

O ENSINO DA TERMODINÂMICA E AS CONTRIBUIÇÕES DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA

THE TEACHING OF THERMODYNAMICS AND THE CONTRIBUTIONS OF THE HISTORY OF SCIENCE

*Djalma Nunes da Silva*¹

*Jesuína Lopes de Almeida Pacca*²

¹USP/Instituto de física/Ensino/*djalmaparana@usp.br*

²USP/Instituto de física/Ensino/*jepacca@if.br*

Resumo

Para o avanço significativo na compreensão do conteúdo de física, torna-se necessário, algumas vezes, possibilitar que os estudantes tenham acesso a uma concepção diferente daquela que vinha sendo utilizada. A concepção anterior passa a ser vista, então, como uma barreira a ser vencida. É nessa direção que este trabalho aponta, ao procurar responder à questão: Como possibilitar, aos alunos do ensino médio, a compreensão das diferentes concepções de calor e de como utilizá-las adequadamente para melhor compreensão da termodinâmica? Esse trabalho oferece subsídios para elaboração de estratégias que visem à superação dessa barreira. Para isso selecionamos nos trabalhos de Carnot e Clausius fragmentos que visam ativar nos estudantes a percepção de que a concepção de calor como “calórico” precisa ser redimensionada quando se pretende compreender as leis da termodinâmica e que nesse caso, o papel organizacional da matemática durante a elaboração dessas leis é preponderante não podendo, portanto, ser ignorado.

Palavras-chave: Concepções de alunos e cientistas; Papel da matemática na física; Ensino-aprendizagem da termodinâmica.

Abstract

For the significant advance in understanding the content of physics, it is necessary sometimes to allow students to have access to a different conception of what was being used. The previous design is now seen then as a barrier to be overcome. This is the direction that this work points, by seeking to answer the question: How to enable, to high school students, the understanding of different conceptions of thermodynamics? This paper provides background for the elaboration of strategies aimed at overcoming this barrier. We chose the works of Carnot and Clausius fragments that activate students in the realization that the concept of heat as “caloric” needs to be resized when you want to understand the laws of thermodynamics and in the case, the organizational role of mathematics during drafting of these laws is preponderant and can not therefore be ignored.

Keywords: Conceptions of students and scientists; Role of mathematics in physics; Teaching and learning of thermodynamics.

Introdução

Sabe-se que no ensino de física geralmente se utiliza a concepção substancialista de calor ao se abordar o conteúdo da calorimetria. Recorrendo à história da termodinâmica, verifica-se que essa concepção aparece na teoria do calor-substância elaborada por Wolff no início do século XVIII, recebendo a denominação de calórico. Ela impregnaria toda matéria e era indetectável quando o corpo estivesse em equilíbrio térmico. Sua detecção só seria possível através de sua permutação com outro corpo quando o equilíbrio térmico fosse rompido (Astolfi & Develay 1991).

Entretanto, tal concepção se constitui como uma barreira quando se pretende atingir estágios mais avançados na compreensão dos fenômenos térmicos como aqueles relacionados às leis da termodinâmica. Para esse caso, é preciso uma visão não substancialista, pois implica em se fazer ajustamentos às ideias de transformação e equivalência alicerçadas na conservação da energia. Essas ideias emergiram da eferescência experimental sobre fenômenos térmicos durante a primeira metade do século XIX e que contrariavam a concepção de calor como calórico. Além disso, a adoção da concepção energética permite uma interessante abordagem do papel organizacional da matemática na elaboração de leis pelos cientistas.

Acreditamos que chamar a atenção para esse aspecto organizacional poderá contribuir também para a diminuição das queixas de muitos professores de que seus alunos não aprendem física por falta de conteúdos de matemática.

Achamos que por trás das queixas há uma visão distorcida do processo de aprendizagem, dos conceitos de física e de matemática e, também, de didática, segundo a qual a tarefa do professor seria unicamente transmitir os conteúdos conceituais da disciplina; as necessidades educacionais seriam de outras ordens e responsabilidade de outrem.

A nossa hipótese é que essa situação é causada pela ausência de conhecimentos das concepções prévias dos alunos, da não confrontação desses conhecimentos com os dos cientistas durante a elaboração das teorias e de como eles utilizaram a matemática durante a sua investigação. Como esse processo se distancia da forma como o ensino tradicional é geralmente efetuado, não nos causa estranheza que os alunos se sintam alheios ao processo e passem a estudar somente para “terem sucesso nas avaliações”.

Nessa perspectiva, os conteúdos de física não devem ser apresentados aos estudantes como um conjunto de verdades imutáveis, mas sim, como um sistema explicativo válido em determinada época (Garret 1998).

Além disso, acreditamos que substituição de um sistema explicativo por outro se faz através do que denominaremos de *estruturantes*, sendo a Matemática, muitas vezes, um elemento revelador do aspecto colaborativo das teorias de diferentes épocas nessa construção. Os conceitos estruturantes, utilizando a terminologia de Kuhn (2000), são determinados a partir da análise das teorias científicas que são utilizadas pela ciência normal levando-se em conta as diversas etapas históricas.

A história da ciência permite visualizar quais são os conceitos que têm permitido as transformações de uma ciência, a elaboração de novas teorias, à utilização de novos métodos e novos instrumentos conceituais.

Sendo assim, pressupõe-se uma concepção epistemológica que vê o desenvolvimento da ciência como resultado de transformações estruturais profundas (Kuhn 2000), que não somente mudam as teorias, como “determinam novos

observáveis”. A realidade a analisar evidencia mudanças conceituais e novos fenômenos são levados em consideração.

Por fim, acreditamos que o levantamento dos estruturantes pode se constituir numa forma de permitir a superação de obstáculos epistemológicos e, ao mesmo tempo, ser uma base para continuar aprendendo (Gagliard 1986). Acharos que um ensino fundado em conceitos estruturantes deve reduzir os temas a ensinar para permitir que se dedique mais tempo ao desenvolvimento da capacidade de raciocínio dos alunos.

Elementos históricos: Carnot, e Clausius

Os relatos apresentados a seguir sobre Sadi Carnot e Rudolf Clausius foram baseados em recortes dos trabalhos de Fox (1978), Aurani, (1985), Brush (2003), Prigogine e Stengers, (1994) e Kuhn (2011). Eles se relacionam com a atividade que será proposta posteriormente neste trabalho.

Sadi Carnot em seu trabalho “*Reflexions sur la puissance motrice de feu*” no início do século XIX, forneceu a base do desenvolvimento da termodinâmica. Seu ponto de partida foram estudos realizados por cientistas da Inglaterra sobre aperfeiçoamentos das máquinas térmicas. Nele, sublinha que tais estudos partem de tentativas intuitivas, com um forte componente de acaso e sem a preocupação de recorrer a uma sistematização teórica apresentando falhas que precisavam ser sanadas, levando-o a focalizar sua atenção na busca de respostas às seguintes perguntas: 1- “*seria a potência motriz do calor ilimitada ou haveria um limite para ela?*” 2 - “*existiriam agentes preferíveis ao vapor d’água para a produção da força motriz do calor?*”. Na busca das respostas para essas questões, Carnot acabou por estabelecer o princípio segundo o qual a “*produção da potência motriz é decorrência do transporte inalterado do calórico de um corpo quente a um corpo frio*”.

O seu trabalho forneceu valiosa contribuição ao introduzir a noção de ciclo reversível cuja ideia fundamental reside no fato de que na produção de potência motriz a substância motora utilizada deve retornar às condições iniciais. Essa ideia evidencia a necessidade de uma intervenção teórica no fenômeno analisado, uma vez que o funcionamento de uma máquina real não favorecia, por si só, a visualização desse requisito, pois a substância motora nunca era exatamente a mesma, já que o vapor era sempre renovado. A conclusão de Carnot sobre a potência motriz do fogo é a de que só são relevantes as temperaturas envolvidas, a despeito das substâncias utilizadas, dos mecanismos empregados nas máquinas e do desenho e constituição de suas peças. Tal conclusão é muito surpreendente quando se considera que durante aproximadamente cem anos considerou-se que a melhoria da potência das máquinas restringia-se a inovações sobre esses elementos.

Entretanto, o trabalho de Carnot apresenta uma concepção de calor como “calórico” que não estava de acordo com o novo quadro que surgia no começo do século XIX, em que se verificava uma efervescência experimental sem precedentes. Muitos experimentos contrariavam a ideia de que o “calórico” fluía, de forma inalterada através do motor, entre as fontes quentes e frias tal como água que cai entre dois níveis diferentes, fazendo mover um moinho. Uma nova descrição que se ajustasse às novas ideias sobre a conservação da energia se tornava necessária.

Tal descrição foi efetuada por Clausius. Nesta nova forma evidenciava-se um processo compensador de conversão que restituía o motor ao seu estado mecânico e térmico inicial. Às relações de balanços exprimindo a conversão de energia juntam-se desde então, novas relações de equivalência entre dois processos, *fluxos de calor entre as fontes e conversão de calor em trabalho*, cujos efeitos se compensam do ponto de vista do estado *físico-químico* do sistema.

A interpretação de Clausius se reveste de uma significação muito profunda, que terá repercussões importantes: a natureza é um reservatório inesgotável de energia térmica, mas, a despeito de sua conservação que se verifica nas suas diversas transformações, não podemos dispor dessa energia sem condições. Diferença alguma de energia pode ser criada sem destruição de uma diferença ao menos equivalente. No ciclo de Carnot, o trabalho produzido paga-se com um *fluxo* de calor que *diminui* a diferença de temperatura das fontes. O trabalho mecânico produzido e a diminuição da diferença de temperatura estão ligados *idealmente* por uma *equivalência reversível*: a mesma máquina, funcionando ao contrário, pode restaurar a diferença inicial, consumindo o trabalho produzido.

Reunindo as conclusões de Carnot, e tendo em vista as discussões sobre a necessidade de se preocupar com a natureza do calor, Clausius reelaborou a termodinâmica em torno da ideia de transformação, equivalência e conservação, o que possibilitou formalizações das leis da termodinâmica, revelando o papel preponderante da matemática como estruturante da sua teoria. Tal reelaboração só foi possível através do rompimento com o conceito substancialista de calor e a adoção de uma concepção energética como algo que se conserva na natureza permitindo transformações que tem como consequências sua perda de qualidade e conseqüentemente sua busca a um estado de equilíbrio que redundaria na morte térmica do universo.

Em seus trabalhos Clausius evidenciou uma nova linguagem para a Física: a de que, contrariamente às transformações mecânicas em que os ideais de conservação e de reversibilidade coincidem como é o caso do princípio de conservação da energia, é necessário ir além. É preciso achar um meio de exprimir a distinção entre fluxos “úteis” àqueles que compensam exatamente uma conversão e os fluxos “dissipados”, perdidos, os que uma inversão do funcionamento do sistema não poderia reconduzir à fonte quente. É este o papel da função de estado que ele denominou de *entropia S*.

Entretanto, Carnot e Clausius em seus estudos protegeram os sistemas dos fluxos que constituem a natureza, pondo-o numa redoma. Elaboraram uma termodinâmica que é categorizada hoje como “termodinâmica do equilíbrio”. No mundo que conhecemos, o equilíbrio é um estado raro e precário. No mundo real a regra é o “não equilíbrio”. Sabe-se hoje, que a natureza viva, a hidrodinâmica, a ciência dos fluxos e da turbulência, a meteorologia, e a ciência da desorganização das massas de ar em função dos fluxos de matéria e energia descrevem a natureza como sede de fluxos incessantes que a constituem como ativa e organizada. Sabemos, no entanto, que a intervenção teórica que isolou o sistema do resto do universo, levou Carnot e Clausius a darem contribuições valiosas para a compreensão do funcionamento das máquinas térmicas e forneceu a base do desenvolvimento da termodinâmica, gerando conseqüências e indagações que se alastraram e redundaram na termodinâmica do “não equilíbrio” cujo tratamento não cabe nesse trabalho.

As concepções dos estudantes e a relação da Matemática com a Física

Astolfi & Develay (1991) afirmam que o conceito de calor, inclusive na atualidade, sempre teve um duplo estatuto: 1- *Calorimétrico*, que apresenta uma abordagem experimental dirigindo-se rapidamente às medidas e se utilizando de uma concepção de calor como uma substância, o “calórico” e 2 - *Energético* mais voltado à pesquisa de novas causas, dependente de um encaminhamento modelizador, no qual se introduz resultados de experiências.

Para muitos problemas, a assimilação do calor como substância (calórico) continua eficaz. Mas, em contrapartida, essa visão impede que se compreenda a equivalência entre o calor e trabalho mecânico, dificultando a compreensão das leis da termodinâmica. Portanto, quando se pretende abordar tais leis é preciso que se introduzam questões relativas à natureza do calor para que os estudantes, ao conhecerem as diferentes concepções, tenham acesso de forma significativa à formalização dessas leis.

Sobre o papel estruturante da matemática na física, concordamos com a posição de Feynman (2000). Para ele, todas as leis da física têm um caráter matemático e para um físico uma lei de conservação significa que existe um número que se pode calcular num dado momento e que, embora a natureza passe por uma grande profusão de mudanças, se voltarem a repetir o cálculo, o resultado é o mesmo, sendo esse número, portanto, invariante. Um exemplo é a lei da conservação da energia expressa na primeira lei da termodinâmica.

Das muitas pesquisas educacionais realizadas sobre as concepções dos estudantes sobre termodinâmica e sobre o papel da matemática na Física cada uma delas percorrendo diferentes caminhos, destacaremos sem pretensão de esgotar o assunto, duas delas: de Silva(2009) e de Carmo (2006).

Utilizando uma linha de investigação voltada ao levantamento das ideias dos estudantes que já tinham tido acesso ao conhecimento formal das leis da termodinâmica, Silva (2009), através da análise de conteúdo das respostas dadas a questões abertas, organizou um quadro de ideias de onde retiramos duas que interessam para esse trabalho que são: **sistema** centrado no objeto e ideia **substancialista** de calor.

Em seu trabalho, Silva (2009) aponta que as ideias da física desenvolvidas e apresentadas por estudantes que já passaram pelo estudo formal das leis da termodinâmica, continuam ligadas à concepção de calor como “calórico” quando respondem perguntas relacionadas às leis da termodinâmica.

Das muitas respostas dadas pelos sujeitos de pesquisa à pergunta:

*“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?”*¹, destacamos a mostrada a seguir:

¹ Para a obtenção de mais exemplos sobre as concepções dos estudantes recomendamos a leitura completa do trabalho de Silva (2009).

“Coloca metade em outra caneca e deixa uma delas num ambiente a 10°C e aquece a segunda, com ajuda de um termômetro, até os 30°C”

Nessa resposta, ao citar um ambiente a 10°C como um “local frio”, o aluno utiliza a ideia de que, o ambiente, por ser frio, tornará a água da caneca também fria. Ao afirmar que a segunda caneca deverá ser aquecida até os 30°C, revela, diferentemente da física, que calor e frio são entidades diferentes e associadas ao ambiente, comprometendo o sentido dos fluxos entre o ambiente e o sistema. Mas, percebe-se o aspecto substancialista, significando que frio e calor podem entrar, sair ou serem retirados dos objetos.

A ideia substancialista de calor como “calórico” apresentada pelos estudantes no trabalho de Silva (2009) foi categorizada como próxima da utilizada por muitos cientistas da corrente calorimétrica como apontaram Astolfi & Develay (1991), podendo ser utilizada no tratamento de muitos fenômenos da termodinâmica.

Essa concepção, como já vimos, foi utilizada por Carnot em seu estudo sobre as máquinas térmicas e o trabalho de Silva (2009) revela a persistência dela na maioria dos estudantes, mesmo dos que já avançaram no estudo do assunto e já tiveram contato com as leis da termodinâmica.

Entretanto, Clausius, diferentemente de Carnot, utilizou outra concepção, partindo de ideias de transformação e equivalência, ancoradas na conservação da energia, para chegar à formulação das leis.

Nesse caso, a concepção de “calórico” perde seu poder explicativo comprometendo a compreensão dessas leis. Isso nos leva à hipótese de que é necessário ativar formas de se discutir questões relativas à natureza do calor antes que essas leis sejam apresentadas aos estudantes.

O trabalho de Silva (2009) também evidencia que, ao discorrer sobre fenômenos termodinâmicos, os estudantes não fazem considerações consistentes sobre possíveis interações entre o ambiente e o sistema. Essas considerações só aparecem quando abordam a transferência de massa através da mudança de fase da substância ou quando se referem ao contato entre o objeto de estudo e um local quente ou frio. A ausência de considerações consistentes sobre as interações entre o sistema e o ambiente leva a barreiras, como observaram Pacca e Henrique (2004), em um trabalho envolvendo o conceito de energia mecânica, ao apontar a dificuldade do senso comum de traduzir a realidade para o sistema.

Utilizando outra linha de investigação, Carmo (2006) revela como a concepção substancialista pode ser utilizada como recurso didático, possuindo forte poder explicativo no estudo da calorimetria. Pretende-se também, possibilitar que o estudante realize a fusão entre signo e referente ao observar como se deu o processo de estruturação matemática dos conceitos físicos, incluindo os produtos dessa matematização – equação fundamental da calorimetria – e as atitudes envolvidas – enxergar o fenômeno nas linguagens matemáticas, semelhantemente ao que ocorreu nos laboratórios científicos que Roth (2003) investigou.

O trabalho de Roth (2003) mostra que os cientistas, na medida em que se familiarizam com o fenômeno, a coleta de dados e os resultados gráficos, tendem a tratá-los de forma indistinguível, passando a ver o fenômeno na representação criada e esquecem os passos que o produziu, fundindo, portanto o signo e o referente.

Acreditamos que, no contexto escolar, devem-se criar condições para que o estudante adquira meios que também o leve a essa fusão.

Em sua pesquisa, Carmo (2006) também analisa trabalhos em que os estudantes são colocados em situações consideradas próximas do fazer dos cientistas e que leva em conta uma aprendizagem que envolve a participação dos alunos *em grupos* na (re) construção dos conhecimentos que trazem de sua experiência pessoal. Trata-se de uma *investigação científica adaptada à sala de aula numa aula de laboratório aberto*. Acrescenta-se a isso outras características da Ciência, como, por exemplo, a da argumentação científica (Capecchi, 2004).

Apoiado em investigações que apontam que não se faz e não se comunica ciência somente pela linguagem oral ou pela escrita, Carmo enfatiza que ela contém, ao mesmo tempo, um componente verbal-*tipológico* e outro matemático-gráfico-operacional-*topológico*. Com isso, estar no mundo da Ciência é combinar discurso verbal, expressões matemáticas, representações gráficas e visuais e operações motoras no mundo natural.

Colhendo contribuições dadas pelos trabalhos de Silva, de Carmo e da história da ciência que já vem sendo pesquisada há algum tempo apresentando bons resultados como aponta Gagliard (1998), propomos mais um caminho. Tal caminho leva em conta *o papel das concepções dos alunos, de Carnot, Clausius e da matemática como elemento organizacional na elaboração de leis físicas ao se adotar o estatuto energético de calor*, como tentativa de obtenção de resposta para a pergunta: *Como possibilitar, aos alunos do ensino médio, a compreensão das diferentes concepções de calor e de como utilizá-las adequadamente para melhor compreensão da termodinâmica?*

A transposição para o contexto escolar

Que aspectos essenciais de um processo que envolve elementos de análise de conteúdo, com base nas ideias dos estudantes e dos cientistas durante a elaboração da termodinâmica devem ser levados em conta em sala de aula durante uma atividade sobre conhecimentos de física? Como, na elaboração de leis da termodinâmica é possível evidenciar para esses estudantes, o papel organizacional da matemática levando-se em conta a concepção energética?

Para responder a essas questões na sala de aula, recorreremos à transposição didática (Chevallard, 1985), para propor uma atividade na qual se procura colocar em evidência conclusões de diferentes cientistas sobre termodinâmica em diferentes etapas de sua história: as de Carnot, com suas reflexões sobre o funcionamento das máquinas térmicas e as de Clausius com suas leis da termodinâmica. Os aspectos essenciais sobre conteúdo de termodinâmica a ensinar se relacionam a aspectos históricos, tendo a matemática como um elemento *estruturante*, segundo a concepção de Gagliard (1998) como foi já apontado anteriormente nesse trabalho, acrescentando-se a isso o fato de que os conhecimentos prévios dos alunos devem fazer parte do início do processo. Além disso, elementos relativos a questões tipológicas e topológicas do trabalho de Carmo (2006), podem ser utilizados quando se pretende independente da natureza do calor, utilizar as ideias de Carnot no tratamento do ciclo reversível como, por exemplo, na utilização de gráficos e suas interpretações.

A atividade proposta consistiria inicialmente da apresentação de um problema aberto contendo perguntas relativas ao conteúdo da termodinâmica. Tal problema leva em consideração: 1- ser aberto, ou seja: conter características que se apoiam em aspectos históricos contidos nos trabalhos de Carnot e Clausius, servindo como ponto inicial da atividade proposta. 2- tocar em aspectos relacionados à natureza do calor. 3 - apresentação da formulação das leis destacando o significado físico de cada parcela e aquelas relacionadas ao que se conserva e ao que varia durante o processo. Um exemplo desse problema é:

De que maneira podemos mostrar que:

A)O movimento da água que cai de uma cachoeira e que é utilizado para mover um moinho é equivalente, na descrição de Carnot, ao movimento do calor entre a fonte quente e a fonte fria, produzindo o movimento do êmbolo?

B)Trabalho mecânico e calor se equivalem?

C)Um copo metálico contendo água quente colocado sobre uma mesa de uma sala se diferencia de uma garrafa térmica totalmente fechada contendo água quente?

D) A descrição de Clausius sobre o funcionamento da máquina térmica se assemelha e se diferencia da descrição de Carnot?

E)Cada termo da expressão $\Delta U = \Delta Q - \tau$ se diferencia do significado de calor utilizado por Carnot?

O item A tem como finalidade colocar em evidência a ideia de que, tanto na máquina hidráulica como na térmica descrita por Carnot movimento gera movimento, sem que nenhuma transformação seja verificada nos dois casos. A analogia que se estabelece aqui é que, na máquina térmica o calórico se movimenta inalterado da fonte fria para a fonte quente, fazendo girar o motor, tal como a água que cai entre dois níveis diferentes faz mover um moinho.

É aqui que podem ser colocadas as indagações de Carnot: qual máquina dará o rendimento ideal? Quais são as fontes de perdas? Quais são os processos que têm como consequência que o calor flua sem produção de trabalho? Segundo Prigogine (1994), o pai de Carnot, Lázaro Carnot, concluíra que, para uma máquina mecânica ter melhor rendimento, é preciso que sua construção e seu regime de funcionamento sejam tais que os choques, atritos, mudanças bruscas de velocidade sejam evitadas ao máximo. A máquina térmica ideal, por seu turno, evitará todo contato com corpos de temperaturas diferentes. O ciclo será concebido de tal forma que nenhuma alteração de temperatura resulte de um fluxo direto de calor entre dois corpos de temperaturas diferentes. Tal é o ciclo ideal de Carnot. Para tal ele divide-o em quatro fases: duas isotérmicas e duas adiabáticas.

Na sala de aula, obviamente, alguns procedimentos devem ser elaborados para dirigir o raciocínio e o pensamento dos alunos, por exemplo:

1 - utilizar diagramas PV onde possa ser discutido como pode ser calculado o trabalho em fases isotérmicas e adiabáticas e em transformações cíclicas. Aqui os aspectos topológicos e tipológicos que aparecem no trabalho de Carmo poderiam ser explorados.

2- no diagrama PV do ciclo de Carnot, comentar cada fase evidenciando as etapas motrizes, em que a dilatação da substância de trabalho empurra o êmbolo e as etapas em que ocorre compressão até que a temperatura do sistema volte à inicial.

No item B poderia ser distribuída a alunos, reunidos em pequenos grupos, uma figura sobre a experiência de Joule. Trata-se de um ponto cujo objetivo é colocar em cheque a ideia substancialista. Textos que relatam outras experiências realizadas no século XIX e que levem à discussão sobre as ideias relativas à conservação da energia podem ser utilizados. O capítulo 4 do livro *A tensão essencial* (Kuhn 2011) pode ser interessante.

O item C pretende que as argumentações dos alunos levem a discussões sobre sistemas abertos e fechados, como pontos de partida para se discutir que Carnot e posteriormente Clausius, trabalharam com sistema fechado. A Exploração dos fluxos de calor entre o sistema e o ambiente pode ser feita através do que ocorre com a temperatura da água no copo e na garrafa. Em seguida, figuras sobre o recipiente com êmbolo utilizado por Carnot poderia ser posteriormente utilizados para aprofundamento.

Com o item D seria possível explorar como Clausius descreve o ciclo de Carnot no novo quadro da conservação da energia. A sua contribuição está na descoberta de que a necessidade de duas fontes e a fórmula do rendimento ideal enunciada por Carnot traduzem o problema específico dos motores térmicos: a obrigação de um processo compensador da conversão, daí a necessidade de uma fonte fria que restitua o motor ao seu estado mecânico e térmico inicial. Às relações de balanços exprimindo a conservação da energia juntam-se novas relações de equivalência entre dois processos; fluxo de calor entre as fontes e conversão de calor em trabalho, cujos efeitos se compensam. Estas discussões abarcam o nascimento da termodinâmica. Quanto à semelhança entre as duas teorias, é a de que se pretende evidenciar que ambos isolaram o sistema.

Como fechamento desse item, deverão ser fornecidos textos de aprofundamento sobre o significado da natureza do calor com o intuito de dar mais ênfase sobre diferença entre as concepções substancialista e a energicista e apontar novas ideias que surgiram a partir daí.

No item E, o nível de elaboração da resposta é mais profundo que os dois anteriores. Aqui o propósito é provocar uma discussão sobre a variável de estado U , energia Interna que depende apenas do estado inicial e final do sistema, destacando que calor e trabalho são variáveis que dependem do caminho efetuado pelo sistema durante o processo. O destaque está em evidenciar que a expressão matemática da lei resulta na adoção de um invariante: a energia e que as parcelas do segundo membro da equação decorrem das visões de transformação e equivalências introduzidas por Clausius. Trata-se do momento em que se evidencia o papel estruturante da matemática no trabalho do cientista. É importante ressaltar que a questão se insere no bojo de uma discussão sobre o conceito de energia que mobilizou um número muito grande de cientistas do século XIX.

A resposta à pergunta feita anteriormente sobre quais os aspectos essenciais de um processo investigativo que levem em conta o papel organizacional da matemática devem ser considerados em sala de aula durante uma atividade sobre conhecimentos de física, pode finalmente ser dada.

Tais aspectos estão nos procedimentos utilizados pelos cientistas durante a elaboração das teorias e na relação existente entre diferentes concepções dos conceitos

em diferentes períodos e a necessidade de produção de uma sistematização cuja consistência abarque uma generalização que se consubstancia através de uma expressão matemática que exhibe uma regularidade da natureza. No nosso caso os aspectos essenciais são os conhecimentos necessários e relevantes que levam a uma conclusão que se expressa através da linguagem matemática como síntese reveladora do comportamento da natureza.

A busca do papel estruturante da matemática para a compreensão da física é revelado pela história da ciência que mostra que isso pertence ao fazer da própria física e não ao tratamento isolado e estanque desses dois sistemas de conhecimento. Isso requer que o professor abandone antigas práticas e passe, ele mesmo, a trabalhar numa perspectiva integradora, em que os aspectos revelados em trabalhos como os de Silva (2009), Carmo (2006) e os contidos nas investigações dos cientistas sejam levados em consideração, pois, sem os quais, a compreensão dos conceitos físicos poderá ser comprometida.

O exemplo da termodinâmica mostra que a construção do conhecimento se dá por sucessivas revisões e críticas dos conhecimentos existentes, revelando uma complexidade que se fez necessária para se chegar a novos sistemas explicativos que deem conta da solução de novos problemas. Tal processo, como já foi dito, não pode ser ocultado dos estudantes e é papel do professor conduzir a aprendizagem nesse sentido.

Considerações finais

Esse artigo procurou evidenciar que o desenvolvimento científico possui raízes fortemente ancoradas em concepções oriundas do passado e que foram se complexificando no decorrer do tempo, ocupando a matemática, nesse processo, um lugar de destaque.

O nosso enfoque centrou-se na crença da grande contribuição que a história da ciência pode oferecer para o ensino e do quanto ela revela do aspecto estruturante da matemática para a elaboração de uma lei ao evidenciar a íntima relação entre matemática e física.

O trabalho do professor consistiria em encaminhar, através de atividades adequadas, respostas a perguntas através de conhecimentos mediadores da física e da matemática que no processo de estruturação se revelam estreitamente relacionados. Além disso, é importante salientar que a relação entre o conhecimento anterior (concepções dos alunos e de Carnot) e o posterior (trabalho de Clausius) não significa um processo cumulativo de conhecimentos, mas numa substituição de uma forma de pensar por outra que depende do contexto e revelam facetas desconhecidas ou não muito claras do processo anterior.

Ao trabalhar com os gráficos, o professor deve procurar ativar os recursos tipológicos e topológicos dessa linguagem. Dentre os recursos tipológicos têm-se as variáveis pressão e volume. Já entre os recursos topológicos, os valores das variáveis, a forma da curva com suas inclinações e a organização visual.

Ainda sobre a atividade apresentada nesse trabalho, podemos levantar a seguinte questão: é preferível dizer que a calor é um fluido ou é energia? Sob um determinado ponto de vista, o fluido é preferível quando se estuda calorimetria como ocorre no

trabalho de Carmo. Por outro lado, para compreender as leis da termodinâmica quando de sua formulação inicial, a concepção energética é preferível e aí o calor aparece como algo que se transforma e perde qualidade para que outra grandeza, a energia, seja conservada.

Sem pretender que o estudante seja um cientista, o trabalho procura mostrar uma situação racionalizada e simplificada pela qual passam os cientistas durante a resolução dos problemas da ciência; isto possibilitaria uma mínima familiarização com o trabalho científico e seus resultados.

Os textos históricos podem servir para colocar os estudantes na problemática com a qual os cientistas se defrontaram. Assim é possível levar os estudantes ao levantamento de hipóteses e à compreensão de uma construção coletiva do conhecimento e à sua socialização. Os textos de apoio dariam embasamento teórico sobre a atividade desenvolvida.

A atividade proposta pode ser uma resposta possível para a questão central desse artigo: *Como possibilitar o acesso, aos alunos do ensino médio, a uma concepção de calor diferente daquela até então utilizada, para que se avance mais na compreensão da termodinâmica?* No contexto de tal atividade a matemática aparece como recurso do pensamento para estruturação das teorias físicas o que torna provável que os componentes didáticos propostos na atividade possam ser utilizados como referência para outros conteúdos da física.

Referências

- ASTOLFI, J. P.; DEVELAY, M. *A Didática das Ciências*. Papirus, Campinas, 1991.
- AURANI, K. M. *Ensino de conceitos: estudo das origens da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII*. Dissertação (Mestrado em ensino: modalidade Física) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 1985.
- BRUSH, S. G. *The Kinetic Theory of Gases. An antology of Classic Papers with Historical Commentary*. Imperial College Press. London (2003).
- CAPECCHI, M.C.M. Argumentação numa aula de Física. In: CARVALHO, A.M.P. (ed.). *Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004b. p. 59-76.
- CHEVALLARD, Y. *La transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble: La Pensée Sauvage, 1985.
- CARMO, A. B. *A Linguagem Matemática em uma Aula Experimental de Física*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Faculdade de Educação. São Paulo, 2006.
- FEYNMAN, R. P.; *O que é uma Lei Física?* Gradiva, Lisboa, 2000.
- FOX, R. *Sadi Carnot. Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu*. Édition critique. VRIN, Paris (1978).
- GAGLIARD, R. *Los Conceptos estructurales en la aprendizaje por investigacion*. Enseñanza de Las Ciencias, 4 (1), 30-35, 1986.

_____ ; *Cómo utilizar La historia de las ciências em La enseñanza de las ciencias*. Enseñanza de Las Ciencias, 6 (3), 291-296, 1988.

GARRET, R. M.; *Resolución de Problemas y Creatividad: Implicaciones para El Currículo de Ciencias*. Enseñanza de Las Ciencias, 6 (3), 224-230,1998.

PACCA, J. L. A.; HENRIQUE, K. F. *Dificultades y estratégias para la enseñanza del concepto de energia*. *Enseñanza de las Ciencias*. 22(1): 159-166, 2004.

KHUN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo, perspectiva, (2000).
_____. *A Tensão Essencial*. São Paulo, UNESP, (2011).

PRIGOGINE, I. & STENGERS, I, *A nova aliança: a metamorfose da ciência*. Editora universidade de Brasília, 1994.

ROTH, W. M. *Competent Workplace Mathematics: How Signs Become Transparent*. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, vol.8, N2, 2003.

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, 2009.