: BORGES, 2002)

A proposta da atividade 3, que será detalhadamente descrita na seção 5.4, corresponde a um laboratório aberto de nível de investigação 2.

3.4 Argumentação

Argumentar é avaliar com base em provas (JIMENEZ, 2010). Provas entendidas como fatos, observações, indícios ou conhecimentos previamente acordados que sustentem a veracidade do que se pretende afirmar.

O conhecimento escolar é muitas vezes transmitido com base num tipo de sustentação inteiramente diverso daquele da argumentação de fato, ao qual pode-se referir como argumento de autoridade. Evitando a confusão com o termo autoritarismo, que significa imposição pela força, a sustentação pela autoridade substitui as provas pela confiança nas credenciais de quem afirma. O professor é o especialista em sala de aula e a confiança de seus alunos em seus estudos e experiência prévios dispensam-no de argumentar em favor daquilo que deseja ensinar numa perspectiva tradicionalista. Entretanto, numa perspectiva de ensino que promove a enculturação científica, a argumentação não é apenas um meio de convencimento com o objetivo final da transmissão de conhecimentos. A argumentação é antes de tudo um fim.

A argumentação está no âmago das relações do homem com o conhecimento. Para construí-lo é preciso avaliar e para sedimentá-lo é preciso comunicar e convencer. A capacidade de utilizar provas está ligada a ambos os momentos. O confronto entre hipóteses divergentes é resolvido através de processos de discussão nos quais argumentos e provas são apresentados e comparados. É da solução dos confrontos que emerge a construção de um novo conhecimento, de modo que construção, avaliação e comunicação não são momentos

isolados, são aspectos indissociáveis do mesmo processo. Para que haja levantamento e confronto de hipóteses, é evidente que deve haver um problema a ser solucionado, o que vem ao encontro do pressuposto de que o conhecimento se constrói a partir da demanda de uma questão. A figura 3.3 abaixo, construída a partir de uma leitura de (JIMENEZ, 2010), resume quatro das ideias chave associadas à argumentação na sala de aula.

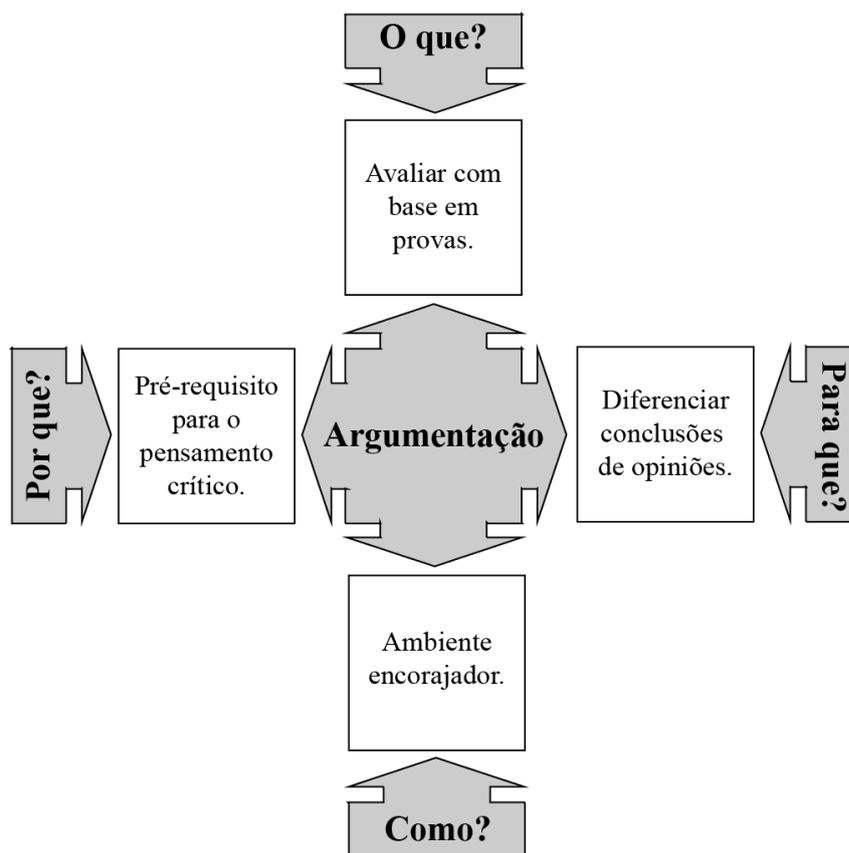


Figura 3.3: Argumentação em sala de aula.

A habilidade de argumentar é um fim em si mesmo no contexto da Educação de um modo geral e não se restringe às áreas de Ciências. Está ligada à cultura científica mas também ao pensamento crítico num sentido mais amplo e ao ganho de autonomia intelectual, no que diz respeito ao desenvolvimento da metacognição. A avaliação de provas é aquilo que permite perceber a diferença entre argumento e opinião, e a capacidade de fazer essa diferenciação constitui uma das competências básicas que se espera de um cidadão egresso da escola média.

A primeira responsabilidade do professor em sala é propor as situações-problema que vão promover episódios de argumentação, já que “o alunado argumenta quando seu papel em sala o exige” (JIMENEZ, 2010 – tradução nossa). Porém, não menos importante, é a responsabilidade de zelar pelo ambiente que encoraja a participação. Esse ambiente

encorajador deriva diretamente do *habitus* do professor. É criado ou destruído por pequenas ações que podem ser palavras, gestos ou expressões faciais mais ou menos explícitos, entendidos pelo aluno como reações positivas ou negativas (CARVALHO, 2011). Relativizar o discurso do aluno, considerando seus argumentos inseridos naquele momento específico da discussão e evitando o julgamento de valor intrínseco com base num referencial de autoridade, é fundamental no sentido de manter sua participação ativa. O aspecto relacional tem papel importante na sala de aula, especialmente se o protagonismo do aluno é um objetivo almejado pela proposta.

Para o acompanhamento e análise das discussões entre os estudantes durante uma atividade de sala de aula, faz-se necessário o uso de uma estrutura que possibilite identificar indícios de que suas falas representem argumentos e não apenas opiniões. Com o objetivo de avaliar a forma dos argumentos, será adotado o padrão proposto por Toulmin (2006).

É possível encontrar num argumento aspectos campo-dependentes e aspectos campo-invariantes, ou seja, elementos que variam de acordo com o contexto em que o argumento se insere (Ciência, Direito, Estética, etc) e elementos que podem ser encontrados em todo e qualquer contexto. Os aspectos campo-invariantes são estruturais, ou seja, definem a forma de uma asserção que se qualifique a ser classificada como um argumento. Por outro lado, a força que determinado argumento possa ter num debate é determinada por critérios sensíveis a contexto e é, portanto, campo-dependente. É proposto então um *layout*, ou seja, uma estrutura ou forma pura que deve ser identificável em qualquer argumento. A figura 3.3 resume essa estrutura.

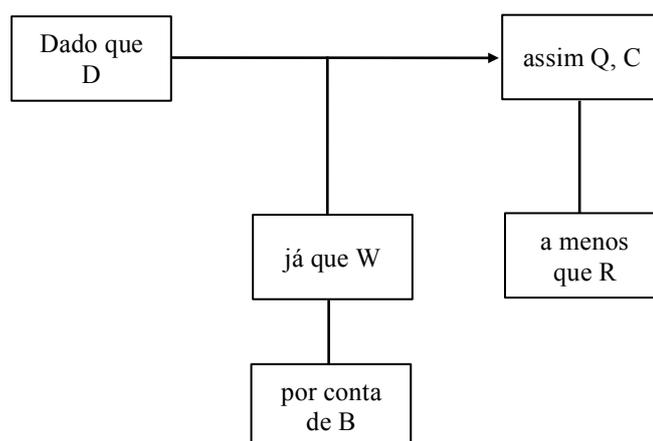


Figura 3.3: O *layout* de argumentos de Toulmin. Adaptado de Toulmin (2006).

Na estrutura, (D) representa os “Dados” e (C) a “Conclusão”. O dado é uma observação ou informação factual a partir da qual deriva diretamente a Conclusão. A relação entre dado e conclusão é a mais forte na composição do argumento. Uma conclusão pura, sem

a presença de dados, não constitui um argumento. O elemento (W) representa as “Garantias”, ou seja, os pressupostos que permitem fazer o passo lógico que vai de (D) a (C). Embora os dados devam ser necessariamente apresentados de modo explícito, é natural que as garantias estejam estabelecidas implicitamente. Garantias precisam ser explicitadas sim quando o argumento é desafiado pelo oponente no debate. Garantias diferentes podem conferir diferentes graus de força ao argumento e os critérios que definem essa força são, mais uma vez, campo-dependentes. Abaixo das garantias estão as bases (B) que a sustentam. Quase sempre implícitas, as bases são informações factuais que servem como mecanismo justificatório da garantia, apresentadas nos casos em que é desafiada. Bases são informações em princípio similares aos dados do argumento em sua forma e, por essa razão, muitas vezes se confundem com os próprios dados, mas é importante notar que seu papel na estrutura é fundamentalmente diferente.

O argumentador muitas vezes precisa explicitar, como forma de proteger sua credibilidade, até que ponto está disposto a se comprometer com aquela afirmativa dependendo da força que percebe emanar de suas garantias. Isso é feito com a inclusão de um qualificador modal (Q) à conclusão. Este é um ponto central na teoria de Toulmin: não é necessário que a conclusão seja inequívoca, como num silogismo clássico, para que componha estruturalmente um argumento. É possível agregar termos como “possivelmente” ou “provavelmente” de modo a indicar o grau de comprometimento pessoal com ela.

Em alguns casos, notoriamente nos argumentos em que a conclusão não é inequívoca, pode ser apresentada uma condição de refutação (R), ou seja, limites ou condições de validade da conclusão. É importante não confundir condições de refutação, que protegem o argumento limitando explicitamente sua validade, com o contra-argumento que, apresentado pelo oponente, procura desconstruir o argumento original atacando as garantias, a relação lógica entre os dados e a conclusão ou os dados em si. A condição de refutação cria uma imunidade ao definir com clareza em que espaço o argumento pode ou não ser criticado e, portanto, reforça o argumento ao invés de contradizê-lo.

É importante ressaltar que, no contexto da aprendizagem, a construção de argumentos é quase sempre gradual e coletiva. Uma vez que o estímulo ao desenvolvimento de habilidades associadas à competência da argumentação está em pauta, é esperado que os diversos elementos que compõem um argumento completo sejam encontrados parcialmente em falas de alunos diferentes no mesmo episódio.

Toulmin (2006) estabelece também uma diferenciação entre duas classes de argumentos especialmente importante quando o campo em questão é o da ciência: argumentos

que “usam garantias” (*warrant-using* no original) e argumentos que “estabelecem garantias” (*warrant-establishing* no original). Os argumentos da primeira classe são os que partem dos dados para estabelecer uma conclusão valendo-se da aceitação prévia de uma garantia. Nos argumentos da segunda classe, a aceitabilidade de uma garantia nova é estabelecida a partir da aplicação sucessiva a uma série de casos nos quais os dados e a conclusão foram verificados independentemente. Argumentos da primeira classe representam a defesa da conclusão, ao passo que da segunda, a defesa da própria garantia.

Argumentos que estabelecem garantias podem ser encontrados tipicamente na relação entre estas e suas bases, ou seja, servem como mecanismo justificatório da própria garantia, que poderia então ser utilizada na fundamentação de argumentos futuros. Argumentos que usam garantias são muitas vezes referidos como argumentos “dedutivos” ou “inferências”. Argumentos que estabelecem garantias, ou seja, que partem da observação de determinada regularidade em uma diversidade de casos e generalizam esta regularidade na forma de uma nova garantia, são muitas vezes referidos como argumentos “indutivos”.

Argumentos que estabelecem garantias são particularmente importantes em fases iniciais do desenvolvimento de teorias científicas. Ora, uma vez que ainda não há garantia acordada à qual recorrer, pode ser preciso fazer conjecturas, ou seja, ligações diretas entre dados e conclusão que não podem ser provadas objetivamente, mas que, verificadas independentemente em um grande número de casos, podem vir a servir como base para construção e defesa de uma garantia anteriormente inexistente.

Numa proposta de ensino por investigação, é desejado que os estudantes conjecturem, ou seja, construam hipóteses explicativas que possam ser testadas. Ao teste, verificação e confronto de hipóteses deve seguir a consolidação de uma delas como fato, que então se torna uma garantia acordada. É importante que se note então que a proposição de argumentos que estabelecem garantias durante a realização de uma atividade investigativa, que podem ser julgados como infundados ao primeiro olhar por constituírem muitas vezes ligação direta entre dados e conclusão, não é apenas natural, é necessária. Isso não é o mesmo, no entanto, que naturalizar uma possível degeneração do trabalho em sala de aula em empirismo-indutivista ingênuo. É claro que conjecturas tem valor apenas na medida em que possam ser postas à prova e contribuam para a construção de concepções mais amplas, mesmo que os passos finais dessa construção venham a requerer algum grau de interferência externa, como uma ação sistematizadora do professor. Esta questão será especialmente importante na análise dos resultados da Atividade 3, que será proposta na seção 5.4 e avaliada na seção 6.4, por tratar-se de um laboratório aberto de nível de investigação 2 (quadro 3.4).

3.5 Elementos da sociologia da ciência

O padrão Toulmin é, por sua própria natureza campo-invariante, distante das sutilezas e especificidades do campo em análise. No caso de uma proposta de ensino de ciências, não parece suficiente, muito embora seja necessário, buscar no discurso do aluno a ocorrência de determinada estrutura lógica que caracterize argumentação. O aspecto campo-dependente surge ao buscar-se indícios de uma discussão de cunho científico. Entretanto, identificar esses indícios pressupõe conhecimento do que são, uma vez que o resultado da observação depende inevitavelmente daquilo que se espera ou deseja observar. Em outras palavras, se é objetivo da análise avaliar a construção ou não de conhecimento que se possa chamar de científico, é preciso primeiro saber o que se espera avaliar.

O modelo de Toulmin vem sendo utilizado por diversos pesquisadores na avaliação estrutural dos argumentos dos alunos em aulas de ciências, como (CAPPECHI, 2004), (CAPPECHI e CARVALHO, 2006) e (GUERRERO, 2007), de modo que adotá-lo é caminhar por terreno aparentemente sólido. A dificuldade de uma análise que considere aspectos mais fortemente campo-dependentes está na inexistência de uma prescrição metodológica para esse fim. Uma estratégia possível seria fazer o aporte de elementos que derivam dos estudos da sociologia da ciência, em especial, do trabalho de Bruno Latour. Estratégia especialmente interessante nos casos em que a proposta para a sala de aula apresenta inserção de conteúdo CTS mais evidente e na qual se espera que a aprendizagem de conceitos científicos ocorra em meio a controvérsias de cunho sócio-científico. Isto é precisamente o que ocorre com a Atividade 1, que será proposta na seção 5.2 e avaliada na seção 6.2.

A primeira crítica a se fazer com relação ao aporte da sociologia da ciência numa análise de atividade de sala de aula é fato de tratarem-se de estudos orientados a objetos epistemologicamente diferentes. Aluno não é cientista, laboratório escolar não é laboratório científico e, de uma posição extremista um crítico poderia afirmar que ciência escolar não é ciência. É preciso então que se considere a questão com cautela pois não se afirmará a ingênua expectativa da transfiguração do aluno em cientista mirim muito menos da escola média em laboratório de pesquisa.

O transplante artificial da teoria de um contexto a outro ganha sentido na medida em que não se coloca como prescrição rígida de critério de análise. Será antes a escolha de um olhar sobre a produção do conhecimento escolar que busca a superação da dicotomia colocada entre quem e o que se conhece.

Os trabalhos no campo escolar têm mostrado, cada vez mais, que não existe ciência pura, limpa e fluida de um lado, de quem o público pacientemente espera os resultados, e a política, o povo com seus valores, do outro. Todo o desafio está em superar essa dicotomia. (OLIVEIRA, 2006)

É evidente que o referencial latouriano sofrerá modificações e adaptações na chegada a um campo diverso daquele de sua gênese. Não há, no entanto, a pretensão de criação de um novo referencial no sentido do estabelecimento de critérios rígidos de análise a serem seguidos por quem quer que seja. As ideias oriundas da sociologia da ciência servem como um pano de fundo sobre o qual é superposto o problema em pauta sofrendo adaptações e ajustes que, por serem dinâmicos, poriam em xeque sua utilização como critério, mas não como perspectiva. Vale o questionamento de até que ponto sua identidade terá perseverado, mas vale também a objeção de que esta obstrução não deriva do campo específico e sim de uma preocupação acadêmica superável com a limpeza teórica (OLIVEIRA, 2006).

A proposta é a de realizar a importação e a adaptação das três primeiras das sete regras metodológicas postuladas por Latour em sua obra “Ciência em ação” (LATOURE, 2011). No estudo original, as regras prestam-se a nortear precisamente as ações do autor na tarefa de seguir em tempo real a atividade profissional de cientistas e engenheiros. Aqui, busca-se um posto de observação seguro, um ângulo de visão a partir do qual pode-se observar as discussões de sala de aula.

A visão latouriana de ciência vem ao encontro de uma proposta de ensino que visa não apenas a aquisição de produtos científicos mas, antes de tudo, a formação de uma cultura científica como forma de responder aos desafios que a sociedade contemporânea apresenta a todos, inclusive os estudantes. Nesse sentido, é necessário diferenciar os dois estágios pelos quais passa a ciência ao longo de seu processo de consolidação: “ciência em ação” e “ciência pronta”, e realizar uma escolha epistemológica por um dos dois.

Ciência pronta é o status de uma teoria científica, ou artefato tecnológico, já consagrada por um longo e complexo processo de consolidação e transmutada de uma hipótese dentre outras em fato ou verdade científica. Ao transitar do estágio de ciência em ação para o estágio de ciência pronta, um produto científico torna-se, como denominado por Latour, uma “caixa-preta”. A partir desse ponto, a caixa-preta, como verdade inquestionável até que surja evidência em contrário, passa a integrar uma base para desenvolvimentos futuros.

Regra 1. Estudamos a *ciência em ação*, e não a ciência ou tecnologia pronta; para isso, ou chegamos antes que fatos e máquinas se tenham transformado em caixas-pretas, ou acompanhamos as controvérsias que as reabrem. (LATOURE, 2011, p. 405)

Às ações efetivas do professor no tempo da atividade, a primeira regra sugere que apontem para a abertura de caixas-pretas. Caixas-pretas são necessárias e não seria possível conviver com a tecnociência sem elas. Não seria possível abri-las todas cada vez que fosse necessário o uso de algum artefato ou teoria que delas deriva (GAMA e ZANETIC, 2013). Isso vale para a ciência tanto quanto para o conhecimento escolar. Mas ainda que seja preciso fazer escolhas com relação a quais caixas devem ser abertas e quais podem ser deixadas confortavelmente fechadas, é importante ter em mente que o objetivo é promover o processo que leva ao fechamento da caixa e não contemplar sua tampa lacrada.

Na análise dos resultados da atividade, assumir a perspectiva de ciência pronta corresponderia a medir conhecimentos supostamente adquiridos com sua realização, o que poderia ser feito por meio de aplicação de avaliação formal posterior, dispensando o acompanhamento da atividade em tempo real. A primeira regra sugere a concentração de esforços numa análise que considere o processo e que, portanto, deve focar o todo da dinâmica de sala de aula e não apenas algum resultado desvinculado dela.

O processo histórico que leva à transformação de uma afirmação em fato ou ficção, ou seja, o processo de consolidação de uma teoria como verdade científica ou caixa-preta, não é guiado apenas por aspectos intrínsecos da afirmação. O cientista, ao apresentar e defender suas ideias, confere-lhes força por meio do alistamento de aliados humanos e não-humanos. Aliados não-humanos são caixas-pretas já estabelecidas como tal, reunidas em torno de sua ideia de modo a inseri-la num contexto científico consistente. Aliados humanos são outros pesquisadores, engenheiros, inventores, empresas ou até mesmo o cidadão comum, consumidor, que utilizem e expandam sua ideia no futuro. De modo que a consolidação de um produto tecnocientífico se dá, principalmente, por seu uso posterior. Essa concepção define a segunda regra metodológica.

Regra 2. Para determinar a objetividade ou subjetividade de uma afirmação, a eficiência ou a perfeição de um mecanismo, não devemos procurar por suas qualidades *intrínsecas*, mas por todas as transformações que ela sofre *depois*, nas mãos dos outros. (LATOIR, 2011, p. 405)

A segunda regra vem ao encontro da concepção de que a ciência é um empreendimento coletivo. Ao analisar as discussões de sala de aula, deve-se ter em mente que uma afirmação se consolida em meio ao debate quando é capaz de atrair aliados, o que se revela e se reforça no uso posterior que é feito dela na discussão.

Para a análise de uma controvérsia científica, Latour introduz o conceito de modalidade que, em primeira ordem, pode ser entendido como uma divisão em apenas duas classes: positiva e negativa. Modalidades são sentenças que fazem uso de outra qualificando-a

ou modificando-a. O conceito é importante porque facilita a identificação da formação de alianças no decorrer de uma controvérsia. O quadro 3.5 abaixo apresenta as duas modalidades.

Modalidade	Característica
Positiva	Afasta o enunciado de suas condições de produção.
Negativa	Leva o enunciado para a direção de suas condições de produção.

Quadro 3.5: Modalidades. Adaptado de Latour (2011).

Note que os termos modalidade positiva e modalidade negativa aqui colocados não são carregados de juízo de valor. Positivo denota o que vai além do enunciado e, ao transcendê-lo, expandi-lo em contexto diverso, assume-o implicitamente como fato e portanto reforça-o. Negativo denota o que volta atrás do enunciado e, ao questioná-lo em suas condições de produção, coloca-o em dúvida e portanto enfraquece-o. Modalidades positivas revelam alianças, explícitas ou não, que vem a contribuir decisivamente na consolidação do enunciado original. Um enunciado transfigurado em caixa-preta, ou seja, assumido como conhecimento tácito, apresenta-se como uma sentença desmodalizada.

Para o estudo da dinâmica de sala de aula, o conceito de modalidade pode ser particularmente útil por potencialmente revelar alianças num grupo de estudantes que busca uma tomada de posição consensual. É evidente que, para que tais conceitos sejam aplicados, é necessário que haja uma controvérsia a ser analisada e que, para que tal controvérsia exista, é necessário que haja um problema a ser resolvido que suscite-a, além da exigência explícita com relação a uma tomada de posição coletiva.

O que o sujeito entende por Natureza emana da representação que faz dela, ou seja, concepções acerca do mundo natural são formadas após a consolidação de teorias. A partir do momento em que se adota a primeira regra metodológica, não é possível recorrer à Natureza como se fosse um árbitro externo capaz de julgar quais afirmativas são corretas e quais não são. No decorrer de uma controvérsia científica não há uma Natureza à qual apelar. A Natureza entra em cena como o resultado de uma controvérsia já resolvida. Esse argumento constitui a terceira regra metodológica.

Regra 3. Como a solução de uma controvérsia é a *causa* da representação da Natureza, e não sua consequência, nunca podemos utilizar essa consequência, a Natureza, para explicar como e por que uma controvérsia foi resolvida. (LATOUR, 2011, p. 405)

Adaptar e aplicar a terceira regra a prática e análise do discurso em sala de aula é uma tarefa delicada e potencialmente perigosa. Essa dificuldade provém do fato de que, no caso do ensino e não da ciência real, há uma representação da Natureza bem estabelecida por detrás da prática e é objetivo do ensino, embora não o único, que o aluno construa esta representação e não outra. Então de que modo essa regra pode ser útil? No momento da sala de aula, reforça a ideia de que o professor deve evitar a postura de árbitro ou detentor de uma verdade pré-existente. No momento da análise de resultados, impõe a inserção da afirmação feita pelo aluno naquele momento específico da discussão, evitando o julgamento de valor da afirmação em si, preferindo avaliar sua consistência estrutural como argumento e sua coerência localizada no tempo da controvérsia.

4. IRREVERSIBILIDADE

4.1 Considerações iniciais

Ao longo deste capítulo apresento uma discussão acerca das questões da irreversibilidade e da degradação da energia e suas relações com a segunda lei da Termodinâmica. Será uma discussão breve focada nos aspectos centrais a serem explorados nas atividades propostas no capítulo 5 que são o cerne deste trabalho. Na seção 4.2, é proposta uma reflexão sobre a irreversibilidade no cotidiano a partir de dois exemplos, uma bola e um pêndulo, que serão retomados na Atividade 2 (seção 5.3). Reflexão que se estende a algumas considerações sobre um projeto de moto-perpétuo que será retomado na Atividade 1 (seção 5.2). Na seção 4.3, considerações sobre o problema da máquina térmica incorporam alguns aspectos históricos da formulação da segunda lei da Termodinâmica, que ressurgirão na Atividade 4 (seção 5.5). Por fim, na seção 4.3, é apresentado um modelo matemático simples de um sistema de partículas binário com estados equiprováveis. Modelo que será a base para a construção da Atividade 3 (seção 5.4), na qual se explora o conceito de entropia diretamente.

4.2 Irreversibilidade e degradação da energia

Consideremos uma bola que, abandonada a partir de uma posição a um metro do solo plano e horizontal, é deixada quicar livremente durante um intervalo de tempo suficientemente longo para que observemos mais do que uma única colisão com a superfície. A experiência cotidiana mostra que, qualquer que seja a bola, jamais a veremos atingir aquela altura de um metro uma segunda vez e que, após cada colisão, a máxima altura atingida será sempre inferior à anterior. De fato, dado tempo suficiente, o estado final da bola será fatalmente o repouso em contato com o solo. Observações análogas podem ser feitas em qualquer sistema mecânico que se imagine como, por exemplo, um pêndulo posto a oscilar livremente. Suponha que alguém resolva filmar um desses eventos e que o filme seja exibido com o sentido do tempo invertido, ou seja, “de trás para frente”. A plateia, mesmo sem qualquer instrução prévia que lhe permitisse fazer considerações físicas formais sobre o que observa, provavelmente seria tomada por um sentimento de inadequação, pela sensação de que “algo deve estar errado”.

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.

No caso do pêndulo, se posto a oscilar por um intervalo de tempo curto, é possível que tenhamos uma falsa impressão de reversibilidade. De fato, se a parcela dissipada da energia mecânica for proporcionalmente pequena em cada oscilação, algumas poucas delas não serão suficientes para que se observe a olho nu perdas significativas de amplitude.

A crença na possibilidade de que aprimoramentos técnicos pudessem levar ao desenvolvimento de um dispositivo que funcionasse 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, e há registros de inventores, com mais ou menos conhecimento técnico, que fazem até hoje tentativas nesse sentido.

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.

Imaginemos um projeto de dispositivo de movimento perpétuo cujo objetivo seja gerar energia elétrica a partir de um sistema hidráulico inteiramente fechado. Voltaremos a ele na atividade 1 que será proposta no próximo capítulo, na seção 5.2. A figura 4.1 abaixo, de autoria própria, esquematiza os elementos principais de tal projeto.

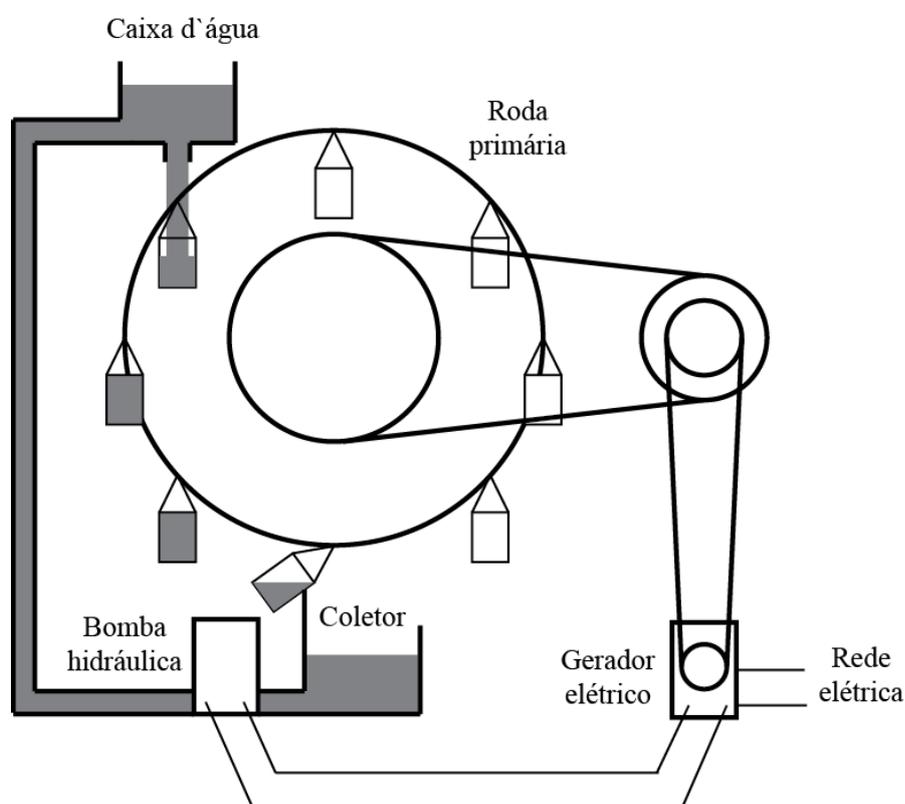


Figura 4.1: Moto-perpétuo de primeira espécie

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.

Suponhamos então que retiremos 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.

Pode-se argumentar, em última análise, que qualquer teoria da Física Clássica encontra raízes na Mecânica. A parcela da energia total de um sistema mecânico a qual aqui nos referimos como não mecânica, ou seja, a energia térmica, pode ser vista como mecânica se o sistema for pensado microscopicamente. Ora, no caso da bola que repica no solo, a redução das alturas máximas alcançadas entre duas repetições sucessivas vem acompanhada de uma elevação de temperatura da própria bola e do ambiente circundante. É claro que a elevação é ínfima e provavelmente não seria sensível ao toque das mãos do jogador, mas se continuamos a confiar na conservação da energia, precisamos admitir que a energia mecânica que aparentemente desapareceu deve se manifestar de algum outro modo. A elevação de temperatura, por menor que seja, da própria bola representa o fato de que devem se intensificar os movimentos aleatórios que seus constituintes microscópicos realizam, de modo que a nova expressão da energia que aparentemente desapareceu não deixa de ser mecânica em essência.

Porém, há uma diferença fundamental entre o movimento da bola como um todo e o movimento de seus constituintes básicos. A diferença reside justamente na impossibilidade de que manipulemos, com nossas mãos macroscópicas, os movimentos individuais destes constituintes, o que impõe o inevitável caráter aleatório desse tipo de movimento. Dessa diferença parece derivar o fato de que é sempre possível transformar integralmente a energia mecânica associada a um movimento macroscópico na energia associada ao movimento microscópico aleatório, ou energia térmica, mas o inverso nunca ocorre com igual eficiência. Afirmar isto é essencialmente o mesmo que afirmar que a energia se degrada naturalmente e que, por esta razão, os processos físicos naturais não são reversíveis. Tratar adequadamente esta questão passa pela tentativa de estudar estatisticamente o movimento de constituintes microscópicos extraindo propriedades macroscópicas desse estudo, o que foi feito por Maxwell e Boltzmann, entre outros, a partir do problema do comportamento físico dos gases, ao longo do século XIX. Retornaremos a essa questão na seção 4.4.

4.3 Máquinas térmicas

Do ponto de vista histórico, é impossível dissociar as questões da irreversibilidade e da degradação da energia da busca pelo aprimoramento técnico das máquinas a vapor. A evolução do calórico ao calor, que veio a render a ampliação do conceito de energia na primeira lei da Termodinâmica, e a busca pelo rendimento máximo, que veio a render a

segunda, se relacionam intimamente com as pressões econômicas e sociais causadas pelo papel central da máquina a vapor na Europa entre os séculos XVIII e XIX.

A primeira formulação da segunda lei da Termodinâmica que se tem notícia encontra-se no trabalho do engenheiro francês Sadi Carnot. É notável que Carnot utiliza o conceito de calórico, porque o conceito de calor como forma de energia ainda não se consolidara, de modo que a segunda lei surge antes da primeira. Segundo ele, o vapor é apenas um meio para transportar o calórico do reservatório quente (a fornalha) para o reservatório frio (o condensador), mas o princípio de funcionamento da máquina é a simples tendência ao reestabelecimento do equilíbrio térmico rompido, nesse caso, pela combustão. Ou seja, para que uma máquina térmica possa funcionar, é preciso que esteja em desequilíbrio e, hoje diríamos, será inevitável que desperdice energia. Uma máquina térmica que não desperdiça energia não pode funcionar. Em outras palavras, não se trata de um problema de técnica ou engenharia, o desperdício de energia é inerente ao seu princípio de funcionamento. Essas ideias são encontradas no trecho abaixo.

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. (Carnot, 1824 apud: AURANI, 1985, p. 32)

É interessante notar, como aponta Feynman (1963, p.44-4), que Carnot tem o cuidado de não afirmar explicitamente que a quantidade de calórico que deixa a fornalha é igual à que chega ao condensador, o que pode indicar que, naquele momento, ele já suspeitasse de uma relação de conservação.

Atualmente, a segunda lei da Termodinâmica costuma ser escrita de um modo mais cuidadoso e formal que o trecho citado acima. Cita-se abaixo um exemplo de como podemos encontrá-la nos livros didáticos.

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho. (NUSSENZVEIG, 2002, p. 207)

Note que a expressão “único efeito” é importante e essencialmente significa que o processo deve ser cíclico, ou seja, o sistema deve retornar às condições iniciais. Numa expansão isotérmica de um gás ideal, por exemplo, como não há variação da energia interna, o gás realiza trabalho igual à quantidade de calor absorvida do ambiente externo. Entretanto,

em seu estado final, apresenta volume maior e pressão proporcionalmente menor que as iniciais, de modo que a transformação de calor em trabalho não é um efeito exclusivo.

É possível escrever a segunda lei em termos de um refrigerador ao invés de uma máquina térmica. O refrigerador é um aparato que, ao sofrer a realização de trabalho, remove calor da fonte fria e descarta calor (em maior quantidade) na fonte quente. Este enunciado, abaixo, é geralmente atribuído a Clausius.

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor do corpo mais frio para o corpo mais quente. (NUSSENZVEIG, 2002, p.207)

Note que o segundo enunciado não afirma que é impossível transferir calor do corpo mais frio para o mais quente. Geladeiras e aparelhos de ar-condicionado realizam essa tarefa o tempo todo. O que se afirma é que não é possível fazê-lo sem a realização de trabalho sobre a máquina, ou seja, sem o dispêndio de alguma quantidade extra de energia fornecida externamente. O que seria equivalente a dizer que geladeiras e aparelhos de ar-condicionado não podem funcionar desligados da tomada.

Com esses dois enunciados, o que se conclui é a impossibilidade de construir um engenho sustentável que desfaça integralmente a degradação da energia. Com o primeiro, afirma-se que é possível transformar calor em trabalho útil, mas não com rendimento integral. No sentido inverso, degradar energia integralmente é sempre possível e é o que acontece, por exemplo, com a bola posta a repicar no solo da seção 4.2. Com o segundo, afirma-se que é possível criar um fluxo antinatural de calor, do ambiente de menor para o de maior temperatura, mas não sem qualquer custo, ou seja, para esse intento, é sempre necessário degradar mais energia. No sentido inverso, é sempre possível transmitir calor sem custos adicionais do ambiente de maior para o de menor temperatura. Os dois enunciados são rigorosamente equivalentes, como se pode verificar, por exemplo, em Feynman (1963, p.44-5) e Nussenzveig (2002, p. 210).

Sabendo então que não é possível construir um motor térmico que opere com rendimento unitário ou, equivalentemente, um refrigerador que opere sem o consumo de energia extra, resta a questão de qual seria a máquina térmica ideal. O problema da maximização do rendimento da máquina foi justamente a força motriz do trabalho de Carnot. A resposta a esta questão é a máquina térmica reversível, ou seja, uma máquina que possa operar como motor térmico ou refrigerador. De fato, para que o rendimento seja máximo, basta que a máquina seja reversível, sendo os detalhes técnicos de sua operação irrelevantes em princípio. Uma demonstração desse fato pode ser encontrada, por exemplo, em Feynman (1963, p.44-6).

A resposta de Carnot foi associar a perda de rendimento da máquina à condução térmica entre corpos a temperaturas diferentes, como evidenciado no trecho a seguir.

Toda mudança de temperatura que não seja devida a uma mudança de volume ou ação química (uma ação que aqui provisoriamente supomos não ocorrer) é necessariamente devida à direta passagem do calórico de um corpo mais ou menos aquecido para um corpo mais frio. Essa passagem ocorre principalmente pelo contato de corpos de diferentes temperaturas; assim tal contato deve ser evitado tanto quanto possível. (Carnot, 1824 apud: AURANI, 1985, p. 33)

A partir desta ideia, Carnot propõe um ciclo no qual as únicas trocas de calor permitidas entre o fluido de operação e o meio externo ocorrem em transformações isotérmicas, ou seja, em momentos nos quais a temperatura do fluido e do reservatório são iguais, impedindo que a condução ocorra. As demais expansões e compressões precisariam ser adiabáticas. A figura 4.2 a seguir, adaptada a partir de (AURANI, 1985, p. 36), ilustra as transformações que compõem o ciclo de Carnot.

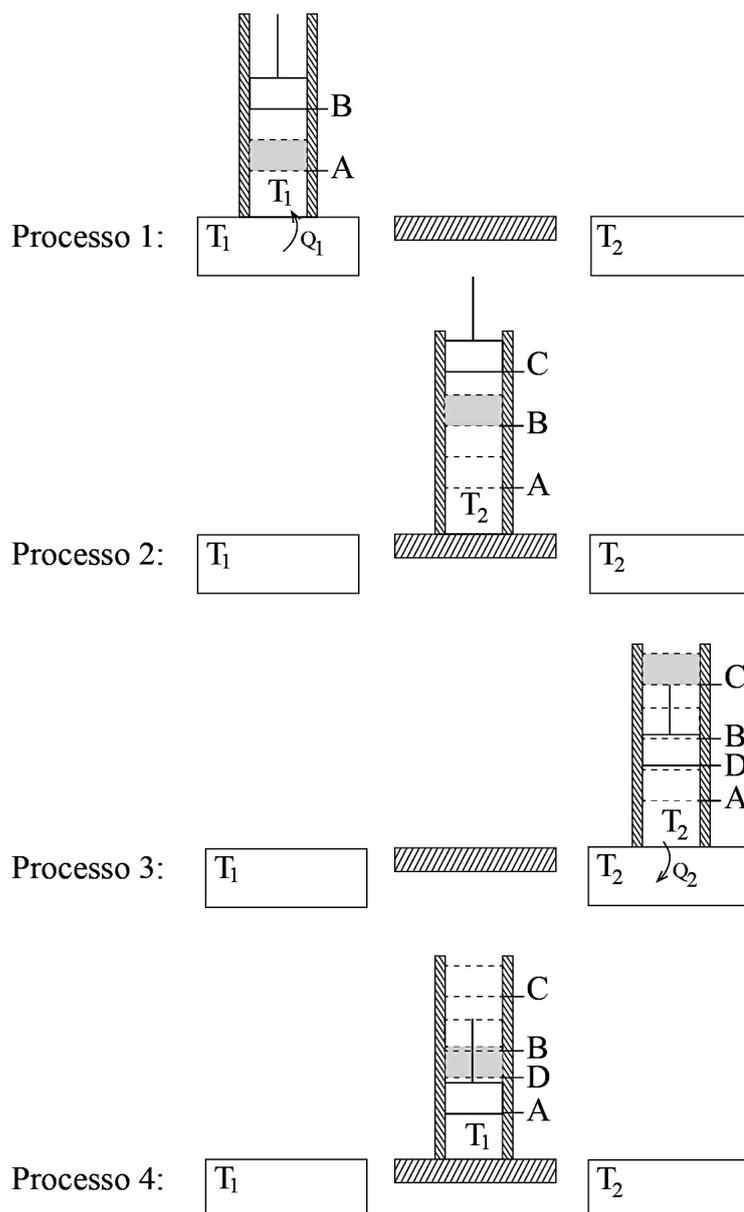


Figura 4.2: Ciclo de Carnot

Como mostrado na figura, as únicas trocas de calor ao longo do ciclo ocorrem nos processos 1 e 3, nos quais o gás está em equilíbrio térmico com os reservatórios de temperaturas T_1 e T_2 (com $T_1 > T_2$), respectivamente. Nos processos 2 e 4, a temperatura do gás é variada entre esses dois valores através, respectivamente, de uma expansão e uma compressão adiabáticas, ou seja, sem qualquer troca de calor com o meio externo.

É importante frisar o caráter de idealização limítrofe da máquina reversível representada pelo ciclo proposto por Carnot. Um engenho real que operasse rigorosamente desta forma jamais poderia ser construído. A primeira crítica recai, evidentemente, sobre as transformações perfeitamente adiabáticas, mas a mais contundente está justamente na suposta ausência de condução térmica. Ora, se o gás e o reservatório estão em equilíbrio térmico, não

pode haver troca de calor alguma, de modo que a máquina não pode funcionar. Seria necessário supor uma diferença de temperaturas infinitesimal entre reservatório e gás, já que uma diferença finita violaria a condição de ausência de condução. Assim, o ciclo só se presta a discussões teóricas cujo objetivo é o estabelecimento de um limite. Este limite, o rendimento máximo teórico, que depende apenas das temperaturas dos reservatórios, representa um critério de teste e não uma característica de uma máquina real. Sua expressão algébrica ($\eta = 1 - T_1/T_2$) é bem conhecida e pode ser encontrada na maioria dos livros didáticos de Termodinâmica, inclusive os do Ensino Médio. Uma demonstração dessa expressão pode ser encontrada, por exemplo, em Nussenzveig (2002, p.214-216). Vale ressaltar que mesmo o rendimento máximo, associado a uma máquina imaginária suposta ideal, será sempre inferior à unidade.

A partir do estudo do Ciclo de Carnot, Clausius preocupa-se com a questão da reversibilidade ou não dos processos termodinâmicos, ou seja, o que faz com que o ciclo de Carnot seja em tese reversível mas que ocorra de modo diferente na maioria das outras transformações? Isto é, a questão fundamental seria considerar o que não se conserva nos processos irreversíveis e que pode ser associado ao próprio fenômeno da irreversibilidade. O conceito de valor equivalente da transformação surge nos estudos de Clausius publicados a partir de 1856, e é posteriormente refinado e denominado por ele próprio: Entropia. Naquele momento, a relação de conservação entre o saldo de calor e o trabalho realizado por uma máquina térmica já era clara, embora o conceito de energia interna, necessário ao tratamento de uma transformação aberta (não cíclica) tenha sido introduzido pelo próprio Clausius posteriormente em 1862 (AURANI, 1985). A ideia surge da observação de que a absorção e o descarte de calor, no ciclo de Carnot, ocorrem necessariamente a temperaturas diferentes, ou seja, interessaria avaliar a transformação de energia a uma determinada temperatura em energia a outra temperatura. Assim, define-se o valor de transformação (ou variação da entropia) pela expressão $dS = dQ/T$, chamando de positivas a transformação de trabalho em calor e de transmissão de calor do corpo quente para o frio e de negativas as contrárias.

A entropia assim definida é coerente com o ciclo de Carnot, já que pode-se mostrar (NUSSENZVEIG, 2002, p.214-215) que, nesse caso, a quantidade de calor trocada em cada transformação isotérmica é proporcional à temperatura em que ocorre a transformação, de modo que o valor Q/T é o mesmo em cada uma delas e nulo nas transformações adiabáticas. A variação total de entropia do ciclo é, portanto, nula, o que se relaciona à ideia de reversibilidade e rendimento máximo.

A ideia central envolvida no conceito de entropia é a compreensão de que processos irreversíveis ocorrem de modo que algo é internamente e permanentemente modificado no sistema físico, por mais que a energia seja sempre conservada. Num processo reversível, por outro lado, esta modificação permanente não ocorre. No trecho a seguir, Clausius estabelece essa ideia num enunciado que pode ser entendido como uma formulação da segunda lei da Termodinâmica se assumirmos aqui “transformação” como sinônimo de “variação da entropia”.

A soma algébrica de todas as transformações ocorrendo em qualquer condição de alteração que seja pode ser somente positiva, ou, em caso extremo, igual a zero. (CLAUSIUS, 1862 apud: AURANI, 1985, p. 73).

No contexto do estudo da Termodinâmica, esta afirmação significa que transformações cuja variação de entropia associada seja negativa só podem ocorrer, num sistema fechado, se compensadas por transformações cuja variação de entropia seja positiva, de modo que o saldo total seja sempre positivo (ou nulo no caso específico do processo reversível). Calor será transformado em trabalho reduzindo a entropia ($\Delta S < 0$) apenas se houver algum processo que compense tal redução, como o descarte de certa quantidade de calor numa fonte fria ($\Delta S > 0$). Calor será transmitido da fonte fria para a fonte quente reduzindo a entropia ($\Delta S < 0$), apenas se houver algum processo que compense tal redução, como a transformação de trabalho em calor a ser também descartado ($\Delta S > 0$).

Embora a Termodinâmica dos séculos XVIII e XIX se ocupasse do estudo da potência e do rendimento das máquinas a vapor, já existia naquele momento uma pretensão de maior generalidade, ou seja, a intenção de extrair daquele estudo informações mais profundas sobre a Natureza e não apenas sobre o funcionamento de determinado tipo de máquina. O próprio Carnot, em diversas passagens, apresenta a ideia do moto-perpétuo como inaceitável em qualquer contexto e não apenas no da máquina térmica. Chega a comparar as limitações de rendimento das máquinas térmicas com as limitações de uma roda d'água ou de um sistema elétrico alimentado por uma pilha de Volta. Clausius, ao formular suas ideias refinando o tratamento matemático e dando início a uma tentativa de estrutura axiomática para a teoria, não descreve esta ou aquela máquina especificamente, mas procura abarcar processos físicos, cíclicos ou não, de aspecto geral através dos conceitos de energia e entropia (AURANI, 1985). Ou seja, a concepção de que qualquer processo físico real num sistema fechado conserva a energia, mas promove modificações permanentes neste sistema e que, portanto, não pode ser invertido no tempo (reversibilidade) ou repetido indefinidamente (moto-

perpétuo), não deve ser entendida como exclusiva do contexto das máquinas térmicas e sim como asserção de maior generalidade.

4.4 Modelo microscópico

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 Atividade 3 no próximo capítulo, na seção 5.5.

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, por exemplo, em Kittel (2000). 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 4.3 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 $n=N/2 \pm 1/2$.

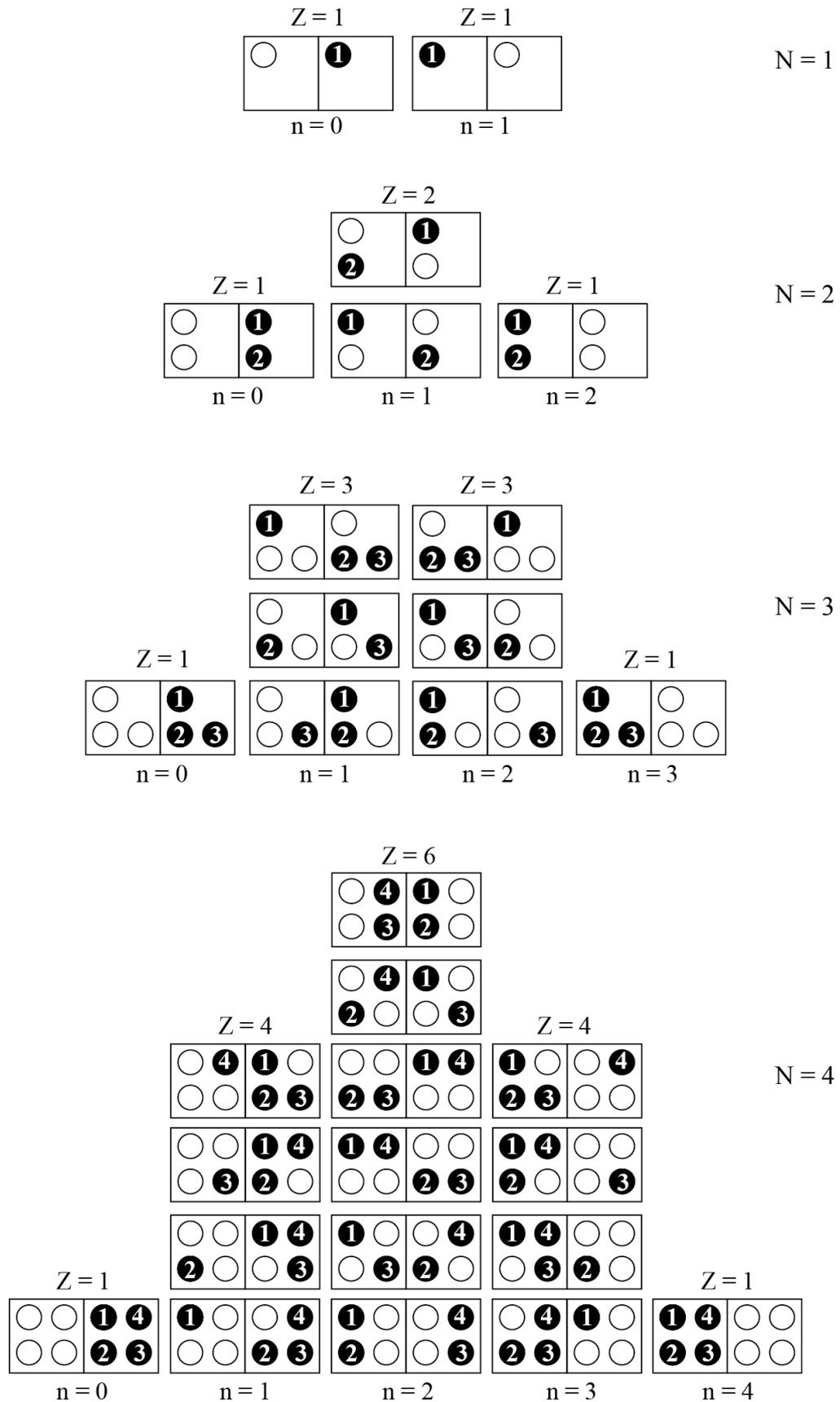


Figura 4.3: Sistema binário com $N=1, 2, 3$ e 4 .

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 $N=40$.

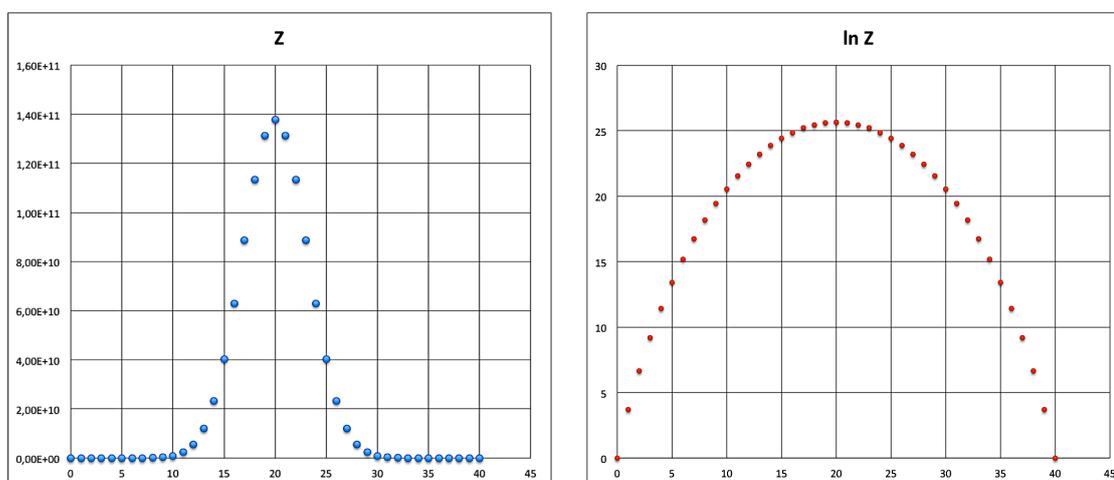


Figura 4.4: Gráficos de Z e $\ln Z$ em função de n para $N=40$.

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 4.3 e com os resultados da tabela 4.1 e dos gráficos da figura 4.4.

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.

5. SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES

5.1 Vista panorâmica

Apresenta-se a proposta de uma sequência de ensino investigativo com enfoque CTS composta por quatro atividades com o objetivo de abordar aspectos da segunda lei da Termodinâmica associados às questões da degradação da energia e da irreversibilidade dos processos naturais. As quatro atividades têm enfoques diferentes, se utilizam de recursos diferentes, mas compartilham a metodologia do ensino por investigação. As atividades, suas classificações de acordo com a listagem de Azevedo (2004), citada na seção 3.3, e seus respectivos recursos encontram-se resumidos no quadro 5.1 a seguir.

	Atividade	Classificação	Recurso
1	Moto-perpétuo	Questão aberta	Texto jornalístico
2	Irreversibilidade no dia-a-dia	Questão aberta	Vídeo amador
3	Entropia	Laboratório aberto	Experimento de baixo custo
4	Máquinas térmicas	Questão aberta	Texto de fonte primária

Quadro 5.1: Resumo da sequência de atividades

As propostas das duas primeiras atividades encontram-se descritas, na forma de material para o professor e material para o aluno, em um capítulo (RODRIGUES, 2012) de um volume publicado pelo grupo PROENFIS com apoio da FAPERJ. A obra foi apresentada pelo grupo, na forma de oficina no XX SNEF, realizado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo em janeiro de 2013. A proposta da segunda atividade foi também apresentada na forma de comunicação oral (RODRIGUES e VIANNA, 2013a) no mesmo evento. Um trabalho (RODRIGUES e VIANNA, 2013b) que contém a proposta da primeira atividade, bem como seus resultados de aplicação e análise (seção 6.2) foi apresentado na forma de comunicação oral no IX ENPEC, realizado no mês de novembro de 2013 no Hotel Majestic em Águas de Lindóia (SP).

A sequência foi projetada tendo como objetivo principal o estudo das questões da degradação da energia e da irreversibilidade, temas da Física, mas considerando suas relações com a tecnologia, a sociedade, a História da Ciência e o dia-a-dia do aluno. O enfoque CTS é muito claro na primeira, tem papel importante na quarta, mas é pouco presente nas demais e, portanto, não é o fio condutor da sequência como um todo. Com relação às classes definidas

por Aikenhead (1996), listadas no quadro 3.1 da seção 3.2, a sequência se situa na classe 3: inserção proposital de conteúdo CTS. Relações CTS não são mencionadas apenas a título de ilustração ou motivação (categorias 1 e 2), são apresentadas questões que se originam no campo da sociedade e que exigem, como resposta, uma tomada de posição. Entretanto, o conteúdo CTS não configura um tema integrador que organize o estudo ao longo da sequência como um todo, o que caracterizaria a categoria 4.

Nas seções de 5.2 a 5.5, são descritos os objetivos e propostas mais específicos das quatro atividades e no Anexo 1 incluímos o material impresso a ser entregue aos estudantes no início da aplicação.

5.2 Atividade 1: Moto-perpétuo

A primeira atividade, classificada como uma questão aberta, tem dois objetivos principais: promover o fechamento do estudo da conservação da energia mecânica, suposto pré-requisito para a atividade, e explicitar a questão da degradação da energia, de modo a abrir o caminho em direção à segunda lei da Termodinâmica nas atividades subsequentes.

A atividade é mediada pela leitura de um texto jornalístico, seguida de uma discussão em grupo que objetiva encontrar respostas para duas perguntas incluídas ao final. O texto, reproduzido no Anexo 1, é um recorte de uma reportagem publicada pelo jornal *O Estado de São Paulo* (KRITSCH, 2000) que relata o projeto de construção de uma máquina hidráulica para geração de energia elétrica na Ilha de Canárias, no 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 que, segundo ele, resolveria o problema local de escassez de energia elétrica. O trecho reproduzido a seguir descreve os pontos principais do projeto da máquina.

O sistema idealizado por Costa, um mecânico autodidata, funciona com a força da água, armazenada em uma caixa com capacidade para 4000 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. (...) 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. (KRITSCH, 2000)

O inventor espera que o uso de um conjunto de rodas de diâmetro decrescente conectadas por correias, que naturalmente faz aumentar gradativamente a frequência, possa aumentar a disponibilidade de energia mecânica da máquina, o que se evidencia no trecho a seguir.

A força do giro movimenta 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”. (KRITSCH, 2000).

Ao final do texto são apresentadas as duas perguntas que os alunos devem responder por escrito findas a leitura e a discussão. A primeira é um chamado a uma tomada de posição de cunho socio-científico e a segunda é um questionamento voltado ao aspecto mais puramente científico que serve para trazer à tona a discussão da degradação da energia.

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?

A ideia do sr. Costa é um exemplar do mais comum de todos os projetos de construção de um artefato de movimento perpétuo, a que muitos se referem como “roda desequilibrada”. Como as canecas descem cheias e sobem vazias, o movimento supostamente se sustentaria perpetuamente, desde que seja possível recolocar a água na caixa de armazenamento de onde saiu. E é neste ponto que está o entrave, como discutido anteriormente na seção 4.2.

A máquina da Ilha de Canárias é, evidentemente, um moto-perpétuo de primeira espécie, pois seu funcionamento exige que a quantidade de energia elétrica gerada seja maior que a energia potencial da massa de água armazenada na caixa. A segunda pergunta, ao retirar a obrigatoriedade do fornecimento energia elétrica às residências, transforma a máquina num moto-perpétuo de segunda espécie de modo a suscitar a discussão da degradação da energia.

Esta primeira atividade, dentre as quatro que compõem a sequência, é a que apresenta mais fortemente o enfoque CTS. O *design* da atividade foi realizado tendo em vista a sequência proposta por Aikenhead (1994), citada na seção 3.3 e ilustrada na figura 3.2. O problema se origina no espaço social, nas dificuldades enfrentadas por uma comunidade que vive o drama da falta de energia elétrica. Propõe-se uma solução de cunho tecnológico, o moto-perpétuo, cuja avaliação vai exigir dos estudantes o exame de leis e princípios científicos, neste caso, a conservação da energia. Compreendida a ciência por detrás do aparato técnico, retorna-se à avaliação do problema tecnológico, ou seja, a viabilidade ou não da máquina, para que então seja possível o retorno ao espaço social para uma tomada de posição: investir ou não na implementação do projeto. Essa atividade em particular, construída propositalmente de acordo com esse enfoque, se situaria, isolada, na categoria 4, uma vez que o conteúdo CTS é o tema que organiza o estudo, é o fio condutor que guia o andamento da atividade. No entanto, as quatro atividades apresentam enfoques diferentes, de modo que a sequência completa deve ser classificada na categoria 3 de Aikenhead (1994).

5.3 Atividade 2: Irreversibilidade no dia-a-dia

O objetivo principal da atividade é situar o estudante na questão da irreversibilidade, ou seja, fazer surgir a percepção de que não se trata de uma obviedade e sim um problema autêntico, oriundo da observação do cotidiano, digno de estudo e aprofundamento. Deseja-se que o aluno seja capaz de associar, após a realização da atividade, a irreversibilidade com o aumento do movimento aleatório em escala microscópica e com a não conservação da energia mecânica em escala macroscópica. Espera-se que os alunos possam perceber que estas duas idéias – movimento aleatório e degradação da energia – têm o mesmo significado físico.

A atividade consiste em um exame de situações do dia-a-dia a partir da exibição de um vídeo amador produzido para este fim. Os alunos, organizados em pequenos grupos, assistem ao vídeo composto por oito cenas que apresentam fenômenos do cotidiano em duas versões, sendo uma delas exibida com o sentido da passagem do tempo invertido. Pede-se a eles que indiquem qual das duas versões é a correta e que apresentem as razões ou observações que motivaram a escolha. Após a decisão, os alunos devem registrar suas conclusões por escrito numa ficha própria, reproduzida no Anexo 1.

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.

O quadro 5.2 a seguir lista o material utilizado na composição de cada uma das cenas do vídeo. Nenhum objeto foi adquirido especialmente para a realização da filmagem, todos foram encontrados no próprio ambiente residencial.

Cena		Material
1	Ovo	Fogão a gás, frigideira, ovo, óleo, sal.
2	Gelo	Cubo de gelo, travessa metálica, secador de cabelo.
3	Café	Copo, água fervente, café solúvel.
4	Spray	Desodorante em <i>spray</i> , lâmpada.
5	Bola 1	Bola plástica.
6	Bola 2	Bola plástica.
7	Pêndulo 1	Peso de pesca, barbante, suporte para toalhas (fixo na parede).
8	Pêndulo 2	Bolinha de papel, barbante, suporte para toalhas (fixo na parede).

Quadro 5.2: Material utilizado na produção das cenas do vídeo

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 21/03/2013)

A seguir apresentamos uma breve descrição das cenas do vídeo apontando as expectativas com relação a cada uma delas.

Cena 1: Ovo



Figura 5.1: 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 5.2: 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

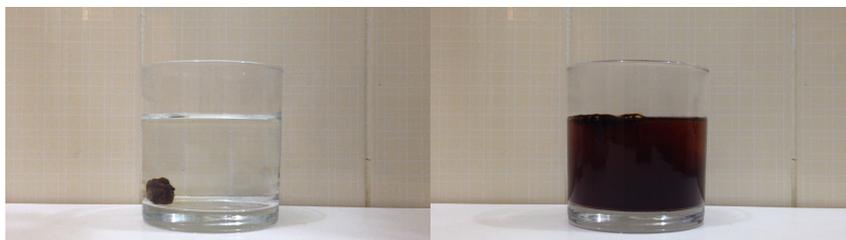


Figura 5.3: Café solúvel (<http://youtu.be/CHcU98k6mCA>)

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

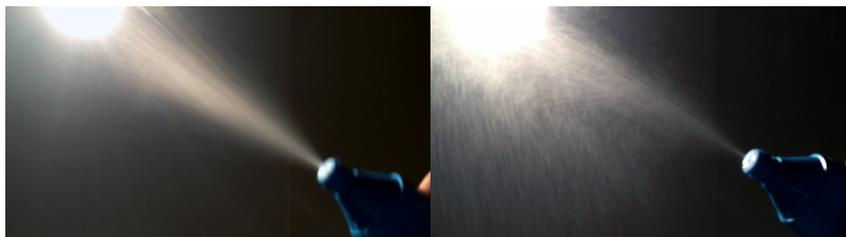


Figura 5.4: Desodorante spray (<http://youtu.be/3XVfQCS4fSs>)

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 5.5: 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 5.6: 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 5.7: 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 5.8: 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 5.2). 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.

5.4 Atividade 3: Entropia

A terceira atividade pode ser classificada como laboratório aberto com nível de investigação 2, ou seja, o estudante é exposto ao problema já formulado, mas não recebe instruções sobre procedimentos e não conhece as conclusões a que se espera que chegue *a priori*. O objetivo é uma investigação, a partir da manipulação de um *kit* produzido com material de baixo custo, que leve o aluno ao reconhecimento de estados mais e menos prováveis de um sistema de partículas e a tendência natural desse sistema de encontrar o equilíbrio no estado mais provável. A importância da atividade está em criar associação entre a irreversibilidade observada em fenômenos macroscópicos e a multiplicidade de estados, o que permite ao professor formalizar o conceito de entropia, numa formulação inspirada pela Mecânica Estatística.

Não é objetivo desta prática que o conceito de entropia surja espontaneamente das discussões entre os alunos de modo completo e formalmente construído. Ao final da realização da atividade, o professor deverá sistematizar as ideias oriundas do trabalho dos grupos no quadro e tomá-las como ponto de partida para a formalização dos conceitos de microestado, macroestado, multiplicidade e entropia, de modo que a aula deverá encerrar-se com um momento de exposição teórica. A proposta de realizar a atividade prática e promover as discussões antes desta formalização pelo professor e não depois é o que dá a ela o caráter investigativo. Permite ao estudante construir o conceito de entropia de forma gradual e natural, já que estará alicerçado nos resultados de suas próprias indagações sobre o problema em mãos e nas discussões com seus pares.

O material físico a ser entregue aos alunos é um conjunto de quarenta bolinhas de gude e uma caixa de papelão dotada de uma divisória com uma fenda central de dimensões pouco maiores que as da bola de gude. Foram produzidos 5 *kits* experimentais em novembro de 2012 com caixas de papelão, normalmente utilizadas para a acomodação de resmas de papel. Adquirimos as bolinhas de gude junto a uma papelaria atacadista. Os materiais encontram-se listados no quadro 5.4 abaixo.

Material	Quantidade	Custo
Caixa de papelão	5	0
Bolinhas de gude	300	R\$5,00

Quadro 5.4: Materiais utilizados na confecção dos kits

A figura 5.9 a seguir mostra o material utilizado e um dos kits confeccionados já pronto para uso.



Figura 5.9: Material e processo de montagem do kit.

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 no anexo 1. As perguntas formuladas no material 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 experimento em si não é novo. Tomamos como referência o trabalho publicado por Monteiro et al. (2009). Entretanto, a metodologia de aplicação aqui proposta é diferente. Apresentamos o material físico e o problema, mas não há instruções com relação a procedimentos, variáveis a serem identificadas e investigadas ou mecanismos de sistematização ou registro de dados. Desejamos estimular os grupos a desenvolver seus próprios métodos numa postura investigativa. Além disso, os alunos não conhecem as conclusões a que devem chegar *a priori*, pois não há instrução prévia. São essas as características que classificam a atividade como um laboratório aberto de nível de investigação 2. No trabalho citado, os autores sugerem que os alunos recebam uma tabela em branco, a ser preenchida durante a realização do experimento, contendo espaços para a contagem do número de bolinhas de cada lado em função do número de “agitações” da caixa e não há a proposição de um problema claro a ser resolvido, a não ser o preenchimento da tabela. Desse modo, os procedimentos estão previamente determinados. Não fica claro no texto se supõe-se a existência de uma instrução prévia ou não, de modo que a atividade seria de nível de investigação 0 ou 1.

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 5.3 e 5.2, 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.

Caso os estudantes já tenham tido a oportunidade de estudar Probabilidade, em especial o cálculo de combinações, no curso de Matemática da escola, é interessante que o professor recorra a esse conhecimento na exposição teórica que deve ser feita ao final da aula.

A partir da Tabela 4.1 (seção 4.5), previamente preparada, o professor pode sistematizar a ideia de que o macroestado observável mais provável é o de $n=20$, ou seja, a divisão meio a meio, e por isto deve corresponder à tendência natural do sistema. É interessante notar que, se o campo gravitacional jogar algum papel na experiência, ou seja, se a caixa não estiver colocada na horizontal, a divisão igualitária não será o estado mais provável. Esta é uma discussão que pode surgir da manipulação do material e reforça a ideia de que o estado central só seria o resultado esperado num modelo de microestados equiprováveis.

Estamos aptos agora a definir a entropia S como uma função crescente com a multiplicidade $S = k_B \ln Z$.

Antes da aplicação da atividade, foi feito um pré-teste do *kit* experimental acompanhando o comportamento do sistema com base em “turnos” arbitrários de agitação da caixa. Os resultados para o número de bolinhas de cada lado da caixa e para a posição da bolinha marcada encontram-se sistematizados na Tabela 5.1 a seguir.

Turno	Direito	Esquerdo	Marcada
0	0	40	E
1	2	38	D
2	8	32	D
3	8	32	D
4	7	33	D
5	9	31	D
6	9	31	D
7	12	28	D
8	14	26	D
9	11	29	E
10	11	29	E
11	13	27	E
12	15	25	E
13	18	22	E
14	18	22	E
15	17	23	E
16	18	22	E
17	21	19	D
18	21	19	E
19	23	17	E
20	20	20	E
21	20	20	E
22	22	18	E
23	19	21	E
24	19	21	D
25	19	21	D
26	20	20	D
27	20	20	D
28	21	19	D
29	21	19	E
30	20	20	E

Tabela 5.1: Pré-teste do experimento
(D = bolinha marcada do lado direito e E = bolinha marcada do lado esquerdo)

Note que a bolinha marcada foi vista 17 vezes do lado esquerdo e 13 vezes do lado direito, o que parece condizente com a ideia de lados equiprováveis. Note também que a permanência da bolinha em cada lado é relativamente longa, o que dificulta essa observação.

O macroestado com a distribuição igualitária é evidentemente a tendência natural do sistema, embora haja flutuações aleatórias. Essa observação torna-se ainda mais nítida no gráfico da figura 5.10 a seguir.

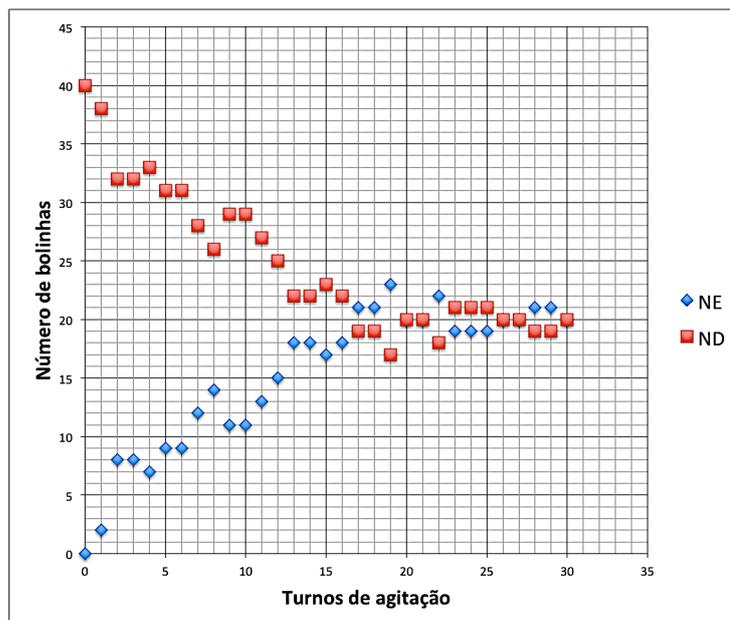


Figura 5.10: Pré-teste do experimento
(NE = número de bolas do lado esquerdo e ND = número de bolas do lado direito)

É claro que será sempre desejável que os estudantes espontaneamente sistematizem os dados da experiência na forma de uma tabela como 5.1 ou um gráfico como o da figura 5.10. 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.

5.5 Atividade 4: Máquinas térmicas

A quarta e última atividade da sequência é uma questão aberta mediada pela leitura e discussão de um texto científico de fonte primária. O texto 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. Não foi possível obter tradução para a Língua Portuguesa da obra completa. No entanto, o recorte dado pela autora em seu trabalho permitiu a seleção de trechos do texto original muito representativos das ideias que desejamos explorar com os estudantes nessa atividade, dispensando a necessidade de uma tradução própria de outros trechos a partir de versões em língua francesa ou inglesa. Os trechos selecionados e reunidos podem ser encontrados no Anexo 1.

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 enculturação científica. 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 do trabalho ora apresentado, constituindo um possível caminho para desenvolvimentos futuros.

Após a leitura do texto, pede-se aos estudantes que discutam e tentem encontrar respostas a duas perguntas incluídas no material, disponível no Anexo 1, 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 de enfoque CTS, 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 contextualização histórica, forte nos parágrafos iniciais do texto, nos quais Carnot descreve a importância das máquinas a vapor para a sociedade inglesa da época, 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 relacionada a um conjunto de expectativas, preocupações e angústias associadas à forma como o homem se relaciona com o mundo exterior, como assinala Romero (2009).

A aplicação de um texto de fonte primária é proposital e intenciona contribuir para evitar distorções comuns na abordagem tradicional dos livros didáticos. Ainda segundo Romero (2009), o texto original flexibiliza os conceitos, sugere novas relações e facilita a compreensão de que uma representação da Natureza bem estabelecida num dado momento é resultado de um processo de desenvolvimento, ideia que vem ao encontro da terceira regra metodológica de Latour, citada na seção 3.5.

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, evidenciado na primeira regra metodológica de Latour (seção 3.5), 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 ação. 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.

Na pergunta número 2, intenciona-se o fechamento da sequência conectando esta atividade com a primeira (Moto-perpétuo, seção 5.2). O moto-perpétuo e sua impossibilidade de construção são explicitamente citados no texto, o que torna a conexão direta. Porém, na primeira atividade, não é necessário considerar um limite de rendimento inerente para rejeitar a construção da máquina, a discussão naquele ponto pode assentar confortavelmente sobre as limitações técnicas. Neste fechamento, deseja-se que os estudantes sejam capazes de perceber que o movimento perpétuo violaria uma lei fundamental da Física, mesmo que fossem superados todos os problemas de engenharia.

6. APLICAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Dinâmica de aplicação e análise

A sequência de quatro atividades foi aplicada no mês de dezembro de 2012 no Colégio Pedro II, Unidade Escolar São Cristóvão III (hoje Campus São Cristóvão III). Trata-se de uma escola pública federal que oferece ensino médio regular, ensino médio integrado e residência docente. O autor do presente trabalho era, naquele ano, professor regente de 5 das 12 turmas de segunda série da unidade. A aplicação foi feita nessas 5 turmas, todas de ensino médio regular.

As atividades foram projetadas como parte do curso de Física do ano letivo 2012 e, portanto, ocorreram como aulas regulares e obrigatórias em horário normal. Embora tenha sido requerido dos alunos registro formal em papel (vide material no Anexo 1), posteriormente lido e avaliado pelo professor e discutido em sala, não houve atribuição de pontuação nem reflexo direto nas notas. A avaliação formal desta etapa do ano letivo é feita por meio de prova única elaborada em equipe pelos professores da série.

O conteúdo programático da segunda série regular previsto para o ano letivo 2012 encontra-se resumido no quadro 6.1 a seguir. O conteúdo é dividido em duas frentes simultâneas, aqui denominadas Física 1 e Física 2. Cada uma das frentes conta com carga horária de dois tempos de aula semanais de 45 minutos de duração cada. No momento da aplicação, todo o conteúdo das duas frentes já havia sido trabalhado, de modo que as atividades podem ser entendidas como um fechamento geral das duas frentes ou interpretadas como último tópico do programa da Física 2, que se encerra com a Termodinâmica.

Física 1	Física 2
Trabalho, potência e rendimento.	Escalas termométricas.
Conservação da energia mecânica.	Dilatação térmica.
Impulso e quantidade de movimento.	Calor específico.
Choques mecânicos.	Mudança de estado físico.
Hidrostática.	Gases ideais.
Gravitação.	Termodinâmica.

Quadro 6.1: Conteúdo programático da segunda série do ensino médio (ano letivo 2012)

O estudo da energia mecânica e sua conservação e da primeira lei da Termodinâmica são supostos pré-requisitos para o bom aproveitamento das atividades pelos estudantes. No ano letivo anterior, ao longo da primeira série, este grupo de alunos estudou a Cinemática, escalar e vetorial, e os princípios da Dinâmica (leis de Newton).

Por se inserirem no curso como aulas regulares e não como atividades opcionais em horário extra, as aplicações encontraram-se submetidas a demandas do funcionamento da escola que não puderam deixar de ser atendidas. Por esta razão, não houve disponibilidade de tempo para realizar todas as atividades em todas as turmas. Esta situação já era conhecida antes do início das aplicações, de modo que foi necessário fazer escolhas com relação a que atividades aplicar em que momentos. Embora não seja esta a situação mais desejável, entendemos que assim é a realidade do trabalho do professor numa escola: exige adaptações e tomadas de decisão em tempo real numa base diária. O prejuízo com a não realização de toda a sequência com todos os alunos é menor que o da não realização de atividade alguma. Vale notar que as atividades planejadas são complementares, inter-relacionadas, mas não necessariamente interdependentes, de modo que a não realização de uma não inviabiliza ou invalida inteiramente a outra.

No quadro 6.2 a seguir, encontram-se indicadas as datas em que foram realizadas as atividades. Células marcadas com um traço representam atividades não realizadas.

Turma	Turno	Atividade 1	Atividade 2	Atividade 3	Atividade 4
1205	Manhã	-	11/12/2012	15/12/2012	18/12/2012
1207	Manhã	13/12/2012	15/12/2012	20/12/2012	-
1209	Manhã	11/12/2012	13/12/2012	15/12/2012	20/12/2012
2202	Tarde	13/12/2012	15/12/2012	-	-
2210	Tarde	18/12/2012	-	-	-

Quadro 6.2: Distribuição das aplicações entre turmas diferentes

As atividades 1, 2 e 3 foram aplicadas em dois tempos consecutivos de aula e a atividade 4 em um tempo de aula.

Cada turma, composta em média por 25 alunos, foi dividida em 5 grupos no início de cada atividade. A divisão foi sempre espontânea de modo que os grupos em cada atividade não são necessariamente os mesmos. A cada grupo foi entregue um gravador de áudio digital para o registro de todas as discussões. Foi também posicionada uma câmera de vídeo estática

em um canto da sala, mas apenas para facilitar identificações no momento da transcrição do áudio.

A gravação das aulas em áudio e vídeo e o uso do material captado para a realização do presente trabalho foram expressamente autorizados pelos responsáveis dos estudantes, ou por eles próprios no caso daqueles maiores de 18 anos, por meio de documento distribuído previamente.

Será apresentada a análise qualitativa de um episódio de discussão de cada atividade. O que se pretende é apresentar algumas situações profícuas de modo a mostrar que a realização de uma ou mais dessas atividades, inseridas no curso regular de Física para o ensino médio, pode criar momentos de aprendizagem de conceitos valiosos. O que não se pretende é acompanhar a trajetória cognitiva de alunos específicos ao longo da sequência e, portanto, opta-se pela escolha de episódios que mostrem discussões mais ricas em possibilidades, que não ocorrem necessariamente com o mesmo grupo em todas elas. É claro que, ao escolher estudar grupos diferentes e de turmas diferentes, perde-se o caráter de continuidade e entra em cena a questão das diferenças de bagagem individual que cada aluno traz consigo. Assim, neste ponto enfatiza-se que o cerne do trabalho são as atividades em si, relacionadas mas não dependentes, e que são as possibilidades didáticas por elas oferecidas o foco do estudo.

Na análise das discussões entre os estudantes, procurou-se verificar a ocorrência de processos reais de argumentação através da identificação de suas falas com o modelo de layout de argumentos de Toulmin, descrito na seção 3.4. Vale ressaltar que, muitas vezes, a construção do argumento é coletiva, de modo que seus elementos constituintes podem ser encontrados em falas de alunos diferentes. Na apresentação da análise, organizou-se cada argumento completo com o uso dos rótulos D (Dados), W (Garantias), B (Bases), Q (Qualificador modal), C (Conclusão) e R (Refutação), ainda que os elementos não estivessem simultaneamente presentes no discurso de um único aluno.

Os nomes de todos os estudantes citados foram substituídos por nomes fictícios de modo a preservar suas identidades.

6.2 Atividade 1: Moto-perpétuo

Na primeira atividade, cuja proposta encontra-se detalhadamente descrita na seção 5.2, foi entregue aos alunos um texto jornalístico (vide Anexo 1) que relata uma experiência de

construção de um dispositivo de movimento perpétuo no Brasil. São feitas duas perguntas que os alunos devem responder ao final da leitura e da discussão, que destacamos abaixo.

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

Esta atividade apresenta inserção de conteúdo CTS bastante evidente. A primeira pergunta, ao forçar um posicionamento coletivo de cunho sócio-científico, cria um ambiente fértil ao surgimento de controvérsias. Assim, é importante termos em mente a primeira regra de Latour (seção 3.5) e valorizar antes de tudo o andamento da discussão, ou seja, perceber como o desenrolar de uma controvérsia e os esforços no sentido da busca de uma solução consensual podem contribuir para a consolidação do aprendizado de conceitos científicos importantes. Já a segunda pergunta objetiva forçar a emergência de um questionamento objetivo acerca do problema da degradação da energia.

A análise do episódio relatado a seguir foi apresentada resumidamente na forma de comunicação oral (RODRIGUES, 2013) no IX ENPEC, realizado em Águas de Lindóia em novembro de 2013. A discussão ocorreu entre cinco alunos aqui referidos pelos nomes: Eduarda, Maria, Luana, João e Clara. Como se verá, a discussão se restringe quase sempre aos primeiros quatro, tendo Clara permanecido voluntariamente ausente a maior parte do tempo.

Inicialmente, quatro dos cinco integrantes do grupo mostraram uma evidente tendência de adesão ao projeto da máquina, com base em argumentos que consideram aspectos sociais mas não levam em conta o problema da conservação da energia.

Trecho 1:

29. Eduarda: Ah, eu não sei, eu acho que, tipo, uma coisa que nunca deu certo, que as pessoas tentam há muito muito tempo. Se eu morasse num lugar...
30. Luana: Cara, mas é a esperança deles também, né? [interrompendo]
42. João: Eu acredito que pode funcionar porque... ué, porque precisa tentar. Agora, eu acho que daria certo porque com os inventos agora da Hidráulica, muita coisa, as bombas hidráulicas vem mudando, os sistemas hidráulicos são muito diferentes agora. Principalmente agora, a Engenharia, a Engenharia Mecânica no estudo da... no estudo da... da Hidráulica e da Pneumática, ela agora tá muito mais avançada do que antes. Eu acho que, pô, tem recurso suficiente pra poder fazer isso funcionar.
43. Maria: Eu acho que se ninguém tentar nunca vai acontecer. Eu incentivaria, se tivesse dinheiro. (risos)
44. Clara: Eu também.
45. João: Ah, eu daria.

A única voz dissonante é a de Eduarda, mas sua objeção à máquina é pouco conclusiva e é facilmente desconstruída por João, que vem a conseguir a adesão dos demais

colegas. Segundo João (turno 42): “(D) (Dado que) os sistemas hidráulicos são muito diferentes agora (W) (já que) a Engenharia Mecânica no estudo da Hidráulica e da Pneumática, ela agora tá muito mais avançada do que antes, (C) eu acredito que (Q) pode funcionar”. Vale citar que João é estudante de curso técnico em Mecânica em outra instituição, fato que é de conhecimento dos demais colegas, o que vem a emprestar autoridade ao argumento apresentado por ele ao citar como garantia supostos avanços na área de Engenharia Mecânica. Note também que o argumento de João não é inequívoco, o que se revela no uso do qualificador modal “pode”, mas, talvez reforçado por sua autoridade, encontra mais receptividade que a fala de Eduarda.

Eduarda tenta em seguida questionar o posicionamento dos colegas e, pela primeira vez, surge o conceito de energia de forma mais clara. Porém, não há a construção de um argumento estruturado e a aluna não consegue angariar aliados.

Trecho 2:

47. Eduarda: Mas a ideia é o sistema se manter sozinho pra sempre?
48. Luana: Aham. É.
49. Eduarda: É como se ele cedesse energia mas continuasse a ter a mesma energia pra continuar rodando? É isso?
50. João: Enquanto tiver água...
51. Luana: É, a roda dele não para.
52. Eduarda: Então ele perde energia e não perde energia?
53. Maria: Ia ter que ser uma coisa muito rápida.
54. Eduarda: Paradoxal. Só isso.

Nesse segundo trecho, embora ainda não seja possível identificar nenhum argumento formalmente construído, percebe-se que o grupo começa a se interessar em investigar mais a fundo o funcionamento da máquina para que possa defender uma posição mais segura com relação ao projeto. Note que Eduarda consegue elencar uma variável principal a ser considerada: energia. E ainda que algo parece dizer-lhe que o conceito de energia poderia oferecer a garantia requerida pelo argumento que inviabilizaria o projeto, o que se revela nos turnos 52 e 54.

O grupo então inicia uma discussão acerca dos detalhes do funcionamento da máquina. O primeiro ponto notável é a questão do diâmetro das rodas. De fato, o uso de diâmetros decrescentes é aquilo a que o inventor se refere como “força da alavanca” (ver texto no anexo 1) e é assim que espera que seu projeto seja viável.

Trecho 3:

100. Eduarda: Porque é justamente porque vai estar girando mais rápido, é isso? Tipo, começa com ela girando devagar aí vai dando impulso na outra, que vai dando impulso na outra e quanto menorzinha ela vai ficando, mais rápido ela vai girando. E, tipo, a energia mecânica que ela vai produzindo...

101. Maria: Mas por que ele disse... a única coisa que eu não entendi é por que que ele disse que se fosse maior daria mais certo.
102. Eduarda: É por que tipo, quanto maior... se eu começar com uma roda muito muito grande, quando ela chegar na menor, a menor vai tá rodando muito mais rápido. Entendeu, tipo, se eu tiver uma roda assim, uma roda razoável dando impulso numa menor, vai girar de uma forma. Agora, se a roda for, tipo, três vezes maior, a velocidade vai ser muito maior.

Movimentos de polias acopladas foram estudados na série anterior por este grupo de alunos, de modo que a ideia de que a frequência (“velocidade” na fala de Eduarda no turno 102) é inversamente proporcional ao diâmetro neste caso não é nova. Entretanto, esse ponto, que é base do argumento do inventor, é deixado de lado e só será brevemente citado ao final da discussão no turno 388.

Segue-se a discussão com a participação do professor. Inicialmente, não é claro para o grupo que a máquina seria de fato um ciclo inteiramente fechado. A participação do professor neste momento é no sentido de esclarecer esse ponto, como apresentado no trecho 4 abaixo.

Trecho 4:

103. Professor: Mas aí, olha só: então você girou as rodas. Aí você aciona o gerador. Vai gerar energia elétrica, certo? Como é que você vai jogar a água de volta lá em cima?
104. Eduarda: Usando essa própria energia?
105. Maria: Mas cara, você não pode usar essa energia pra... levar lá pra cima.
106. Professor: Não faria sentido usar uma energia externa, né? Não é isso o que ele quer. Ele não tem essa energia. Ele quer gerar energia.
107. Maria: Não dá pra fazer nenhum mecanismo que... que a água volte lá pra cima? Um cano que botaria a água lá pra cima com a pressão?
108. Eduarda: Não, não tem como, porque a pressão vai fazer a água descer.
109. Maria: Então a bomba vai criar pressão? Vai jogar ela lá em cima com a pressão? Tem a roda aqui, tem a caixa aqui em cima. Se eu colocar a mesma pressão que tá lá dividindo pra ir lá pra cima...
110. Professor: É isso o que uma bomba faz: ela aumenta a pressão em baixo pra água subir.
111. João: Mas, professor, essa bomba tem que tá impulsionada por alguma outra coisa. Por exemplo, por um motor.
112. Professor: Essa bomba é ligada no gerador elétrico.
113. João: É ligada no gerador elétrico. Então pra essa bomba começar, pra dar o pontapé inicial pra água começar a subir assim que a caneca despejar, ela vai precisar de uma energia que o gerador ainda não vai estar dando.
114. Professor: Você pode começar com a água já lá em cima. Ela começa a cair, a roda começa a girar e começa a acionar o gerador.
115. Maria: Mas aí teria que ter uma quantidade de água muito grande pra fazer a roda girar.
116. João: Sim, quatro mil litros de água a 13,5 metros é o suficiente pra fazer a roda girar.
117. Maria: Tudo bem, mas pra continuar girando sem precisar fazer nada?
118. João: Eu entendi, eu entendi. Por exemplo, quatro mil litros de água em cima e 13,5 metros de altura. Ele vai girar. Uma hora vai começar a dar energia no gerador muito embora tenha muita água em baixo. Quando o gerador começar a ter energia elétrica suficiente ele vai impulsionar a bomba e...
119. Maria: Eu sei, mas como é que ele vai rodar até que o gerador...
120. João: Com quatro mil litros de água. Por isso é que ele colocou muita água em cima.

João percebe (turno 111) que não só a bomba hidráulica é necessária, mas que seu uso requer alguma fonte de energia. Nos turnos seguintes, o diálogo, com a participação do professor, serve para esclarecer que a fonte é a própria máquina (turnos de 111 a 117). Como se revela em sua fala no turno 118, após compreender que trata-se de fato de um sistema

inteiramente autônomo, o aluno segue convencido de que pode funcionar desde que seja resolvido o problema da inicialização do movimento, ou seja, desde que haja volume de água e altura suficientes para provocar o giro inicial da roda maior. Começa a se consolidar uma posição favorável ao investimento no projeto e que será fechada como uma decisão coletiva no próximo trecho.

Trecho 5:

129. Maria: Eu acho que ele pode conseguir. Eu acho que tem futuro.
130. Luana: Antigamente, as chances de darem errado eram maiores porque as tecnologias eram mais precárias mas hoje em dia as tecnologias são muito mais avançadas e, por mais que, assim, tenham defeitos, é muito mais fácil você avançar a tecnologia ainda mais porque tem muito mais cientistas. Por mais que até ele não tem tanto acesso a essa tecnologia, ele tem acesso ao que ele consegue entender e é mais barato ter acesso a uma ideia, a uma pesquisa, a um... do que ter acesso à própria tecnologia pronta, entendeu? Você falou da energia eólica. Energia eólica é uma energia pronta? Beleza. Só que é uma energia que ocupa espaço, que é cara, entendeu? Que quem tem energia eólica...
131. João: E que não é 100% garantida. E se parar de ventar?
132. Luana: É, não é 100% garantida. E além disso, tipo assim...
133. Eduarda: Não, mas não é totalmente instantânea, energia eólica, eles armazenam, mas mesmo assim se o lugar ficar muito tempo sem ventar.
134. Luana: Mas não é nem questão disso, tipo, o que ele vai gastar com a energia eólica pode até ser mais do que os experimentos que eles estão fazendo porque se der certo eles não vão precisar gastar mais nada.
135. João: Só que a energia eólica tem um porém que, assim, fica muito claro. O custo de manutenção dos equipamentos de energia eólica é surreal. Pra uma população que levou anos pra poder juntar quatro mil reais pra prefeitura dar os outros 26 mil pra eles juntarem 30, é surreal colocar um projeto de energia eólica lá.
136. Luana: É muito caro e além disso, tipo, é como você falou, é muito mais barato você ter acesso a tecnologias baratas que... porque bomba hidráulica é mais barata que um sistema eólico, entendeu? É muito mais barato você ter acesso a isso e a ideia de como fazer pra melhorar, cientistas, universidades, do que ter acesso a outra tecnologia.
137. João: Eu acho o seguinte, com a ideia dele, ele tá podendo provar de muito perto pras pessoas no que que ele tá investindo, entendeu? As pessoas tão acreditando nele porque o equipamento tá no quintal de uma pessoa, entendeu? A pessoa tá vendo que o negócio tá funcionando, tá começando a girar.
- (...)
147. Luana: Eu acho que eu ajudaria. Eu ajudaria assim, eu acho que investiria se eu morasse lá. Até porque, cara, você pensa, você é uma população pobre, você é uma população que precisa, entendeu? Tipo, você vai precisar desse sistema. Você tem que investir no que você tem.

Os argumento apresentado por João no trecho 1 (turno 42) estabelece uma possibilidade, embora não uma conclusão inequívoca, ou seja, a máquina “pode funcionar” ao invés de a máquina “funciona”. A leitura do trecho 5 mostra que a ausência de uma garantia de sucesso não parece ser um impedimento para que os demais colegas, com exceção de Eduarda, se posicionem no sentido de investir no projeto. Poderíamos conjecturar que isto acontece porque a possibilidade de que haja uma garantia inversa, ou seja, uma garantia de insucesso, não ocorre ao grupo. O conceito de energia como um invariante em qualquer sistema físico, embora tenha sido estudado previamente, não faz parte, nesse momento, do arsenal conceitual ao qual estes alunos recorrem ao realizar esforços para compreender o

mundo que observam ou tomar decisões de cunho sócio-científico, como é o caso. Uma das expectativas com relação a esta atividade é justamente contribuir com a superação da barreira entre dois mundos aparentemente distintos que muitas vezes coexistem cognitivamente no estudante: o da experiência real e objetiva e o da Física escolar.

Retomando as ideias expressas pela segunda regra de Latour (seção 3.5), nota-se que a posição favorável ganha força não pelo valor intrínseco da afirmação da possibilidade, mas pelo uso posterior feito dela pelo grupo. Com a formação de uma aliança, surgem modalidades positivas (seção 3.5) que reforçam a afirmativa original expandindo-a em outro contexto. Ora, uma vez que assumo que a máquina pode funcionar, mostro agora que ela também é vantajosa em oposição a outras alternativas de solução para o problema do fornecimento de energia elétrica. O argumento financeiro, que reforça a posição favorável, poderia ser composto na estrutura padrão a partir de algumas falas de alunos diferentes (turnos 130, 137 e 147): “ (D) (Dado que) você é uma população pobre, você é uma população que precisa (W) (já que) você tem que investir no que você tem (B1) (por conta de ser) mais barato ter acesso a uma ideia, a uma pesquisa, do que ter acesso à própria tecnologia pronta (B2) (e por conta de que) ele tá podendo provar de muito perto pras pessoas no que que ele tá investindo, (C) eu acho que investiria se eu morasse lá.”

Neste ponto, o professor pode sentir algum desconforto com a tomada de posição do grupo. Podemos diluí-lo se mantivermos em mente as três regras metodológicas que tomamos por empréstimo da sociologia da ciência de Latour (seção 3.5). Em primeiro lugar, procedemos a análise de um processo em construção, gradativo, coletivo e dinâmico por natureza, como requer a regra número um. A segunda regra nos impõe compreender que o conhecimento é construído no debate, pela formação de alianças entre uma afirmativa e as caixas-pretas sobre as quais se apoia e, principalmente, entre a afirmativa e as pessoas que fazem uso posterior dela, de modo que a tomada de posição realizada pelo grupo é a única consistente com o processo de argumentação observado até o presente momento. Localizar as posições no tempo da discussão é necessário para entendê-las, uma ideia que se aprofunda tendo em vista a terceira regra metodológica. O possível desconforto do professor só poderia derivar da crença numa Natureza que arbitra, de uma confortável posição alheia ao tempo da controvérsia, o certo e o errado, o fato e a falácia. Ora, esta representação da Natureza, embora esteja presente no pensamento do professor, ainda não existe no espaço dos estudantes, de modo que não serve como critério de análise. Cabe apenas entender que a discussão ainda não atingiu o seu ápice, ou seja, que a caixa-preta ainda não pode ser fechada.

A discussão avança quando Eduarda, compreendendo que foi voto vencida com relação a resposta à primeira questão, sugere o exame da segunda. A segunda questão foi imaginada originalmente com o objetivo de trazer à tona o problema da degradação da energia. Como se verá no trecho 6, isto é precisamente o que ocorre.

Trecho 6:

155. Eduarda: Não sei, cara. Não sei. Às vezes eu sou pessimista. Vamos pra próxima pergunta. [lendo] “Caso o objetivo da máquina fosse apenas manter a roda em movimento e não fornecer energia elétrica às residências poderia funcionar?”
156. Maria: Sim, porque ela ia contar só com a caída da água. Entendeu? Fornecer energia é mais complicado porque ela tem que estar numa velocidade tal que gere energia e faça o gerador funcionar.
157. Eduarda: E que sustente o próprio movimento.
158. Maria: Que sustente o próprio movimento. Mas isso é mais fácil que fazer esse movimento gerar energia. Ainda mais pras proporções que ele quer. Entendeu? Tipo assim. Conseguir colocar a roda em movimento ele já conseguiu. Na água. Não sei se na terra eles conseguiram. Mas, tipo assim, eu acho mais fácil. Eu acho.
159. Eduarda: Não sei se ia ser uma coisa eterna, porque tem tanta perda. Você perde muita coisa. Imagina. A roda girando no chão, cara.
160. Luana: Mas é muito mais fácil ficar com essa roda girando no chão do que com esse movimento fornecer energia pra todas as casas.
161. Eduarda: Mas é por isso que eu acho que movimento contínuo é algo que vai ser muito difícil dele conseguir. Porque você vai perder muita energia, então, tipo, você pode conseguir ficar muito tempo girando a roda mas em um momento você vai perder muita energia. Porque você vai perdendo de pouquinho em pouquinho. Você vai perder com atrito, você vai perder com...
162. João: Mas olha só, mas essa questão da energia, vai ser toda reposta pela pressão que a bomba hidráulica vai repor no sistema. Porque o gerador de energia elétrica, ele vai oferecer energia pra bomba hidráulica e a bomba hidráulica vai estar sempre jogando pressão na água [pausa 10 segundos]. Olha só [lendo] “a energia resultante do movimento vai acionar um gerador. Ele vai alimentar a comunidade e o próprio sistema”, que é a bomba hidráulica. Se ele não estiver só alimentando a cidade, estiver alimentando a si mesmo, ele vai ter energia pra sempre. Agora, se ele estiver alimentando só a cidade e esquecer do sistema, o sistema uma hora ia parar.
163. Maria: Agora, se ele não estiver só alimentando a cidade é mais fácil ele rodar.
164. João: Pois é, mas aí nem tem sentido ele existir.
165. Maria: Não, eu sei, mas foi o que ele perguntou, se fosse só pra manter a roda em movimento.
166. João: Sim, agora, se você tem um projeto com dimensões muito maiores do que essa, eu acho que o próprio projeto vai ter energia pra oferecer pra si mesmo e a sobra, que é o que ele tá propondo aqui, não com esse mesmo nome, “sobra”, mas o restante, que vai ser muita energia, vai dar pra distribuir pras outras populações.
167. Eduarda: Mas eu acho que, assim, olha só, vem a energia...
168. Maria: Professor, depois você vem aqui? [interrompendo]
169. Eduarda: Ele produz uma energia X. Sendo que essa energia X ele vai ter que voltar e vai gastar. Sendo que ele vai perder energia, então a energia que ele produziu no primeiro ciclo vai ser maior do que a do segundo, entendeu? Quando ele for girando, ele produziu uma energia X...
170. João: A ideia é ao contrário.
171. Eduarda: Daí ele girou de novo. Quando ele girar de novo ele vai ter perdido energia. Porque ele vai ter perdido com várias coisas. Você vai perdendo energia. Inclusive porque ele vai tá alimentando uma cidade.
172. João: Sim, ele vai perder energia por causa do som, por causa do atrito, por causa de N fatores que fazem ele desgastar energia. Mas se o sistema se alimentar mais a si mesmo do que ele perde, ele vai sempre continuar funcionando.

Está criada afinal a controvérsia que pretendíamos fomentar com a proposta da atividade. Surgem duas posições claramente divergentes que dividirão a discussão até o final. A primeira é a de Eduarda, evidenciada no turno 169, que defende que a máquina

eventualmente pararia de funcionar porque a quantidade de energia gerada em cada ciclo seria sempre menor que a gerada no ciclo anterior. A segunda é a de João, evidenciada no turno 172, que defende que a máquina poderia funcionar se gerasse alguma quantidade extra de energia, ou seja, se pudesse compensar internamente as perdas inevitáveis. A primeira posição é consistente com o princípio da conservação da energia, a segunda não. Assim, a discussão, a partir desse ponto, torna-se de fato o caminho que gostaríamos de estabelecer em direção à consolidação do próprio conceito de energia. É interessante notar que a trilha no sentido de uma compreensão mais ampla do conceito, neste grupo que analisamos, foi traçada apenas no momento em que a dissipação de energia entrou em cena. Esse fato vem ao encontro da concepção de que a conservação da energia se torna relevante como forma de compreender o mundo que nos cerca apenas quando formas não mecânicas são consideradas.

Trecho 7:

337. Eduarda: Então ele vai produzir uma energia 2X. Eu que inventei 2X, é uma energia qualquer.
 338. Professor: Mas quanto a água tinha antes?
 339. Maria: X
 340. Eduarda: Como assim? Ah, a água tinha a energia potencial dela, antes dela descer.
 341. Professor: Mas quanto era? Quanto era?
 (...)

351. Eduarda: Pera. Tem que ser a energia da gravidade, mas se ela vai girando, ela vai ter que ser menor do que a que chegar no final porque quando chegar no final ela foi aumentando por causa da velocidade da roda, não? Mas é a energia cinética que eu vou usar pra produzir energia.
 352. Professor: Sim.
 353. Eduarda: Mas eu só converti, professor. Então é a mesma energia! Então não tem como produzir energia extra! Chega no final a mesma energia! [agitada]
 354. Maria: [risos]
 355. Luana: [risos]
 356. Eduarda: Péra! Péra! Olha só, começou com uma energia X, energia potencial X.
 357. Professor: Certo.
 358. Eduarda: A energia mecânica lá que vai produzir a cinética. Quando chegar no final, a energia cinética da roda menor vai girar o gerador e vai produzir a mesma energia X, sendo que elétrica agora. Quando ela produzir essa energia elétrica, eu vou ter energia elétrica X. Se a minha bomba, ela precisar de energia metade de X, tipo, se X for mil e a minha bomba precisar de quinhentos, eu vou usar quinhentos pra bomba, pra água subir, e vou mandar quinhentos pra cidade.
 359. Professor: Mas quanto você vai precisar pra água subir?
 360. Eduarda: A energia pra alimentar da bomba.
 361. Maria: Mas a água vai voltar pro mesmo lugar então precisa da mesma energia.
 362. Eduarda: Eu não tenho que ligar a bomba? Então se eu ligar a bomba, a bomba faz o trabalho pra recolocar a água no lugar. Ou não?
 363. Professor: Mas a bomba tira energia de onde?
 364. João: Do gerador.
 365. Maria: Mas, professor, não tem como o gerador dobrar... dobrar... dobrar a energia?
 366. Professor: Tem?
 367. Maria: Não sei, não conheço geradores.
 368. Professor: Mas conhece energia.
 369. Professor: Vamos lá: seu gerador produziu energia X, né? Então a energia que a água tinha antes era X. Agora o que a bomba vai fazer?
 370. Maria: Ela vai dobrar a energia.
 371. Eduarda: A bomba vai ter que vencer a mesma energia potencial, a mesma que fez com que a água descesse no começo.
 372. Luana: É.

373. Eduarda: Por isso eu disse que era paradoxal! Vocês ficaram me confundindo!

O professor é chamado de volta à discussão por Eduarda que tenta matematizar seus argumentos em busca de maior segurança. Inicialmente, Eduarda estabelece que a energia mecânica da água ao chegar à roda não pode ser maior que a energia potencial inicial (turnos 351 e 353): “(D) (Dado que) tem que ser a energia da gravidade (e que) é a energia cinética que eu vou usar pra produzir energia (W) (já que) eu só converti (C) então (Q) não tem como produzir energia extra (e) chega no final a mesma energia”. A percepção de maior segurança e, conseqüentemente, maior comprometimento pessoal com a afirmativa, se explicita no uso do qualificador modal “não tem como”, que substitui “muito difícil” (usado pela aluna no turno 161 do trecho 6). Segurança essa que emana do uso da garantia que vem a ser, essencialmente, a própria conservação da energia.

Entretanto, a passagem do processo pelo gerador e pela bomba hidráulica se mostra inicialmente uma incógnita que poderia, mesmo na visão de Eduarda, validar a posição dos demais colegas, o que se revela no turno 358. Curiosamente, é Maria, que sustenta a posição favorável à criação de energia extra, quem fornece à colega o elemento que faltava para completar o argumento no turno 361. A partir da colocação de Maria, Eduarda estabelece o quadro completo da conservação (371 e 373): “(D) (Dado que) a bomba vai ter que vencer a mesma energia potencial, a mesma que fez com que a água descesse no começo (C) por isso eu disse que era paradoxal!”

A controvérsia se encerra no próximo trecho, quando a questão da degradação ressurge e o argumento completo contrário à construção da máquina é formulado.

Trecho 8:

385. Maria: Será que não tem um jeito dessa bomba dobrar? Tem alguma forma dessa bomba dobrar?
 386. Eduarda: É isso que eu tô pensando agora.
 387. Maria: Mas como é que ela vai dobrar? Porque pra ela dobrar a energia cinética tem que ter alguma coisa dentro dela que gere mais energia, além da...
 388. Eduarda: Será que esse tamanho das... Não, porque o que importa é somente a altura, o desnível.
 389. Luana: É...
 390. Maria: Mas, olha só, e se a bomba tivesse uma outra energia lá dentro que dobrasse a energia da água?
 391. Eduarda: Mas tem que ser a energia unicamente... você não pode usar nenhuma fonte exterior.
 392. Maria: Mas aí não vai dar certo então! Porque ela tem que... tem que... dobrar, triplicar, quadruplicar, sei lá quanto conseguir, a energia da água. Será que se cair mais rápido vai conseguir gerar?
 393. Eduarda: Gente! É por isso que é possível colocar a roda pra girar eternamente mas não é possível botar ela pra produzir eternamente! [agitada]
 394. Maria: O que?
 395. Eduarda: Entendeu?
 396. Maria: Ah, eu não acredito!
 397. Eduarda: Professor! Professor! [agitada]
 398. Professor: Sim?

399. Eduarda: Então é possível eu deixar essa roda girando eternamente mas não é possível produzir energia e deixar ela girando eternamente.
400. Professor: Por que?
401. Maria: Porque ela não vai conseguir vencer o desnível.
402. João: Vai ter um déficit de energia.
403. Eduarda: Porque eu tenho energia suficiente pra fazer ela continuar. Porque, do tipo, a energia potencial vem, vira cinética, vira elétrica e a elétrica faz a potencial voltar pro mesmo lugar. Então eu continuo com o mesmo sistema e, se eu ignorar a perda de energia, tipo... [pausa: 5 segundos] Não pode ignorar! Nem isso! A roda vai parar de girar! Tá vendo? Tá vendo? Olha só, ia ficar igualzinho se não tivesse atrito, não tivesse nada, mas tem atrito. Eu não posso ignorar, então ela nem vai produzir energia elétrica e nem vai girar pra sempre. Eu falei isso no início e vocês disseram que eu era maluca! Viu? Viu? [muito agitada]
404. Maria: Eu não disse que você era maluca!
405. Eduarda: Acabei de provar! Anota aí! Anota aí, gente!

No início deste trecho, vemos Eduarda consolidar sua objeção à máquina diante do grupo rejeitando a possibilidade de geração de energia extra, seja a partir do aumento da frequência das rodas, como gostaria o inventor (turno 388), ou da hipótese de interferência externa (turno 391).

Nos turnos de 397 a 402, com o professor novamente chamado à discussão, o grupo, agora claramente liderado por Eduarda, apresenta uma nova conclusão. É interessante notar que Maria (turno 401) e João (turno 402) realinharam suas posições e se deixaram alistar pelo argumento da colega.

A degradação da energia, no entanto, é deixada brevemente de lado, o que parece indicar que o grupo deve responder com uma negativa a primeira pergunta mas com uma afirmativa a segunda. O episódio tem sua última reviravolta quando Eduarda afinal constrói o argumento, completo em conteúdo e robusto na forma, que nega inequivocamente a viabilidade da máquina e, com isso, completa o fechamento da caixa-preta da conservação da energia (turno 403): “(D) (Dado que) a energia potencial vem, vira cinética, vira elétrica e a elétrica faz a potencial voltar pro mesmo lugar (W) (já que) eu não posso ignorar a perda de energia (C) então ela (Q) nem vai produzir energia elétrica e (Q) nem vai girar pra sempre”.

Trecho 9:

426. Maria: Eu não tinha pensado nisso no início. Agora tô me sentindo burra.
427. Larissa: Pensar no que?
428. Maria: Pensar que ela não ia conseguir manter por causa da perda de energia. [pausa – 10 segundos] Estou me sentindo estúpida. Ele não pensou isso no projeto não?
429. Luana: É...
- (...)
434. Maria: Mas se o Professor sabe disso, por que ele não conta pro inventor?
435. Luana: [risos]
436. Maria: [risos]
437. Maria: Olha só, mas se você sabe que o cara tá errado, eu acho muito ético...
438. Professor: [interrompendo] Mas eu não sei de nada!
439. Maria: Porque se você sabe que ele...
440. Professor: [interrompendo] Eu nunca encontrei uma segunda reportagem sobre a ilha pra saber o que aconteceu depois lá.
441. Maria: Você tem que mandar um e-mail pra esse cara, nem que seja no túmulo, pra avisar pra ele.

442. Professor: E-mail? Ele não tem nem luz elétrica!
443. Eduarda: [risos]
444. Luana: [risos]

Este último trecho foi incluído para ilustrar a força das ideias que encontramos na terceira regra metodológica de Latour (seção 3.5). Resolvida a controvérsia, uma representação da Natureza emerge como uma verdade inquestionável, uma verdade que não existia antes da resolução. Mesmo para os atores que defenderam, durante a maior parte da discussão, uma posição diferente, a representação vencedora agora lhes parece ter sido sempre a única. Isso é revelador. Mostra o efeito do fechamento da caixa-preta, da transição do conhecimento de hipótese a fato consolidado.

6.3 Atividade 2: Irreversibilidade no dia-a-dia

O objetivo desta atividade, cuja proposta encontra-se detalhadamente descrita na seção 5.3, é o de que o aluno observe que há uma assimetria fundamental na Natureza, a do sentido da passagem do tempo, e que os efeitos dessa assimetria são notáveis nos fenômenos do cotidiano. Mais ainda, que o aluno possa estabelecer conexões entre essa assimetria fundamental, o conceito de energia e um modelo microscópico rudimentar da matéria, lançando mão de conteúdos estudados anteriormente. Para tanto, é exibida uma sequência de oito vídeos em duas versões cada e pede-se aos alunos que respondam e justifiquem o que se pergunta no material impresso distribuído (vide anexo 1).

O grupo selecionado para análise é composto por cinco alunos, aqui referidos como: Camila, Renata, Júlia, Alex e Tiago. Para a realização desta atividade, o professor contou com o apoio e a participação de um estudante do curso de Licenciatura em Física da UFRJ participante do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID). Na transcrição, o professor da turma e autor deste trabalho será denominado Professor (1) e o licenciando Professor (2).

A atividade se inicia com a exibição das duas versões da primeira cena do vídeo, que mostra um ovo fritando na frigideira. A segunda versão foi revertida no tempo. Pede-se aos alunos que identifiquem a versão “correta” e justifiquem a escolha. Vale ressaltar que os alunos não foram previamente informados de que a adulteração feita no vídeo é uma reversão temporal. A discussão após a exibição da cena é apresentada abaixo.

Cena 1: Ovo

4. Camila: Gente, não. Isso é impossível.
5. Júlia: Acho que dá sim.

6. Camila: Olha só, cara... o ovo, a parte branca tá ficando coisada. Gente, isso é impossível de acontecer. Vocês já fritaram um ovo? Ele botou alguma coisa ali. Colocou alguma substância no ovo. Ele colocou alguma coisa no ovo. Tá errado isso aí.
7. Camila: A gente tem que escrever.
8. Camila: O que é isso? O que aconteceu agora? Essa é a versão 2? Qual foi a diferença?
9. Júlia: Tá de trás pra frente.
10. Camila: Ah... tá saindo o óleo, né?
11. Camila: É Photoshop mesmo. Isso é Photoshop.
12. Renata: Gente, o que que aconteceu com o ovo?!
13. Júlia: Caramba!
14. Camila: Então a primeira...
15. Júlia: Cara, a primeira pode estar certa. Nem sempre a gema tem que estourar, cara.
16. Camila: Tá bom...
17. Alex: O que que foi?
18. Camila: A gente tem que escolher uma versão certa. Gente, qual é a versão que tá certa?
19. Júlia: Eu acho que a 2 é impossível.
20. Camila: É, tá ao contrário...
- (...)
29. Tiago: Eu acho que a versão correta é a primeira. Tudo bem. Mas por que?
30. Júlia: Porque a gente já fez isso em casa e nunca aconteceu.
31. Camila: Porque não acontece.
- (...)
37. Tiago: Qual é a diferença entre um e o outro?
38. Camila: Um começou a ficar todo branco e no outro começou a ficar transparente.
39. Tiago: Isso. Tá. Quando ele está cru, ele tá transparente. Tá na temperatura normal.
40. Camila: É... ele tá...
41. Tiago: Aí quando começa a aquecer ele fica branco.
42. Camila: Então não faz sentido ele desficar (sic).
43. Camila: A não ser que ele tenha colocado alguma substância, que quando fica quente fica branco e quando...
44. Tiago: Ele tá trolando (sic) a gente. Tá voltando o vídeo. [interrompendo]
45. Júlia: Foi isso que eu falei, cara.
46. Camila: É... então... não sei.
47. Tiago: Ele voltou o vídeo mesmo?
48. Camila: Ele não voltou o vídeo, o vídeo é assim.
49. Renata: É assim. [junto com Camila]
50. Camila: Mas ele pode ter editado.
- (...)
58. Camila: Tá bom... gente, sério, qual versão tá certa? A primeira.
59. Renata: É.
60. Camila: Por que? Qual a razão da escolha?
61. Renata: Porque o movimento natural do ovo é ficar branco.
62. Tiago: Por que fica branco?
63. Camila: Porque a enzima que eu não lembro o nome agora desnatura.
64. Renata: Cara, vamos pra Biologia.
65. Júlia: É, a enzima desnatura.
66. Renata: É.. é...
- (...)
94. Júlia: Ele fica branco. Branco em volta e a gema. Aí ele faz a operação inversa. Começa com a clara branca e aí vai ficando transparente. Quando você taca o ovo ele é transparente. Depois com o calor e o...
95. Camila: É, mais o que eu tô dizendo é que... [interrompendo]
96. Tiago: Olha só... [interrompendo. Pausa: 10 segundos]
97. Camila: Fala.
98. Tiago: Olha só. É normal que quando começa a aquecer as enzimas desnaturam e ele começa a ficar branco e não o contrário, não fica transparente.
99. Júlia: Então, ele não pode ficar branco pra depois ficar transparente.
100. Tiago: Isso não é muito Física, mas...
101. Camila: É Física, mas quando você fala em enzima desnaturando é uma reação Química.
102. Tiago: Química.

103. Júlia: Física.
 104. Camila: Lembra de reação Física e Química?
 105. Renata: Mas isso aí é Bioquímica, cara.
 106. Camila: Bioquímica?
 107. Alex: A reação do ovo é Física ou Química? Tan tan tan tan...
 108. Camila: E aí, como é que a gente escreve?
 109. Camila: Vou colocar: a versão um é a única que faz sentido?
 110. Professor (2): Mas o que é “faz sentido”?
 111. Camila: Porque quando você coloca o ovo na panela, primeiro ele tá transparente, certo? Depois ele fica branco. Não faz sentido ele ficar branco pra depois ficar transparente.
 112. Júlia: Tá sumindo?
 113. Camila: É, tá esfriando ele de volta.
 114. Professor (2): Mas a gente consegue derreter ferro, por que não poderia derreter o ovo?
 115. Júlia: Porque... não temos a mesma panela.
 116. Camila: Porque não dá pra você renaturar as enzimas.
 117. Júlia: O ferro volta pro seu lugar.
 118. Camila: O ferro volta do estado líquido.
 (...)
 126. Júlia: Qual é o nome da enzima do ovo?
 127. Renata: Ah, eu lembro. Não, não é enzima não, gente. O nome é proteína.
 (...)
 136. Camila: Olha só, na um, eu coloquei [lendo] A versão um é a única que faz sentido pois, ao fritar-se um ovo, a clara passa da cor transparente para a cor branca [para a leitura] aí eu coloquei entre parênteses [lendo] desnaturação da enzima. O ovo...
 137. Júlia: Tá bom, agora vamos pra dois.
 138. Alex: Mas você não ouviu o que ele falou? Não é pra gente pensar assim. É pra gente pensar... dizer... por que que a gente pode derreter tipo um ferro e não pode derreter o ovo.
 139. Camila: É que o ferro não tá desnaturando, o ferro só está mudando de estado físico. Isso que a Renata falou... é uma reação química [interrompendo]

Como esperado, a percepção de que a segunda versão do vídeo foi invertida no tempo foi bastante imediata (turnos 19, 20 e 29) e se baseia, num primeiro momento, na simples constatação de que o sentido inverso não faz parte da experiência cotidiana (turnos 30 e 31). No entanto, a obrigatoriedade da apresentação de uma justificativa para a escolha força os alunos a levantarem hipóteses. A primeira se relaciona à forma e à cor da gema, mas é logo abandonada em virtude da colocação de Júlia no turno 15. O grupo então percebe que vale a pena concentrar suas atenções na mudança de cor da clara e associa o sentido natural da passagem do tempo a essa transformação. Um primeiro argumento poderia ser estruturado, compondo as falas dos alunos, da seguinte forma (turnos 38, 43, 58 e 63): “(D) (Dado que) um começou a ficar todo branco e no outro começou a ficar transparente (W) (já que) o movimento natural do ovo é ficar branco (B) porque a enzima que eu não lembro o nome agora desnatura (C) (então) qual versão tá certa? A primeira (R) a não ser que ele tenha colocado alguma substância.” Note que a base da garantia aparece apenas quando requerida, no turno 62. Já no turno 64, surge a percepção de que algum conhecimento de Biologia é necessário para que se consiga uma explicação mais precisa do fenômeno mostrado no vídeo.

Sem a pretensão de enveredar por uma discussão acerca de conhecimentos de Química ou Biologia, gostaríamos, com essa primeira cena do vídeo, de estimular a percepção de que a fritura provocou algum tipo de transformação permanente, transformação essa que não poderia ser explicada como uma mudança de estado físico apenas. Daí o questionamento apresentado pelo professor (2) no turno 114, uma modalidade do tipo negativo, que força os alunos a explicitarem a razão pela qual a transformação da clara é diferente de uma mudança de fase. A explicitação é feita por Camila no turno 139 ao estabelecer, a partir de sua própria fala (turno 101) e da de Renata (turno 105), que o processo em questão envolve uma reação química.

Passa-se então à exibição do segundo vídeo, a cena do cubo de gelo que derrete sobre a mesa. A versão invertida é a primeira. A discussão subsequente é apresentada abaixo.

Cena 2: Gelo

153. Professor (1): O primeiro ou o segundo?
 154. Camila: O segundo.
 155. Alex: Ah, tá.
 156. Camila: Porque o gelo não ia virar um cubo.
 157. Renata: A água no estado líquido não ia fazer um cubo assim.
 158. Professor (1): Se você colocar a água no congelador ela não vai voltar a ser gelo?
 159. Renata: Vai. [junto com Júlia e Camila]
 160. Júlia: Vai. [junto com Renata e Camila]
 161. Camila: Vai. [junto com Renata e Júlia]
 162. Camila: Mas não vai voltar a fazer um cubo. Ela não tá em nada.
 163. Alex: Não tem como meter essa.
 164. Professor (1): Ela não está presa em nada?
 165. Camila: É, ia virar uma poça de gelo.
 166. Professor (1): Mas por que não poderia assumir outra forma?
 167. Camila: Ia virar uma poça de gelo.
 168. Alex: É... essa é que é a chave...
 169. Professor (1): O que não permite que ela assuma a forma do cubo, por exemplo?
 170. Camila: O que não permite que ela volte para aquela forma?
 171. Alex: Vocês estão interpretando todas as perguntas errado.
 172. Camila: A gente passa a limpo depois.
 173. Renata: Eu já aprendi isso, cara.
 174. Camila: É a fôrma mesmo, cara.
 175. Júlia: Mas você quer comparar a forma com a fôrma?
 176. Alex: Por que o líquido não pode voltar àquela forma do ge... do sólido?
 177. Júlia: Por que o gelo pode virar água e a água não pode virar gelo? É isso que eu quero entender.
 178. Camila: Porque o gelo é sólido, quando você derrete...
 179. Renata: É, cara, pô.
 180. Júlia: Mas por que você não pode passar do líquido para o sólido?
 181. Alex: Porque o meio externo é mais quente que o gelo, não?
 182. Tiago: A tendência é derreter e não congelar.
 183. Camila: Mas o que eu tô dizendo é que isso não importa. Se você colocasse a água ali e colocasse no congelador, a água ia virar uma poça de gelo e não um cubo, entendeu?
 184. Júlia: A pressão interna pro gelo derreter é bem maior que a pressão pra água...
 185. Camila: Cara, a resposta disso é a mesma do por que que o rio não sobe a montanha. A água não pode subir pra virar um cubo, ela vai ficar do jeito que ela tá.
 186. Alex: E por que o rio não sobe a montanha? Eu quero saber a parada física.
 187. Júlia: Isso aí é o que? É a gravidade, né?
 188. Camila: A versão dois vai contra as leis da gravidade.

189. Alex: Não é a lei da gravidade.
 190. Júlia: É sim.
 191. Camila: É sim, olha só, a água tá aqui. Ela vai subir pra virar um cubo? Sem nenhuma força externa? Vou colocar a gravidade. Porque a água não vai subir sem nenhuma força externa.

A percepção de que a segunda versão da cena corresponde ao sentido natural do tempo foi, como esperado, bastante direta. Parecem surgir duas hipóteses diferentes como justificativa: a impossibilidade de reconstruir a forma de cubo espontaneamente (Camila e Renata nos turnos 156 e 157) e uma suposta diferença de temperaturas entre o meio externo e o gelo (Alex e Tiago nos turnos 181 e 182). De fato, o vídeo mostra o gelo sobre uma travessa apoiada numa mesa comum, de modo que a segunda hipótese é razoável. Estimular essa controvérsia é a razão do questionamento apresentado pelo professor (1) no turno 158. Os alunos Alex e Júlia questionam o argumento em favor da impossibilidade pela forma pedindo a Camila e Renata que mostrem suas garantias (turnos 176, 177 e 180). No turno 185, Camila responde com uma analogia interessante entre a forma da massa de água/gelo e o sentido do fluxo de um rio, associando implicitamente a forma com a existência do campo gravitacional. A gravidade virá a aparecer explicitamente em seguida nas falas de Júlia (turno 187) e Camila (turno 188) após mais um questionamento de Alex (turno 186). O argumento final de Camila poderia ser estruturado assim (turnos 185, 188 e 191): “(D) (Dado que) a água não pode subir pra virar um cubo (W) (já que) a água não vai subir sem nenhuma força externa (C) a versão dois vai contra as leis da gravidade.” Embora não haja menção específica dos termos centro de massa e energia potencial, é bastante interessante notar a associação feita pelos alunos entre a irreversibilidade do fenômeno e a forma do corpo e que a aluna tenha ido além, associando também a forma do corpo com o campo gravitacional.

Na terceira cena, vê-se uma pequena quantidade de café solúvel que se dissolve num copo contendo água quente. A primeira versão é a invertida. A discussão dos alunos do grupo acerca dessa cena segue abaixo.

Cena 3: Café

197. Camila: Ele tá o contrário de dissolvendo, gente.
 198. Júlia: Ele tá o que? Solvendo? [risos]
 199. Renata: Ele tá se filtrando sozinho, cara.
 200. Júlia: Tá o contrário do que devia ser.
 201. Camila: Começa em baixo aí depois ele bóia.
 202. Júlia: É que no começo a densidade dele é maior que a da água.
 203. Camila: Tá, é a versão dois que tá certa.
 (...)
 228. Camila: A versão dois faz mais sentido porque...
 229. Júlia: Porque eu faço isso e o café... ele não ia conseguir...
 230. Camila: Cara, eu acho que essas coisas só funcionariam... todas essas coisas só funcionariam se fossem metais. Se eu jogar... como é que se chama? Pó de... limalha de ferro na água e depois passar um imã, eu posso pegar a limalha de ferro de novo, não posso? Agora, se eu jogar o pó de café e passar um imã...

231. Renata: O café é solúvel em água então não faz sentido.
 (...)

235. Júlia: Tem a ver com a densidade.

236. Camila: Não sei, densidade?

237. Alex: Vai lá, vai lá, escreve aí.

238. Camila: Na versão dois o café é dissolvido... dissolvido normalmente.
 (...)

246. Camila: A versão um é impossível... Por que a versão um é impossível? Pois... pois... é muito esquisito que o café seja... seja... não sei.
 (...)

255. Alex: É o empuxo... não, empuxo não, qual é o nome da força que tem dentro d'água?

256. Júlia: Empuxo.

257. Alex: Empuxo.

258. Camila: Mas empuxo é pra cima. Não gente, vamos voltar aqui.

259. Tiago: Mas e a gravidade.

260. Camila: Não, a massa da Terra é muito maior.

261. Tiago: Não, eu quis dizer densidade.

262. Camila: Ah, densidade.

263. Tiago: Se fosse de metal, bem, a maioria dos metais é mais denso do que a água, então ele deveria ir para o fundo.

264. Camila: Bem, mas é café solúvel. Inclusive tava escrito lá.

265. Tiago: É, tava escrito na paradinha: instantâneo.

266. Camila: Mas aquilo ali era um grão de café ou era só um bolinho... de café.

267. Professor (1): É Nescafé.

268. Camila: Ah, então, era pó de café. O pó de café não vai se recompor, entendeu?

269. Tiago: Por que?

270. Alex: Mas por que não vai?

271. Camila: Porque eu já fiz café e sei que isso não acontece.

272. Alex: Eu sei que quando ele joga a bolinha de café, ela vai pro fundo e depois sobe, ela sobe por causa do empuxo.

273. Júlia: É, porque a densidade mudou.

274. Camila: Porque ele tá ficando tipo...

275. Renata: Formando Hidrogênio.

276. Camila: Ah. Tá, tá, tá...

Na sequência, os alunos passam à construção do desenho pedido. No material impresso (vide Anexo 1), é sugerida a elaboração de duas figuras mostrando o líquido nos instantes iniciais e nos instantes finais vídeo no sentido suposto natural. Nas figuras, as moléculas de água devem ser representadas por bolas brancas e as partículas do café por bolas pretas. A intenção do pedido do desenho é a de que os alunos considerem um modelo microscópico em seus argumentos estabelecendo um caminho possível para o conceito de entropia. Um esboço análogo será pedido também na próxima cena com o mesmo intuito. A figura 6.1, a seguir, mostra a representação construída pelo grupo em análise.

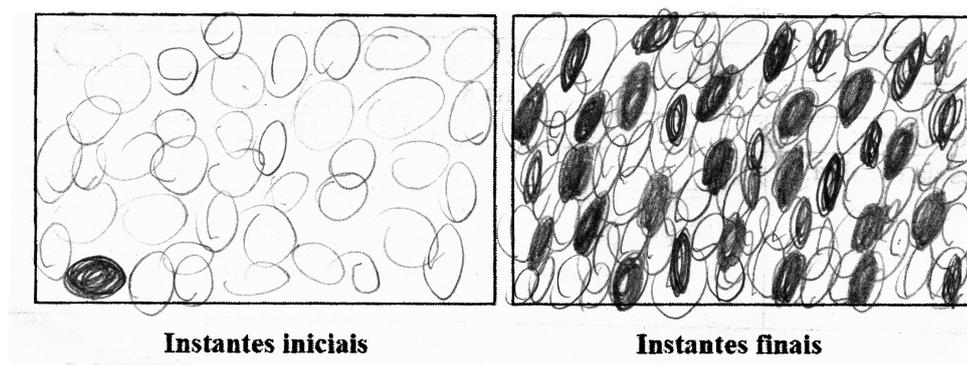


Figura 6.1: Representação da cena do café

Logo no início da discussão, entre os turnos 197 e 203, as alunas Camila, Júlia e Renata estabelecem rapidamente que o sentido natural da passagem do tempo deve corresponder à versão 2, que mostra o café se dissolvendo na água. Esta passagem mostra também que o fenômeno da dissolução é visto por elas como natural, mas que o inverso corresponderia a uma filtração, que não se espera que ocorra espontaneamente (Renata no turno 199). A ideia de que o fenômeno inverso não poderia ocorrer naturalmente é levada adiante (modalidade positiva) na analogia proposta por Camila no turno 230. A aluna imagina a ação de um campo externo que pudesse separar as partículas do café da água, como um campo magnético atuando sobre limalha de ferro, reforçando a convicção de que a separação só poderia ocorrer sob algum tipo de ação externa conveniente.

Embora a identificação do sentido natural tenha sido rápida e inequívoca, foi feita em princípio com base na vivência cotidiana, como mostram as falas de Júlia no turno 229 e Camila nos turnos 246 e 272. Encontrar um argumento que vá além da memória de observação é uma tarefa mais difícil porque exige conceitos ainda não familiares ao grupo, em especial, o conceito de entropia. No entanto, uma hipótese de explicação bastante interessante é levantada por eles: variação da densidade e ação do empuxo. O vídeo, no sentido natural, mostra que a bola de café solúvel, inicialmente no fundo do copo, sobe para a superfície após alguns instantes. Lembrando que Hidrostática foi um dos assuntos abordados no ano letivo, é natural que se recorra a esse conhecimento na busca de uma explicação. O argumento construído coletivamente pelo grupo é o de que a passagem do tempo deve estar associada à subida da bolinha e não à descida. Este argumento poderia ser estruturado da seguinte forma (Turnos 273, 274 e 276): “(D) (Dado) que quando ele joga a bolinha de café, ela vai pro fundo e depois sobe (W) (já que) a densidade mudou (B) (por conta de estar) formando Hidrogênio (C) (então) ele sobe por causa do empuxo.”

Naturalmente, a ideia que gostaríamos de explorar nesta cena, a do aumento do número de microestados associados à observação do café dissolvido, é desconhecida pelos alunos neste ponto e não seria razoável esperar que surgisse de modo completo e inteiramente autônomo. Fez-se a opção por não apresentar essas ideias no decorrer desta atividade, esperando que esta cena e a próxima sirvam como ponte para a Atividade 3, na qual os conceitos de microestado, macroestado e entropia serão trabalhados mais especificamente. Entretanto, é possível notar que alguma associação entre uma maior desagregação das partículas do soluto e a passagem do tempo foi criada, como mostra o desenho apresentado pelo grupo (fig. 6.1) e a fala de Camila no turno 268: “O pó de café não vai se recompor, entendeu?” Vale lembrar, de uma perspectiva que se inspira nas regras de Latour (seção 3.5), que acompanhamos em tempo real o processo de construção dos conceitos rejeitando uma perspectiva na qual teorias prontas são apresentadas como caixas-pretas.

A atividade prossegue com a exibição da quarta cena, na qual um desodorante em spray é pressionado algumas vezes e observa-se a dispersão das gotículas do líquido no ar. A primeira versão da cena é a do sentido natural do tempo. Segue-se a discussão estabelecida pelos estudantes.

Cena 4: Spray

323. Júlia: Desenha esse aqui agora.
 324. Renata: Spray no começo e spray no final.
 325. Tiago: Bota a setinha indicando.
 326. Camila: Seria engraçado, né? Se o mundo fosse assim. Se o spray entrasse.
 327. Tiago: Pô, mas se a gente compra um pote vazio...
 328. Professor (2): Se você apertar o frasco e soltar, o que acontece?
 329. Camila: É, mas pra acontecer isso a pressão tinha que ser absurda.
 330. Professor (2): A pressão tinha que ser absurda?
 331. Camila: É, tinha que ser absurda pra você colocar tudo de volta pra dentro.
 332. Professor (2): Se você aperta ele vazio e coloca num copo com água, entraria água pra dentro do frasco.
 333. Alex: Na pressão que a gente exerce e tudo... força o líquido a sair.
 334. Camila: Pode ser então, fazer ao contrário. Não, pode ser, cara, se ele tá falando, pode ser...
 335. Camila: Não, ele tá falando que se você apertar a parada e tiver passando as gotas lá ele entra.
 336. Tiago: Por causa da pressão, pô.
 337. Tiago: E esse desenho?
 338. Alex: Cara, isso são moléculas, partículas.
 339. Camila: Tá, enfim, e essa daí? A um ou a dois?
 340. Renata: Ah, bota a dois, cara, e escreve aí, se as gotas estiverem passando e você apertar...
 341. Alex: É a dois?
 342. Camila: Ah... sei lá...
 343. Alex: A dois é a correta? Eu não lembro do vídeo.
 344. Camila: A dois é a que entra.
 345. Alex: Então é a um.
 346. Camila: Não sei mais de nada.
 347. Alex: Quer que eu volte explicando cientificamente?
 348. Tiago: Eu acho que quando ele apertou a garrafa, a pressão fez os bagulhinhos saírem.
 349. Camila: É. A pressão dentro era maior que a de fora.
 350. Alex: Ele aplicou uma força que aumentou a pressão e fez o líquido sair.

351. Professor (1): Sim, mas se você pegar um recipiente vazio apertar e soltar, você não vai reverter isso?
352. Tiago: Não.
353. Camila: Cara, mesmo assim, não vai estar passando lá.
354. Alex: Qual o sentido disso? Fazer a gente ficar confuso... Não tô entendendo!
355. Renata: Logo antes da prova de Física. [risos]
356. Camila: Então as duas estão certas.
357. Júlia: Mas não pode marcar duas.
358. Camila: Ele falou que pode.
359. Júlia: Mas tem alguma que tem uma... uma...
360. Alex: Tem, a gente não pode derreter um ovo.
361. Camila: E nem coisar o gelo...
362. Alex: Qual o sentido de deixar a gente confuso?
363. Renata: Vai me enlouquecer antes da hora.
364. Camila: Tá, então as duas são...
365. Tiago: Não, acho que a última é impossível porque eu nunca vi um jato entrando.
366. Camila: Não, mas ele tá falando que pode ser qualquer coisa, pode escrever qualquer coisa, não pode?
367. Professor (1): Quero saber a sua opinião.
368. Camila: Então, é que nem ele falou, se você apertar ele na água vai entrar.
369. Alex: Sim, mas aí tem uma diferença de pressão...
370. Camila: O problema é estar passando por lá o jatinho.
371. Tiago: Não tem como você rapidamente apertar e sugar o troço.

No material impresso (vide anexo 1), é pedido também um desenho que represente os instantes inicial e final do fenômeno observado no vídeo. No desenho, o movimento das gotas do desodorante deve ser indicado por meio de setas. A representação feita pelo grupo em análise é mostrada na figura 6.2 a seguir.

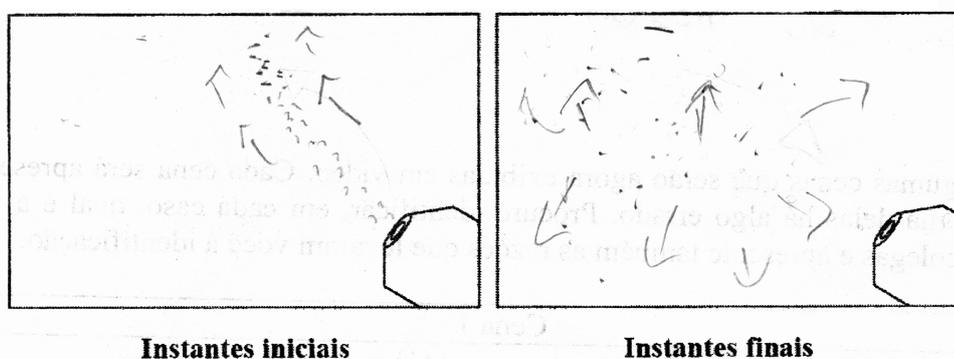


Figura 6.2: Representação da cena do spray

Mais uma vez, a identificação do sentido natural do tempo com base na vivência cotidiana é imediata (Camila no turno 326), mas a busca de uma justificativa que vá além dela apresenta dificuldades. A primeira hipótese levantada pelo grupo é a de que a ação da mão sobre o frasco só poderia aumentar a pressão interna, forçando o líquido para fora e não para dentro (turnos 348, 349 e 350). É por esta razão que o professor (1), no turno 351, retoma a modalidade negativa já proposta por Tiago (turno 327) e pelo professor (2), no turno 328: a pressão não poderia ser reduzida soltando o frasco? Camila (turno 353 e 370) e Tiago (turno 365) procuram mostrar que a redução de pressão interna do frasco sugaria matéria para

dentro, mas não criaria um jato organizado revertido que separa o líquido do ar. Infelizmente, um argumento formalmente estruturado não chega a ser construído e o grupo não chega a um consenso definitivo vindo a marcar as duas versões do vídeo como possíveis na folha. No entanto, o desenho apresentado mostra que foi feita a associação de ideias que gostaríamos e que, mais uma vez, pode servir como ponte para a visão microscópica da entropia a ser explorada na atividade 3: o estado inicial com o movimento direcionado e o estado final com o movimento de caráter mais fortemente aleatório.

Nas cenas 5 e 6, surgem um homem e uma bola de plástico. Na cena 5, o homem quica a bola contra o solo repetidas vezes. É claramente perceptível que a velocidade média da bola na descida é maior que na subida na segunda versão, que corresponde ao sentido natural da passagem do tempo. Apresenta-se abaixo a discussão dos alunos acerca dessa cena.

Cena 5: Bola 1

421. Professor (1): E aí, qual é o certo?
 422. Alex: É o dois.
 423. Professor (1): Por que?
 424. Alex: Porque a gravidade da Terra não deixa a bola subir na sua mão.
 425. Professor (1): Não? Ué? Mas você não viu a bola subindo ali?
 426. Camila: Não mas... no começo.
 427. Alex: A força tá puxando a bola pro centro da Terra. Então...
 428. Camila: A não ser que ela já esteja quicando.
 429. Tiago: Ela sobe por causa do chão e da força elástica.
 430. Renata: Na primeira?
 431. Júlia: Na primeira eu vi ela subindo.
 432. Camila: É...
 433. Alex: Não.
 434. Renata: Eu vi ele jogando...
 435. Alex: Não, não, não.
 436. Professor (1): Sim, mas é isso, você começa jogando ela para baixo.
 437. Júlia: Na primeira eu vi ela subindo.
 438. Alex: Não, não. Ele já tava com a bola na mão, como que ia subir da onde?
 439. Júlia: E na outra? Ah, a gente botou que as duas tão certas.
 440. Camila: Ele tá com a bola na mão sim. Olha lá, ele vai passar de novo.
 [pausa: 1 minuto – nova exibição do vídeo]
 441. Camila: Ah, é verdade, ela tá saindo sempre da mesma altura.
 442. Alex: Não, não tá certo.
 443. Camila: Pera aí, pera aí.
 [pausa: 1 minuto – sequência da exibição do vídeo]
 444. Camila: Na primeira ele não tava fazendo.
 445. Júlia: Na primeira ele não faz força nenhuma. Ele faz uma força primeiro e tipo... ele faz a primeira força depois ele para.
 446. Camila: E agora, olha só, agora ela tava indo mais pra baixo.
 447. Camila: Na outra, como é que ele fez então?
 448. Júlia: Na outra fez com a mão parada, tipo... ele fez uma força primeiro e depois deixou a mão parada.
 449. Camila: E as duas podem estar certas então? Na um, se ele deixar a bola bater na mão...
 450. Júlia: Não, ele deixa a mão parada.
 451. Camila: Mas como é que ele vai... Cara, quando ele joga a bola, ela vai cada vez mais rápido, como se tivesse acelerando.
 452. Renata: Como que ele tava?
 453. Camila: Ele tava, tipo assim... a bola ia batendo e ele ficava assim.

454. Júlia: Ele não tava fazendo tipo força.
 455. Camila: É...
 456. Tiago: Olha, a força que a bola desce é a soma da força da mão dele...
 457. Camila: Com o peso. [interrompendo]
 458. Tiago: É, com a gravidade, no caso. Peso.
 459. Júlia: Então, mas e a segunda?
 460. Tiago: Isso. E a subida seria a...
 461. Júlia: A reação... normal. [interrompendo]
 462. Tiago: A reação normal, elástica, mas tipo assim, na verdade ela é elástica se não ela estaria ali no chão. Quando transformou a elástica ela sobe.
 463. Camila: Mas quando eu falei...
 464. Tiago: Não, não. O que acontece? Olha só [ruído de algo que colide com a mesa] Por que isso não volta? Porque não tem propriedade elástica.
 465. Júlia: Por que se não tivesse força, ela tende a ficar no mesmo ponto.
 466. Camila: É porque você está jogando ela mais forte.
 467. Tiago: É...

A expectativa com relação a esta cena é a de iniciar uma discussão acerca da degradação da energia que se completa na cena seguinte. Os alunos tentam proceder a identificação do sentido natural do tempo levantando hipóteses com relação à interação da bola com a mão no jogador. Júlia aponta aos colegas que, na versão 1 (invertida), o jogador deixa a mão parada para receber o impacto da bola que retorna, ou seja, que a interação da bola com a mão parece mais intensa na subida que na descida, o que deve indicar que este não é o sentido correto (turnos 445, 448 e 450). Camila, no turno 451, apresenta uma modalidade positiva indicando sua estranheza ao perceber que a bola parece acelerar ao longo do movimento. Essa ideia é próxima do argumento que gostaríamos que os alunos formulassem: a velocidade média da descida deve ser maior que a da subida por causa da dissipação de energia mecânica. Tiago tangencia a questão da degradação da energia nos turnos 462 e 464, embora não cite explicitamente o conceito neste momento. A próxima cena trará a questão à tona de modo mais direto.

Na sexta cena, o homem abandona a bola uma única vez e aguarda até que atinja o repouso no solo. A primeira versão é a do sentido natural do tempo. Abaixo, a discussão estabelecida pelos alunos do grupo.

Cena 6: Bola 2

475. Alex: Olha ele! Olha ele!
 476. Tiago: Esse aí deve estar certo.
 477. Júlia: Ele tacou e a bola não voltou.
 478. Camila: É o Magneto do plástico.
 479. Renata: [risos]
 480. Júlia: Essa aí tá certa! [tom irônico]
 481. Renata: Essa aí é a mais certa de todas, cara! [risos]
 482. Júlia: Professor (1), a outra tava sinistra, mas agora...
 (...)

 494. Júlia: E por que que a um... a dois tá errada?
 495. Camila: Como é que a bola vai subir de novo pra mão dele?
 496. Renata: É...
 497. Júlia: Não, mas tem que explicar porque.

498. Camila: Explica porque.
 499. Professor (1): Qual é a certa?
 500. Júlia: A um.
 501. Professor (1): Por que?
 502. Camila: Porque é impossível você colocar a bola no chão e ela começar a quicar.
 503. Alex: Porque ele pode ter aquecido as moléculas da bola e a bola ter começado a...
 504. Camila: Não, não, a gravidade não deixa.
 505. Professor (1): Pensando nesse problema, se você aquecesse a bola, se o chão estivesse quente por exemplo, ela faria isso?
 506. Alex: Eu sei. Faria. Igual pipoca.
 507. Camila: A bola? Não, a bola podia derreter, podia furar a bola.
 508. Alex: Eu tô brincando.
 509. Camila: Ia furar a bola, pô, se tivesse quente o chão.
 510. Professor (1): Se você aquecesse a bola, você veria ela saltar do chão?
 511. Camila: Depende da bola.
 512. Tiago: Depende do material.
 513. Camila: É, depende do material. Eu acho que ela ia estourar.
 514. Professor (1): Que material faria isso?
 515. Camila: Calor... que nem quando você pega uma bola de festa e põe perto do... do... fogo. Estoura.
 516. Renata: Numa temperatura muito alta também pega fogo.
 517. Tiago: O material...
 518. Camila: Mesmo aquela bola do Toy Story...
 519. Alex: Tá difícil demais! É impossível! [interrompendo]
 520. Camila: Não, não! [junto com Renata]
 521. Renata: Não, não! [junto com Camila]
 522. Camila: Olha só, quando você solta a bola no chão e ela quica e para isso é normal porque ela tá perdendo... como é que chama?
 523. Renata: Energia. [junto com Júlia]
 524. Júlia: Energia. [Junto com Renata]
 525. Camila: Energia.
 526. Tiago: A gente não tá considerando metafísica aqui.
 527. Camila: Não, mas é sério isso, ela tá perdendo energia potencial.
 528. Júlia: E na primeira, como que quicando ela volta pra tua mão?
 529. Camila: É.
 530. Professor (1): Então, na vida real, você está acostumado a ver a bola perder a energia potencial, mas não tem uma maneira dessa energia ser repostada?
 531. Alex: É que na segunda ela tá no repouso, ela não tem movimento.
 532. Camila: Colocar um motor dentro da bola.

Nesta cena, a degradação da energia é mais evidente que na cena anterior pois se expressa no fato de que as alturas máximas atingidas em cada volta são decrescentes, como apontado por Camila inicialmente no turno 502. Alex mostra uma rápida compreensão da ideia da dissipação de energia ao sugerir, em tom de brincadeira, na discussão com o professor (1) entre os turnos 503 e 508, que a energia mecânica transformada em calor poderia ser repostada aquecendo a bola. Ele próprio e os demais colegas estabelecem que isto não seria possível (turnos de 508 a 516), o que afinal marca a irreversibilidade do fenômeno. O argumento da degradação da energia pode ser composto de forma mais estruturada com os turnos de 522 a 532: “(D) (Dado que) quando você solta a bola no chão e ela quica e para (W) (já que) ela tá perdendo energia potencial (C) isso é normal (R) (a menos que se possa) colocar um motor dentro da bola.”

Nas duas últimas cenas do vídeo, 7 e 8, é mostrado o movimento oscilatório de um pêndulo. Na cena 7, o pêndulo é um peso de chumbo e a oscilação é interrompida após alguns segundos. A primeira versão está invertida. É desejado o surgimento de dúvidas da identificação da versão natural.

Cena 7: Pêndulo 1

548. Camila: Esse é o mesmo?
 549. Júlia: Essa parada vai ser tipo... vai voltar... [pausa: 10 segundos]
 550. Júlia: Pode ser se você soprar.
 551. Camila: É.
 552. Júlia: Acho que as duas são válidas.
 553. Camila: É.
 554. Júlia: Acho que dá, as duas dá.
 555. Renata: Não.
 556. Júlia: Professor, passa tudo de novo!
 557. Renata: Tudo de novo!
 558. Camila: Bota de novo.
 559. Júlia: Passa o primeiro.
 560. Camila: Ah, pera aí, fiquei confusa.
 561. Tiago: Isso tem a ver com a resistência do ar.
 562. Camila: Ah, é verdade, ele não ia ficar...
 563. Tiago: Ele não ia ganhar velocidade tendo a resistência do ar.
 564. Camila: A não ser que ele...
 565. Júlia: Professor, passa de novo aí. Professor (1), vai passar de novo?
 566. Camila: Não, acho que tem a ver com a resistência do ar também.

O resultado esperado da exibição da sétima cena é exatamente o que ocorreu com este grupo: uma dúvida criada por uma falsa impressão de reversibilidade devida à observação de um movimento no qual a parcela da energia mecânica dissipada é relativamente pequena. Como mostram Tiago (turno 561) e Camila (turno 566), era esperado pelos alunos que o sentido natural fosse identificável a partir da dissipação da energia na interação do pêndulo com o ar, provavelmente inspirados pelas conclusões obtidas a partir das cenas com a bola. Como não foi possível identificar à primeira vista, os alunos pedem a repetição do vídeo. O professor opta então por exibir a cena seguinte, cujo objetivo principal é justamente esclarecer o que ocorreu nesta.

Na cena 8, o pêndulo de chumbo é substituído por uma bolinha de papel. O movimento não é interrompido, de modo que se encerra com o pêndulo em repouso no ponto mais baixo. A primeira versão é a do sentido natural da passagem do tempo. A seguir a discussão entre os alunos.

Cena 8: Pêndulo 2

581. Tiago: É de papel. Vai parar, vai parar olha lá.
 582. Alex: Mas quem garante que o Professor (1) não tá mexendo? Quem garante que o Professor (1) não tava mexendo?
 583. Aluno de outro grupo: Pela sombra ali, a sombra.
 584. Alex: Valeu...

- (...)
588. Alex: Olha só, gente, tá mexendo.
589. Aluna de outro grupo: [risos]
590. Aluno de outro grupo: Mas realmente ele poderia ter mexido lá.
591. Tiago: Ele tá balançando ali em cima, ele tá balançando.
592. Renata: A cara dele é o melhor.
593. Alex: A música dele...
594. Camila: É muito boa.
595. Alex: Olha só, o Professor (1) assoprou...
596. Tiago: Não, olha só... [interrompendo]
597. Tiago: Ou ele tá mexendo ali em cima.
598. Júlia: Mas por que essa tá errada?
599. Camila: Por que tá errada? Porque ela não vai ganhar movimento do nada.
600. Alex: Isso.
601. Júlia: Mas ele falou que não tava mexendo.
602. Tiago: Se não tiver interação de um ventilador, alguma coisa...
603. Júlia: Professor, no último tava balançando?
604. Tiago: Tinha alguma coisa externa?
605. Professor (1): Não sei.
606. Tiago: Ele não pode se movimentar do nada. O mais certo seria aquela tendência da resistência do ar.
607. Camila: Tá... mas... na oito. A primeira tá certa porque... ele que imprimiu a força na bola.
- (...)
611. Camila: Então a primeira tá certa porque ele empurra o pêndulo. A primeira tá certa porque ele... ele joga.
612. Alex: [bocejando] Pode ser.
613. Júlia: Eu acho que aqui, a dois tá errada porque ela vai com uma força bem menor que ela volta, tipo... ela vai fraca e volta super forte.
614. Camila: É.
615. Júlia: A dois, eu não sei. Não sei se ele não tá soprando também.
616. Camila: Soprando?
617. Júlia: É, o que que tem?
- (...)
623. Júlia: Cara, acho que isso tá errado.
624. Camila: Você não ouviu o que ele falou: Não tem resposta errada.
625. Júlia: Bota o que não acontece no um então. Porque no segundo ele vai com uma força, volta e... sabe quando ele volta mais rápido do que ele foi? Não pode isso. Ele tem que, tipo... ir rápido, voltar rápido, ir rápido, voltar rápido... até parar. Mas ele não tem como ir, tipo, com uma velocidade e voltar rápido. Só se ele tiver fazendo alguma coisa desse lado.

Percebe-se neste trecho que, após as discussões das cenas anteriores, especialmente as duas últimas, a relação entre irreversibilidade e degradação da energia está estabelecida, ainda que o termo energia não apareça explicitamente desta vez. Todos os alunos concordam que a segunda versão do vídeo (invertida) só seria possível com alguma ação externa que compensasse os efeitos da resistência do ar. O argumento poderia ser estruturado, a partir das falas dos alunos, da seguinte forma (turnos 606, 613 e 625): “(D) (Dado que) No segundo (...) ele volta mais rápido do que ele foi (W) (já que) ele não pode se movimentar do nada (B) (por conta da) tendência da resistência do ar (C) (então) a dois tá errada (R) (a menos que tenha) alguma coisa externa.”

Pergunta final

633. Tiago: Aí, essa última pergunta é muito filosófica.
634. Camila: Última? Ah, é.

635. Renata: Qual é a pergunta?
636. Camila: [lendo] Você consegue estabelecer uma relação entre os vídeos que assistimos e o texto sobre a construção do moto-contínuo na ilha de Canárias?
637. Tiago: Nada na natureza volta a ser como era antigamente. Sei lá, é uma parada sinistra, tudo o que tem tende a perder energia. Só que a natureza é um sistema, então você perde energia pra ceder pra alguém e então você vai cedendo, cedendo, cedendo...
638. Camila: Ai, que lindo, escreve isso.

Ao responder a pergunta final que encerra a segunda atividade e retoma a primeira, Tiago (turno 637) resume exatamente a observação que gostaríamos que os alunos fizessem: “Nada na natureza volta a ser como era antigamente”. Estabelece ainda a relação entre a irreversibilidade dos fenômenos naturais e a degradação da energia e mostra, ao responder a pergunta, que compreende que estas questões estão relacionadas com a inviabilidade do moto-perpétuo.

6.4 Atividade 3: Entropia

Na terceira atividade, cuja proposta encontra-se detalhadamente descrita na seção 5.4, cada grupo de alunos recebe um kit experimental com caixa e bolinhas de gude e, cada aluno, material impresso com algumas perguntas a serem respondidas (vide Anexo 1). Não há, no material, qualquer instrução sobre procedimentos experimentais a serem adotados. Não há também qualquer indicação sobre que respostas são esperadas ou seriam consideradas corretas. Há apenas perguntas abertas, de modo que, numa perspectiva de laboratório aberto de nível 2 (TAMIR apud: BORGES, 2002, reproduzido no quadro 3.4 da seção 3.3), procedimentos e conclusões estão a cargo dos estudantes.

O objetivo principal da atividade é a construção de um modelo microscópico rudimentar da matéria e a percepção de que, neste modelo, o problema da irreversibilidade deve ter caráter probabilístico. Espera-se que os alunos percebam a relação entre a assimetria do tempo e a existência de estados mais e menos prováveis de um sistema de partículas. Em particular, espera-se que possam concluir que o fato de que os dois estados possíveis de um único constituinte do sistema em questão são equiprováveis leva à expectativa de uma distribuição final igualitária, ainda que possam ocorrer flutuações.

Não é esperado que os conceitos de macroestado, microestado, multiplicidade e entropia surjam espontaneamente de modo formal e completo das discussões entre os alunos. Entende-se que é necessário um momento posterior de fechamento no qual o professor apresenta e formaliza esses conceitos a partir dos resultados da atividade. Na aplicação, a atividade e o fechamento foram feitos em dois tempos consecutivos de aula, sendo os

primeiros 60 min de atividade e discussões e os últimos 30 min de formalização e fechamento.

Em se tratando de uma atividade de laboratório aberto, é importante que a dinâmica de manipulação e discussão inclua o levantamento, teste e confronto de hipóteses divergentes e que esse possa levar à consolidação de uma dessas hipóteses como fato acordado. O episódio a ser analisado adiante foi escolhido justamente porque algumas particularidades dos resultados do experimento, de caráter inteiramente aleatório, renderam o levantamento de algumas hipóteses inesperadas e algumas discussões bastante interessantes em função delas.

O grupo, cujas discussões serão analisadas, é composto por quatro alunos, aqui referidos pelos nomes fictícios: Lúcio, Gustavo, Rafael e Hélio. Vale apontar que a transcrição do áudio foi tarefa particularmente difícil. O ruído produzido pelos choques entre as 40 bolinhas de gude no interior de cada uma das cinco caixas utilizadas é bastante intenso. Este fato foi notado no momento da aplicação, mas não representou, naquele momento, um incômodo significativo que forçasse o professor a repensar a prática. No entanto, como gravador e caixa ficaram próximos um do outro nas mesas da maioria dos grupos, o volume do ruído captado na gravação é maior que o da voz dos estudantes do grupo nos momentos em que falas ocorrem simultaneamente com a agitação da caixa. Na maioria das vezes, isto não tornou a transcrição impossível, mas impôs o uso de filtros de áudio e aumentou significativamente o tempo de trabalho para a audição de todo o material gravado e transcrição do episódio apresentado a seguir.

Assim que receberam e começaram a manipular o kit, os alunos buscaram estabelecer um procedimento a ser seguido na prática experimental de modo a obter as respostas pedidas no material impresso, como mostra o primeiro trecho abaixo.

Trecho 1:

1. Gustavo: Ê... bolinha de gude!
2. Professor: Vai contando aí: 40.
3. Gustavo: 40?
4. Professor: É, 40.
- (...)
17. Hélio: Tá do mesmo lado a bolinha, do mesmo lado.
18. Lúcio: Vai ser tudo repetido.
19. Rafael: Que vai ser tudo repetido o que? Pode ter mudança.
20. Gustavo: Como é que é pra agitar essas bolinhas?
21. Rafael: Agita esse negócio! Pra um lado e pro outro, moleque!

[ruído forte das bolinhas: 30”]

22. Lúcio: Ah, aqui tá do mesmo lado. Mas podia ter passado.

[ruído forte das bolinhas: 20”]

23. Hélio: É, mas podia ter passado pro lado de lá, né não? Nem sempre vai ficar de um lado só. Tem que botar tem que botar.
24. Lúcio: Você vai ter que analisar em qual lado você poderia encontrar a bolinha sozinha.
25. Rafael: Aqui, ó! Ó! Tá do outro lado. Tá certo?
26. Gustavo: Ah!
27. Rafael: Ah! Agora passou pra lá!
28. Rafael: Não tem algum tempo não? Pra ver quantas bolinhas passaram.
29. Hélio: É, tem que ter um tempo...

[ruído forte das bolinhas: 30”]

30. Lúcio: O que que a gente vai fazer?
31. Professor: O que vocês vão fazer? Não sei. Isso é com vocês.

[ruído forte das bolinhas: 1’]

32. Rafael: Ah, não! Para aí, para aí.
33. Lúcio: Já parei.
34. Gustavo: Passa pro outro lado.
35. Rafael: Marca um dez, marca aí.
36. Lúcio: Tipo, bora imaginar... Por que não pega uma folha e gruda numa bolinha dessa aí, porque tem que observar, imaginar, tipo, uma bolinha dessa aí... você espera que depois da agitação, depois de um certo tempo, essa bolinha vai estar aqui ou ali, tá ligado? Aí depois a gente vê porque. Tipo, a bolinha vai estar do mesmo lado depois de agitar? Por que? Porque ela tá... tá mais próxima do lugar...
37. Gustavo: É que, tipo assim, não é uma bolinha em particular. Não é escolher uma bolinha não. É, tipo assim, é uma bolinha que vai passar pro outro lado. Quanto tempo você acha que ela deve ficar num lado em particular sozinha.
38. Lúcio: Mas marca quanto tempo? Marca um minuto? Dois minutos?
39. Hélio: O tempo pra...
40. Gustavo: [interrompendo] Ah, chuta qualquer coisa.
41. Lúcio: [lendo] Como você esperaria encontrar a distribuição de bolinhas entre os dois lados da caixa após algum tempo? Espera que tenha mais nesse ou tenha mais nesse?
42. Gustavo: Marca 30 segundos aí.

[ruído forte das bolinhas: 30”]

43. Gustavo: Professor, a gente vai marcar 30 segundos aqui e fazer duas vezes. Pra ver se vai.
44. Professor: Anota aí. Anota tudo o que você fizer.
45. Lúcio: Pode anotar nessa folha mesmo?
46. Professor: Pode. Pode sim.
47. Gustavo: Não tem quarenta bolinhas aí.
48. Rafael: Tem sim, cara.

Neste trecho observamos o início da manipulação do material que rende a formulação de algumas hipóteses rudimentares que fazem emergir espontaneamente a necessidade de estabelecer algum procedimento experimental rígido a ser seguido. A primeira pergunta (1a) colocada no material impresso (vide Anexo 1) faz referência a uma única bolinha entre as 40, com o objetivo de evidenciar o caráter equiprovável dos microestados. Entre os turnos 17 e 27, os alunos procuram responder a essa questão e já observam que uma bolinha em particular aparece de um determinado lado, mas nada permite garantir que não poderia ter passado para o outro, o que mostra que a resposta vai requerer mais observações (turnos 22 e 23) e algum tipo de método mais preciso, que poderia ser o proposto por Lúcio no turno 36: colar um

pedaço de papel em alguma bolinha para acompanhá-la. Curiosamente, esta primeira questão será em breve abandonada pelo grupo, que se focará na resposta à 1b (“Como você esperaria encontrar a distribuição do número de bolinhas entre os dois lados da caixa após algum tempo? Por que?” - vide anexo 1), que objetiva caracterizar o macroestado mais provável (turno 41) e, de fato, representa o objetivo principal da atividade. A primeira questão será retomada apenas no turno 272 (trecho 7), estimulada por uma pergunta do professor.

O ponto mais importante no trecho 1, no entanto, é a emergência espontânea da necessidade de indexar a evolução do sistema. No pré-teste do experimento, feito pelo autor do presente trabalho e apresentado na seção 5.4, a indexação foi feita com a variável “número de agitações”. Uma variável arbitrária, uma vez que pessoas diferentes agitariam a caixa de maneiras diferentes. Pareceu mais razoável a este grupo elencar a variável tempo como forma de acompanhar o sistema (turnos 28, 29, 38, 39, 40, 42 e 43). Vale citar que esta foi a escolha da maioria dos grupos que realizaram a atividade e também que a variável é igualmente arbitrária, já que o número de agitações por unidade de tempo depende de quem manipula a caixa. A escolha do incremento (30 segundos), por outro lado, cria uma situação interessante cujas consequências ficarão mais claras ao longo dos trechos 3, 4, 5 e 6: da forma, bastante vigorosa, como estes alunos agitavam a caixa, 30 segundos é tempo mais que suficiente para que o sistema atinja seu estado mais provável: a divisão meio a meio.

Ao longo do próximo trecho, o grupo tenta formular explicitamente alguma hipótese prévia sobre o resultado final a ser encontrado com relação à segunda pergunta (1b).

Trecho 2:

51. Rafael: Opinião do grupo, cara...
52. Lúcio: Vai lá, vai lá... Você acha que vai ter mais bolinha aqui ou mais bolinha ali?
53. Hélio: Ahm?
54. Lúcio: Você acha que vai ter mais bolinha do lado que começou ou do... do outro que começou sem nada ou do que tem tudo?
55. Rafael: Cara, eu acho que...
56. Gustavo: [interrompendo] Vai vai vai vai...
57. Hélio: Eu não sei dar essa certeza antes de fazer. Acho que tem que fazer primeiro pra ver como é que vai se comportar.
58. Lúcio: Mas acho que tem que dar uma opinião antes.
59. Gustavo: De qual lado você esperaria. Antes de fazer o teste.
60. Lúcio: Na minha opinião, fazendo esse negócio toda hora... fazendo esse bagulho aí toda hora eu acho que ia ficar meio que intercalado entre os dois lados.
61. Gustavo: Mas meio, cara? Não é possível que tenha 20 e o outro tenha 20, um pode ter 21 e o outro...
62. Lúcio: Não, mas conforme vai balançando, vai intercalar. Ué, bora botar.
63. Gustavo: Aí a gente faz três testes.
64. Lúcio: É, faz três pra ter certeza.
65. Rafael: Pera aí. Faz o teste com três. Se der a primeira, der a segunda e der a terceira então é isso mesmo.
66. Rafael: Cadê o João nessas horas?
67. Gustavo: Para de ser criança, moleque. Dá isso aqui. Dá aqui, rapidão (sic), cara.

68. Lúcio: Pera aí, cara. Pera aí, cara.
 69. Gustavo: Praticamente o mesmo número que tinha aqui tinha ali.
 70. Lúcio: Então, [lendo] Nós achamos que antes de agitar a caixa nós vamos encontrar praticamente o mesmo número de bolinhas dos dois lados.
 (...)

 80. Lúcio: Aqui. Esse lado aqui vai diminuindo.
 81. Rafael: É, cara, mas tem que ver o tempo direito.
 82. Gustavo: Marca aí os 30 segundos.
 83. Lúcio: Então, cara, tá marcando.

Neste segundo trecho, vemos que o grupo sente a necessidade de registrar por escrito uma hipótese com relação à segunda pergunta (1b) antes da realização da experiência. Embora a explicitação de uma hipótese prévia por escrito não tenha sido pedida diretamente na pergunta, é possível que a forma como foi formulada, com o uso do verbo “esperar” no futuro do pretérito (“Como você esperaria encontrar a distribuição do número de bolinhas entre os dois lados da caixa após algum tempo? Por que?” – vide anexo 1) tenha induzido os alunos a reconhecer esta necessidade, como se pode notar no diálogo entre os turnos 51 e 59. É desejável o surgimento desta explicitação, de modo que o experimento realizado mais cuidadosamente em seguida se configura verdadeiramente como um teste de hipóteses. A hipótese colocada pelo grupo então é a da divisão igualitária (turnos 60 e 61). Neste momento, a hipótese é única, mas outras surgirão ao longo da prática, como se verá nos trechos 3, 5 e 6. É interessante notar que a percepção de que deve haver flutuações em torno do estado igualitário, apresentada por Gustavo no turno 61, reforça a ideia de que o experimento deve ser repetido mais de uma vez para que o resultado seja confiável (turnos 63 a 65). Por fim, o grupo conclui que não há mais o que afirmar sem um acompanhamento indexado cuidadosamente pelo tempo (turnos de 80 a 83), que se inicia no próximo trecho.

Trecho 3:

98. Hélio: Vai.
 99. Gustavo: Faltam 5 segundos. Um, dois, três e... vai.

[ruído forte das bolinhas: 30”]

100. Gustavo: Um, dois, três e... para.

[fim do ruído. Pode-se ouvir os alunos contando]

101. Gustavo: Quatorze aqui, então ali tem... vinte e seis.
 102. Lúcio: Do lado que não tinha nenhuma tem mais. Esse lado que não tinha nenhuma...
 103. Rafael: [interrompendo] Esse lado que tinha.
 104. Hélio: Não, esse lado que tinha. O lado que tinha mais era esse.
 105. Rafael: Então 26 na primeira vez.
 106. Gustavo: No primeiro teste.
 107. Gustavo: Então, o lado que tinha as 40 bolinhas é o lado que ficou com 26. O lado vazio ficou com o resto.

[ruído de bolinhas caindo sobre a caixa]

108. Gustavo: Professor, tipo, a gente fez a primeira tentativa e deu 14 e 26, mas se a gente tentar de novo pode ser que fique diferente.
109. Professor: Então tenta mais de uma vez.
110. Lúcio: Com 30 segundos certinho.
111. Professor: E se você simplesmente continuasse?
112. Lúcio: Eu fiz isso daquela vez... ficou...
113. Gustavo: [interrompendo] É que o nosso tempo de teste é 30 segundos.
114. Professor: Então por que não testes sucessivos?
115. Lúcio: Ficou pouca bolinha aqui, ficou um mínimo de bolinhas, ficou uma bolinha só aqui.
116. Professor: Testa e vê o que acontece, ué?
117. Hélio: Faz o teste sucessivo.
118. Gustavo: Ah, tá.
119. Lúcio: Ficou uma bolinha aqui.
120. Hélio: Então, volta elas lá.
121. Lúcio: Bota 26 de um lado e 27 do outro.
122. Rafael: Vinte e seis na direita e 14 na esquerda.
123. Hélio: Já entendi. Entendi tudo já. De um lado vai aumentando e do outro vai diminuindo até ficar zero.
124. Lúcio: Você acha que vai ficar zero em um?
125. Hélio: Não, zero não, mas mais ou menos.
126. Lúcio: Imagina cara, no mesmo lado fica vazio depois de 25 minutos...
127. Gustavo: Vai. Tem certeza?
128. Lúcio: Tenho.
129. Gustavo: Pera aí. Deixa sem ficar inclinado.

O resultado do primeiro teste é 14/26, sendo o estado inicial 0/40. Gustavo percebe rapidamente que não há garantia de generalidade (turno 108), ou seja, não há como afirmar que o resultado seja sempre o mesmo.

A partir desse resultado, surge a segunda hipótese, levantada explicitamente por Hélio no turno 123. Ora “(D) (Dado que) o lado que tinha as 40 bolinhas é o lado que ficou com 26, (então) (C) de um lado vai aumentando e do outro vai diminuindo até ficar zero” (turnos 107 e 123). É claro que o argumento não se sustenta sobre qualquer tipo de garantia previamente acordada. Para avaliar este tipo de colocação, vale lembrar que, da perspectiva assumida, que emana da primeira regra de Latour (seção 3.5), o que se observa é uma atividade investigativa em tempo real, o que se analisa é aprendizagem em curso e, portanto, não se pode julgar como quem avalia um produto acabado.

Com relação à notável ausência de garantias na estrutura do argumento em questão, como discutido anteriormente na seção 3.4, é necessário ter em mente a diferença entre argumentos que usam garantias e argumentos que estabelecem garantias. A atividade não exige que os estudantes utilizem conhecimentos previamente adquiridos de modo a prever resultados particulares, ou seja, não pede que façam inferências, ao contrário, parte de um passo indutivo, no sentido de que se deseja que alguma aprendizagem possa decorrer do teste de hipóteses divergentes acerca de um contexto inteiramente novo. Sendo assim, a ausência, neste momento, de garantias, é natural e necessária. O que se espera enfim é que uma decisão

entre as hipóteses formuladas, tomada pelo grupo em algum momento posterior (trecho 7), possa vir a servir de base para uma garantia inteiramente nova. Vale lembrar também que é prevista a ação direta do professor ao final no sentido do fechamento da atividade e da formalização de conceitos.

Seguem-se então o segundo e o terceiro testes do experimento no próximo trecho.

Trecho 4:

130. Lúcio: Um, dois, três e... vai.

[ruído forte das bolinhas: 30"]

131. Lúcio: Um, dois, três e... parou.

132. Rafael: Quantas aqui?

133. Gustavo: Vinte e um.

134. Lúcio: Vinte e um de um lado e 19 do outro.

135. Hélio: Do lado esquerdo.

136. Lúcio: Do lado esquerdo aumentou.

137. Rafael: Cara, não é possível!

138. Lúcio: Não é possível o que, cara? Isso é Física.

139. Hélio: Do lado que tinha...

140. Gustavo: [interrompendo] Do lado que começou sem nada agora ficou maior.

141. Lúcio: Calma, calma.

142. Hélio: Foi o que eu disse, vai aumentando o lado de lá.

143. Gustavo: Mas fica mais ou menos o mesmo.

144. Rafael: Ou não, cara. Ou não.

145. Gustavo: Teria que aumentar no lado direito o número de bolinhas e diminuir o esquerdo. Aí teria que tentar mais uma vez.

146. Hélio: Não, do lado direito diminui e do lado esquerdo só aumenta.

147. Lúcio: São 30 segundos?

148. Rafael: Vou marcar aqui no celular.

[conversas paralelas até o turno 174]

[ruído forte das bolinhas: 30"]

174. Hélio: Para aí, para aí, Gustavo.

175. Rafael: Tá fazendo a parada sozinho?

176. Gustavo: Tô, vocês tão me enrolando.

177. Gustavo: [contando]

178. Gustavo: Agora tem 18. Tem 18 aqui e o outro... 22.

179. Hélio: Vinte e dois.

180. Lúcio: Pô! Só diminuiu uma agora!

(...)

184. Hélio: O que que tá acontecendo? Um tá voltando?

185. Lúcio: Tá passando tudo pro outro.

186. Hélio: Vamo (sic) lá.

187. Lúcio: Pera aí, vou botar aqui. Após 30 segundos... mais 30 segundos...

188. Hélio: Deixa que eu faço esse teste.

189. Rafael: Deixa o Hélio fazer agora.

A hipótese alternativa proposta por Hélio no turno 123 (trecho 3), de que todas as bolinhas gradativamente passarão para o lado esquerdo, foi inicialmente mal recebida pelo grupo, como se poderia comprovar na fala irônica de Lúcio (turno 126 no mesmo trecho). O resultado do segundo teste e, em seguida, do terceiro, relatados neste quarto trecho, parecem

emprestar agora credibilidade a essa previsão. A sequência de estados 0/40, 14/26 e 21/19 parece indicar a Hélio uma comprovação de sua hipótese (turno 142) e traz como possível aliado Rafael, como mostra o turno 144. Gustavo, no entanto, sustenta que este resultado não é fundamentalmente diferente do anterior, uma vez que é razoável esperar flutuações em torno do estado igualitário, previsão indicada por ele próprio anteriormente no turno 61 (trecho 2).

Temos então duas hipóteses claramente formuladas e que partem da mesma observação: a sequência de resultados obtida até o momento.

- Hipótese 1: “(D) Do lado esquerdo aumentou” (turno 136), mas “(C) fica mais ou menos o mesmo” (turno 143).
- Hipótese 2: “(D) Do lado esquerdo aumentou” (turno 136) porque “(C) do lado direito diminui e do lado esquerdo só aumenta” (turno 146).

Gustavo então conclui que seria necessário repetir a experiência para verificar qual hipótese é a correta, mas faz uma previsão equivocada: a de que o número de bolinhas do lado direito deveria necessariamente aumentar (turno 145). O número de fato diminui no teste seguinte (22/18 – turno 178) o que parece reforçar a hipótese 2 trazendo Lúcio como aliado (turno 185) e, portanto, isolando temporariamente Gustavo.

O grupo então realiza o quarto teste, cujos desdobramentos são apresentados no trecho 5 abaixo.

Trecho 5:

204. Hélio: Vamo lá. Pode ir?
 205. Rafael: Vai, vai, vai!
 206. Gustavo: Não, para, calma aí.
 207. Rafael: Vai, cara, pode ir, tá no celular aqui. Pode ir, moleque.
 208. Gustavo: Calma, é sábado... vai.

[ruído forte das bolinhas: 30”]

209. Gustavo: Vê quantas tem.
 210. Hélio: Cinco, dez, dezoito... vinte.
 211. Gustavo: Vinte, vinte?!
 212. Rafael: Vinte, vinte, velho.
 213. Hélio: Agora igualou. Agora não entendi nada.
 214. Lúcio: Bora botar que... que quando chega em dois minutos iguala.
 215. Hélio: Igual, mas será que elas não voltam? Será que... não entendi isso não.
 216. Gustavo: Tem que fazer mais uma.
 217. Rafael: Tem que responder as perguntas.
 218. Lúcio: Não, cara, a gente tá fazendo os experimentos, senão é impossível. Senão não é uma verdade absoluta, é só uma opinião.
 219. Gustavo: [lendo a pergunta 2] Você consegue encontrar uma relação...
 220. Lúcio: [interrompendo] Cara, a gente acertou, cara, porque a gente falou que ia ficar mais ou menos igual. Ficou totalmente diferente depois mais ou menos igual, mais ou menos igual e depois igualou.
 221. Hélio: O que eu ia falar é será que vai ficar totalmente igual direto? Será que não vai...

222. Lúcio: É, pode ser...
 223. Rafael: Não, se aumentar... tem que aumentar pelo menor um pouco, tá ligado?
 224. Gustavo: Tá, agora mais 30.
 225. Rafael: Os últimos 30.
 226. Hélio: É, os últimos 30 agora.
 227. Rafael: Por favor.

O resultado do quarto teste do experimento não apenas não resolve a dúvida entre as duas hipóteses anteriormente formuladas como cria uma terceira: a de que o estado do sistema deve estacionar uma vez que atinja a distribuição igualitária (turno 214). Hélio protege sua hipótese inicial (2) conjecturando que o número de bolinhas de cada lado poderia mesmo flutuar, embora mostre também alguma relutância (turnos 215 e 221).

- Hipótese 3: “(D) Agora igualou” (turno 213) então “(C) quando chega em dois minutos iguala” (turno 214).

Como qualquer das hipóteses não passa, em última análise, de conjectura, nenhum dos quatro integrantes do grupo faz afirmações inequívocas e todos reconhecem a necessidade de mais testes, cujos resultados serão discutidos no trecho 6 adiante.

Trecho 6:

228. Lúcio: Um, dois, um, dois...
 229. Gustavo: Vai!

[ruído forte das bolinhas: 30 segundos]

230. Gustavo: Um, dois, três e... para.
 231. Rafael: [contando] Quatorze!
 232. Lúcio: Não... agora... ficou... foi inverso. Agora aqui tem o que? Quatorze?
 233. Gustavo: Voltou, voltou a... a primeira situação.
 234. Rafael: Faz mais um teste e vê se volta a de baixo.
 235. Lúcio: Vai que volta aqui?
 236. Hélio: Pode ser... sei lá.
 237. Gustavo: Nada a ver, cara, muito estranho.
 238. Hélio: Muito estranho.
 239. Gustavo: Cara, é melhor a gente omitir essa coisa.
 240. Rafael: Vai passar bolinha pro outro lado.
 241. Gustavo: Tava assim. Tem 14/26.
 242. Lúcio: Vai, vai, vai! Agora deixa. Vai!
 243. Gustavo: Um, dois, três e... vai.

[ruído forte das bolinhas: 30 segundos. Diálogo até o turno 249 ao fundo]

244. Rafael: Você vê alguma relação?
 245. Lúcio: Tem sim, cara.
 246. Gustavo: Olha, você botou 30 segundos aqui. Trinta segundos, um minuto, aí ficou mais ou menos igual, um minuto e meio, dois minutos. Depois de dois minutos ficou igual. Talvez, talvez, depois de dois minutos ele faça isso de novo.
 247. Lúcio: A cada dois minutos ele iguala.
 248. Rafael: [risos] Uma coisa mais certa.
 249. Lúcio: Não, porque ele foi aumentando e igualando.
 250. Gustavo: Agora deu 19... 19/21.

251. Lúcio: Então a gente vai fazer assim, vai falar que depois de dois minutos ele iguala.
 252. Gustavo: Porque talvez... já é a sexta, né?
 253. Rafael: Tava na quarta.
 254. Lúcio: Melhor falar... apagamos a outra... melhor falar que depois de dois minutos igualou.
 255. Gustavo: Professor, Professor!
 256. Lúcio: Aqui, a gente chutou antes de fazer que iria dar uma... quase igual... ficaria um resultado quase igual.
 257. Gustavo: Aí fizemos 30...
 258. Lúcio: Continuamos...
 259. Gustavo: Fizemos mais 30...
 260. Lúcio: Aí, depois de dois minutos ele igualou.
 261. Professor: Tá, mas como é que você responderia as questões então?
 262. Lúcio: Por que você esperaria encontrar mais ou menos igual...

O desconcertante resultado do quinto teste, a reprodução da configuração do estado encontrado após o primeiro, faz emergir mais uma hipótese, formulada coletivamente nos turnos 234, 235, 246 e 247.

- Hipótese 4: “(D) Voltou a primeira situação” (turno 233) então, “talvez, depois de dois minutos ele faça isso de novo” (turno 246).

Embora a quarta hipótese, a de um sistema que apresenta estados de ocorrência periódica, tenha sido construída coletivamente, não soa provável para os alunos, com exceção talvez de Lúcio, como se verifica nos turnos 237, 238 e 248. Gustavo, que defende a hipótese 1 desde o início da atividade, chega mesmo a sugerir a supressão artificial do resultado de modo a evitar a inclusão desta hipótese nas discussões (turno 239). Mas, como percebe Rafael (turno 234), o sexto teste deveria mostrar estado igual ao encontrado após o segundo caso essa hipótese fosse verdadeira, o que não ocorre. Note que o resultado obtido, 19/21, não é igual ao observado no segundo teste, 21/19.

A sequência completa dos resultados obtidos pelo grupo está resumida no quadro 6.3 abaixo:

Teste	inicial	1	2	3	4	5	6
Lado 1	0	14	21	22	20	14	19
Lado 2	40	26	19	18	20	26	21

Quadro 6.3: Resultados do experimento obtidos pelo grupo com turnos sequenciais de agitação da caixa de 30 segundos de duração (quadro nosso).

O resultado enfim força a escolha da hipótese 1, a de que o sistema deve procurar a divisão igualitária com flutuações aleatórias admitidas em torno desta configuração, como a única das quatro que acomoda as observações. Note, entre os turnos 256 e 262, que o resumo apresentado por Lúcio ao professor é a hipótese 1 e não a hipótese 3, o que se evidencia no uso da expressão “mais ou menos igual”.

No próximo trecho, estimulados por perguntas do professor, os estudantes procuram responder a questão 1c (“Você esperaria encontrar todas as bolinhas do mesmo lado da caixa uma segunda vez? Por que?” - vide anexo 1), o que faz surgir pela primeira vez, de modo explícito, o caráter probabilístico do problema. Retomam ainda a questão 1a (“Em qual lado da caixa você esperaria encontrar uma bolinha em particular após algum tempo? Do mesmo lado ou do outro? Por que?” - vide anexo 1), que havia sido deixada de lado no início das discussões, e tentam traçar um procedimento experimental para respondê-la.

Trecho 7:

264. Gustavo: A “c” [lendo] Você esperaria encontrar as bolinhas do mesmo lado...
265. Gustavo: Eu acho que não. Aqui, a “c”, eu acho que não.
266. Gustavo: A “um” teria que responder sem fazer o teste.
267. Professor: Por que não? Pode fazer o teste.
268. Gustavo: Eu acho que não porque aqui, ele vai tirando de um lado, jogando pro outro, até, tipo, meio que... equilibra.
269. Rafael: É, até equilibrar.
270. Professor: Mas nessa situação que você chama de equilíbrio, as bolinhas deixam de passar?
271. Lúcio: Não, é porque, tipo assim, como aqui só passa uma bolinha, só tem espaço pra passar uma bolinha. Então tu passa uma de um lado, aí fica 21 de um lado. Quando chegar aqui, aí tu agita, aí bate uma bolinha daqui, bate uma na outra e tal, vai ficar... nessa coisa de sempre igualando. Porque só tem espaço pra passar uma bolinha.
272. Professor: Tá, esse seria o comportamento do grupo todo, mas e o item “a” aqui, que é uma bolinha só?
273. Hélio: Como assim?
274. Professor: Se você acompanhar uma delas, só uma delas...
275. Gustavo: Falei que era pra acompanhar...
276. Lúcio: É melhor marcar com algum negócio. Pode marcar com algum negócio? Tem uma cola aí?
277. Professor: Claro. Mas a “c” você consegue responder. [lendo] Você esperaria encontrar todas as bolinhas do mesmo lado da caixa uma segunda vez?
278. Rafael: Não.
279. Professor: Por que não?
- (...)
289. Rafael: Porque, tipo, se aqui tem uma bolinha e ali tem 39, tem muito mais chance de passar aqui do que ali. Com uma ali você ficaria agitando e ficaria assim. Essa daqui com 39, uma delas vai acabar passando pra lá.
290. Professor: Então é uma questão de chance?
291. Rafael: É... chance... probabilidade.
292. Gustavo: Tem que fazer o teste com uma bolinha só.
293. Lúcio: Não, acompanhando uma bolinha só.
294. Rafael: É, com 40.
295. Gustavo: É, ah tá.
296. Lúcio: Tem que ver a posição da bolinha.
297. Rafael: Escreve aí o que a gente fez: pintou uma bolinha de liquid paper.

Neste trecho, após a escolha da hipótese 1 como a resposta vencedora para a questão 1b, agora assumida como fato, constrói-se um argumento mais robusto como resposta à questão 1c que utiliza também o conceito de probabilidade explicitamente (turnos 265, 268, 271 e 289): “(D) (Dado que) vai ficar nessa coisa de sempre igualando, (W) (já que) se aqui

tem uma bolinha e ali tem 39, tem muito mais chance de passar aqui do que ali, (então) (C) eu acho que não.”

No trecho a seguir discute-se a questão do movimento da bolinha individual (1a).

Trecho 8:

323. Lúcio: Vocês acham que essa bolinha vai ficar aonde? Vocês acham que vai ficar aonde?
 324. Gustavo: Cara, eu acho o seguinte: eu acho que ela não deve passar. Porque, como são 40 bolinhas, a chance das outras bolinhas passarem para o outro lado é maior.
 325. Rafael: Vou colocar ela lá pra trás.
 326. Lúcio: [lendo] De qual lado você esperaria encontrar a bolinha... de qual lado você espera?
 327. Gustavo: Faz a Matemática, faz a Matemática. Primeiro você tem 40 chances, depois você tem 39...
 328. Lúcio: Análise Combinatória? Tem como usar? Tem como usar?
 329. Hélio: Tem pouca chance no começo, mas fica maior depois.
 330. Gustavo: É, Probabilidade.
 331. Gustavo: Vai, cara, bota aí. Quando eu falar “já”.
 332. Gustavo: Dois, um... vai.

[ruído forte das bolinhas: 30 segundos]

333. Gustavo: Ela tá do mesmo lado a bolinha.
 (...)
 340. Lúcio: Mesma coisa, né? Foi pra um lado, foi pro outro, voltou.
 341. Rafael: Por que?
 342. Gustavo: A tendência das bolinhas...
 343. Rafael: É passar uma de cada vez.
 344. Gustavo: Não, é se igualarem o número cada um de cada lado, o mesmo de cada lado, entendeu? Então, a tendência dela vai ser a mesma estando aqui ou aqui quando tu parar. Porque a tendência vai ser igualar.
 345. Lúcio: Não.
 346. Gustavo: É, pô, porque ela pode ir tanto pra lá quanto pra cá.
 347. Lúcio: Se é igualar, ela pode ou voltar pro mesmo lugar ou ir pro outro.
 348. Gustavo: Então? A tendência dela é qualquer um dos dois lados, certo? É a mesma. É a mesma.
 349. Lúcio: Agora eu entendi tudo. Não é nem de um lado, nem do outro, é a mesma.

(...)

[ruído forte das bolinhas: 30 segundos]

363. Hélio: Olha aí! Agora passou pro outro lado. Foi pro outro lado.
 364. Lúcio: É, mas não existe, como a chance é de dividir, tem a mesma chance de ficar de um lado ou do outro. Não faz diferença isso.
 365. Gustavo: Acho que é 50%.
 366. Lúcio: É, 50%, então.

Neste oitavo trecho, o grupo constrói um argumento interessante como resposta à pergunta 1a, estabelecendo que os estados de uma bolinha individual são equiprováveis utilizando a resposta dada à pergunta 1b como garantia. O interessante é o fato de que este argumento representa precisamente o caminho de raciocínio inverso com relação ao esperado no planejamento da atividade. A partir dos turnos 329, 342, 344 e 348: “(D) (Dado que) tem pouca chance no começo, mas fica maior depois, (W) (já que) a tendência das bolinhas é se igualarem cada um de cada lado (C) (então) a tendência dela é qualquer um dos dois lados”.

No último trecho destacado, o grupo busca uma resposta à pergunta 2, acerca de possíveis relações entre esta atividade e os vídeos da atividade anterior, “Moto-perpétuo”, descrita na seção 5.3 e analisada na seção 6.3 (“Você consegue encontrar relações entre esta experiência e algum ou alguns dos vídeos que assistimos na aula passada?” - vide anexo 1). Neste momento, procura-se amarrar as atividades entre si e verificar se os estudantes percebem que há conceitos e ideias em comum envolvidos. Entendemos que as atividades não são interdependentes, mas são inter-relacionadas e, portanto, vale a pena explorar de algum modo estas relações. Por sua própria natureza inteiramente aberta a pergunta admite uma infinidade de respostas diferentes e, como se verá, a resposta dada por este grupo é inteiramente diferente da prevista pelo professor, mas igualmente digna de atenção e reflexão.

Trecho 9:

373. Gustavo: [lendo] Você consegue encontrar relações entre... se tem uma relação com aqueles vídeos. Eu acho, tipo assim, com as bolinhas, a tendência é igualar. Ali nos vídeos é equilibrar e parar. Entendeu? Aqui é equilibrar quando iguala o número de bolinhas dos dois lados. Lá é quando a bola para de quicar e a outra do barbante para.
- (...)
378. Lúcio: Ah, “tendência”.
379. Gustavo: Naquele a tendência é as forças que atuam, as forças contrárias, se equilibrarem até parar. Nesse, a tendência é você ter um número de bolinhas de um lado, mas balançando balançando, a tendência é igualar, entendeu?
380. Lúcio: E lá a tendência é o repouso.
381. Rafael: Até o objeto parar?
382. Gustavo: Até o objeto parar.
383. Lúcio: No caso da caixa...
384. Rafael: A tendência é igualar dos dois lados.
385. Gustavo: É. Igualar, igualar não, porque pode passar um pouco pra lá e pra cá, mas fica quase igual.

No planejamento da atividade, esperava-se que os alunos estabelecessem relações entre o experimento e os vídeos do café solúvel e do spray, que mostram fenômenos de difusão. O resultado foi inesperado mas também interessante e, em última análise, satisfatório, afinal, o que se deseja primordialmente com todas as quatro atividades é o reconhecimento e o estudo da irreversibilidade nos processos naturais. A relação encontrada pelos alunos é justamente uma analogia entre o caráter irreversível da evolução dos estados da caixa, evidenciado pela pergunta 1c, e o caráter irreversível de um sistema mecânico, que se explica pela degradação da energia.

Para finalizar o exame desta atividade, é importante lembrar que seu fechamento requer um momento de sistematização formal comandado pelo professor, com os alunos não mais dispostos em grupos. Na prática, o professor seguiu a sequência de passos abaixo para proceder a um momento da aula de caráter mais expositivo.

1. Pedido para que os alunos expusessem 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. Projeção na lousa da tabela 4.1, que contém as multiplicidades de todos os macroestados do sistema de 40 bolinhas.
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.

6.5 Atividade 4: Máquinas térmicas

Nesta atividade, cuja proposta encontra-se detalhadamente descrita na seção 5.5, o principal objetivo é fazer surgir a percepção de que há um limite de rendimento imposto às máquinas térmicas mais profundo que dificuldades de técnica ou engenharia. É a discussão de que a degradação da energia é inerente ao próprio princípio de funcionamento de uma máquina deste tipo e que, portanto, constitui-se num problema não superável por avanços tecnológicos, ao menos no que tange à Física conhecida até o presente momento. Vale notar que o resultado da primeira atividade, centrada na discussão do moto-perpétuo hidráulico (Moto-perpétuo, seções 5.2 e 6.2), poderia deixar a impressão de que o problema da degradação da energia e, conseqüentemente, da irreversibilidade, se resumiria à questão de eliminar dificuldades técnicas mais prosaicas, como forças de atrito nos eixos e demais partes móveis de uma máquina. Com esta atividade, que encerra a sequência, espera-se aprofundar a

discussão no sentido de explicitar o fato de que a degradação da energia é necessária ao funcionamento da máquina térmica e não apenas uma consequência indesejável e eventualmente contornável.

Foi feita a opção pelo uso de trechos originais do trabalho de Sadi Carnot (CARNOT, 1824 apud: AURANI, 1985), que podem ser encontrados no Anexo 1. Como objetivo secundário da atividade, portanto, deseja-se colocar o estudante em contato com algo do peculiar desenvolvimento da Termodinâmica ao longo da Revolução Industrial. Um momento no qual a tecnologia e ciência se desenvolviam de forma profundamente integrada às pressões sociais e econômicas da época. Embora este aspecto não tenha sido explorado diretamente no presente trabalho, espera-se que uma atividade como esta possa, no contexto dos cursos regulares de Ensino Médio, abrir pontes profícuas entre os conteúdos das disciplinas de Física, História, Geografia e Sociologia.

A dinâmica foi a mesma empregada na Atividade 1 (Moto-perpétuo, seções 5.2 e 6.2): divididos espontaneamente em grupos, os estudantes leram o texto que lhes foi entregue acompanhado por duas perguntas, destacadas abaixo, cujas respostas são esperadas em consenso.

3. 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?
4. Você consegue estabelecer uma relação entre o ensaio de Carnot e a reportagem sobre o projeto da máquina na ilha de Canárias?

O grupo selecionado para análise é composto por quatro alunos, aqui referidos pelos nomes fictícios: Jorge, Luiza, Juliana e Thamires. Uma primeira discussão interessante ocorre ainda durante a primeira leitura do texto.

TRECHO 1:

1. Luiza: [lendo] 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.
2. Juliana: Como assim é necessário que haja frio?
3. Luiza: Porque... para ter o transporte do calor e nunca acabar, entendeu?

4. Jorge: Entendeu?
5. Juliana: Não.
6. Luiza: Eu tô quente, eu passo calor pra você, você tá menos quente do que eu...
7. Jorge: [interrompendo] Tipo assim, não adianta ela tá quente se não tiver ninguém frio, entendeu? Porque o calor não vai ser transportado.
8. Luiza: Exatamente.
9. Juliana: Ah...
10. Jorge: O calor vai ficar só nela, a energia não vai...
11. Luiza: [interrompendo] É como o conhecimento. Não adianta você ter se não puder passar pros outros.
12. Jorge: Não adianta curtir, tem que compartilhar.
13. Luiza: Exatamente.
14. Juliana: Ah... bonito isso.

Neste primeiro trecho, o grupo percebe, a partir da leitura, que o funcionamento do motor térmico deve envolver necessariamente a diferença entre duas temperaturas, a de um reservatório quente e outro frio. A ideia é natural, uma vez que o conceito de equilíbrio térmico já havia sido estudado anteriormente no curso de Calorimetria e, portanto, a noção de que a energia térmica flui naturalmente do corpo quente para o frio deve ser evidente. O argumento poderia ser estruturado da seguinte forma (turnos 6 e 7): “(D) Eu tô quente (e) você tá menos quente do que eu (W) (já que) não adianta ela tá quente se não tiver ninguém frio porque o calor não vai ser transportado, (C) (então) eu passo calor pra você.” É claro que o ponto fundamental a ser explorado é o aproveitamento do fluxo de calor para a produção de trabalho mecânico e as possibilidades quanto ao rendimento deste processo, mas este primeiro trecho já mostra o início de um possível desenvolvimento neste sentido.

No próximo trecho, o grupo interrompe a leitura do texto e procura obter uma resposta à primeira pergunta.

TRECHO 2:

21. Luiza: [leitura da primeira pergunta]
22. Thamires: Ih, não entendi nada.
23. Juliana: [lendo] Seria possível conceber um motor que não desperdiçasse energia de nenhum modo e, portanto, não contribuísse para o aquecimento... ué, por que?
24. Jorge: [interrompendo] É tudo igual. É praticamente igual àquele outro texto. Praticamente o mesmo texto da máquina lá, do moto-perpétuo¹.
25. Thamires: Ah! Agora sim!
26. Juliana: A diferença é que esse dá certo.
27. Jorge: Ah, esse dá certo?
28. Juliana: Não?
29. Jorge: July, você acha que nunca perde energia, July?
30. Luiza: Eu acho que não tem como.
31. Jorge: Tem como você não perder energia? Você sempre perde energia.
32. Juliana: É isso o que ele tá propondo?
33. Jorge: É isso que ele tá perguntando. [lendo] Será que seria possível fazer um motor que não desperdiçasse energia de modo nenhum e, portanto, não contribuísse para o aquecimento do ambiente?
34. Juliana: Não.

¹ O aluno se refere ao texto aplicado na Atividade 1 (Moto-perpétuo, seções 5.2 e 6.2).

35. Luiza: Lógico que não.
 (...)

41. Luiza: A verdade é que tudo sempre perde energia.

42. Jorge: É, cara.

43. Juliana: Nunca a potência total...

44. Luiza: [junto com Juliana] É por causa da transferência...

45. Jorge: [interrompendo] É que o rendimento...

46. Juliana: [interrompendo] Rendimento! Isso é o que eu ia falar!

47. Luiza: É que você sempre está transferindo calor de um pro outro e aí na transferência você sempre perde alguma coisa.

48. Jorge: Você sempre perde energia.

49. Thamires: Eu não entendi o texto!

50. Jorge: Parado você perde energia!

51. Luiza: Dormindo você perde energia.

52. Jorge: Dormindo você perde energia!

53. Jorge: Namorando você perde energia.

Neste segundo trecho, o grupo passa à análise da primeira pergunta sem proceder à leitura do texto completo. A consequência imediata desta prática foi uma associação direta entre os resultados da Atividade 1 (Moto-perpétuo, seções 5.2 e 6.2) e a proposta da atividade em análise, como claramente se percebe na fala de Jorge (turno 24). Esta associação, embora imediata, é limitada no sentido da aprendizagem que se deseja promover com a presente atividade. Sem a leitura do trecho do texto no qual se descreve o funcionamento da máquina a vapor em mais detalhes, o fato de que o limite de rendimento máximo é inerente à própria máquina fica obscurecido.

No próximo trecho, a concepção de que o problema da máquina térmica deve ser exatamente o mesmo apresentado pelo moto-perpétuo da primeira atividade se aprofunda.

TRECHO 3:

67. Juliana: Vamos voltar pro moto-perpétuo. Eu vou colocar pra funcionar esse moto-perpétuo.

68. Thamires: Eu não entendi o texto, gente!

69. Juliana: Ele tá propondo uma forma de energia...

70. Jorge: [interrompendo] Uma forma de energia que não desperdiça energia, foi isso o que ela quis dizer.

71. Juliana: Tipo assim, um *fazedor* (sic) de energia...

(...)

79. Luiza: Um gerador de energia.

80. Jorge: Obrigado, Lu.

81. Juliana: Uma coisa que gera energia.

82. Jorge: Então, um gerador!

83. Thamires: Eu tô fazendo energia, mas não tô consumindo, tô só fazendo.

84. Luiza: Você tá só gerando. Isso, obrigada.

85. Jorge: Não. Nessa produção você não perde energia, é isso o que ele tá falando. Enquanto você tá gerando, você não perde energia. É isso o que ele tá falando.

86. Juliana: Isso.

87. Jorge: Tem como isso? É a pergunta.

88. Thamires: Não.

89. Jorge: Não. Por que, Thamires?

(...)

95. Thamires: Porque você precisa de energia pra gerar energia.

96. Jorge: [escrevendo] Porque o rendimento nunca é 100%.

97. Jorge: Vai contribuir para o aquecimento do ambiente sim.

98. Luiza: A outra pergunta tá assim: você vê alguma semelhança entre esse trabalho e os outros? Sim.
 99. Thamires: [risos]
 100. Luiza: [junto com Jorge] Porque a resposta é sempre a mesma.
 101. Jorge: [junto com Luiza] Porque a resposta é sempre a mesma.
 102. Luiza: Exatamente.
 103. Jorge: Qual é a resposta? O rendimento nunca é 100%.
 104. Luiza: Do que eu lembro daquela primeira máquina lá é que ela não pode funcionar porque alguma hora a energia dela vai... vai parar.
 105. Jorge: Não, é porque ela tem que fornecer energia pra ela mesma, porque ela se... realimenta e, além da energia que ela precisa pra ela funcionar, ela precisa de energia pra cidade. Ela vai fornecer energia pra cidade. Então, tipo assim, a energia que ela vai gerar tem que ser pra ela e pra cidade. Entendeu? Energia demais pra uma pessoa só. De certa forma ela vai perder energia.
 106. Thamires: Mas se... não sei. Nada é impossível.
 107. Juliana: Professor, depois pode vir aqui?

A discussão neste segundo trecho aprofunda a conexão entre a presente atividade e a atividade 1 (Moto-perpétuo, seções 5.2 e 6.2) de um modo que limita conceitualmente o problema e aponta para uma solução de algum modo ingênua e que não desejaríamos promover. O argumento desenvolvido neste trecho poderia ser resumido pelas falas dos turnos 95, 96 e 97: “(D) (Dado que) Você precisa de energia para gerar energia (W) (e já que) o rendimento nunca é 100%, (C) (então) vai contribuir para o aquecimento do ambiente sim.” A comparação entre as duas atividades (turnos 104 e 105), proposta diretamente na pergunta 2, vem a servir como modalidade positiva ao enunciado utilizado como garantia (W) no argumento. Retomando o exposto na seção 3.5, no modelo de Latour (2011), uma modalidade positiva é uma sentença que expande o enunciado num contexto diferente e portanto reforça-o, contribuindo para que se torne uma caixa-preta, ou seja, um fato acordado fechado em si mesmo. A dificuldade é que a proposta da presente atividade consiste justamente em forçar a abertura desta caixa-preta. As falas de Luiza e Jorge (turnos 100 e 101) são muito representativas da concepção formada pelos estudantes até o momento: “Porque a resposta é sempre a mesma.”

O professor, chamado à discussão por Juliana (turno 107), procura apresentar questões que possam mostrar ao grupo uma necessidade de aprofundamento da discussão, que passaria, naturalmente pela leitura do restante do texto, em especial de seus parágrafos mais técnicos: aqueles em que o funcionamento da máquina a vapor é descrito, como vê-se no trecho 3 a seguir.

TRECHO 3:

108. Juliana: Professor! Professor!
 109. Luiza: Professor!
 110. Juliana: Olha, se a gente falar, que nenhum motor, nenhum...
 111. Thamires: Gerador
 112. Juliana: Nenhum gerador assim tem rendimento 100%, é o suficiente? Ou não?
 113. Professor: Como é que você sabe?
 114. Juliana: Ah, experiência própria.

115. Professor: Você já construiu um motor?
 116. Juliana: Não, mas eu já vi isso.
 117. Professor: Viu aonde?
 118. Juliana: Ah, na vida.
 119. Jorge: Ah, mas você sempre tem um gasto de energia. Em algum lugar você tem um gasto de energia.
 120. Professor: Em que lugar?
 121. Juliana: Uhm...
 122. Jorge: Em qualquer lugar.
 123. Luiza: [risos]
 124. Thamires: [risos]
 125. Juliana: No caso, ele queria, tipo assim, transmitir 100% de energia, né?
 126. Professor: Eu quero um motor que não dissipe calor para o meio externo. Um motor a combustão que não dissipe calor para o meio externo.
 127. Luiza: Mas tem que ter diferença de calor pra funcionar.
 128. Professor: O que é diferença de calor?
 129. Luiza: Entre o meio externo e o motor.
 130. Juliana: E isso vai gerar a troca sozinho, automaticamente.
 131. Professor: É? Você não poderia colocar o seu motor dentro de uma caixa adiabática?
 132. Jorge: Mas pro motor funcionar, precisa de movimento, certo? O movimento não gera calor não?
 133. Juliana: Gera.
 134. Professor: Ok, forças como a de atrito fariam o seu motor gerar calor no movimento. Mas em que momento você está jogando calor para o meio externo?

A intenção do professor é atuar no sentido de apresentar modalidades negativas ao enunciado “Nenhum gerador assim tem rendimento 100%” (Juliana no turno 112). Retomando novamente o exposto na seção 3.5, uma modalidade negativa, no modelo de Latour (2011), é uma sentença que leva o enunciado de volta às suas condições de produção questionando-o em suas bases. Isto é, uma modalidade negativa procura forçar a abertura de caixas-pretas. Assim, é pedido que o grupo apresente as bases da suposta garantia sobre a qual suas afirmações se apoiam através das perguntas dos turnos 113, 115, 117 e 120. Ao perguntar “Em que lugar?” (ocorre a perda de calor) (turno 120), o professor intenciona, mais uma vez, forçar o exame dos parágrafos mais técnicos do texto com a expectativa de que o grupo perceba o papel fundamental do condensador na descrição de Carnot. O objetivo, evidentemente, não é questionar o enunciado em si, mas fazer emergir as discussões que poderiam levar a uma formulação mais precisa da segunda lei da Termodinâmica no contexto das máquinas térmicas. Luiza (turnos 127 e 129) e Juliana (turno 130), com o auxílio dos questionamentos do professor (turnos 126 e 128), já conseguem formular um argumento de algum modo mais satisfatório no sentido, mas ainda insuficiente por não apresentar bases muito claras: “(D) (Dado que) eu quero um motor que não dissipe calor para o meio externo, (W) mas (já que) tem que ter diferença de calor (temperatura) para funcionar entre o meio externo e o motor, (C) (então) isso vai gerar a troca sozinho, automaticamente.”

No turno 131, ao sugerir isolar o motor em uma “caixa adiabática”, o professor lança mais uma modalidade negativa, desta vez ao enunciado de Luiza (turno 127), que assume

como garantia o fato de que é preciso haver diferenças de calor (temperatura) para que o motor funcione. Uma garantia que deriva apenas da leitura direta dos primeiros parágrafos do texto e não de algum tipo de discussão mais detalhada, de modo que se apresenta sem bases. No turno 134, o professor insiste de modo mais enfático no fato de que é necessário explicitar de que modo o motor dissipa calor para o meio externo.

O grupo passa então à leitura do restante do texto e uma questão, cujo surgimento já era esperado no planejamento da atividade, surge e compele o grupo a chamar mais uma vez a presença do professor.

TRECHO 4:

140. Juliana: [lendo] 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... eu acho que é nesse momento, olha. Ele atravessa as paredes da caldeira...
141. Luiza: [interrompendo] O que que é calórico?
142. Juliana: É um... é uma coisa.
143. Luiza: Tá legal. [risos]
- (...)
151. Luiza: Eu quero saber o que que é calórico.
152. Juliana: O que que é calórico?
- (...)
159. Juliana: Pode falar aí, gente.
160. Luiza: Se você me disser o que que é calórico eu acho que consigo pensar.
- [Pausa: 1 minuto]
161. Luiza: Vai, gente, pensa aí.
162. Juliana: Eu tô lendo aqui, calma.
163. Jorge: Então, ele atravessa as paredes da caldeira, produz vapor, aí quando produz vapor é que o negócio...
- (...)
178. Jorge: Gente, o que é calórico?
179. Juliana: Que tem muita caloria?
180. Luiza: É... Pode ser.
- [Conversas paralelas: 3 minutos]
181. Jorge: Gente, acorda, acorda, o Professor vai vir. Vamos perguntar pra ele.
182. Jorge: Professor, o que que é calórico?
183. Professor: Essa é uma boa pergunta. Essa época, esse texto é de 1824, é o momento em que a Termodinâmica começou a surgir, ela começou a ser elaborada a partir do estudo da máquina a vapor. Muito do que a gente conhece sobre a Termodinâmica, muito do que já estudamos esse ano inclusive, foi baseado originalmente nessa máquina. Ele diz aí, eles estavam tentando generalizar as leis que regem as máquinas para melhorar as máquinas. Daí vem a Termodinâmica.
184. Juliana: Mas eles não sabiam antes não?
185. Professor: Não, não. Não existia naquele momento uma teoria muito bem estabelecida por detrás.
186. Juliana: Maneiro.
187. Professor: As primeiras máquinas a vapor eficientes, que surgiram na Inglaterra com Watt, eram usadas nas minas de carvão e na tecelagem, fabricação de tecidos. Mas o pessoal não entendia completamente os princípios físicos por detrás delas não. Isso foi sendo estudado aos poucos e o Carnot foi uma das pessoas importantes nesse estudo.
188. Luiza: A gente viu um vídeo disso, não viu não?
189. Juliana: Eu lembro disso, um filme sobre os trabalhadores que extraíam carvão das minas².

² O filme a que os alunos se referem é “Germinal” (França – 1993), baseado no romance homônimo de Émile Zola e dirigido por Claude Berri. A narrativa retrata as condições precárias vividas pelos trabalhadores das minas de carvão francesas em meados do séc. XIX. O filme foi exibido aos alunos em sala pelo professor de História cerca de dois meses antes da realização da atividade aqui descrita.

190. Thamires: Em História?
191. Juliana: É, acho que foi em História mesmo.
192. Professor: Nessa época então, os conceitos da Termodinâmica não eram tão bem estabelecidos quanto hoje. Então os conceitos de calor, energia interna, entropia, da forma como a gente tem hoje, ainda não eram muito claros. Estavam sendo formulados aí.
193. Professor: Nesse livro do Carnot, quando se fala em calórico, hoje se interpreta que, dependendo do contexto, pode significar coisas diferentes, porque os conceitos ainda não eram muito bem estabelecidos. Nesse trecho do texto aí, você pode interpretar com segurança calórico simplesmente como calor.
194. Jorge: Quantidade de calor.
195. Professor: Quantidade de calor. Inclusive a palavra caloria vem da palavra calórico.
196. Juliana: Então tá.
197. Jorge: Então tá. Então tá. [lendo] Em sua passagem de um corpo para o outro, o calórico proveniente da combustão atravessa as paredes da caldeira.

É neste terceiro trecho, a partir da dúvida quanto ao significado da palavra “calórico”, que surgem as oportunidades para o estabelecimento de possíveis conexões entre Física e História e também para uma discussão quanto às relações entre ciência, tecnologia e sociedade, em particular, quanto à forma não linear como estes três espaços se articulam no sentido do progresso tecnocientífico. Vale notar que, até a realização da atividade, o professor não tinha conhecimento da exibição do filme citado pelos alunos. Não houve diálogo prévio entre os professores de Física e História, o que aponta para um primeiro possível desenvolvimento futuro desta atividade. Uma vez que trata-se da leitura de um texto de fonte primária que faz referência direta ao contexto social e econômico da Europa do século XIX, um planejamento conjunto articulado entre as duas áreas poderia enriquecer a proposta da atividade.

Como se verá no trecho 5, a descrição da máquina, agora lida pelos estudantes, não esclarece de fato o seu princípio de funcionamento e a questão, vista pelo professor como central, a do papel do condensador na máquina, não aparece naturalmente na discussão. O resultado é que o grupo parece ainda satisfeito com a concepção de que o limite de rendimento é um fato simples e acordado.

TRECHO 6:

228. Juliana: O calórico atravessa as paredes da caldeira.
229. Jorge: É porque o calórico, a quantidade de calor que é produzida pela combustão, vira vapor e...
230. Juliana: [interrompendo] vira vapor e passa...
231. Jorge: [interrompendo] Vira vapor não, produz vapor.
232. Juliana: Produz vapor...
233. Juliana: A quantidade de energia... a quantidade de energia ou a quantidade de calor?
234. Jorge: Quantidade de calor...
235. Juliana: ... produzida na combustão é transformada em vapor...
236. Jorge: Não, atravessa as paredes da caldeira.
237. Juliana: E o vapor, tá aonde?
238. Jorge: Produz vapor.
239. Juliana: Produz vapor e esse...
240. Jorge: Aí, no vapor, vai estar contida também a quantidade de calor.
241. Juliana: Mas é óbvio.

242. Juliana: Professor, olha, é que a gente queria falar... vê se é assim: não é possível, né? Porque o rendimento de qualquer fonte de energia não chega a 100%. Uma prova disso é que, aí a gente ia colocar assim, a quantidade de calor que é produzida na combustão produz vapor e esse vapor atravessa as paredes da caldeira, que é uma forma de perder energia. O que faria com que o rendimento já não fosse 100%.
243. Professor: O que atravessa as paredes da caldeira? O vapor?
244. Jorge: Não, o calórico atravessa as paredes da caldeira e produz vapor.
245. Professor: Você queima o carvão. Aí você tem a caldeira cheia d'água. O calor vem do carvão e...
246. Juliana: Mas se perde, né, no ambiente.
247. Professor: Sim, mas a questão é: e se você pudesse melhorar a sua máquina e conseguisse colocá-la dentro de um recipiente adiabático... fechado.
248. Juliana: Mas pra alguma outra coisa você ia perder.
249. Professor: É?
250. Luiza: É que você precisa do frio pra utilizar o calor. Você precisa de uma diferença de temperatura.

É possível que não tenha ficado claro para os estudantes o que a palavra “condensador” significa, ou que a linguagem utilizada por um autor do século XIX tenha dificultado uma melhor compreensão do texto. Esta é uma falha importante na proposta da Atividade 4 e que precisaria ser considerada em desenvolvimentos futuros. Uma possível solução seria fazer acompanhar o texto um diagrama esquemático simplificado de uma máquina a vapor que represente de algum modo a própria descrição apresentada por Carnot, como o mostrado na figura 6.3, de autoria própria, abaixo.

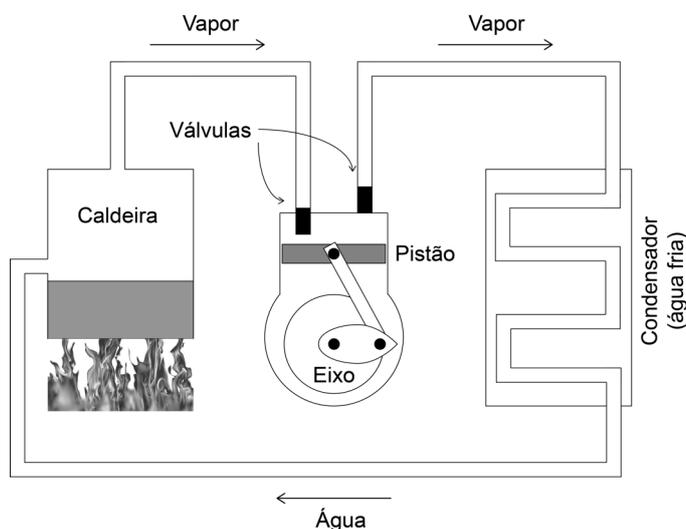


Figura 6.3: Diagrama esquemático simplificado de uma máquina a vapor.

Outra possibilidade, talvez mais bem posta no sentido do ensino por investigação, seria pedir aos estudantes que produzissem tal diagrama a partir da leitura. O pedido poderia ser feito explicitamente como a primeira das perguntas do material (“Você conseguiria fazer um desenho da máquina a vapor descrita por Carnot?”), ou mesmo verbalmente pelo professor ao longo das discussões, como resultado da constatação de que o mecanismo básico de funcionamento da máquina não estava claro. Na aplicação, nenhuma das duas estratégias

foi adotada e, como se verá no trecho 7 a seguir, o professor atuou na discussão no sentido de tentar esclarecer o papel do condensador como mecanismo que evita o estabelecimento do equilíbrio térmico que anularia o funcionamento da máquina.

TRECHO 7:

251. Professor: Você criou o vapor na caldeira, certo?
252. Juliana: Sim.
253. Professor: Mas em algum momento você não teria que fazer essa água voltar para a caldeira?
254. Juliana: Vai ter que resfriar o vapor?
255. Professor: Bem, você vai ter que jogar a água de volta na caldeira. Ele explica isso aí. É o que acontece no condensador. O vapor passa pelo condensador, volta para o estado líquido e a água volta para a caldeira.
256. Jorge: Sim.
257. Professor: Então você tem a caldeira muito quente e o condensador frio fazendo o vapor voltar a ser água. Na passagem do vapor até o condensador, o que acontece?
258. Jorge: Ele move alguma coisa.
259. Professor: Isso. Então agora você imagina que a sua máquina vai ficar dentro de uma caixa adiabática. Fechada. O que vai acontecer com a água do condensador?
260. Juliana: Ia ficar quente direto.
261. Professor: Mas ia ficar quente até onde?
262. Juliana: Até explodir a máquina.
263. Jorge: Até ficar na temperatura do vapor.
264. Professor: Por que?
265. Jorge: A tendência natural é equilibrar. O equilíbrio térmico.
266. Professor: Então a água vai procurar o equilíbrio térmico com o vapor. E aí, com o tempo?
267. Jorge: A caldeira vai entrar em equilíbrio térmico com o condensador.
268. Professor: E aí?
269. Jorge: E aí você não produz mais energia, não produz mais nada, porque a produção se baseia na diferença de temperatura.
270. Luiza: Você tem que ter um lado quente e um lado frio.
271. Professor: E a passagem natural do calor é?
272. Luiza: Do quente para o frio.
273. Professor: E nessa passagem, você consegue aproveitar alguma coisa. Se você permitir que o sistema entre em equilíbrio...
274. Jorge: Ela para de funcionar.
275. Professor: Então, se você deixar o motor numa caixa adiabática, o que acontece?
276. Jorge: O motor equilibra.
277. Professor: Por que?
278. Jorge: Porque a água tem que trocar calor com o meio externo pra não esquentar.
279. Professor: No seu automóvel tem uma coisa que faz isso também. Sabe o que é?
280. Jorge: O radiador.
281. Juliana: Isso!
282. Professor: O radiador é como o condensador da máquina a vapor, ele serve para descartar calor para o meio externo. Se você não fizer isso...
283. Juliana: [interrompendo] Uh! A temperatura vai lá em cima, né?
284. Professor: É.
285. Juliana: E o carro para de funcionar.
286. Professor: Então não tem como funcionar com rendimento 100% não só porque você não consegue evitar as perdas por atrito, sim você também não tem como evitar isso, mas a questão é que, mesmo sem isso, isolado do meio externo, o motor equilibra. Se equilibrar, para de funcionar. Então a perda de calor faz parte do funcionamento da máquina.
287. Professor: O que o Carnot estava tentando convencer vocês aí é que, para gerar energia mecânica a partir do calor, é necessário perder calor. Isso é uma das maneiras de formular o que a gente chama de Segunda Lei da Termodinâmica. Isto é, nenhuma máquina térmica, por melhor e mais bem projetada que seja, pode funcionar com rendimento de 100%.
288. Juliana: Porque se o rendimento fosse 100% ela entraria em equilíbrio.
289. Professor: E se ela equilibrar?

290. Juliana: Ela para de funcionar.

Neste sétimo e último trecho, vemos que o esclarecimento quanto ao papel do condensador enriquece a discussão e vem a tornar claro o fato de que a ausência da troca de calor com o meio externo faria com que o sistema entrasse em equilíbrio térmico e que, por sua vez, o equilíbrio térmico anularia a possibilidade de aproveitamento de energia mecânica. A partir desta ideia, o professor consegue apresentar de forma fluida e contextualizada um possível enunciado da segunda lei da Termodinâmica a partir de uma dinâmica dialógica com os estudantes. Alguns argumentos interessantes são formulados pelos alunos em meio a esta dinâmica, entre eles, podemos estruturar o apresentado por Jorge (turnos 267 e 269), sobre a questão da impossibilidade de isolar o motor do ambiente externo: “(D) (Dado que) a caldeira vai entrar em equilíbrio térmico com o condensador , (e já que) a produção se baseia na diferença de temperatura, (C) você não produz energia, não produz mais nada.” E também a conclusão final do trabalho, resumida no breve diálogo entre Juliana e o professor entre os turnos 287 e 290.

Consideramos que o andamento da atividade veio a requerer uma participação do professor nas discussões mais incisiva do que anteriormente planejado. Alguns passos necessários a uma aproximação com a segunda lei da Termodinâmica no contexto das máquinas térmicas foram dados pelos alunos mediante intervenções muito explícitas do professor, que se fizeram necessárias como resultado de uma má compreensão do texto utilizado como subsídio. Entretanto, consideramos que, ao final do diálogo, a superação da concepção da limitação de rendimento como uma caixa-preta imune a questionamentos e sobre a qual não vale refletir foi conseguida e que a ideia de que a degradação da energia, no contexto da máquina térmica, é mais que apenas um efeito indesejável e sim uma condição para o funcionamento, foi aprendida. É evidente que algumas questões procedimentais, já apontadas na análise do trecho 6, precisariam ser replanejadas para possíveis aplicações futuras de modo que se pudesse considerar a proposta desta quarta atividade um sucesso integral no sentido do ensino por investigação.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho surgiu como busca pessoal de indicativos de resposta a duas questões fundamentais na prática de um professor de Física em atividade no Ensino Médio. A primeira poderia ser colocada de modo aparentemente simples: como cativar o interesse dos estudantes nas aulas de Física? A busca de uma possível solução, no entanto, nada traz de simplicidade e se aprofunda em questionamentos posteriores como: ensinar Física por que? Ensinar Física para que? Refletir sobre essas questões, em última análise, trata-se mais de se fazer uma opção consciente por um conjunto de objetivos e métodos do que propriamente de se buscar uma resposta única. A adoção de uma visão do ensino de ciências como imersão numa cultura e a aplicação do enfoque CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) e da metodologia do ensino por investigação, são as opções feitas aqui na produção e aplicação das quatro atividades apresentadas. Longe de ser alternativa única ou simples para o insucesso histórico da aprendizagem em ciências, resumido pela constatação de que aquilo que ensinamos é quase sempre diferente daquilo que efetivamente se aprende (McDERMOTT, 1993), ou para o notável desinteresse dos estudantes em nossas salas de aula, a opção pela enculturação científica representa um profundo deslocamento de foco na atividade docente. Do conteúdo e da necessidade do cumprimento formal de programas e currículos, transfere-se o protagonismo do processo a quem de fato compete o papel: o aluno. Assim, as reflexões de quem planeja a ação pedagógica concentram-se nos objetivos da aprendizagem almejada no contexto da formação do aluno como cidadão no futuro, egresso do ensino médio, que não necessariamente virá a se tornar um profissional da área de ciência e tecnologia. Ao refletir sobre a utilidade das ciências em geral e da Física em particular na formação básica, o educador valoriza o aluno e aproxima a prática de sua realidade objetiva, o que potencialmente faz surgir envolvimento emocional de ambas as partes e resgata o interesse e a participação em sala de aula.

Ressignificar o papel da Física na escola média traz à tona a segunda questão fundamental que move o presente trabalho: por que e como abordar a segunda lei da Termodinâmica? Essa é uma questão que emerge diretamente da prática do professor ao observar o caráter secundário do tratamento que o tema recebe em livros didáticos e prescrições curriculares nas escolas. Defendo firmemente que o tema não pode ser visto como supérfluo ou opcional por se relacionar diretamente a observações das mais cotidianas para todos nós, incluindo nossos alunos: a irreversibilidade dos fenômenos naturais e a degradação da energia. Ao responder dessa forma o “por que”, faz-se necessária uma inversão de

perspectivas, dessa vez com relação ao conteúdo específico, que aponta para um indicativo de resposta à questão do “como”. Ao invés da abordagem da segunda lei da Termodinâmica *per se*, o tema para a sala de aula passa a ser o da irreversibilidade dos processos naturais e sua relação com a degradação da energia, tema que impõe necessariamente o estudo de aspectos da própria segunda lei. Essa inversão de perspectivas modifica escolhas de enfoque de conteúdo com relação às tradicionais encontradas na maioria dos livros didáticos. Uma atenção maior ao conceito de entropia e o *design* de ao menos uma atividade que aprofunde o assunto são necessários, ao passo que aspectos matemáticos subjacentes ao rendimento máximo teórico, ou o próprio ciclo de Carnot, podem e são deixados de lado. O entendimento de que esse sim, é um ponto marginal, está intimamente ligado à adesão ao referencial da enculturação científica e à opção por uma proposta de ensino de Física que considera diferenças de interesse pessoal dos alunos, admitindo que aqueles que eventualmente se tornarão cientistas e engenheiros terão outras oportunidades de estudo e aprofundamento dessas questões no futuro. Planejar atividades é fazer escolhas e o que foi feito aqui é tão somente uma escolha consciente com base em objetivos específicos.

Permeia todo o trabalho um objetivo claro de aplicação direta e imediata em sala de aula. Assim, a questão da utilidade, no sentido da prática docente, esteve em pauta durante toda a elaboração. Não nos interessa, portanto, que esta proposta seja vista como reflexão vaga e facilmente descartável por colegas que vivem a realidade das escolas. Ao contrário, afirma-se que a aplicação de uma ou mais das quatro atividades elaboradas poderia ser reproduzida por qualquer colega que se interesse em conhecer o trabalho já em suas próximas aulas. A proposta surge de inquietações oriundas da prática docente e pede invariavelmente o retorno a esta prática para que se valide como verdadeiramente útil não apenas como reflexão, mas como metodologia.

O planejamento das quatro atividades foi feito tendo em vista aspectos da questão da irreversibilidade física que se desejava abordar. As quatro atividades são fortemente inter-relacionadas, mas é igualmente evidente que não são interdependentes. Isto significa que, embora idealmente formem um todo coerente da maneira como foram propostas aqui, poderiam ser aplicadas independentemente e em qualquer ordem em outras escolas e outros contextos. É claro que esta flexibilização não ocorre sem perdas, perde-se o todo no descarte da riqueza das inter-relações, mas possibilita algum grau de maleabilidade que pode ser particularmente útil tendo em vista o objetivo maior de aplicação prática imediata. A depender do contexto específico de uma escola, uma, duas ou mais dessas atividades

poderiam ser empregadas como inserções, ou seja, não exigiriam uma reformulação curricular ampla e profunda.

A opção pela construção de uma sequência de atividades maleável e não por uma proposta de transformação curricular profunda deu-se também em função da intenção de aplicá-la em caráter teste imediatamente. A escola onde foi aplicada trabalha, como a maioria, em função das amarras de currículos marcados por exigências rígidas de cumprimento de conteúdos programáticos, exigências institucionalizadas inclusive pelo emprego de provas bimestrais unificadas. Entretanto, é importante frisar que todo o trabalho foi planejado como parte integrante do curso de Física e aplicado durante os horários regulares de aula e que não deve ser visto como um conjunto de aulas extras ou opcionais.

Para a análise dos resultados de aplicação, foi adotado um ponto de vista inspirado explicitamente pela sociologia da ciência de Bruno Latour, especificamente em sua obra “Ciência em ação” (LATOURE, 2011). Deste ponto de vista, rejeita-se a análise dos resultados de sala de aula como uma simples questão de sucesso ou fracasso com relação à aquisição de conhecimentos específicos. Prefere-se a observação das discussões entre os alunos em tempo real e a análise do processo que, em meio a estas discussões, pode levar à aprendizagem ou consolidação da aprendizagem de conceitos da Física. Valoriza-se assim também o próprio desenvolvimento da habilidade de argumentar, vista como um objetivo em si mesmo, não apenas para área de ciências, mas para qualquer área do conhecimento escolar (JIMENEZ, 2010). Na análise dessas discussões, procedeu-se a busca por afirmativas, muitas vezes divididas entre falas de alunos diferentes, que se apresentassem numa forma que as qualificasse ao título de argumentos. Para tanto, foi utilizado o padrão de *layout* de argumentos de Stephen Toulmin (TOULMIN, 2006), amplamente conhecido e utilizado em pesquisas na área de ensino de ciências (CAPPECHI, 2004), (CAPPECHI e CARVALHO, 2006) e (GUERRERO, 2007).

Com a Atividade 1, Moto-perpétuo (seção 5.2), o que se intencionava é o fechamento do estudo do conceito de energia, suposto já conhecido pelos estudantes no contexto da Mecânica. Embora o estudo do tema já houvesse sido realizado previamente, a análise da discussão apresentada como exemplo (seção 6.2) mostrou que os estudantes não incorporavam em seu arcabouço de conhecimentos prévios uma compreensão ampla do conceito de energia que inclui a degradação. Esta conclusão foi trazida à tona pela proposição de um problema de caráter verdadeiramente CTS nos moldes propostos por Aikenhead (1996) e resumidos na figura 3.2 (seção 3.2) e pela exigência de uma solução consensual do grupo. Um problema que surge no espaço social e exige o exame de aspectos de tecnologia e ciência

para a construção de um posicionamento crítico coletivo. Criou-se assim uma controvérsia de cunho sócio-científico que, com a interferência do professor por meio de questionamentos e não de respostas prontas, permitiu um aprofundamento do tema e a emergência do problema da degradação, consolidando a aprendizagem do conceito de energia.

Com a Atividade 2, Irreversibilidade no dia-a-dia (seção 5.3), o objetivo foi a explicitação do problema da irreversibilidade física em eventos do cotidiano. A atividade é mediada por um vídeo propositalmente produzido de modo a permitir fácil reprodução e adaptação, vídeo esse disponibilizado publicamente. A análise do episódio de discussão apresentado (seção 6.3) mostrou que os alunos, como esperado, tendem a conferir caráter de obviedade ao problema da irreversibilidade dos fenômenos que observam, mas a necessidade de justificar precisamente a escolha da versão do vídeo a ser assinalada, e as dificuldades que encontraram em formular as justificativas, trouxeram à tona uma necessidade de aprofundamento e estudo de questões relacionadas à degradação da energia e a um modelo microscópico da matéria.

Na Atividade 3, Entropia (seção 5.4), foi proposto um laboratório aberto de grau de investigação 2, de acordo com a classificação resumida no quadro 3.4 da seção 3.3 (TAMIR apud: BORGES, 2002). Como o problema foi proposto aos alunos sem uma prescrição metodológica e sem o conhecimento prévio de uma resposta supostamente correta, foi possível encontrar, na análise do episódio apresentado como exemplo (seção 6.4), um movimento claro de formulação e teste de hipóteses, evidenciado por afirmações classificadas por Toulmin (2006) como argumentos que estabelecem garantias. Segue-se como resultado desse teste de hipóteses uma garantia acordada, a saber, a tendência do sistema binário e equiprovável ao estado de divisão igualitária com o passar do tempo. A emergência dessa garantia como resultado final da manipulação experimental e das discussões permitiu ao professor realizar um momento de fechamento de cunho expositivo, no qual o conceito de entropia foi formalmente apresentado.

Como avaliação global da Atividade 3, vale apontar que o alto grau de envolvimento e participação dos estudantes em todas as suas fases, inclusive na de fechamento e formalização, foi facilmente perceptível para todos os que estiveram presentes. A diferença no grau de adesão à proposta foi marcadamente grande com relação a qualquer aula expositiva ministrada por este professor nestas turmas e perceptível mesmo com relação às demais atividades da sequência em análise. Durante a etapa de formalização não houve, como temido pelo professor em algum momento durante o planejamento, um desligamento de uma parcela sensível do alunado da dinâmica da aula. Inversamente, o desejo de participar ativamente,

expondo ao professor e aos colegas as conclusões obtidas com seu experimento, e o anseio de ouvir do professor de que modo aquelas conclusões se conectam com a Física formal foram comuns a uma parcela muito mais facilmente visível do grupo. Muitos procuraram o professor nas semanas seguintes com questionamentos pessoais sobre a entropia e o caráter irreversível do tempo. Muitos o procuraram apenas para agradecer pela aula. Neste ponto, da óptica de professor de ofício, que pode ser omitida mas não abandonada inteiramente, é impossível não reconhecer que a atividade valeu a pena antes de tudo pelo potencial de envolvimento dos alunos com uma aula de Física.

Com a Atividade 4, Máquinas térmicas (seção 5.5), intencionava-se situar a segunda lei da Termodinâmica, em seu viés macroscópico, no contexto do desenvolvimento da máquina a vapor no séc. XIX. A análise do episódio apresentado (seção 6.5) mostrou que a aplicação de fragmentos de um texto original do séc. XIX introduziu dificuldades de compreensão provavelmente por causa da linguagem utilizada pelo autor. Isso fez com que a ação do professor tivesse que ser mais incisiva do que o planejado. Por outro lado, cabe insistir que a opção pelo texto de fonte primária traz também oportunidades de aprendizagem únicas no sentido da compreensão da ciência como atividade humana que integra o social, o tecnológico e o científico (ROMERO, 2009). No caso específico das máquinas a vapor, permite uma reflexão sobre as pressões econômicas e seu papel no desenvolvimento, criando uma ponte de contato muito rica entre a Física e diversas disciplinas do currículo escolar tradicional, mais marcadamente a História. Um planejamento de aplicação desta atividade articulado com o professor de História da escola poderia render algumas discussões ainda mais interessantes. Tal articulação segue como sugestão para possíveis aplicações futuras.

Como último comentário, vale ressaltar que o objeto de estudo deste trabalho são as atividades em si e não a trajetória cognitiva de estudantes específicos e que o objetivo da análise, que espera-se ter sido atingido, é mostrar que são ricas em possibilidades de aprendizagem de conteúdos da Física a partir de uma perspectiva de enculturação científica com enfoque CTS numa metodologia de ensino por investigação. O envolvimento dos estudantes nas atividades foi notável, bem como, acredita-se, tenha sido a aprendizagem dos conceitos de energia, no sentido amplo que inclui a degradação, e de entropia. Espera-se por fim, que este trabalho possa servir como subsídio para mais professores de Física além do próprio autor, e que possa retornar à sala de aula como instrumento útil, contribuindo de algum modo com a prática docente no ensino médio.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIKENHEAD, G. What is STS science teaching? In: SOLOMON, J., AIKENHEAD, G. *STS Education: International Perspectives on Reform*. New York: Teachers College Press, 1994. Cap.5. p.47-59.

Disponível em <http://www.usask.ca/education/people/aikenhead/sts05.htm> Acesso em 21/03/2013

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.

AZEVEDO, M. C. P. S. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, A. M. P. (org.) *Ensino de Ciências*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. p. 19-33.

BACHELARD, G. *A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento*. 9ª reimpressão. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v. 19, n. 3, 2002. p. 291-313.

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

CACHAPUZ, A., PAIXÃO, F., LOPES, J. B. e GUERRA, C. Do estado da arte da pesquisa em educação em ciências: linhas de pesquisa e o caso “Ciência-Tecnologia-Sociedade.” In: ALEXANDRIA *Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, v.1, n.1, p.27-49, mar. 2008. UFSC.

CAPPECHI, M. C. M. Argumentação numa sala de aula. CARVALHO, A. M. P. (org.) *Ensino de Ciências – Unindo a pesquisa e a prática*, São Paulo, Thomson Learning, 2004. p.59-76.

CAPPECHI, M.C.M. e CARVALHO A.M.P. Atividade de laboratório como instrumento para a abordagem de aspectos da cultura científica em sala de aula. *Pró-Posições*, V17, n1(49), 2006. p137-153.

CARVALHO, A. M. P. Ensino e aprendizagem de ciências: referenciais teóricos e dados empíricos das sequências de ensino investigativas (SEI). In: LONGHINI, M. D. (org.) *O uno e o diverso na Educação*. EDUFU, Uberlândia, 2011, p.253-266.

FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, 1963.

GAMA, L. D. e ZANETIC, J., Abrindo caixas pretas em aulas de Física: Uma reflexão educacional a partir dos conceitos de Bruno Latour In: XX SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, São Paulo, 2013

Disponível em <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xx/sys/resumos/T0687-2.pdf>
Acesso em 09/03/2013

GUERRERO, J. C. A. Las aportaciones de Toulmin a la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, V.25, n.1, 2007. p.133-146.

JIMENEZ – ALEIXANDRE, M.P. El alunado argumenta se si su papel en classe lo requiere. In: *10 Ideas Claves – Competencias en argumentación y uso de pruebas*. Espanha. Editorial Graó, 2010. p.155-171.

KITTEL, C. Thermal Physics, 21^a edição, W.H. Freeman, 2000.

KRASILCHIC, M. Reformas e realidade: o caso do ensino de ciências. São Paulo: *São Paulo em perspectiva*, v. 14, n.1, p. 85-93, Jan/Mar 2000.

Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/spp/v14n1/9805.pdf> Acesso em 21/03/2013.

KRITSCH, R. Ilha das Canárias, no Maranhão, vive o sonho do moto-contínuo. *O Estado de São Paulo*, caderno especial: Descobrimdo 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> (página d11) <http://acervo.estadao.com.br/pagina/-!/20000213-38834-nac-0215-cd2-d11-not> Acesso em 21/03/2013

LATOUR, B. Ciência em ação: como seguir cientistas e engenheiros sociedade afora. 2^a edição. São Paulo: Unesp, 2011.

McDERMOTT, L. C. How we teach and how students learn: a mismatch? *American Journal of Physics*, v. 61, n.4, 1993.

MENEZES, L. C. A matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico, 1^a 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.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica. 4^a edição. São Paulo: Edgard Blucher, V. 2, 2002.

OLIVEIRA, M. A. Estudos de laboratório no ensino médio a partir de Bruno Latour. *Educação e Realidade*. V.31, n.1, 2006. Pg. 163-182.

Disponível em <http://seer.ufrgs.br/educacaoerealidade/article/view/22994/13267> Acesso em 30/03/2013.

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.

RODRIGUES, C. F. M. e VIANNA, D. M. Irreversibilidade. In: XX SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, São Paulo/SP, jan.2013a. Disponível em <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xx/sys/resumos/T1162-1.pdf> Acesso em 05/01/2014.

RODRIGUES, C. F. M. e VIANNA, D. M. Análise de uma discussão acerca de um dispositivo de movimento perpétuo. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, Águas de Lindóia/SP, nov.2013b. Disponível em <http://www.adaltech.com.br/sigeventos/abrapec2013/inscricao/resumos/0001/R0650-1.PDF> Acesso em 05/01/2014.

ROMERO, A. E. La historia, la epistemologia y la enseñanza de la física: un enfoque cultural. Atas X Conferencia InterAmericana de Educación em Física. Medellin. 2009. Conferencia apresentada.

SANTOS, Z.T.S. e PERNAMBUCO M.M.C.A. (2008) Uma perspectiva histórica e epistemológica para o ensino de entropia no ensino médio. XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Curitiba/PR. Comunicação Oral. Disponível em <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xi/sys/resumos/T0097-1.pdf>. Acesso em 28/03/2012.

SASSERON, L. H. e CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. *Investigações em Ensino de Ciências*. V.16, n.1, 2011. p. 59-77.

TOULMIN, S. E., *Os usos do argumento*. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

VIARD, J. Using the history of Science to Teach Thermodynamics at the University level: The Case of the Concept of Entropy. 2005. Disponível em <http://www.ihpst2005.leeds.ac.uk/papers/Viard.pdf>. Acesso em 28/03/2012.

WILSEK, M.A.G. e TOSIN J.A.P. Ensinar e aprender ciências no ensino fundamental através da resolução de problemas. Portal de Educação do Estado do Paraná: Dia-a-dia @Educação, 2009.

ANEXO 1: 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, Araióses, 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 Araióses, 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 movimenta uma segunda roda, menor, ligada à primeira por uma correia. A segunda alimenta as subseqüentes 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 Araióses: 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, electricista, 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

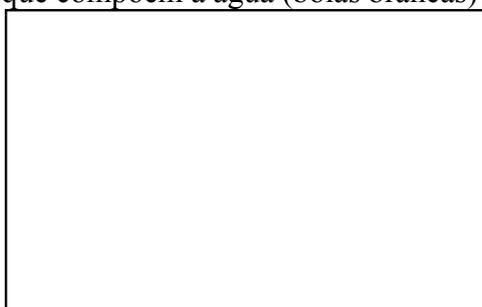
Observe algumas cenas que serão agora exibidas em vídeo. Cada cena será apresentada em duas versões, mas em uma delas há algo errado. Procure identificar, em cada caso, qual é a versão correta. Discuta com seus colegas e apresente também as razões que levaram você à identificação.

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

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

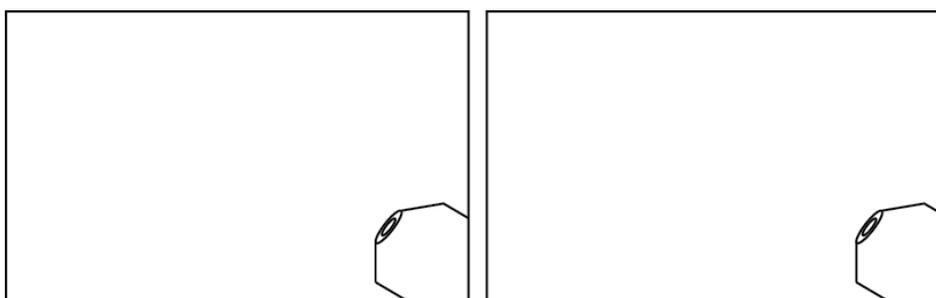
Cena 3	
Versão correta:	(1) (2)
Razões da escolha:	

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.