

Dos vínculos aos estruturantes: uma proposta para o ensino de Termodinâmica

From the links to the structurings: a proposal for thermodynamics teaching

Djalma Nunes da Silva

Instituto de Física da USP
djalmaparana@usp.br

Jesuína Lopes de Almeida

Instituto de Física da USP
jepacca@if.usp.br

Resumo

Partindo-se da ideia de vínculo, propõe-se ensinar Termodinâmica utilizando a ideia bachelardiana de obstáculo e ruptura epistemológica. Esperamos, assim, estarmos contribuindo para melhor articulação entre teoria científica e o mundo à nossa volta.

Palavras Chave: ensino da termodinâmica, estruturantes, obstáculos epistemológicos.

Abstract

Based on the idea of links, this paper proposes to teach thermodynamics using the idea Bachelardian obstacle and epistemological break. We hope so, we are contributing to better coordination between scientific theory and the world around us.

Keywords: thermodynamics teaching, epistemological obstacles, structurings.

Introdução

Este trabalho focaliza a aprendizagem de conceitos de Termodinâmica destacando o erro como um dos indicadores do funcionamento da mente ao revelar obstáculos inerentes ao pensamento dos estudantes frente a problemas cujas respostas deveriam estar fundamentadas nas teorias científicas.

Na base do trabalho está um artigo de Pietrocola (1999), em que se atribui o malogro do modelo de mudança conceitual à falta de *vínculos* que possibilitariam aos estudantes interpretar o mundo que os cerca através dos conhecimentos científicos. Isso nos levou às ideias de Bachelard (1971) de que o fato do senso comum ver o mundo como ele se apresenta aos sentidos, torna-se necessário promover uma *ruptura* com essa visão.

No caso da Termodinâmica, entidades como energia e entropia aparecem na formulação de suas leis pretendendo descrever o mundo "como ele realmente é". Contudo, essas descrições revelam um mundo diferente do percebido pelo senso comum. Como abrir a porta que leva ao novo conhecimento? É na busca da resposta a essa questão que propomos repensar o ensino da Termodinâmica recorrendo à epistemologia de Bachelard focalizando-a na ideia dos obstáculos epistemológico.

A Epistemologia de Bachelard

Segundo Astolfi (1999), na obra de Bachelard destacam-se, entre outras, as seguintes ideias: *Não há verdade sem erro retificado; o erro só é reconhecido a posteriori (é o passado da razão voltando-se sobre si mesmo); a mente só pode formar-se se reformando*. Nesta visão a escola passa ser um local onde se aprende a refazer o funcionamento cerebral para que ocorra um ascetismo intelectual. As principais características dos obstáculos epistemológicos de Bachelard segundo Michel Fabre (ASTOLFI, 1999), que consideramos pertinentes para esse trabalho, são:

- **Interioridade:** *Não é “algo contra o qual o pensamento se choca”, mas constituinte do próprio ato de conhecer.*
- **Facilidade:** *Refere-se ao que o cérebro está acostumado a lidar, à comodidade intelectual, a uma rede de analogias e metáforas, a uma certeza interior.*
- **Positividade:** *As concepções que se diferenciam das científicas é um conhecimento como qualquer outro.*
- **Ambiguidade:** *Apresenta-se com dupla dimensão; i) de ferramenta necessária e ii) fonte potencial de erros.*
- **Poliformismo:** *Possui múltiplas aderências necessitando-se levar em consideração dimensões transversais e psicanalíticas.*
- **Recorrência:** *Reside no fato de que os erros só são reconhecidos depois de cometidos, uma vez que os obstáculos foram ativados.*

As considerações feitas até aqui tem como meta o oferecimento de subsídios que permitam a elaboração de estratégias de ensino que contemplem o resgate das raízes filosóficas dessa ciência

com o intuito de possibilitar aos estudantes perceberem em que medida as leis da Termodinâmica não são apenas expressões matemáticas.

Para isso fizemos uma adaptação para o ensino da Termodinâmica, de contribuições das Epistemologia de Bachelard complementadas por elementos colhidos na História da Ciência e apoiadas nas ideias de Gagliard (1986) e Astolfi (1999). Os dados empíricos, contextualizados na sala de aula, estão numa pesquisa feita por Silva (2013), que se organiza com informações das fontes:

- 1- Coleta das concepções de estudantes sobre reversibilidade e irreversibilidade em fenômenos termodinâmicos; desses estudantes, vinte eram do terceiro ano do ensino médio de uma escola pública de Cubatão, no interior do estado de São Paulo e dez do primeiro semestre de uma faculdade particular de licenciatura em física da cidade de São Paulo que já tinham passado pelo ensino formal das leis da Termodinâmica.
- 2- Concepções de Carnot e Clausius sobre os mesmos fenômenos; Para isso foram utilizadas traduções dos originais de Carnot (1824) e Clausius (1850, 1864) respectivamente para o espanhol e francês

Com relação ao primeiro ponto a ideia foi identificar os possíveis obstáculos para a compreensão científica dos processos reversíveis e irreversíveis.

O segundo ponto se refere às contribuições que a História da Ciência e a Epistemologia podem fornecer ao abordar situações em que os cientistas se debruçam sobre os erros do passado em busca de novos conhecimentos.

Os conceitos estruturantes

Gagliard (1986), ao propor um ensino centrado nos conceitos estruturantes considera que eles se constituem como um meio para distinguir as concepções em diferentes sistemas de conhecimento, além de fornecerem aos estudantes uma base para continuarem aprendendo quando se libertarem da mediação do professor.

A análise dos trabalhos de Carnot e Clausius evidenciaram a necessidade de se estabelecerem “eixos racionais” (os estruturantes) que identificamos como: *analogia, transformação, natureza do calor, sistema, processo e matematização*. Destes, pretendemos destacar **processo** com foco na reversibilidade e irreversibilidade que pode ser detectado em fenômenos termodinâmicos especialmente escolhidos para a análise pretendida.

O estruturante **processo** também foi identificado na análise de conteúdo de respostas escritas dadas pelos estudantes pesquisados à questão:

Temos duas canecas com água até a metade; numa delas a temperatura da água é de 10°C e na outra é de 30°C. As quantidades de água são misturadas numa das canecas e a temperatura da mistura fica num valor intermediário. Como fazer para que os líquidos voltem a ficar separados e com as mesmas temperaturas iniciais?

A seguir, descrevemos parte dessa análise que interessa para esse trabalho:

Processo¹:

¹ A Termodinâmica considera como processo a mudança pela qual o sistema passa de um estado de equilíbrio para outro. A série de estados através dos quais um sistema passa durante um processo é denominada de percurso do processo. Para descrever um processo de forma completa é preciso especificar seus estados inicial e final, bem como o percurso que ele segue, além das interações com a vizinhança. Quando um processo se desenvolve de forma que o sistema permaneça infinitesimalmente próximo a um estado de equilíbrio em todos os instantes, ele é denominado processo quase estático.

Nos estudantes:

A questão citada anteriormente pretendia colher além das noções de reversibilidade e Irreversibilidade², presentes nas argumentações escritas dos estudantes, as ideias implícitas sobre processo. A análise mostrou que para os sujeitos analisados essa ideia está condicionada à ação de um experimentador que deveria separar a água nas duas porções iniciais, para em seguida proceder-se às “variações de temperatura necessárias”. Portanto, sem essas “ações externas” o retorno às condições iniciais não seria possível, como é revelado nas respostas:

A - “Separam-se os líquidos, aquece-se um copo até chegar a 30°C e resfria-se o outro até chegar a 10 °C.”

B - “Primeiro, separe os líquidos. Depois, pegue um termômetro e meça a temperatura. Se um estiver mais frio, do que deveria estar, aqueça-o ao fogo. Se o outro estiver mais quente do que deveria estar, coloque-o em uma vasilha com gelo. Sempre cheque a temperatura com um termômetro.”

Percebe-se que o **processo** é descrito de forma *narrativa* condicionado à ação de um experimentador para separar a água nas duas porções iniciais, para em seguida proceder-se às “variações de temperatura necessárias”. Portanto, sem essas “ações externas” o retorno às condições iniciais não seria possível.

Isso mostra que os elementos contidos na narrativa e que a justificam são escolhidos em função do contexto de tal forma que não se distanciam dos fatos observados na vida diária, o que constitui-se como um obstáculo a ser removido”, pois o hábito da narrativa é uma característica herdada do pensamento verbal, onde a ausência do registro escrito leva os sujeitos nas sociedades não alfabetizadas à função social da memória e do esquecimento (GOODY e WATT, 1968).

Esse hábito revela-se como um obstáculo na medida em que sua persistência mostra uma *estrutura* erguida com bases oriundas de um passado remoto, que em Bachelard corresponde à característica *interioridade*. Havendo portanto, a necessidade de *ruptura* por parte dos estudantes para que a visão da ciência seja compreendida.

Alguns alunos apresentam ideias mais elaboradas quando respondem com base nos componentes microscópicos dos corpos. Neste caso, aproximam-se, apesar de muito remota, da noção científica processos irreversíveis como “algo” relacionado ao arranjo interno das substâncias, como pode ser visto na resposta.

“Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno! Uma hipótese bem... (ininteligível)... que pode haver é a seguinte: junto com a água quente ou a outra água pode-se colocar uma espécie de corante, ou algo parecido, que demonstre a diferença. Mas acho pouco provável a veracidade deste fato.”

Preocupações com o arranjo interno das substâncias, como veremos em Clausius, foi fundamental para que ele, após muitos anos de trabalho, definisse o conceito de entropia.

Em Carnot:

No trabalho de Carnot percebe-se a necessidade de acompanhar o sistema desde a sua fase inicial e final através de considerações inteiramente distanciadas do senso comum, cujas evidências para o estudante requer que muito trabalho seja feito para a sua compreensão.

² A ideia de processo reversível na Termodinâmica é claramente explicitada no trabalho de Carnot, no qual o sistema pode retornar às condições iniciais pelo mesmo caminho levando-se em conta que a cada ponto, ao longo da trajetória, corresponde um estado de equilíbrio. Um processo que não satisfaça essas exigências é irreversível. Esse último mereceu uma especial atenção nos trabalhos de Clausius.

Em seu trabalho Carnot critica os esforços empreendidos na época sobre as “máquinas de fogo”, afirmando que não havia uma teoria consistente sobre elas. Tais esforços visando seu aperfeiçoamento eram feitos de forma aleatória e confusa. Além disso, segundo ele, uma teoria confiável deveria também ser válida para qualquer outra máquina como ocorria na teoria existente, na Mecânica, para as máquinas simples. A partir daí passou a tecer considerações sobre as partes de uma máquina a vapor “ordinária”, estabelecendo o princípio de que a produção do movimento é sempre acompanhada do “estabelecimento do equilíbrio no calórico”. O significado desse equilíbrio aparece na passagem (os grifos são nossos):

(...)o que acontece em uma máquina a vapor quando está em atividade? O *calórico*, fornecido pelo corpo quente, atravessa as paredes da caldeira, dá lugar à formação de vapor, ao qual se incorpora. O vapor, arrastando-o consigo, leva-o primeiro ao cilindro, onde cumpre uma determinada função e depois transporta-o ao condensador, onde se liquefaz ao contato com a água fria que ali se encontra. Por último a água fria se apodera do calórico desenvolvido na combustão. Ela se esquentava por meio do vapor como se estivesse diretamente sobre a fonte quente. Aqui o vapor é apenas um meio para transportar o calórico. (CARNOT,1987, p. 40, tradução nossa)

A passagem mostrada torna claro que Carnot se refere ao calor “calórico” como produtor de “potência motriz” que se faz sem que haja um consumo deste. O que ocorre é seu transporte “inalterado” de uma fonte quente para uma fonte fria, que ele denomina de “restabelecimento de equilíbrio”, ou seja, é preciso que seja feita sua recondução à fonte quente, o que configura a necessidade de se introduzir o ciclo fechado que será descrito através de duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas, eliminando-se no processo qualquer perda, utilizando para isso uma analogia com as máquinas simples.

Em Clausius

Na edição de 1868 da *Theorie Mécanique...*, Clausius introduz o conceito de desagregação que se refere ao arranjo dos constituintes moleculares dos corpos como pode ser visto na passagem):

...temos de examinar mais profundamente os fenômenos através dos quais o calor pode produzir trabalho. Esses fenômenos podem ser estendidos àqueles em que o calor modifica, de certa maneira, o arranjo das partes constituintes dos corpos. Assim por exemplo, por meio do calor os corpos se dilatam, suas moléculas ficam mais distantes umas das outras; devem, portanto vencer as forças de coesão e as forças externas que podem existir. (p.257)

...representaremos o grau de divisão dos corpos por uma nova quantidade que denominaremos desagregação dos corpos através da qual podemos definir a ação do calor dizendo simplesmente que ele tende a aumentar a desagregação. (p. 258. Tradução e grifos nossos)

Essas reflexões de Clausius o levaram, posteriormente, à definição do conceito de entropia (SILVA, 2009). Esse conceito resulta da equivalência entre os três tipos de transformação estabelecidos por ele: *de calor em trabalho, de calor de determinada temperatura a calor de outra temperatura, e à de desagregação*.

Entretanto, para que se compreenda os três tipos de transformação de Clausius é necessário uma ruptura epistemológica com o conceito de calórico muito presente entre os estudantes devido especialmente ao estudo da calorimetria no ensino médio. Essa necessidade de se colocar em discussão a natureza do calor já foi abordada em outro trabalho (SILVA e PACCA, 2011), pois o calórico passa a ser um obstáculo para a compreensão das leis da Termodinâmica elaboradas por Clausius.

Na nova visão, parte do calor que é transferido ao vapor pela fonte quente é utilizada para realização do trabalho e uma parte residual é transferida à fonte fria. Nem o calor cedido pela fonte quente nem o trabalho realizado, na nossa interpretação, são considerados energia, mas formas que procuram possibilitar as transformações ocorridas. A energia está nas partículas constituintes da substância de trabalho, que posteriormente será denominada de energia interna.

A questão operacional de possibilitar a compreensão pelo estudante do conceito de entropia é um problema que está longe de ser solucionado, uma vez que exige um mergulho em aspectos que fogem da maneira de se pensar os fenômenos, pois implica em explorações de questões que exigem raciocínios complexos que dizem respeito a situações microscópicas e relações que devem ser analisadas com muito cuidado.

Em 1877, Ludwig Boltzmann, elaborou um *método probabilístico* para medir a entropia de um determinado número de partículas de um gás ideal, o qual ele definiu como proporcional ao logaritmo neperiano do número de *microestados* que um gás pode ocupar: $S = k \ln W$ (em sua forma mais simples)³.

Encontram-se na literatura trabalhos que tocam em pontos relacionados à importância de se explorar o ensino da segunda lei da termodinâmica tanto no ensino médio e no superior (CARMELLO e KAWAMURA, 2010; SARAIVA e PERNAMBUCO 2008) de forma a levar o estudante a uma compreensão adequada do conceito de entropia, que frequentemente é tratado de forma inadequada em livros didáticos e entre os professores.

Caramello e Kawamura (2010) apontam necessidade da promoção de discussões nas aulas de física a partir de questões ambientais focalizando sistemas abertos, dissipação, ordem e desordem. Nesse sentido, as autoras chamam a atenção para reconsiderações sobre os conteúdos curriculares do ensino médio, no sentido de que eles contemplem adequadamente conceitos que possibilitem a compreensão das questões ambientais.

Já Saraiva e Pernambuco (2008), chamam a atenção para a importância de se considerar a história da ciência e da epistemologia para o ensino da entropia, propondo a utilização de *três momentos epistemológicos* a saber: *técnico-substancialista* em que coloca-se em evidência o processo técnico de construção e funcionamento das máquinas térmicas. *Do calor como processo e transformação*, em que, segundo os autores, abre-se uma porta para introdução do conceito de entropia pois ele está epistemologicamente associado à equivalência dessas transformações. *Da Teoria cinético-molecular* que faria a ponte entre a termodinâmica clássica e sua abordagem estatística.

Do nosso ponto de vista, com relação aos trabalhos citados nos três parágrafos precedentes, achamos que a inserção, neles, dos obstáculos epistemológicos que apresentamos pode ser uma possibilidade.

Considerações finais

A forma narrativa com que os estudantes descrevem os processos parece muito afastada da ideia de estados anteriores e subsequentes usualmente tratados por Carnot e Clausius, como revelam as respostas analisadas.

Nos estudantes, a necessidade de justificar o fenômeno por meio de relações causais subsequentes: “*Primeiro, separe os líquidos. Depois, pegue um termômetro e meça a temperatura. Se um*

³ k (constante de Boltzmann) é uma constante positiva que define a unidade em que a entropia é medida e W é a medida dos possíveis estados microscópicos que constituem o espaço de fases macroscópico do sistema.

estiver mais frio, do que deveria estar, aqueça-o ao fogo...”, será um obstáculo para a compreensão da Termodinâmica, pois tais descrições utilizam uma abordagem exclusivamente macroscópica e local e sem preocupações com o que se conserva, varia e se transforma durante o processo revelando obstáculos como: - *interioridade* (uma forma própria de pensar que revela distanciamento da forma como pensa o cientista), - *facilidade* (um pensamento que persiste em continuar “velho” na medida em que se evidencia antigos hábitos incorporados pela vivência cotidiana). Entretanto, tais conhecimentos, devido à característica *positividade* do obstáculo constitui-se como um conhecimento que, para ser rompido, é preciso ser confrontado com o científico. Além disso, a *ambiguidade* do obstáculo permite que o professor se instrumentalize de forma a alertar os estudantes sobre o que para a ciência são considerados erros. Um pouco mais ainda: pelo seu caráter *recorrente*, a identificação do obstáculo pode possibilitar, através do confronto de ideias *estudantes - cientistas* e *cientistas – cientistas*, o *reconhecimento a posteriori dos erros* o que para Bachelard é fundamental para a compreensão da forma de se pensar na ciência.

A análise do raciocínio de Carnot, mostra obstáculos em relação ao pensamento de Clausius, uma vez que ele considera que a quantidade de calor *se conserva* durante o ciclo. A adoção dessa concepção torna o calor uma variável de estado⁴. Sendo assim, a única coisa que poderia ser feita para que a substância transportadora do calórico voltasse a seu estado de equilíbrio era devolver-lhe a mesma quantidade desse fluido.

Utilizando uma terminologia mais moderna para tocar em pontos que nos parecem essenciais na direção de uma operacionalização das situações de ensino, teceremos a seguir algumas considerações sobre elementos básicos que devem conduzir a um caminho consistente para compreensão dos processos irreversíveis a partir do afastamento do obstáculo *interioridade*, revelado através da concepção substancialista dos estudantes: ... “*Se um estiver mais frio, do que deveria estar, aqueça-o ao fogo. Se o outro estiver mais quente do que deveria estar, coloque-o em uma vasilha com gelo.*” Além disso, respostas como: “*Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno! Uma hipótese bem... (ininteligível)... que pode haver é a seguinte: junto com a água quente ou a outra água pode-se colocar uma espécie de corante, ou algo parecido, que demonstre a diferença. Mas acho pouco provável a veracidade deste fato.*” Isso revela a possibilidade de construções de pontes entre o conhecimento dos estudantes e o científico possibilitando discussões sobre a teoria cinética dos gases.

A teoria cinética dos gases estabelece que a temperatura esteja relacionada com a energia cinética das partículas do corpo. No caso do contato entre dois gases ideais de temperaturas diferentes, após algum tempo, os valores médios dessas energias tornam-se iguais. Isso ocorre devido às colisões elásticas entre suas moléculas.

Esse modelo pode ser utilizado para permitir discussões sobre a temperatura de equilíbrio na questão que foi aqui apresentada. Para isso é preciso que se estabeleçam situações-problema que possibilitem a passagem de uma visão macroscópica da água para uma visão microscópica. Além disso, é necessário que se discuta o sentido da propagação do calor agora com base no modelo cinético molecular.

A definição de temperatura, como independente de qualquer propriedade da substância, relacionada aos níveis de agitação média das moléculas de uma substância só foi possível com a segunda lei da Termodinâmica. Para isso a contribuição de Carnot foi muito importante

Percebemos no raciocínio dos estudantes, um exemplo de se colocar em discussão noções pré-científicas arraigadas no senso comum, como pretende Bachelard, evidenciando-as na sala de aula,

⁴ Na história do calor a noção de variável de estado ou quantidades de estado remonta a datas muito anteriores ao século XIX, quando as mudanças de fase foram denominadas de estado, aplicando-se inicialmente às diferentes formas em que o mesmo “corpo” (ou substância) se apresenta. Para mais considerações a esse respeito ver Gibert (1982, p. 238).

confrontando-as com as dos cientistas, com todas as diferenças que possam existir entre eles, como forma de proporcionar o afastamento dos obstáculos, possibilitando a compreensão do novo.

As estratégias pedagógicas exigem disposição e criatividade do professor de forma que a compreensão da segunda lei da Termodinâmica explicitada em Carnot e redimensionada por Clausius seja uma possibilidade. Esse trabalho evidenciando a necessidade de se levar para sala de aula reflexões *sobre o significado de processo termodinâmico*, procura mostrar que sua extensão a outros estruturantes poderá fazer com que as brumas da incompreensão possam ser reduzidas.

Referências

- ASTOLFI, J. P. **El “Error”, um médio para ensinar** – Colección Investigación y Enseñanza. Espanha. Diada, 1999.
- BACHELARD, G. **A epistemologia**. Edições 70. Lisboa 1971.
- CARNOT, S. **Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia** y otras notas de carácter científico (Introducción, traducción y notas de Javier Odon Ordóñez). Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- CLAUSIUS, R. **Theorie Mécanique de la chaleur**. Gauthier – Villars, Paris, 1888.
- CLAUSIUS, R. **Theorie Mécanique de la chaleur**. Librairie Scientifique, Industriale et agricole. Eugène Lacroix, éditeur, Paris, 1868.
- GAGLIARD, R. Los Conceptos estructurales en la aprendizaje por investigación. **Enseñanza de Las Ciencias**, 4 (1), pp. 30-35, 1986.
- GIBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1982.
- GOODY, J. & WATT, I. **The consequences of literacy**. In literacy in traditional societies. Cambridge university Press New York, 1968.
- CARMELLO, G. W. & KAWAMURA, M. R. D. Uma abordagem da Termodinâmica para discutir o meio ambiente. **Anais do XII EPEF**. Águas de Lindoia, Sp. 2010.
- PIETROCOLA, M. Construção e Realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**. Vol. 4, N. 3. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.
- SARAIVA, Z. e PERNAMBUCO, M. Uma perspectiva histórica e epistemológica para o ensino de entropia no ensino médio. **Anais do XII EPEF**. Curitiba, Paraná. 2008.
- SILVA, D. N. **A Termodinâmica no Ensino Médio: Ênfase nos processos Irreversíveis**. São Paulo. Dissertação de mestrado apresentada no Instituto de Física/ Faculdade de Educação da USP. São Paulo, 2009.
- SILVA, D. N. **Ensino e aprendizagem da Termodinâmica: questões didáticas e contribuições da história da ciência**. Tese de doutorado apresentada no Instituto de Física/ Faculdade de Educação da USP. São Paulo, 2013.
- SILVA, D. N.; PACCA J. L. A. O ensino da termodinâmica e as contribuições da história da ciência. Trabalho apresentado e publicado nos anais do **VIII ENPEC/I CIEC**, Unicamp, Campinas. São Paulo, 2011