

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
INSTITUTO DE FÍSICA  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

DJALMA NUNES DA SILVA

**ENSINO E APRENDIZAGEM DA  
TERMODINÂMICA: QUESTÕES  
DIDÁTICAS E CONTRIBUIÇÕES DA  
HISTÓRIA DA CIÊNCIA**

São Paulo  
2013

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO**

**DJALMA NUNES DA SILVA**

**ENSINO E APRENDIZAGEM DA  
TERMODINÂMICA: QUESTÕES  
DIDÁTICAS E CONTRIBUIÇÕES DA  
HISTÓRIA DA CIÊNCIA**

Tese apresentada ao programa de Pós Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em ensino de Ciências (Modalidade Física).

Área de concentração: Ensino de Ciências

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dra.  
Jesuína Lopes de Almeida Pacca

São Paulo  
2013

Autorizo a reprodução e a divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação  
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Silva, Djalma Nunes da

Ensino e aprendizagem da termodinâmica: questões didáticas e contribuições da história da ciência. - São Paulo, 2013.

Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Faculdade de Educação.

Orientador: Profa. Dra. Jesuina Lopes de Almeida Pacca.

Área de Concentração: Ensino de Ciências

Unitermos: 1. Ciência (Estudo e ensino); 2. Ensino e aprendizagem; 3. Termodinâmica (Estudo e ensino); 4. Ciência (História).

USP/IF/SBI-029/2013

## **Dedicatória**

*A meus pais José e Isaura (in memoriam) cujas ausências fazem parte do meu elã vital.*

*Aos meus irmãos e irmãs, especialmente Cielita que não poupou esforços, na minha juventude, para que nada me faltasse.*

*A Maria José, companheira, cuja presença sempre vigilante, me impede de cair no imobilismo.*

*Às minhas filhas, Luísa e Carolina, por me ensinarem a importância das desconstruções para que as coisas continuem a fazer sentido.*

*Aos meus ex-alunos, por me ensinarem, em muitas de suas respostas, a perceber onde a Inteligência se apresenta inata.*

*A Nico e a Rita, por mostrarem que a vida possui outras dimensões que a ciência certamente desconhece.*

## **Agradecimentos**

À *Jesuína Pacca*, minha gratidão pela acolhida, conselhos, dedicação, paciência, sugestões, revisões, apoio em momentos conflituosos e fornecimento de materiais que muito contribuíram para o desenvolvimento e finalização deste trabalho.

À *Regina Kawamura*, por me possibilitar a compreensão da termodinâmica do não equilíbrio, pelo incentivo na busca do novo, fornecimento de materiais e troca de ideias sobre Bachelard, Kuhn e Prigogine.

A *Ivã Gurgel*, pelas conversas, palavras incentivadoras e fornecimento de material sobre Carnot e História da Ciência.

Aos professores Alberto Villani, Anna Maria Pessoa de Carvalho, Maurício Pietrocola, Luís Carlos de Menezes, Maria Lúcia dos Santos Vital Abib, Osvaldo Frota Pessoa Jr, Genaro Guisasola, Sílvia Trivellatto e Michel Paty, de cujas aulas muitos subsídios foram coletados e de alguma maneira contribuíram para enriquecer o conteúdo desta tese.

A *Cristiano Mattos*, cujas intervenções durante os seminários de ensino me serviram de reflexões sobre a complexidade do ensino-aprendizagem.

Aos professores Elio Ricardo e Anildes Cafagne, pelas sugestões dadas durante o exame de qualificação.

Aos colegas Tassiana Genzini, Jucivagno Francisco, Gabriel Moreira, Leika Horii, Maria Christina, Anne Scarinci, Elifas Levi, Graciella e Giselle Watanabe, Josias Paiva, Wellington Batista, Alexandre Campos, pelas trocas de ideias e colaborações em reuniões de grupo, coleta de dados, congressos, simpósios e encontros.

A Igor Pacca pela colaboração no “abstract” e à Letícia Carniello pela revisão do texto.

A Lia, Ellen, Thomas e todos os funcionários do Instituto de Física que de alguma maneira contribuíram com sua disponibilidade, simpatia e eficiência.

## RESUMO

SILVA, D. N. **Ensino e aprendizagem da Termodinâmica: questões didáticas e contribuições da história da ciência**. 2013. 250 f. Tese (Doutorado). Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Este trabalho trata da questão de aprendizagem presente frequentemente entre estudantes do ensino médio e de um curso de Licenciatura em física: a dificuldade em empregar corretamente concepções científicas em questões que se referem a fenômenos termodinâmicos, mesmo tendo já passado pelo ensino desse conteúdo na escola.

A pesquisa considera a importância de estabelecer conexões entre áreas de conhecimento complementares e essenciais para promover um ensino consistente; o resgate das raízes filosóficas da termodinâmica, fazendo emergir as estruturas que permitem a elaboração de seu arcabouço teórico em diferentes períodos históricos constitui uma base da pesquisa. Esse resgate nas aulas de física proporcionaria as condições para a emergência das potencialidades criativas dos sujeitos envolvidos no processo de ensino/aprendizagem e poderiam talvez possibilitar aos estudantes fazer uso dos conceitos científicos quando necessário.

A análise das pesquisas de Kuhn sobre a conservação da energia e do conceito de obstáculo epistemológico de Bachelard reforçou nossa crença na importância de revolver o passado da ciência na busca das estruturas que sustentam a produção científica de uma época.

Essas estruturas orientam a análise do corpus da pesquisa constituído pelas respostas escritas dos estudantes, para questões de termodinâmica e pelas ideias encontradas nos originais de Carnot e Clausius; o levantamento dos estruturantes, bem como as contribuições de outras pesquisas didáticas, resultam em subsídios relevantes para o planejamento de boas situações de ensino. Assim espera-se poder reverter as percepções prévias inadequadas dos estudantes em outras percepções mais amplas apoiadas nos princípios organizadores do conhecimento.

**Palavras chave:** ensino de termodinâmica, concepções em Carnot e Clausius, estruturantes do conhecimento científico, obstáculos epistemológicos

## ABSTRACT

SILVA, D. N. **Thermodynamics teaching and learning: issues didactic and contributions of Science History**. 2013. 250 f. Tese (Doutorado). Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

This work is concerned with a Physics learning problem that frequently appears both among secondary school students and also with science teaching students: the difficulty for adequately using Physics conceptions regarding to thermodynamics phenomena even after this content has been seen in their school activities.

The research considers the importance of establishing connections between complementary knowledge areas that are essential for consistent teaching; a recall of the thermodynamical philosophical roots may favor the emergence of structures that have led to its theoretical framework in different historical periods and this has been taken as the basis for this research. This recall in Physics classes favors conditions for the emergence of a creative potential involved in the teaching/learning process and could perhaps enable students do use scientific concepts when necessary.

The analysis of Kuhn's research on energy conservation and on Bachelard epistemological obstacle concept strengthened our belief on the importance of looking into the past of science in search of structures that sustain the scientific production of an epoch.

These structures pointed towards an analysis of the research corpus a constituted by students answers and to thermodynamics questions found in Carnot's and Clausius's originals; the identification of such structures as well as work by other didactic research authors as relevant contributions for planning favorable teaching situations. Therefore it is expected that students inadequate previous conceptions may be reverted into broader perceptions based on knowledge organizing principles.

**Key words:** thermodynamics teaching, structuring scientific knowledge, epistemological obstacles, Carnot and Clausius conceptions.

## Sumário

<b>Considerações preliminares.....</b>	<b>2</b>
O ponto de partida.....	2
Reflexões sobre as concepções dos estudantes.....	3
As epistemologias de Kuhn e Bachelard: conceitos estruturantes.....	14
Sobre a utilização da História da Ciência .....	24
Considerações sobre complexidade, e Termodinâmica.....	26
O conteúdo dos capítulos.....	30
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>32</b>
Considerações sobre a criação, aquisição de novos conhecimentos e o papel dos estruturantes.....	32
A religação dos saberes, os conteúdos de física e o papel da epistemologia.....	45
A questão e a organização da pesquisa.....	49
Agregando a História da Ciência e Epistemologia para o ensino de física.....	50
As categorias.....	53
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>57</b>
Contribuições da História da Física e da Epistemologia, as barreiras conceituais e um panorama da ciência no século XIX .....	57
A conservação da energia .....	59
Considerações sobre o fogo, flogístico, calórico e conservação da energia .....	71
O significado de flogístico.....	74
Considerações sobre calor como calórico.....	79
O século XIX e a conservação da energia.....	86
Reflexões sobre a quantificação da conservação da energia.....	87



<b>Capítulo 3.....</b>	<b>91</b>
As construções das categorias.....	91
Revisitando o trabalho de mestrado.....	97
Os estruturantes nos estudantes .....	100
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>120</b>
Os estruturantes nos cientistas.....	120
Carnot e Clausius. Enfim, a Termodinâmica .....	120
Os estruturantes em Carnot .....	121
Os estruturantes em Clausius .....	137
As Categorias complementares: ampliação de suportes para atuação do professor.....	153
O confronto entre as ideias dos estudantes e dos cientistas.....	164
Conclusões.....	193
Implicações para o ensino.....	197
Considerações finais.....	213
<b>Notas.....</b>	<b>217</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>228</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>242</b>

*“o barro”  
toma a forma  
que você quiser*

*você nem sabe  
estar fazendo apenas  
o que o barro quer”*

*Paulo Leminsky*



Florença – Galleria dell'Accademia  
MICHELANGELO BUONAROTTI  
Prisões; O escravo que desperta



Washington – Gallery of art  
ALBERTO GIACOMETTI  
L'homme qui Marche

## Considerações Preliminares

### O ponto de partida

Este trabalho de investigação foi iniciado em fevereiro de 2010 tendo como fonte inspiradora nossa dissertação de mestrado: A Termodinâmica no ensino médio: ênfase nos processos irreversíveis (SILVA, 2009).

Nela, partindo-se da análise das respostas produzidas a três questões apresentadas (ver anexo) a estudantes do terceiro ano do ensino médio e do primeiro ano do curso superior de licenciatura em Física, foi possível explicitar concepções que serviriam a dois propósitos: estabelecer relações com as ideias de Carnot e Clausius ao longo da elaboração da teoria da Termodinâmica, bem como compará-las com as da Termodinâmica hoje aceitas.

As concepções dos estudantes e de suas relações com um modelo mais articulado foram organizadas em um quadro (ver anexo), tomando como base a análise dos textos de Carnot e Clausius, por sua importância para a compreensão das leis da Termodinâmica.

O modelo encontrado no estudo realizado permitiu identificar alguma ressonância entre as ideias dos estudantes e a concepção de calor como substância “o calórico”, presente nos trabalhos de Carnot.

No que se refere a Clausius o estabelecimento dessas relações revelou-se mais complexo, uma vez que exigia a adoção da ideia de energia como “conservação no meio de mudanças”, expressão utilizada por Lindsey (1975) e que está ausente nas argumentações dos estudantes, pois quando eles se referem a ela o fazem da mesma forma que se referem ao calor, ou seja: a ideia de que o corpo “tem alguma coisa” que dá ao outro por meio de um processo onde a individualidade de cada corpo é absoluta.

A dissertação termina apresentando subsídios que foram considerados de relevância pedagógica, pois podem contribuir para a melhoria do ensino da Termodinâmica no ensino médio. Sugere também que, com esses subsídios, os professores elaborem atividades especiais que possam tocar em pontos conflitantes entre as concepções dos estudantes e o conhecimento científico,

com vistas à promoção de mudanças na estrutura cognitiva do sujeito tornando-o capaz de utilizar as concepções científicas apreendidas não só dentro da escola como fora dela.

No contexto escolar, acreditamos que as atividades realizadas pelos estudantes devem visar à possibilidade de transformação do seu sistema cognitivo de forma que ele possa adquirir instrumental adequado que permita novas formas de ver o mundo à sua volta. Essas novas visões poderão levá-los a uma participação positiva e fecunda nas transformações necessárias que levem à melhoria da sua qualidade de vida e dos outros seres, da convivência social e da participação na construção de uma sociedade mais justa, tolerante e solidária (SILVA, PACCA 2012).

### **Reflexões sobre as concepções dos estudantes**

O trabalho aqui desenvolvido tem certa continuidade com esses resultados e nos levou a um aprofundamento sobre as concepções dos estudantes bem como suas consequências para o ensino e a aprendizagem das ciências. Verificamos, por meio de leituras de artigos e pesquisas produzidos nas últimas décadas, que muitos deles, de forma semelhante à de nossa dissertação, estão fundamentados na Epistemologia genética de Jean Piaget. Eles procuram estabelecer relações entre alguns momentos do desenvolvimento histórico de ideias científicas e as concepções manifestadas pelas crianças e pelo senso comum de adultos relativa às mesmas ideias.

Martins (2004), ao se referir a trabalhos das décadas de setenta e oitenta do século passado, considera que, em alguns deles, verifica-se o início de uma linha de investigação na qual o pensamento do estudante passou a interessar mais que *as estruturas mentais ou operatórias subjacentes, iniciando-se uma linha de investigação que ficou conhecida movimento de concepções alternativas.*

Esse autor assinala a grande repercussão que teve o trabalho de Driver e Easley na área de educação em ciências ao defender as concepções alternativas desvinculando-as porém, *diferentemente do que faziam muitos investigadores na época, da teoria dos estágios de desenvolvimento de Piaget.*

Uma das constatações verificadas durante esse período foi de que essas concepções eram *resistentes a mudanças* (MARTINS, 2004).

Martins (2004), ainda aponta que os trabalhos sobre concepções alternativas poderiam ser classificados em:

- i) *Os que apresentam ressonâncias ou não com ideias científicas;*
- ii) *Aqueles que as analisam internamente sem relacioná-las com um sistema externo.*

O trabalho de Posner e seus colaboradores (1982), segundo Martins (2004), se fez notar por fazer comparações entre a *concepção piagetiana dos processos de assimilação e acomodação e os períodos de revolução científica e de ciência normal de Kuhn para desenvolver estratégias de ensino* com vistas à promoção de uma mudança conceitual. Entretanto, verificou-se um malogro de tal proposta, uma vez que as estratégias de ensino sob esse enfoque não atingiram o objetivo esperado. Tal fracasso levou à dúvida sobre a eficiência do modelo de mudança conceitual. Verifica-se a partir daí inúmeras críticas a esse modelo e ao construtivismo de bases piagetianas devido principalmente a fracos resultados que se verificam quando os estudantes são solicitados a relacionarem o conteúdo científico apresentado na escola ao mundo à sua volta.

Autores como Villani (1992) e Pacca (2006) descrevem a mudança conceitual como um processo complexo que envolve gradativamente graus de abstração cada vez mais elevados com os quais haveria a manutenção das concepções alternativas por parte dos estudantes, que as utilizam muitas vezes fora do contexto escolar. Sob essa perspectiva, pode-se dizer que se trata de uma questão em aberto que mereceria pesquisas mais aprofundadas que melhor fundamentassem as críticas.

As críticas permitiram o surgimento de trabalhos que defendiam pontos de vistas diferentes sobre a construção do conhecimento científico (LINDER 1993; DRIVER et al 1994, MORTIMER 1995 e 1996, MORENO e WALLDEGG 1998), o que confirma o caráter complexo do processo de aprendizagem conceitual, e muitas investigações sobre o tema ainda são realizadas oferecendo diversas opções de estratégias, algumas sugerindo o abandono desse modelo.

Pietrocola (1999) comenta que, apesar de atualmente existirem algumas tentativas de se revalorizar a mudança conceitual dentro do movimento construtivista, poucos resultados práticos têm sido obtidos. Segundo esse autor, *o que parece problemático na forma de atuar sobre esse tipo de questão, é que a vinculação entre conhecimento científico e realidade do mundo não consta como uma das teses principais desse movimento. E mesmo trabalhos presentes nesse contexto não conseguem integrar a questão da realidade com os processos de construção pessoal de conhecimento. Ou seja, há dificuldade em se integrar a dimensão ontológica do conhecimento com a cognitiva.*

Incentivar os alunos a perceberem que o conhecimento científico ensinado na escola serve como forma de interpretação do mundo que os cerca, afirma Pietrocola (1999), *seria uma maneira de lidar com a dimensão de realidade do mundo.* Pois, em geral, os alunos não veem as teorias científicas como capazes de gerar explicações plausíveis sobre situações conhecidas. Segundo esse autor, *a cor do céu, a eletricidade atmosférica, os diferentes tipos de materiais presentes no cotidiano não são temas tratados no ambiente escolar e acabam recebendo explicações pessoais, influenciadas por crenças, mitos e todo tipo de informação não científica.*

Pietrocola (1999) diz ainda que *o conhecimento científico não é apreendido pelos estudantes e, em muitos casos, leva-os a conclusões contrárias aos dos cientistas. Isso evidencia a dificuldade que eles têm de abandonar suas concepções alternativas, pois, em parte, elas acabam permitindo certa aproximação com a realidade. Percebe-se, em relatos de professores, que a Ciência continua restrita às situações escolares em que está sempre sendo superada por formas de conhecimento menos sistematizadas.* Sobre esse *abismo* entre a forma de visão de realidade do senso comum e dos cientistas faremos a seguir algumas considerações.

Ao descrever as diversas formas de realismo, Hessen (2012), aponta uma denominada *realismo crítico* segundo a qual *existem, no mundo, objetos que são independentes das teorias e da consciência.* Nessa perspectiva, nem todas as percepções que são captadas através dos sentidos estão presentes, de fato, nas características desses objetos. *As qualidades apreendidas por meio dos sentidos como cor, som, odor, sabor etc., existem apenas na consciência.* Elas surgem através de estímulos externos sobre os órgãos

sensíveis, que, na interação com a consciência produzem condicionamentos que resultam em atribuir ao objeto a posse de determinada qualidade. Isso faz com que o verde das folhas de uma planta, por exemplo, seja tomado como uma característica de cada folha e não algo que se estabelece através de uma rede de relações entre o objeto, o meio circundante e os órgãos perceptivos, ou seja, como algo que precisa ser explicado através de *reflexões* que levem a argumentações mais consistentes que transcendem a percepção imediata.

A *raíz* do realismo crítico, afirma Hessen (2012), se encontra na antiguidade sendo Demócrito (470-370) um adepto dessa visão, ao sustentar que a origem de tudo está nos átomos que deveria ser uma entidade com *características quantitativas* e era através deles que as coisas deveriam ser explicadas e não através dos sentidos que se vale de aspectos *qualitativos*.

A visão de Demócrito, entretanto, não se impôs na filosofia grega, pois, segundo Hessen (2012), havia predominância da influência de Aristóteles que defendia um *realismo natural*, que não diferencia conteúdo perceptivo e objeto. Nessa visão, é absurdo admitir que a folha não seja verde.

A visão aristotélica prevaleceu por um longo período até a Idade Moderna quando, inicialmente através das reflexões de Galileu, passou-se às considerações de que a matéria apresenta exclusivamente *aspectos quantitativos e espaço-temporais*, sendo as outras propriedades meramente subjetivas, atestando um *ressurgir* da teoria de Demócrito (HESSEN, 2012).

*As perspectivas galileanas ampliaram-se com Descartes e Hobbes, passando a serem mais bem fundamentadas e ampliadas, sendo disseminada por John Locke que, segundo Hessen (2012) estabeleceu uma distinção entre qualidades que denominou de:*

- **primárias**, correspondentes a *tamanho, forma, movimento, espaço, número* e que possuem caráter objetivo e é determinante dos objetos.

- **secundárias**, correspondentes à *cor, som, odor, sabor, maciez, dureza etc.*, de caráter subjetivo.

Segundo Hessen (2012), *as qualidades secundárias têm lugar apenas em nossa consciência, ainda que possam apresentar elementos de correspondência nos objetos.*

Há outra variante do realismo denominada realismo ingênuo em que Hessen (2012) afirma que *nele o problema sujeito-objeto ainda não surgiu*

*claramente e não ocorre a distinção entre aquilo que está presente na consciência e o objeto percebido. Como identifica os conteúdos de consciência no objetos, acaba atribuindo aos objetos todas as propriedades que estão presentes nos conteúdos. As coisas são, nesse caso, exatamente como são percebidas. Aqui o verde da folha, por exemplo, é fixada como qualidade objetiva.*

As considerações feitas por Pietrocola (1999) de que os trabalhos sobre mudança conceitual não conseguem integrar a questão da realidade com os processos de construção pessoal de conhecimento, ou seja, que há dificuldade em se integrar a dimensão ontológica do conhecimento com a cognitiva, talvez seja a causa do aparente malogro do modelo de mudança conceitual nos leva à busca de um caminho que possivelmente contribua para a superação desse problema.

Para isso, consideraremos que, durante as atividades escolares que focalizam conceitos científicos, que no nosso caso são os relacionados à Termodinâmica, não se pode desconsiderar que tais conceitos são elementos descritos através de representações, elaborados pela Ciência aplicando-se a fenômenos físicos. São construções que se valem, entre outros aspectos, de considerações qualitativas e formais encontrados na Matemática e na Lógica.

A construção desses conceitos requer que o pensamento esteja em constante atividade que leve à compreensão, através deles, dos fatos que os tornam críveis. Para isso deve-se utilizar elementos simbólicos que se relacionam. *Sendo assim, os conceitos se apresentam como símbolos racionais abstratos que vão além dos signos que os representam, pois são constituídos de significados complexos que os tornam, para o pensamento, substitutos da realidade exterior concreta tornando-os de certa maneira, igualmente concretos através da experiência e na história* (PATY, 2012). Acreditamos que para que isso se efetive, um possível caminho é o que leva a uma nítida relação entre o signo e o referente, ou seja: é necessário que se estabeleça atividades que possibilitem reflexões sobre as relações existentes entre eles

Numa outra perspectiva, Bachelard (1974) afirma que o real não é capturado pela Ciência. *Ela direciona e organiza nosso intelecto de maneira que nos aproximamos do real. A realidade do mundo está sempre para ser*



*retomada por meio da racionalidade e seu significado faz-se em função da organização do pensamento.*

Já para o senso comum, a realidade objetiva é aquela que se apresenta aos sentidos; o real aparente faz parte do senso comum. Portanto, para Bachelard, será essencialmente a partir do rompimento com esse conhecimento comum que se constituirá o conhecimento científico.

A realidade para se constituir, segundo Bachelard, necessita que se recorra a diferentes formas racionais. Ela possui diferentes níveis: *em um objeto tal como se apresenta aos nossos olhos, podendo ser tocado, possuindo lugar e forma definidos, é diferente da de uma molécula, que para ser compreendida é necessário uma teoria molecular a ela subjacente.*

Ao se referir ao pensamento de Bachelard sobre a questão da realidade na ciência, Lopes (1990; 1994) aponta que *as ideias de moléculas, átomos, elétrons etc., em Bachelard é outra realidade, que não pode ser compreendida sem o uso da razão.* Além disso, na *Ciência contemporânea o real científico se concretiza na relação sujeito-objeto mediado pela técnica.* Os fenômenos são produzidos pela Ciência por meio de *um instrumento mediador* evidenciando seu caráter instrumental e teórico numa relação em que a influência do sujeito é mediada pela técnica, trata-se de fenomenotécnica<sup>1</sup> (BACHELARD, 1974).

Bachelard (2002), ao se referir aos *obstáculos epistemológicos*, do qual falaremos mais adiante, afirma que *o espírito científico trava uma batalha contra eles procurando vencê-los.* E isso se constitui como um *conjunto de erros retificados.* No decorrer do desenvolvimento científico há sínteses que parecem absorver o empirismo, tais como as sínteses da Mecânica e da Astronomia. Entretanto, de repente algo não dá certo, Mercúrio parece não obedecer as previsões da gravitação de Newton, de cuja mecânica a segunda lei da Termodinâmica também parece contradizer. Fenômenos fotoelétricos enfraquecem a concepção ondulatória, os campos não se quantificam, os fenômenos da vida parecem contradizer as leis da Termodinâmica do equilíbrio.

---

<sup>1</sup> Segundo essa concepção o cientista não é um mero contemplador da natureza, mas sim aquele que constrói fenômenos que sequer existem naturalmente, transcendendo ao objeto dado. Esse processo de construção se faz por uma dupla via, instrumental e teórica: há um instrumento mediando a relação sujeito-objeto e uma teoria capaz de permitir a compreensão do fenômeno e do instrumento (Lopes, 1990; 1994).

Esses aspectos contraditórios, na nossa forma de ver, deveriam chegar à sala de aula. Os professores deveriam perceber a importância do ensino das descobertas ao longo da História da Ciência como pontos a serem colocados em discussão. Com isso pretendemos que o aluno adquira a capacidade de inventar, além de mostrar-lhe que descobrir é bom. A busca de atividades alternativas que levem a reflexões nessa direção pode ser uma das possíveis formas de superação da crise atual do ensino de Física.

Um exemplo alternativo de atividade que toca na problemática de se substituir formas de explicação não científicas por outras aceitas pela Ciência, no caso específico do ensino da Termodinâmica que, tendo sido o objeto da nossa dissertação e continua sendo no presente trabalho, é aquele que se baseia em três pontos, a saber:

- apresentação de um problema relacionado ao cotidiano extraescolar dos estudantes para que possam explicitar suas concepções;
- relação do problema apresentado com o contexto da época em que o cientista foi levado à elaboração de conceitos e teorias. A preocupação aqui é levar em conta que aprender ciência não é para saber o que a última geração de cientistas pensava. Mas sim, possibilitar certo grau de participação no processo de invenção e descoberta em que a história ocupa um lugar de destaque para o nosso propósito, pois seu objeto não é senão o conjunto das atividades humanas ligadas de forma inseparável às diversas representações simbólicas, apreendidas em determinado momento e local. A história lança mão, inicialmente, para caracterizar seus objetos e seus métodos, às construções simbólicas cuja memória ela se propõe preservar. Para isso recorre a interpretações e à hermenêutica, mas, procurando a objetividade possível quanto às fontes e arquivos, que são os registros concretos e escritos das produções e das consequências dessas representações simbólicas em suas relações e diversidades.
- fornecimento de elementos mediadores apropriados que levem os estudantes à compreensão de que a Ciência possui modelos próprios sobre a realidade do mundo que diferem de outros existentes na sociedade e tocar em pontos relativos ao papel da Matemática na elaboração de uma lei física.

Com esses pontos pretendemos colocar os estudantes em uma situação em que possam explicitar as suas visões e confrontá-las com as da Ciência de forma que possam perceber as diferenças entre elas, ampliando o seu leque de conhecimentos de modo a utilizá-los de forma conveniente quando necessário. A elaboração das estratégias para que isso ocorra deve proporcionar a *compreensão de outras formas explicativas sobre o mesmo fenômeno sem pretender impor brusca supremacia do conhecimento científico sobre outro*. A História da Física mostra que durante suas diferentes etapas históricas houve diversas formas de compreensão sobre os mesmos fenômenos. O desenvolvimento do conceito de calor é um exemplo disso. Quando se pretende apresentar as leis da Termodinâmica, a nossa tese é de que, se a natureza do calor não for colocada em discussão, a compreensão dessas leis fica comprometida.

Além disso, deve-se ter em vista a possibilidade de se oferecer condições para que estudantes aprendam a relacionar suas concepções com as do cientista e em que situações os problemas deverão ser solucionados utilizando-se as concepções científicas.

Mas como compor um trabalho que possa abarcar os três pontos apontados acima? Em busca dessa resposta procuramos diversas fontes, sendo as principais:

- a nossa dissertação de mestrado que passa a se constituir como dado empírico do nosso trabalho (SILVA, 2009). Dela extraímos as concepções dos estudantes e dos cientistas (Carnot e Clausius). Além disso, acrescentamos contribuições colhidas na ampliação bibliográfica especialmente dos trabalhos de: i) Nascimento (2003) por apresentar estratégias de ensino relativas à natureza do calor utilizando textos científicos nas aulas de Física do ensino médio; ii) Carmo (2006) como exemplo de um processo de ensino por investigação guiada, por fornecer elementos que podem dar embasamento significativo quando se pretende explorar matematicamente as leis da Termodinâmica;
- os estudos históricos de Thomas Kuhn (2000, 2003, 2011), e a Epistemologia de Gaston Bachelard (1971). Kuhn, além de nos chamar a atenção para a base científica sobre a qual emerge o

discurso propriamente científico, nos mostra, em seus estudos, os pontos que levaram teorias científicas ser modificadas e as consequências que isso acarreta em termos de visões sobre os conceitos de uma determinada entidade que o novo paradigma oferece. Há paradigmas que dominam o conhecimento científico durante certa época, e as grandes mudanças acontecem quando um paradigma cede seu lugar a outro. Às vezes, basta uma simples troca, como a troca entre o Sol e a Terra, para derrubar determinada concepção de mundo.

- preocupações com a transposição didática. Para isso nos utilizamos das ideias de: 1) Gagliard (1986); 2) Astolfi (1999). O primeiro focaliza os cursos de ciências segundo a ideia de obstáculo epistemológico de Bachelard e os conceitos estruturantes. *Esses conceitos são aqueles que, tendo sido construídos pelos estudantes, determinam uma ampliação do seu sistema conceitual que permite continuar com a aprendizagem.*

Um ensino fundamentado nos conceitos estruturantes requer a redução dos temas a ensinar para permitir que haja mais tempo no desenvolvimento da capacidade de reflexão dos estudantes. Em outras palavras, as construções desses conceitos pode ser um caminho para afastar as barreiras que impedem a apreensão de uma nova forma de ver o mundo que não a do senso comum e também de teorias científicas que foram substituídas por outras. As ideias de Gagliard nos levaram à crença de que os obstáculos são elementos estruturantes que podem ajudar o professor a determinar conteúdos de ensino que deverão ser abordados em suas estratégias com pretensão não só a destacá-los, como confrontá-los com vistas à sua remoção quando necessário.

Em Astolfi nos interessa análise dos variados estatutos que podem ter os erros escolares e como seus efeitos podem ser conduzidos de maneira positiva como elementos importantes de aprendizagem, pretendendo-se com isso, identificar suas causas e origens. Além disso, acreditamos que o erro parece ser uma

boa forma de analisar modelos pedagógicos para a melhoria da atuação docente.

Complementando essas considerações e levando em conta que nossa expectativa é promover a significativa *compreensão* dos conceitos científicos em suas diferentes etapas históricas por parte dos alunos, chamou-nos a atenção considerações feitas por Martins (1999), sobre a importância do interesse do aluno pelo conteúdo que deverá ser abordado. Em um trabalho denominado *“explicando uma explicação”* essa investigadora alerta para o fato de se levar em conta que, na sala de aula, *o estudante é colocado, na maioria das vezes, numa posição de quem necessita de informação ou conhecimento, porém esse conhecimento não é determinado por ele, mas por programas curriculares*. Quando se pretende construir situações de aprendizagem, se esse fato não for levado em consideração, corre-se o risco de o estudante não se interessar pelos problemas propostos de modo que a compreensão do novo fica comprometida, pois, afinal de contas, perceber que o estudante têm suas expectativas e conhecimentos próprios, não pode ser ignorado.

Concordamos com Martins (1999) ao apontar a importância, para os professores, de reflexões sobre como produzir, nas salas de aula, um contexto que permita que conhecimentos não solicitados pelos estudantes passe a ser interessantes para eles. *E que isso envolve que se considere a existência de diferenças entre o que o estudante sabe e o que o estudante deve saber. Ou ainda, diferenças entre o que o estudante deve saber e o que o estudante quer saber. Essas diferenças devem ser exploradas para que seja possível resolvê-las e permitir que dois pontos de vista, inicialmente incompatíveis, possam ser aproximados.*

No caso das explicações científicas, Martins (1999) diz que elas geralmente são formuladas em termos de entidades que não são familiares aos estudantes, as quais se comportam de maneira estranha num mundo distante. *Isso acontece, em parte, porque explicações na sala de aula são, frequentemente, determinadas pelas explicações científicas disponíveis.*

Fazendo a transposição das explicações, que é o foco das colocações de Martins, para a esfera da compreensão dos conceitos científicos, que é o objeto do nosso trabalho, acreditamos ser preciso fornecer recursos adequados para que o estudante compreenda conceitos que se diferenciam na maneira

como são entendidos por ele no seu dia a dia. *Entidades como átomos, pontos materiais, ondas, energia etc. precisam ser construídos, como coisas a ser compreendidas, ou seja, “coisas” sobre as quais devemos pensar.* À medida que a escolarização avança, muitas entidades científicas passam de objetos de reflexão e análise a ferramentas para o pensamento. Dessa forma, a construção das entidades é também a construção de novas formas de apreensão de outras realidades.

Na Termodinâmica encontram-se entidades como energia, calor, trabalho, entropia, que aparecem na formulação de suas leis pretendendo descrever o mundo "como ele realmente é". Contudo, as teorias científicas, como já foi apontado anteriormente por Pietrocola, descreve um mundo muito diferente daquele percebido pelo senso comum, onde a energia parece não se conservar, calor e frio parecem ser coisas diferentes, o ar parece não ter peso etc. As teorias científicas falam do mundo "por trás das aparências". Como abrir adequadamente a porta que leva a novo conhecimento?

No nosso trabalho há um interesse pela reflexão. “Quem somos nós, o que fazemos”? Essa pergunta nos leva à busca de uma Ciência crítica com vistas à emancipação do ser humano, livrando-o da dominação e sujeição. Achamos que na medida em que a Ciência coloca em primeiro plano a conquista da objetividade, ela nega, entre outras coisas, os aspectos a partir dos quais foi construída e também as condições que torna a objetividade possível.

É nessa busca que se insere nossa proposta: repensar o binômio ensino-aprendizagem de conceitos no contexto de tendências modernas de programas curriculares, pretendendo, mais que desenvolver o conhecimento do aluno, valorizar o despertar do interesse deste pela Ciência, bem como a percepção de suas interrelações com outras instituições sociais e com a tecnologia.

Quando elaboramos nossas atividades de ensino de Física, buscamos restabelecer a humanidade e as incertezas da Ciência que produzimos. Com este objetivo em mente, concebemos um ensino de tal modo que nossos alunos, convenientemente orientados pelos professores, além de fazerem experimentos, consigam elaborar hipóteses, discutir e compreender argumentos relativos aos conceitos científicos, podendo também encontrar

espaços de reflexões sobre aquilo que fazem. Essas reflexões deverão contribuir para possibilitar a compreensão do significado daquilo que aprendem para que possam decidir quais escolhas fazer quando necessário.

### **As Epistemologias de Kuhn e Bachelard: conceitos estruturantes**

Entre os cientistas há uma atitude, assinalada por Kuhn (2000), que consiste em *não considerar relevantes fatos ou dados que não se encaixam dentro do que ele denomina paradigma, mas casos isolados ou marginais de seu sistema explicativo. A não consideração desses fatos lhes permite a manutenção de seu paradigma.*

Epistemologicamente, o significado de paradigma, segundo Kuhn (2011), é o marco de pensamento definidor da “norma” de uma área de investigação e época determinada. No fundo, é o que compartilham implicitamente os investigadores de um determinado período em que suas investigações não refutam determinadas teorias, conceitos ou técnicas instrumentais, porque todos se apoiam neles. Durante esse período se desenrola o que se denomina “ciência normal”. Porém, de tempos em tempos, ocorre uma “crise” que abala essas convicções compartilhadas surgindo o que ele denominou de “revoluções científicas”.

Segundo Chalmers (1995), Kuhn considera que os paradigmas sempre apresentam dificuldades devido à existência de pontos obscuros dentro deles, e que tais dificuldades sempre ocorrem. *Apenas em condições especiais é que elas podem solapar a confiança no paradigma, configurando o estabelecimento de uma crise. Um exemplo disso é o associado ao éter e o movimento da Terra em relação a ele na teoria eletromagnética de Maxwell, no fim do século XIX.* O aprofundamento da crise ocorre quando aparece uma teoria rival. O novo paradigma será diferente do antigo e incompatível com ele. Aparecem divergências radicais de vários tipos.

Para Kuhn (2000), a construção do conhecimento científico é uma combinação entre invenção e descoberta, que remete ao surgimento de novidades, sendo a invenção inerente ao campo das teorias e leis, nas redes de significações e fenômenos, enquanto a descoberta ocorre no campo das manifestações da natureza, obtidas durante as experiências.

De acordo com Kuhn, *os comportamentos insuspeitados da natureza brotariam em meio à constância dos procedimentos de manipulação da natureza, por meio de dados discordantes e não esperados dentro dos parâmetros da Ciência normal praticada.*

Quando se muda o paradigma é muito difícil definir todos os termos e conceitos científicos utilizados em um, com o vocabulário do outro, a isso Kuhn (2003) denominou “incomensurabilidade”.

Em *O caminho desde a estrutura*, Kuhn (2003), relata como surgiu a ideia de “incomensurabilidade”. Ela veio do fato de que a hipotenusa de um triângulo retângulo isósceles é incomensurável relativamente a qualquer um dos catetos do triângulo. Da mesma maneira que o comprimento da circunferência  $\phi$  é com relação ao seu raio, no sentido de que não há nenhuma unidade de comprimento pela qual ambos os elementos do par possam ser divididos, sem deixar resto, um número inteiro de vezes. Contudo, a falta de uma medida comum não torna impossível uma comparação. Pelo contrário, magnitudes incomensuráveis podem ser comparadas dentro das limitações possíveis que se fazem necessárias.

Ao se afirmar que duas teorias são incomensuráveis significa que não há nenhuma linguagem, neutra ou não, em que ambas as teorias, concebidas como conjunto de sentenças possam ser traduzidas sem haver resíduos ou perdas. A incomensurabilidade em sua forma metafórica não implica incomparabilidade (KUHN, 2003).

Kuhn (2000), no pós-fácio de sua “A estrutura das revoluções científicas” esclarece a concepção de paradigma colocando-a como possuidora de um sentido geral e outro estrito. O primeiro, sociológico, corresponde toda constelação de crenças, valores, técnicas etc., partilhada pelos membros de uma determinada comunidade. O segundo corresponde a um tipo de elemento dessa constelação: as soluções concretas de quebra-cabeças que, empregadas como modelos ou exemplos, podem substituir regras explícitas como base para a solução dos quebra-cabeças resultantes da Ciência normal.

Ao primeiro sentido ele preferiu denominar matriz disciplinar. Disciplinar porque corresponde ao comportamento comum aos praticantes de uma disciplina na resolução de seus problemas; matriz porque se compõe de



elementos ordenados de várias espécies, cada um deles exigindo uma explicitação pormenorizada.

O quadro a seguir mostra os principais componentes da matriz disciplinar com base em Kuhn (2000) e apoiada em Ostermann (1996):

<b>Matriz disciplinar</b>	
<b>Componentes</b>	<b>Significado</b>
<b>Generalizações simbólicas</b>	<i>Comparam-se a leis da natureza e, às vezes, aparecem sob a forma simbólica, como ocorre com a equação fundamental da dinâmica <math>F=ma</math>; também podem ser expressas em palavras: a toda ação corresponde uma reação de mesma intensidade, mesma direção e sentido contrário.</i>
<b>Modelos particulares</b>	<i>São os ontológicos ou heurísticos que se utilizam de metáforas e analogias. Por exemplo, as moléculas de um gás comportam-se como pequenas bolas de bilhar elásticas movendo-se ao acaso.</i>
<b>Valores compartilhados</b>	<i>São os que os cientistas aderem. Por exemplo: predições devem ser tratadas com muito cuidado e as quantitativas são preferíveis às qualitativas.</i>
<b>Exemplares</b>	<i>Referem-se às soluções de problemas encontrados no fim dos capítulos dos manuais científicos, nas publicações periódicas, as quais os estudantes descobrem com ou sem mediação do professor durante sua educação científica.</i>

No caso dos exemplares, Kuhn (2000), aponta que a percepção pelos estudantes das semelhanças e analogias entre diferentes problemas que já

tenham demonstrado eficiência em sua aplicação, faz com que neles se apoiem para aprenderem a estabelecer relações entre símbolos e a aplicá-los à natureza. Segundo ele, a expressão  $F=ma$ , por exemplo, é um instrumento que informa ao aluno que semelhanças procurar, sinalizando o contexto dentro do qual a situação ocorre. Dessa informação resulta a habilidade para ver a semelhança entre variadas situações, fazendo com que o aprendiz passe a tratar situações problemas como um cientista.

Ostermann (1996), ao se referir à matriz disciplinar de Kuhn, afirma ter encontrado semelhanças entre a atitude dos cientistas dos estudantes ao perceber nestes últimos *um comportamento conservador que tende a manter seu sistema de equilíbrio intelectual, alterando os novos dados para adaptá-los ao seu sistema ou, simplesmente, ignorá-los.*

Segundo essa autora, *o ensino em geral esquece ou desconhece a existência desses sistemas de organização intelectual do estudante que, da mesma forma que os sistemas epistêmicos – ou os paradigmas kuhnianos – da Ciência, evoluem com o tempo e tendem a formas cada vez mais complexas e equilibradas de organização.* Entretanto, segundo ela, esses sistemas possuem duas importantes características: *capacidade de evolução e estabilidade.*

Ostermann enfatiza que a estabilidade dos sistemas de pensamento tanto do estudante quanto o do cientista *é imprescindível, sadia e necessária* e para que o pensamento e conseqüentemente a Ciência seriam impossíveis uma vez que não poderiam conservar-se as ideias que lhes dão lugar.

Entretanto, é importante frisar que o paradigma de Kuhn foi objeto de muito debate e segundo Piaget e Garcia (1987), essa noção revela mais da sociologia do conhecimento que da própria Epistemologia. Para esses autores, as ideias de Bachelard se aproximam mais de um paradigma epistêmico.

Para os nossos propósitos, à da matriz disciplinar de Kuhn será agregado o conceito de obstáculo epistemológico de Bachelard. Acreditamos que essa agregação pode tornar eficiente o resgate das raízes filosóficas da Física. Nesse trabalho pretendemos que esse resgate ocorra de forma

integrada durante as aulas de Física. Para isso faremos algumas considerações sobre a Epistemologia histórica<sup>2</sup> de Gaston Bachelard.

Bachelard (2002) foi o primeiro a indicar a importância do “obstáculo epistemológico”, e “ruptura epistemológica” no desenvolvimento da Ciência. Sua noção de ruptura além de se referir ao que ele denomina de concepções pré-científicas, ao mesmo tempo identifica como o maior obstáculo epistemológico o irracionalismo pré-científico (PIAGET; GARCIA, 1987).

Segundo Astolfi (1999), na obra de Bachelard podem ser identificadas, dentre outras, as seguintes ideias:

- *Não há verdade sem erro retificado.*
- *Ao se voltar sobre um passado de erros, se encontra a verdade em um arrependimento intelectual verdadeiro.*
- *Uma psicologia sobre a atitude objetiva é uma história de nossos erros pessoais.*
- *A essência de uma reflexão está em compreender que não havíamos compreendido.*
- *O erro só é reconhecido a posteriori. É o passado da razão que volta sobre si mesmo para julgar-se.*

Para Astolfi (1999), o que Bachelard pretende mostrar com essas ideias, é chamar atenção para a importância dos erros na construção do conhecimento. Para que eles sejam evitados, *deve se conhecer, anteriormente e de forma profunda, o que se está aprendendo.* Para Bachelard, *a mente somente pode formar-se se reformando.*

Um caminho possível para isso é a adoção da ideia de *obstáculo epistemológico* que é o *núcleo* das reflexões de Bachelard. Ela pode ser estudada no desenvolvimento histórico do pensamento científico e na prática da educação. O quadro a seguir, construído com base em colocações de Astolfi (1999), mostra as principais características dos obstáculos epistemológicos que consideramos pertinentes para o nosso trabalho.

---

<sup>2</sup> Segundo Japiassu (1991), sabe-se muito pouco sobre o significado de Epistemologia, pois se trata de uma disciplina recente e o seu conceito não possui uma significação rigorosa. Há diversas Epistemologias: genética, histórica, racionalista crítica, arqueológica etc. A Epistemologia histórica, segundo Bachelard, consiste em que, para se compreender uma Ciência do passado, devemos nos situar nos pontos de vista ulteriores. É uma Epistemologia polêmica cujo princípio está nos transtornos e embaraços por que passa a história das ciências.

<b>Obstáculos epistemológicos</b>	
<b>Características</b>	<b>Significado</b>
<b>Interioridade</b>	<i>Situa-se na linguagem verbal, na experiência do dia a dia, no inconsciente. Diferencia-se de sua origem latina “obstare” que significa “o que está adiante” a obstruir o caminho. Não é “algo contra o qual se choca o pensamento”, mas o que se apresenta como constituinte do próprio ato de conhecer, ou seja: é “uma espécie de sombra projetada pela razão”. Aqui o “erro”, torna-se importante para construção do conhecimento.</i>
<b>Facilidade</b>	<i>Refere-se ao que o cérebro está acostumado a lidar, à comodidade intelectual, a uma rede de analogias e metáforas, a uma certeza interior.</i>
<b>Positividade</b>	<i>As concepções que se diferenciam das científicas é uma forma de conhecimento como qualquer outra. Inclusive pode ser um “excesso” de conhecimentos disponíveis que já estão ali e que impedem de construir novos conhecimentos. É o que ocorre com o senso comum ao dispor de uma resposta imediata para tudo deixando em suspenso o juízo.</i>
<b>Ambiguidade</b>	<i>Apresenta-se como uma dupla dimensão; i) de ferramenta necessária e ii) fonte potencial de erros.</i>
<b>Poliformismo</b>	<i>Possui múltiplas “aderências”, tendo-se que considerar duas dimensões: 1- Transversal. 2- Psicanalítica.</i>
<b>Recorrência</b>	<i>Reside no fato de que os erros só são reconhecidos depois de cometidos, uma vez que os obstáculos foram ativados.</i>

As seis características que aparecem na tabela, segundo Astolfi (1999) foram criadas por Michel Fabre em sua obra *Bachelard Educateur* (Bachelard Educador). Sobre algumas delas, apresentamos a seguir parte de alguns comentários feitos em Astolfi (1999, p.34-39), acrescidas de algumas citações de Bachelard.

**Facilidade:** *Um exemplo disso é aquele em que se pretende dar uma explicação do funcionamento da lâmpada de Edson. Essa explicação contradiz a intuição primitiva, pois antes dela, todos os procedimentos de iluminação requeriam que algum material fosse consumido: lenha, gordura, petróleo etc. O envoltório de vidro de uma lâmpada de óleo é destinado à proteção da chama, de ativar a combustão, de evitar as correntes de ar.*

*Na lâmpada de Edson, o bulbo de vidro tem a função contrária. Ele deve evitar que matéria seja consumida ao arder, deve garantir o vácuo em volta do filamento. Isso revela a necessidade de uma ruptura epistemológica. Essa ruptura, diz Bachelard, exige um “pensar contra o cérebro”.*

**Positividade:** *Bachelard destaca que a força das afirmações primitivas não chega a eliminar-se apesar de uma nova experiência e de uma nova crítica. “Nestes raciocínios imprudentes, a resposta está mais clara que a pergunta”. Ou melhor, dizendo: “a resposta é dada antes que se torne clara a pergunta”. Isso é o que sucede na educação com a recorrência da ideia de que o nível dos alunos está baixando, quando se pretende continuar com o ensino transmissivo. O obstáculo é um “tecido de erros construídos”, tenazes e solidários, que resiste à refutação;*

**Ambiguidade:** *Bachelard aponta, como exemplo, que as formas em que os alunos (e os adultos) frequentemente apresentam as ideias de fotossíntese e nutrição das plantas estão determinadas por uma trama de obstáculos, dos quais os mais essenciais são: 1) a não percepção dos gases; 2) o pensamento categórico; 3) valorização-desvalorização seletiva, segundo os elementos.*

*O primeiro obstáculo leva ao conhecimento sistemático dos gases nos raciocínios, na medida em que não se percebe de maneira sensível, mas se pensa sem esforço nos sólidos e nos líquidos. O segundo consiste em pensar a natureza como uma série de “gavetas” distintas onde cada elemento pertence a uma categoria “natural” (sólido, líquido ou gasoso) apesar de existirem algumas exceções (como a água, que se pode encontrar no estado sólido ou líquido). O*

*terceiro conduz a valorizar mais o vivo (obstáculo vitalista) e a desvalorizar o “químico”;*

**Poliformismo:** 1) *a dimensão transversal dos obstáculos. No caso dos exemplos citados anteriormente, aqueles obstáculos não estão localizados exclusivamente na compreensão das transformações da matéria, pois a não percepção, o pensamento categórico ou a supervalorização também se encontram em outros campos e fenômenos;* 2) *psicanálise do conhecimento objetivo<sup>3</sup>. Para superar as suas representações locais, é necessário que todas as transformações das ideias intelectuais sejam igualmente uma remodelação das identidades e uma constante atualização das ideias recebidas.*

Em sua obra “A Epistemologia”, Bachelard (1971) afirma que,

*ao desdizer um passado de erros, encontramos a verdade em um verdadeiro arrependimento intelectual. O conhecimento se processa contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos malfeitos, ultrapassando aquilo que, no próprio espírito, constitui um obstáculo à espiritualização (p. 165, grifo nosso).*

Mais adiante, na mesma obra, Bachelard afirma que:

*a ideia de partir do zero para fundar e aumentar algo que se pretende, só pode vir de culturas de simples justaposição, nas quais um fato conhecido constitui imediatamente uma riqueza. Mas, perante o mistério do real, a alma não pode, por decreto, fazer-se ingênua. Torna-se então, impossível, de um só golpe, fazer tábua rasa dos conhecimentos usuais. Face ao real, aquilo que se julga saber claramente ofusca aquilo que se deveria saber. Quando se apresenta à cultura científica, o espírito nunca é jovem. É mesmo muito velho, pois tem a idade dos seus preconceitos. Ter acesso à Ciência é,*

---

<sup>3</sup> O significado de psicanálise em Bachelard difere do significado freudiano. O significado bachelardiano de psicanálise do conhecimento retira desse conhecimento o caráter subjetivo.

espiritualmente, rejuvenescer, é aceitar uma mutação brusca que deve contradizer um passado (p. 166).

**Recorrência:** *Sobre isso Bachelard formula a pergunta: os erros são ativados de verdade ou são identificados? Em todo caso há algo de metacognitivo nessa reflexão. É o que conduz Bachelard à dissociação entre “começos” e “fundamentos”. O fundamento é sempre recorrente: aparece no fim, emerge do trabalho realizado, é o que permite identificar o começo da forma que ele era: um balbucio infantil. Daí as expressões iniciais deste item, como a de “arrependimento intelectual” ou “passado da razão que volta a si mesmo para julgar-se”. A facilidade inicial é consequência de uma maior construção e é o melhor indicador do importante trabalho intelectual que foi realizado. Quanto trabalho foi preciso para que as coisas ficassem finalmente claras! (Astolfi 1999, P. 39 tradução nossa)*

Segundo Astolfi (1999), Bachelard afirma que *o primeiro contato com o objeto nos informa sobre a juventude de nossa mente. Retrospectivamente, aquilo contra o que nos chocamos, contra o que temos batalhado nos parece pueril e casual... Quando não irrisório. Não temos de que nos vangloriar; não há nada de glorioso. Por isso o inconsciente bachelardiano “É mais ignorância que conflito”.*

Do que foi dito, podemos considerar que o conjunto de tais características nos permite melhor compreender o porquê da resistência dos obstáculos e, com base neles, o caráter recorrente das concepções espontâneas dos alunos. *Longe de ser uma disfunção, é uma de suas características naturais. A resistência está na própria natureza do obstáculo e é a razão do emprego deste termo tão forte (ASTOLFI, 1999)*

Enfatizamos a necessidade de se levar em conta que em Bachelard obstáculo que não é sinônimo de dificuldade mas sim, fruto de uma comodidade intelectual; também não é um bloqueio de um sistema de pensamento. É o indicador e testemunho da lentidão, das regressões, das analogias que caracterizam um pensamento em construção. É o funcionamento natural e cotidiano do cérebro.

Deste ponto de vista pode-se definir a escola como sendo um local onde se deve aprender a refazer o funcionamento cerebral para que se adquira um ascetismo intelectual.

A necessidade da remoção dos obstáculos é vista por nós como elemento essencial que pode levar à compreensão do que se está pretendendo ensinar, sendo que para isso é necessário a confrontação das concepções espontâneas dos estudantes com as científicas. Isso pode possibilitar a percepção de que a resistência dos obstáculos está na sua natureza e é uma das razões da dificuldade de se compreender novos conceitos.

Achamos importante enfatizar a necessidade de se levar em conta que a palavra obstáculo, longe de se constituir como uma simples dificuldade ou bloqueio de um sistema de pensamento é indicador e testemunho da lentidão, das regressões, das analogias que caracterizam um pensamento em construção. Nesse sentido ele, como já apontamos, corresponde ao funcionamento natural do cérebro, salvo quando este pode basear-se solidamente em eixos racionais.

Ao se referir à vertente científica da obra de Bachelard, Japiassu (1991) afirma algo com que concordamos, que *o que dela devemos apreender é que a Ciência não é representação, mas ato. A noção de espetáculo precisa ser eliminada. Não é contemplando, mas construindo, criando, produzindo, retificando, que o espírito pode se aproximar da verdade.*

Do que foi exposto até aqui vimos que a noção de ruptura em Kuhn e Bachelard são distintas. Na perspectiva bachelardiana os longos períodos de ciência normal, intercalados por revoluções científicas, apontados por Kuhn não existem. O que ocorre é um constante desabrochar de novos conhecimentos que se faz contra um conhecimento anterior. A ruptura é com os obstáculos epistemológicos existentes no conhecimento comum ou no próprio conhecimento científico.

Para o nosso trabalho interessa:

1 - Em Kuhn: sua pesquisa a respeito da conservação da energia como descoberta simultânea que será abordada no capítulo 2; os componentes da matriz disciplinar; a ideia de que as visões se diferenciam no novo paradigma em relação ao paradigma anterior; o aspecto sociológico do conhecimento.



2 - Em Bachelard: a ideia de ruptura com os obstáculos epistemológicos existentes, redimensionado para a possibilidade de *compreensão* de outro modelo explicativo sem que isso signifique necessariamente o abandono do antigo; o papel positivo do erro na construção de conhecimento.

### **Sobre a utilização da História da Ciência**

Sabe-se que os livros didáticos de Ciência contam apenas um pouco de história, seja em um capítulo introdutório ou, mais frequentemente, em referências dispersas sobre os “grandes heróis” de uma época anterior. Dessa forma, com base nessas referências, estudantes e profissionais se acham participantes de uma longa tradição histórica, o que é absolutamente falso.

Segundo Allchin (2004), lições de História da Ciência são, muitas vezes, vistas como um remédio educacional, pela veiculação da natureza da Ciência. Mas tais histórias podem ser falhas. Em particular, muitas histórias romantizam os cientistas, inflam o drama de suas descobertas e simplificam o processo da Ciência. Eles são, literalmente e retoricamente, os mitos. Embora baseado em acontecimentos históricos reais, eles distorcem a base da autoridade científica e fomentam estereótipos injustificados. Tais histórias são pseudo-histórias. Como pseudociência, eles promovem ideias falsas sobre a Ciência – neste caso, sobre como a Ciência funciona.

Souza Filho (1987) aponta em sua dissertação que a preocupação da inserção da História da Ciência no ensino de Física já ocorre há algum tempo como pode ser visto em trabalhos de Paul Langevin, Lloyd W. Taylor, James B. Conant, Gerald Holton, Bernard Cohen, entre outros.

Souza Filho também afirma que sempre houve resistências à admissão desse enfoque na justificativa de que são meras ilustrações, ou mesmo um empecilho ao aprendizado, não representando um papel essencial na formação do estudante. Este modo de pensar, segundo esse autor, reflete-se no ensino de Física ficando bastante evidente quando se examina os textos didáticos que são utilizados normalmente nos cursos. Neles, o conteúdo necessário para se aprender a estrutura está presente, ainda que de forma linear e compartimentada, mas a referência histórica, quando feita, é quase sempre

caricatural acabando por falsear o verdadeiro processo de desenvolvimento da Ciência.

A História da Ciência ainda nos mostra que os períodos de estabilidade dos sistemas epistêmicos em que têm lugar as teorias científicas podem ter uma duração de vários séculos. As mudanças de um sistema a outro se produzem, às vezes, com grande dificuldade e lentidão acompanhadas por incompreensões e intolerâncias, como é o caso, entre outros, de Giordano Bruno, que se empenhou em defender que o imóvel podia mover-se.

Outros autores que se referem à importância da utilização da História da Ciência no ensino (RESNICK, 1983; GAGLIARD, 1988; 1986; SOLBES, 1998; 2004) se opõem à ideia de que o ensino possa e deva ocorrer tão rapidamente quanto possível sem que os estudantes possam minimamente se inteirar dos processos empregados pelos cientistas para se chegar a um conceito e quais os entraves e as questões significativas que resultaram na elaboração de uma teoria.

Resnick aponta que, além das concepções dos estudantes diferirem qualitativamente das dos especialistas, os *novatos* não são capazes de utilizar diretamente as categorias mentais dos cientistas se estas lhe forem fornecidas de imediato. Se for assim, a tarefa do ensino não será a de procurar meios didáticos adequados que possibilitem aos estudantes a compreensão de formas de pensar dos cientistas, mas sim, o de transmitir conteúdos como se a mente desses estudantes fosse um recipiente vazio a ser preenchido.

Acreditamos que o reconhecimento de que os estudantes trazem para sala de aula saberes que diferem dos da Ciência e o colocá-los diante das teorias científicas implica reconhecer e valorizar esses conhecimentos oferecendo, a partir daí, possibilidades para se compreender em que medida noções, atitudes ou métodos considerados ultrapassados foram, em sua época, uma ultrapassagem. Além disso, de que forma o passado ultrapassado continua como passado de uma atividade científica. Compreender o que foi a instrução do momento é tão importante quanto expor as razões da destruição subsequente.

Para isso é preciso que o professor passe a ter uma “função de apoio”, de modo que a intervenção tente regular-se pelo funcionamento intelectual dos alunos, a fim de melhor obter o seu progresso.

A utilização da História da Ciência no ensino da Termodinâmica não se inscreve na mesma perspectiva de uma disciplina específica, mesmo porque não se pretende aqui ensiná-la. Nossa intenção não é aumentar a quantidade de informações que os estudantes recebem, nem submetê-los a longas e cansativas aulas. Também não pretendemos apresentar biografias de cientistas famosos como se fossem gênios a ser reverenciados ou deuses difíceis de ser alcançados e compreendidos.

Somos contrários a um ensino que submete o estudante a um treinamento exaustivo esperando-se que ele entenda e domine os pontos principais de um determinado paradigma. Esse procedimento dogmático é um reflexo da atividade mais constante dos cientistas ao praticarem a Ciência normal, em que se ocupam na resolução de quebra-cabeças no interior de um paradigma e não da Ciência extraordinária em que as teorias rivais disputam entre si para obter o consenso da comunidade científica.

A História da Ciência e a Epistemologia podem ser utilizadas para a realização de um ensino não dogmático que contenha indícios das contradições no processo de elaboração de novas teorias científicas. Nessa perspectiva o objetivo não seria apenas o de introduzir o estudante às ideias aceitas e utilizadas pela comunidade científica com ênfase em seus produtos finais, mas, principalmente de tocar em pontos relacionados aos processos de desenvolvimento como uma atividade humana que encerra em si conflitos, contradições e mudanças de perspectivas.

### **Considerações sobre complexidade e Termodinâmica**

No prefácio do seu livro “Introdução ao pensamento complexo”, Edgar Morin<sup>4</sup> escreve:

Pedimos legitimamente ao pensamento que dissipe as brumas e as trevas, que ponha ordem e clareza no real, que revele as

---

<sup>4</sup> Edgar Morin, antropólogo, sociólogo e filósofo francês, realizou estudos em Filosofia, Sociologia e Epistemologia. É teórico da complexidade. Seu pensamento procura enfatizar a importância das reflexões sobre o destino do homem em todas as dimensões do conhecimento. Fundamentando-se na ideia da perda do fundamento científico, Morin aposta no fato de que as ideias destruidoras podem tornar-se ideias reconstruidoras. Seus trabalhos contêm contribuições significativas para a educação e se constituem como referências significativas nesse trabalho na medida em que, além da importância que dá à religação dos saberes, alerta para os perigos de um ensino dogmático.

leis que o governam. A palavra complexidade só pode exprimir nosso incômodo, nossa confusão, nossa incapacidade para definir de modo simples, para nomear de modo claro, para ordenar nossas ideias (MORIN, 2006, p. 5).

Essas colocações de Morin talvez revelem as situações primeiras, “complexas” da mente quando o indivíduo se depara com um problema novo.

Mais adiante, no mesmo prefácio, Morin, ao se referir ao conhecimento científico diz:

O conhecimento científico também foi durante muito tempo e com frequência ainda continua sendo concebido como tendo por missão dissipar a aparente complexidade dos fenômenos a fim de revelar a ordem simples a que eles obedecem (MORIN, 2006, p. 5).

Entretanto, Morin<sup>5</sup> aponta, no mesmo prefácio, que modos simplificadores de conhecimento mutilam mais do que elucidam os fenômenos de que tratam.

Para que se chegue a uma elucidação mais ampla torna-se necessário a introdução de elementos que foram deixados de lado durante o processo investigativo tradicional da Ciência.

Com relação a isso, entendemos que Prigogine e Stengers (1994), ao citar o panorama científico do século XIX, de alguma maneira, localizam um fato que marcou o início de uma nova visão na Ciência quando afirmam que aquele século legou-nos uma *herança conflituosa*. De um lado as leis deterministas da natureza; de outro, a entropia. *A Termodinâmica nos proporcionou uma imagem inteiramente diferente do mundo. Ao lado das leis reversíveis da dinâmica newtoniana passaram a existir leis irreversíveis que encontramos no fluxo do calor, nos fenômenos de transporte, na Química, na*

---

<sup>5</sup> Em o método II, Morin (1999), afirma que o que anima sua investigação sobre o método da complexidade é o horror do pensamento mutilado/mutilador, é a recusa do conhecimento atomizado, parcelar e redutor, é a reivindicação vital do direito à reflexão. É a consciência de que aquilo que mais falta nos faz não é o conhecimento daquilo que ignoramos, mas a aptidão para pensar aquilo que sabemos.

*biologia, nas quais o passado e o futuro podem desempenhar papéis diferentes.*

As leis reversíveis de Newton cobrem apenas uma parte do mundo em que vivemos. Elas descrevem adequadamente do movimento dos planetas. Mas, a geologia, o clima, a vida, requer que se introduza o estudo de fenômenos irreversíveis. Ao nível microscópico, descobrem-se fenômenos irreversíveis por toda parte. Na radioatividade, nas partículas elementares instáveis etc. Diante disso, é preciso aproximar as leis da Física de questões que dizem respeito a situações que envolvem a complexidade dos fenômenos existentes.

Sobre o problema de como envolver a complexidade, retomemos o prefácio de Morin e vejamos como ele se refere a isso:

Este problema, (...), não pode se impor de imediato. Ele deve provar sua legitimidade, porque a palavra complexidade não tem por trás de si uma nobre herança filosófica, científica ou epistemológica. Ela suporta, ao contrário, uma pesada carga semântica, pois que traz em seu seio confusão, incerteza, desordem. Sua primeira definição não pode fornecer nenhuma elucidação: é complexo o que não pode se resumir numa palavra-chave, o que não pode ser reduzido a uma lei nem a uma ideia simples. Em outros termos, o complexo não pode se resumir à palavra complexidade, referir-se a uma lei da complexidade, reduzir-se à ideia de complexidade. Não se poderia fazer da complexidade algo que se definisse de modo simples e ocupasse o lugar da simplicidade. A complexidade é uma palavra-problema e não uma palavra-solução (MORIN, 2006, p. 5-6).

Em continuidade ao seu raciocínio e sobre a necessidade de um pensamento complexo, afirma Morin (o grifo é nosso):

*Tal necessidade só pode se impor progressivamente ao longo de um percurso onde surgiriam primeiro os limites, as insuficiências e as carências do pensamento simplificador,*

*depois as condições nas quais não se pode escamotear o desafio do complexo.* Em seguida será preciso perguntar-se se há complexidades diferentes umas das outras e se elas podem ser unificadas num complexo dos complexos. Será preciso, enfim, ver se há um modo de pensar, ou um método capaz de responder ao desafio da complexidade. Não se trata de retomar a ambição do pensamento simples que é a de controlar e dominar o real. Trata-se de exercer um pensamento capaz de lidar com o real, de com ele dialogar e negociar (MORIN, 2006, p. 6).

Mais adiante Morin chama a atenção para interpretações erradas que podem ocorrer com relação ao pensamento complexo, procurando desfazer o que chama de “ilusões que desviam as mentes do pensamento complexo” e uma dessas ilusões, segundo ele, é (o grifo é nosso):

*acreditar que a complexidade conduz à eliminação da simplicidade. A complexidade surge, é verdade, lá onde o pensamento simplificador falha, mas ela integra em si tudo o que põe ordem, clareza, distinção e precisão no conhecimento.* Enquanto o pensamento simplificador desintegra a complexidade do real, o pensamento complexo integra o mais possível os modos simplificadores de pensar, mas recusa as consequências mutiladoras, redutoras, unidimensionais e finalmente ofuscantes de uma simplificação que se considera reflexo do que há de real na realidade (MORIN, 2006, p. 6).

Esta tese, tomando como base a colocação de Morin sobre o fato de que a complexidade integra as formas econômicas do pensamento, volta-se para o ensino da Termodinâmica clássica colocando-a nessa categoria, mas privilegiando seus pontos discordantes em relação à mecânica newtoniana. Nessa direção a História e Filosofia da Ciência nos mostram que desde o século XVIII alguma coisa mudou no estatuto das idealizações.

Surge a partir daí, a gênese de uma nova concepção de ciência, fundada sobre o princípio da conservação da energia, a qual não pretendia

mais descrever uma idealização, mas a própria natureza, inclusive as perdas. Temos em mente que a Ciência em seu período clássico, privilegiou de forma excessiva o aspecto formal de tal maneira que ainda nos dias atuais esses privilégios continuam fortemente arraigados em vários setores da comunidade científica. Sobre essa questão, chamamos atenção para a necessidade de levar em conta que há algo além da forma que precisa ser considerado.

### **O conteúdo dos capítulos**

Capítulo 1: considerações sobre a criação de novos conhecimentos com base na percepção de que, tanto nos trabalhos acadêmicos, científicos e educacionais, especialmente nas “situações iniciais” e nos “mergulhos” necessários, as metodologias utilizadas se aproximam e se distanciam do fazer artístico.

A questão de pesquisa se apresenta com foco na identificação dos estruturantes.

Capítulo 2: elementos da História da Física diretamente relacionados com a nossa questão de pesquisa apoiada na concepção de energia como “constância no meio de mudanças”, expressão cunhada por Lindsay (1975). Os elementos relacionados ao desenvolvimento do conceito de calor tomando como base o estatuto energético e o substancialista.

Capítulo 3: A construção das categorias, o trabalho de mestrado na qualidade de dados empíricos, levantamento dos estruturantes com base em elementos colhidos nas Epistemologias de Kuhn e Bachelard, complementadas pelas ideias de Astolfi e Gagliard. Os estruturantes nos estudantes.

Capítulo 4: Os estruturantes em Carnot (1824) e Clausius (1850). Ampliação da revisão bibliográfica relativa a pesquisas que trazem ideias inovadoras para o ensino da Termodinâmica. O confronto entre as ideias dos estudantes e dos cientistas. As conclusões, Implicações para o ensino e considerações finais.



*"A ciência é uma irmã caçula  
(talvez bastarda) da arte"*  
César Lattes

*"A treva mais estrita já pousara  
sobre a estrada de Minas, pedregosa,  
e a máquina do mundo, repelida,*

*se foi miudamente recompondo,  
enquanto eu, avaliando o que perdera,  
seguia vagaroso, de mãos pensas.*

*Carlos Drummond de Andrade  
(A máquina do mundo)*



René Magritte. A condição humana. 1935



## Capítulo 1

### Considerações sobre criação, aquisição de novos conhecimentos e o papel dos estruturantes

O processo de construção do conhecimento é complexo e para um sujeito individual vários fatores contribuem para que se produza nele uma necessidade de compreensão que o leve a ações que resultem no esclarecimento de situações envolvidas pelas brumas da incompreensão. Acreditamos que isso ocorre tanto no estudante quanto no cientista e ocorreu durante o desenvolvimento desse trabalho.

Entretanto, mesmo quando essa necessidade já se concretizou e as ações se tornaram rotina, cada indivíduo difere quanto aos caminhos escolhidos e as velocidades com que as ações são praticadas. Entre os cientistas a história revela ocorrências similares quando abordam problemas abertos, iniciais de uma teoria, cujas soluções ainda não foram encontradas.

Segundo Paty (2012), *os fatores mais importantes que decorrem do pensamento científico são a produção de conhecimentos novos e o fato dessa produção ser o resultado de atos de criação intelectual*. Segundo esse autor, é na História da Ciência que se deve procurar pistas que possibilitam a emergência da novidade.

Criar novidades, afirma Paty (2012), está mais fortemente relacionada com a *representação dos objetos (signo) do que com os próprios objetos (referente)*. Segundo esse autor, a falta de reflexões que levem à clara distinção entre os dois *excluiu da Ciência, durante muito tempo, a palavra criação*.

Paty (2012) afirma que *é na criação que a novidade emerge* e para isso o papel do indivíduo é fundamental. *Parece que nenhum efeito coletivo seria suficiente para explicar a emergência da novidade, pois cada cientista compreende de modo diferente as questões discutidas e os problemas a resolver: cada um deles adota um ponto de vista próprio. O que é denominado de criação se situa na solução encontrada para os problemas se constituindo como obra individual e imprevisível*.

A criação, segundo Paty (2012), tanto nas artes como nas ciências, ressalta a necessidade de nos referirmos ao sujeito. Segundo ele, *nenhum efeito coletivo seria suficiente para explicar a invenção e a criação de formas novas nas ideias, nas representações, nos objetos produzidos, que não existiam anteriormente no universo das formas simbólicas nem no mundo real.*

Acreditamos, segundo nossa interpretação do pensamento de Paty, que o fato fundador tanto nas ciências, nas artes e em outras instâncias, emerge como “invenção” que se inscreve tanto no pensamento quanto na história. Assim sendo, as atividades se desenvolvem segundo as especificidades de cada uma delas.

No campo da pintura, a análise do quadro a condição humana de Magrite, por exemplo, pode nos conduzir à percepção do relacionamento entre fatores internos e externos que podem ser percebidos nas metodologias científicas no que se refere às limitações da transposição no âmbito da representação: *o que está no quadro não é a mesma coisa que é vista através da janela do local onde está exposto. Em Magrite, a fixação dos seus objetos no espaço pictórico, exige uma operacionalização que revela o intransponível no âmbito da representação e que, no cientista, implica numa reflexão a respeito do conceito, da percepção e da representação* (GOMBRICH 1979).

Em Magrite, segundo Gombrich (1979), *é a interioridade que capta a paisagem entendida como exterior (realidade objetiva)*. Nele, a perspectiva é simulada de um lugar que não é o nosso (a superfície pictórica). O exterior é visto não através da janela do espaço expositivo. Frente à tela do artista perguntamos: *onde estamos e o que percebemos afinal?*

Passando da superfície bidimensional, como é o caso da pintura de Magrite, para o espaço tridimensional, Gombrich (1979) afirma que *Michelângelo concebia suas esculturas como se já estivessem ocultas no bloco de mármore em que iria trabalhar: sua tarefa, como escultor, consistia na remoção da parte da pedra que as cobria*. Com seu trabalho, esse artista nos proporcionou um produto final em que a forma invade o espaço, revelando a predominância de um processo em que o conteúdo material prevalece.

Já Giacometti, esculpe numa direção contrária à escolhida por Michelângelo. Percebe-se, em seu trabalho, uma invasão do espaço na forma. Segundo Silvester (2012), no homem que marcha, por exemplo, *há uma*

*espécie de centro e, fora deste, uma sugestão de massa que se dissolve. Trata-se de uma execução em que o entorno também é esculpido, quase de modo bárbaro, inacabado. Existe uma busca por uma realidade além da forma, a tentativa de criar uma arte que fosse viva.*

Tais características do trabalho desses artistas se assemelham às do trabalho dos cientista no que se refere à liberdade criadora? Ambos experimentam intervenções do raciocínio e da imaginação procurando, frequentemente, referentes na realidade objetiva?

Prigogine (2009), ao se referir ao processo criativo, diz que *na ciência e na arte ele deve ser visto da mesma forma*. Segundo ele, entre os que pensam que há diferenças está Thomas Kuhn<sup>6</sup>, ao afirmar que *há padronizações nos trabalhos dos cientistas e quando o padrão é rompido emerge contradições e discussões que possibilitam um período criativo entretanto provisório*. Prigogine acha que esse posicionamento não lhe parece correto. E exemplifica:

A questão do tempo apaixonou gerações de físicos e isso ocorreu quando ainda não havia desacordo teórico entre eles. A descrição da Ciência moderna feita por Kant talvez tenha propiciado a redução do papel da criatividade nas ciências. Com efeito, para o filósofo alemão, a Física de Newton é definitiva e implica um determinismo rigoroso. Como então incluir a criatividade num universo determinista? Eu não saberia concordar com essas visões que separam artes e ciências (PRIGOGINE, 2009[2], p.2).

Prigogine concorda com Valéry (1937)<sup>7</sup>, *que associa a criatividade a tudo que resiste ao pensamento e essa resistência que se encontra tanto na*

---

<sup>6</sup> Kuhn (2011) enfatiza as diferenças entre os trabalhos do cientista e do artista: o que quer que signifique o termo “estética”, diz ele, o objetivo do artista é produzir objetos estéticos; os enigmas técnicos são o que ele tem de resolver a fim de produzir esses objetos. Para o cientista, ao contrário, os enigmas técnicos resolvidos são o objetivo, e a estética é um instrumento para a sua consecução. Quer no domínio das produções, quer no das atividades, os fins do artista são os meios do cientista e vice-versa. Além disso, Kuhn afirma que os membros de uma comunidade científica compartilham, tanto a seus olhos como na percepção pública, um conjunto de soluções de problemas, no entanto suas respostas estéticas e estilos, em geral eliminados de seus trabalhos publicados, são, em larga medida, variados e privados. Mas alerta que esses paralelos ainda precisam ser mais acentuados e mais desenvolvidos.

<sup>7</sup> O filósofo e poeta Paul Valéry (1937), em seu *Discours sur l'Esthétique*, ao refletir sobre a condição científica da Estética e sobre a tradição clássica, aponta a importância, para uma Ciência, das ideias não

*Ciência como na arte em qualquer período. Segundo esse autor, a criatividade atravessa todas as atividades humanas embora existam diferenças entre a criatividade das ciências e a das artes.*

Ainda no mesmo trabalho, Prigogine afirma que

a noção de criatividade aparece na obra de Newton e Einstein. Newton não era newtoniano. Acreditava que Deus deveria intervir ativamente a fim de manter o equilíbrio e a estabilidade do sistema planetário. Quanto a Einstein, ele tinha uma dupla atitude. Por um lado, afirmava a existência da criatividade, por outro pronunciava-se a favor da existência de um mundo determinista e declarava que o tempo – ou a flecha do tempo<sup>8</sup> – não passava de uma ilusão (PRIGOGINE, 2009[2], p.3).

Prigogine amplia o debate aos fenômenos da vida. Segundo ele:

atualmente, em biologia, encontramos-nos confrontados com dois aspectos contraditórios. De um lado, a unidade da vida, ou seja, a similitude de estrutura dos genomas; de outro lado, a variedade da vida, que se traduz por uma extrema diversidade morfológica. O genoma da mosca se assemelha estreitamente ao genoma humano, enquanto que, em contrapartida, a morfologia do corpo da mosca é muito diferente da nossa. Do mesmo modo, o nascimento de uma nova espécie pode ser considerado um acontecimento. Parece que a vida só é possível graças ao fluxo de energia do sol, modulado pelo poder inventivo da natureza. Mais que um simples exemplo, a árvore é testemunha disso: pela elevação de seus ramos em direção à luz, ela organiza a maravilhosa transformação da luz em energia química. Nossa tecnologia está atualmente longe de se igualar à tecnologia da natureza. Sabemos hoje que a

---

científicas, pois elas permitem o retorno frutífero às intenções primeiras, aos dilemas fundamentais e aos fins mais básicos dessa Ciência. A Estética teria o caráter de ser uma espécie de Ciência do Belo, capaz de estabelecer o que é preciso amar, o que é preciso odiar, aclamar ou destruir, capacitando o homem a produzir obras de valor incontestável.

<sup>8</sup> Bunge (2000, p. 331-339) faz considerações sobre a flecha do tempo. Ele afirma que o tempo, em sua história, foi conceituado como alguma coisa que flui em vez de considerá-lo como um vir a ser.

criatividade está ligada à irreversibilidade, à quebra de simetria temporal, por meio da qual o futuro e o passado desempenham papéis diferentes (PRIGOGINE, 2009[2], p.3).

Prigogine afirma que ao se refletir sobre o que é a vida, percebe-se que nela a irreversibilidade está presente. Após Clausius, durante longo tempo, ela foi compreendida apenas como dissipação. *O mecanicismo do século XVIII é algo sem dinamismo. Mas, o surgimento da Termodinâmica do século XIX, nos legou uma uma visão pessimista. São duas visões contraditórias em relação ao mundo que observamos, no qual o inesperado e a criação são essenciais.*

Ao apresentar uma concepção de cultura como construção humana, Paul Valéry (1937) afirma que *a compreensão do mundo requer o estabelecimento de relações com as manifestações da Ciência, da religião, das artes etc.* O surgimento de uma cultura é muitas vezes impregnado de muitos elementos de outra, como aponta Edgar Morin (1998) *ao mencionar que no núcleo de toda teoria científica há paradigmas que a ligam à cultura da qual é originária e à história na qual nasce e/ou ganha consistência*<sup>9</sup>. Sendo assim, não se pode negligenciar as bases da experiência cotidiana das pessoas comuns, dos não cientistas, pois foram a partir delas que parte das descobertas científicas aconteceram.

As esculturas de Michelangelo e Giacometti, sendo valiosos produtos de duas épocas distintas, não são objetos que apenas preenchem espaços de uma mostra de arte ou de uma sala de museu. Nelas há valiosas mensagens que cada observador pode captar de diversas maneiras. Pode-se dizer, por exemplo, que em Giacometti a vida é algo que está sempre em movimento. Podemos também ir mais além, pensando que, diferentemente da era clássica, existir é avançar em direção ao futuro. O ser humano, sempre insatisfeito com o presente, pressente o futuro como se fosse uma falta. Deve, porém, consolar-se com a ideia de que o futuro é, igualmente, inovação. O tempo, é, para o ser

---

<sup>9</sup> Com relação a essas colocações, mais elementos podem ser encontrados na obra *Ciência com consciência* (MORIN, 2010). Nela o autor afirma que os trabalhos de Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend entre outros, apesar de muitos pontos antagônicos possuem como traço comum a ideia de que as teorias científicas, como os *icebergs*, têm enorme parte imersa não científica, mas indispensável ao desenvolvimento da Ciência. Aí se situa a zona cega da Ciência que acredita ser a teoria reflexo do real. Não é próprio da cientificidade refletir o real, mas traduzi-lo em teorias mutáveis e refutáveis.

humano, sua dimensão existencial fundamental. É ele que o incita a ultrapassar o presente e a se projetar no futuro.

Os trabalhos de Giacometti parecem querer conduzir a inteligência na busca daquilo que ela tem de inata. A algo semelhante ao movimento de um estudante que, sabendo que lhe vai ser ditada uma fração, faz um traço antes de saber quais são o numerador e o denominador, pois tem presente no espírito, a relação geral entre dois termos, embora sem conhecer nenhum deles. O gesto desse estudante, para Bergson (2009), *exemplifica um tipo de conhecimento que se assemelha mais a um hábito contraído que a uma coisa possuída.*

Considerando que a partir da invenção da máquina a vapor o ser humano perdeu para ela sua dignidade, independência e identidade, pensamos que a “manufatura sem alma” também passa a ser um produto artístico, na medida em que impulsiona o ser humano em sua reconquista.

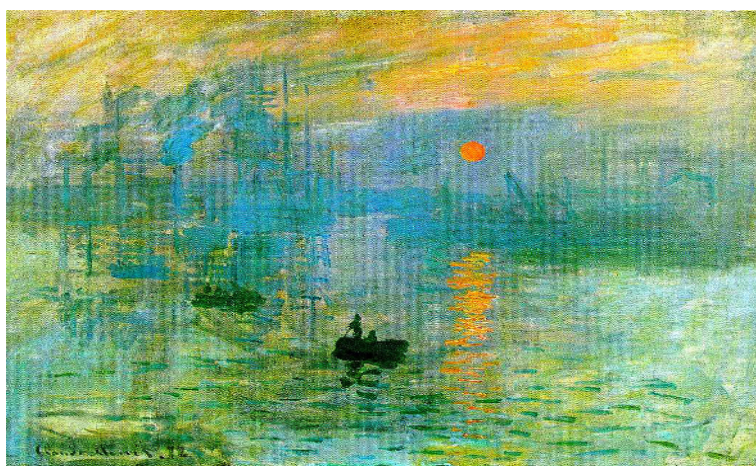
Bergson (2009) afirma que a máquina a vapor, com todas as invenções dela resultantes, talvez seja ainda lembrada dentro de milhares de anos se os seres humanos sobreviverem até lá. A revolução que ela operou na indústria alterou a relação entre as pessoas. Novas ideias surgem. Novos sentimentos estão em vias de florescer.

O trabalho do artista e do cientista, para nós, apresenta certa cumplicidade na medida que busca a porta, a fechadura e a chave que possibilite a emergência de uma revelação. Talvez essa busca tenha proporcionado aos elaboradores de poesias a consciência de que a razão lhes mostra que uma total explicação do mundo é o mergulho em mais uma ilusão e que, da mesma maneira para os construtores das teorias científicas, resultará em mais uma desilusão.

Sob esse ponto de vista vemos alguma aproximação entre as concepções das práticas científicas e as artísticas na obra de Bachelard, na medida em que, para esse autor, todo conhecimento científico é a reforma de uma ilusão. Ele nos ensina que conhecemos sempre contra um conhecimento anterior, retificando o que se julgava sabido e sedimentado. Assim sendo, *não há verdades primeiras, mas apenas os primeiros erros. A verdade está em devir.*

Bachelard, ao se situar como o filósofo da desilusão, nos diz que *somos os limites de nossas ilusões perdidas* e que nem nosso conhecimento imediato nem nossas habilidades não nos expressa. Para ele, o que somos resulta *de um constante e contínuo processo de retificação a que nosso espírito é submetido no decorrer de sua existência. O que sabemos é fruto da desilusão com aquilo que julgávamos ser* (LOPES, 1996).

É importante ressaltar que a desilusão de que fala Bachelard assume um aspecto dinâmico. Ele a vê como um elemento essencial que põe o ser humano em marcha. Esse aspecto, a nosso ver, relaciona a Ciência à arte ao apontar os momentos em que surge a necessidade do novo devido ao esgotamento do modelo atual. Isso leva a um salto qualitativo que determina uma ruptura com a tendência em voga. Foi assim quando Claude Monet pintou a célebre “Impression, Soleil, Levant”, que determinou discussões que resultaram no surgimento do impressionismo.



“Impression, Soleil, Levant”· Claude Monet.  
1872.Museu Marmottan, Paris.

Evidentemente que associado ao surgimento do impressionismo adicionam-se fatores como a construção das ferrovias, que facilitaram o deslocamento de pessoas da cidade ao campo e vice-versa e o surgimento da teoria das cores, que proporcionou explicações enriquecedoras das representações pictóricas dos impressionistas como, entre outras coisas, o resultado das diversas formas de incidência da luz solar ao longo do dia sobre a superfície dos objetos. O pintor, ao sair do ateliê para pintar ao ar livre

redimensiona a pintura que, torna-se também o *registro do “devenir” da mudança cromática da paisagem com o passar das horas* (GULLAR, 2013).

Gullar (2013) aponta, que essa forma de pintar *redimensiona a visão do belo, pois cada pintor o apresentava de um modo diferente*. O observador, por sua vez, em seus aspectos cognitivos, redimensiona essa beleza de acordo com sua própria história. A linguagem dos impressionistas dura até o surgimento de Paul Cézanne, com a ideia do cubismo, provocando nova ruptura.

A partir do do cubismo, talvez devido às mudanças mais frequentes na economia, na produção industrial, nas descobertas científicas etc, a busca do novo nas artes, acompanhando, como sempre, as transformações da sociedade, adquiriu um ritmo frenético (GULLAR, 2013).

Esse ritmo, entretanto, por correr o risco de nos deixar sem memória, nos chama atenção para a necessidade de se criar um espaço tanto na Ciência como nas artes onde possamos nos debruçar sobre o nosso passado e conseqüentemente, como aponta Bachelard, sobre o passado do conhecimento científico para criar novas visões a partir de suas raízes históricas que, em suas diversas etapas revelam uma aproximação e reciprocidade que nunca se desfaz.

Só para referirmo-nos um pouco mais sobre a questão, de se associar arte e ciência, chama-nos atenção uma afirmação de João Zanetic:

Essa aparente incongruência em procurar associar ciência e arte foi abordada por diversos autores, alguns contrários e outros favoráveis a essa aproximação. Obviamente incluo-me entre estes últimos, acreditando que a contaminação mútua entre essas duas culturas é útil não apenas para interpretar o mundo, mas também para transformá-lo (ZANETIC, 2006, p. 55).

Ao depararmos com essa afirmação de Zanetic nos lembramos de outra, citada por Gombrich, do pintor John Constable na segunda metade do século XIX: “...pintar é uma Ciência e deve ser praticada como uma investigação das leis da natureza. Por que então, não pode o paisagismo ser considerado como



um ramo da filosofia natural, do qual os quadros não passam de experiências (1986, p. 27)?” .



*Jonh Constable. A carroça de feno. National Gallery, Londres. 1821*

Aquilo a que Constable chamava “filosofia natural” nós hoje chamamos de “Física”. Segundo Gombrich (1986), *na tradição ocidental a pintura tem sido tratada como ciência*. Todas as obras oriundas dessa tradição e que estão expostas em museus revelam descobertas que são produtos resultantes de intensa experimentação.

Gombrich afirma ainda que se tais afirmações soam paradoxais é porque *muito do que aprendemos sobre isso no passado tornou-se propriedade comum. Pode ser ensinado e aplicado com a mesma facilidade com que usamos as leis do pêndulo simples, embora tivesse sido necessário que Galileu se dispusesse a um árduo trabalho para descobri-las e Huygens para pô-las em prática*.

Mas onde se situa, no nosso trabalho, a questão artística? Nos fins ou nos meios? Ele possui características mais próximas do fazer do artista ou do cientista? Refletindo sobre essas questões, o que podemos dizer é que, como nossa finalidade é educacional, essas relações entre Ciência e Arte precisariam ser mais desenvolvidas.

Entretanto, entendemos que os benefícios de se considerar a Ciência e a arte em seu conjunto, apesar de não ser o objetivo deste trabalho, coloca-se como justificativa para a metodologia utilizada na nossa pesquisa. Essa metodologia, cuja descrição voltará a ser tratada nos capítulos 3 e 4, na nossa

forma de entender, se assemelha à utilizada em algumas formas do fazer artístico nas quais a intuição desempenha um papel significativo.

Isso nos permitiu o surgimento, entre outras coisas, do diálogo entre os dados e a teoria, fazendo ocorrer a fecundação necessária. Uma vez fecundado, o trabalho, que se pretende teórico e como tal aberto, pretende oferecer, ao professor, subsídios para que ele crie estratégias de ensino que, levadas à sala de aula, possam ser pontos de partida para a elaboração de estratégias que permitam aos estudantes ultrapassarem suas limitações conceituais, e eles próprios, quem sabe, tornem-se fontes de criação. Segundo Freire (1996), *o sujeito que se abre ao mundo e aos outros inaugura com seu gesto a relação dialógica em que se confirma como inquietação e curiosidade, como inconclusão em permanente movimento na história.*

A procura de elementos que pudessem possibilitar as aberturas cognitivas necessárias para a percepção de novas ideias nos fez escolher uma metodologia qualitativa que se centrasse na *busca dos estruturantes* colhidos tanto nas respostas dos estudantes aos problemas termodinâmicos a eles apresentados, como naqueles revelados na análise de conteúdo das obras de cientistas selecionadas para tal fim. Com eles pretendemos que não apenas sejam localizados os que se constituem como obstáculos epistemológicos como também possibilitar que novos estruturantes sejam construídos pelos estudantes.

A História da Ciência nos permitiu visualizar isso, pois se revelaram os conceitos que têm permitido transformações da Ciência, a elaboração de novas teorias, a utilização de novos métodos e novos instrumentos conceituais, que não somente mudam as teorias como determinam novos observáveis. A realidade a analisar se modifica em virtude da aquisição do novo conhecimento e novos fenômenos são levados em consideração.

Parece paradoxal que na escola se tratem muitos temas, porém o conhecimento em si mesmo não seja um tema da classe. Acreditamos que o aluno deve estar consciente dos mecanismos que utiliza para elaborar seu pensamento e dos processos sociais que conduzem à elaboração de novas teorias científicas.

Em particular nos parece muito importante que os alunos tomem consciência de que reproduzem conhecimentos já elaborados socialmente,

porém que os produzem por um processo individual de reconstrução. Nesse sentido, a História da Ciência e a Epistemologia permitem ver as diferenças entre os processos individuais e os processos institucionais da construção do conhecimento.

O nosso trabalho de mestrado, por se inserir na linha de ensino de conceitos e por ter feito levantamento das ideias dos estudantes sobre Termodinâmica com vistas a uma mudança conceitual, é agora redirecionado para uma nova busca levando em conta: as críticas sobre o modelo da mudança conceitual, a História da Ciência e a Epistemologia, pesquisas didáticas recentes sobre enculturação científica e as concepções dos estudantes.

Com relação ao novo direcionamento, estamos sendo coerentes com a maneira como vemos os trabalhos de Clausius e de Carnot. O trabalho do primeiro, revelando sensibilidade às críticas existentes no século XIX e bem fundamentadas sobre o trabalho do segundo, efetua uma reelaboração que acaba redundando em uma obra fecunda cujos desdobramentos ressoam, de forma significativa, hoje, mais de um século e meio mais tarde. Essas duas obras, entretanto, estão enraizadas em concepções oriundas de períodos pré-clássicos e clássicos como veremos no capítulo 2. Pretendemos com isso revelar o caráter dinâmico do conhecimento. Sua estabilidade e provisoriedade andam juntas. Assim também nos parece que devem ser as teorias do ensino e aprendizagem e é por isso que damos importância às considerações sobre diferentes tradições de pesquisa nessa área.

É isso que nos leva, entre outras coisas, à insistência de se dar atenção às concepções dos estudantes, pois a importância delas leva em conta que a mente do estudante não chega vazia na sala de aula. Quando o professor apresenta ao aluno elementos de uma cultura diferente daquela que este está acostumado a lidar, deve-se ter a responsabilidade de respeitar o conhecimento anterior para que o novo conhecimento também seja respeitado.

Achamos que é de fundamental importância a percepção da existência de diferentes formas de se compreender a realidade para que se possa oferecer possibilidades ao aluno de encontrar os vínculos que o leve a modificar sua estrutura cognitiva de forma a poder compreender de que maneira a Ciência explica os fenômenos que aborda. Dessa forma,

acreditamos estar contribuindo para o afastamento de um ensino dogmático e redutor.

Portanto, os mecanismos de atuação do professor devem possibilitar que os estudantes compreendam os conceitos científicos como mais um corpo de conhecimentos dentre os muitos existentes na sociedade e que todos devem ser respeitados. Para isso, durante o processo de ensino e aprendizagem, não é razoável que se imponha a aceitação do conceito ou da teoria científica como a única válida ou verdadeira.

Apresentar os conhecimentos científicos como verdades absolutas equivale a uma postura que não nos parece conveniente e que, ao mesmo tempo, expressa um preconceito invertido e perigoso (ALMEIDA 2010). A suposição da pureza e da ausência de erro é uma “idealização” de uma cultura marcada pela ausência de desordem e equívocos de pensamento.

Possibilitar entre os estudantes a consciência de que a aquisição do conhecimento científico pode contribuir para um melhor ajustamento, defesa e atuação no mundo contemporâneo tão preenchido de produtos tecnológicos e bombardeio midiático é mais razoável. Além disso, tal conhecimento poderá levar a uma contribuição, entre outras, para construção de uma sociedade mais justa, solidária e tolerante.

Diante de possíveis conflitos entre as visões de mundo dos estudantes e as concepções científicas na sala de aula, usualmente mais multiculturais do que reconhecemos, não nos parece que a postura de forçar os estudantes a assumirem uma posição quanto às suas crenças, indo além dos compromissos com a compreensão, seja a mais apropriada.

Nos parece, seguindo um raciocínio sustentado em concepções de Morin (2000), que a Ciência é ideologia<sup>10</sup> e está no mesmo nível de todas as demais formas de conhecimento, concepções de mundo e sistemas de explicação. Utilizando o critério de objetividade de Popper, Morin afirma que *o que distingue o discurso científico dos demais é o consenso da comunidade científica sobre as regras estabelecidas e seu conhecimento democrático. Morin crê que a Ciência é como a democracia: nega a existência da verdade. A única verdade é o conflito, a pluralidade ideológica.*

---

<sup>10</sup> Uma interessante abordagem sobre ciência como ideologia pode ser encontrada em Piaget e Garcia (1987, p. 232-236).

Com base em Kuhn, a respeito da base científica sobre a qual emerge o discurso propriamente científico, Morin avança ainda mais, ao destacar a obsessão individual de um cientista em relação ao seu projeto, com base em suas experiências pessoais. *Vê a descoberta como o momento da criação artística, que fugindo das regularidades, não pode ser explicado cientificamente.*

A nossa aposta é que a compreensão dos conceitos científicos pode ser atingida por meio de estratégias de ensino que favoreçam a inserção do estudante numa aventura de invenção e descoberta de forma que estes possam (re) construir novos estruturantes com a ajuda do professor.

Chalmers (1995) afirma que *é essencial compreender a Ciência como um corpo de conhecimento historicamente em expansão e que uma teoria só pode ser adequadamente avaliada se for prestada a devida atenção ao seu contexto histórico.*

Sem pretender abarcar aspectos mais profundos da História da Ciência e da Epistemologia, pois não somos especialistas no assunto, cremos que podemos tomar algumas de suas contribuições para que, agregadas ao ensino de Física possam gerar interesses nos estudantes, ao promover “o foco” necessário para a busca do novo que poderá levá-los ao alargamento de horizontes.

Para isso é preciso que se abram portas que levem os estudantes a um espaço onde se promovam discussões, argumentações e processos investigativos sobre as diferentes formas de se explicar o mundo. Para que eles percebam, por exemplo, que a teoria aristotélica apresentava o universo dividido numa região sobrelunar, incorruptível e imutável e outra, terrestre, corruptível e mutável. Já teorias posteriores viram o universo de forma diferente: composto do mesmo tipo de substâncias materiais. Que a Química anterior a Lavoisier afirmava que o mundo continha uma substância chamada flogístico que era expulsa dos materiais quando queimados. A partir de Lavoisier o flogístico saiu de cena e afirmou-se a existência do gás oxigênio que desempenha um papel diferente na combustão.

Perceber que teorias diferentes consideram diferentes tipos de questões como legítimas e significativas; que questões a respeito do peso eram importantes para os teóricos do flogístico e insignificantes para Lavoisier

(CHALMERS, 1995) é a chave. *A Ciência pode nos ensinar a compreender que a realidade a ser analisada muda* quando se compreende os fundamentos de outra cultura estranha à que estamos acostumados a lidar.

Compartilhamos da ideia de que a Ciência é “verdadeira” nos seus dados sem que por isso suas teorias sejam “verdadeiras”. A respeito disso, Morin (2010) formula e responde a seguinte pergunta:

Então, o que faz que uma teoria seja científica se não a sua verdade? Popper trouxe a ideia capital que permite distinguir a teoria científica da doutrina (não científica): uma teoria é científica quando aceita que sua falsidade possa ser eventualmente demonstrada. Uma doutrina, um dogma encontram neles mesmos a autoverificação incessante (referência ao pensamento sacralizado dos fundadores, certeza de que a tese está definitivamente provada). O dogma é inatacável pela experiência. A teoria científica é biodegradável. O que Popper não viu é que a mesma teoria tanto pode ser científica (aceitando o jogo da contestação e da refutação, isto é, aceitando sua morte eventual), quanto doutrina autossuficiente (MORIN, 2010, p. 23).

Com base nessas colocações, Morin conclui, com razão, que o jogo da Ciência não é o da posse e do alargamento da verdade, mas aquele em que o combate pela posse da verdade se confunde com a luta contra o erro.

### **A religação dos saberes, os conteúdos de Física e o papel da Epistemologia**

A nossa preocupação em resgatar para as aulas de Física discussões sobre as raízes filosóficas dessa Ciência revela nossa intenção de promover no estudante a arte de organizar seu próprio pensamento, de religar e, ao mesmo tempo, diferenciar, contextualizar e a globalizar, ou seja, relacionar cada informação e conhecimento ao seu contexto e conjunto.

Esperamos com isso fortificar a aptidão do indivíduo para interrogar e ligar o saber à dúvida, integrar o saber particular em sua própria vida e não

somente a um contexto global, colocar a si mesmo os problemas fundamentais de sua própria condição e de seu tempo.

Japiassu (1991) ao se referir ao termo saber afirma que ele possui um significado que transcende ao de ciência, pois se refere a várias disciplinas, englobando qualquer conjunto de conhecimentos racionalmente construídos e possíveis de ser transmitidos através de processos pedagógicos de ensino. Nessa perspectiva, o saber, sai da esfera considerada intelectualizada e teórica, se estendendo à aprendizagem, entre outras, de ordem prática e técnica.

Embora as colocações de Japiassu (1991) se refiram, adequadamente, a saberes de ordem prática e intelectual, pensamos que, além disso, o grande desafio atual do ser humano é saber efetuar a leitura de um mundo imerso na incerteza, o que implica saber escolher e lidar com informações diversificadas. É também a capacidade de transformar informações em conhecimentos pertinentes, de compreender sabedorias antigas que nem por isso estão mortas, porque ainda falam do essencial que permanece, para poder situá-las adequadamente e possibilitar, talvez, a emergência de novos saberes.

Saber ler bem o mundo atual é fazer com que nossa inteligência seja ativada remodelando-a com a costura possível de vários conhecimentos, na busca do que eles possuem de comum e de diferente, do que eles possuem de complementares, de essencial. E nosso trabalho se constitui, nesse sentido, num esforço nessa direção.

Edgar Morin (2012), ao se referir à concepção de mundo em todas as civilizações, afirma que elas se preocuparam em *situar e inscrever os seres humanos no cosmo*. Entretanto, há aproximadamente quarenta anos, estamos, de forma singular, diante de um mundo vivendo como “ciganos”. *Somos diferentes e distantes desse mundo devido a nossa cultura, nosso espírito, nosso pensamento, nossa consciência, e é esse distanciamento que nos permite conhecê-lo e interrogá-lo*.

Nas escolas e universidades os conteúdos, em sua grande maioria, continuam sendo transmitidos em grandes quantidades sem que os alunos sejam instigados a refletir sobre eles. O sistema educacional funciona como um grande mercado de informações fazendo com que os alunos se transformem em “banco de dados”. O conhecimento científico, especialmente nos três

últimos séculos, foi se especializando e tornando mais difícil o intercâmbio com outros sistemas de representação do mundo.

Dominique Lecourt (2012), ao se referir às aulas de filosofia que oferece a cientistas na Universidade Denis Diderot, em Paris, afirma que seus alunos *se queixam de não saber em que sentido Schrödinger não é uma equação*. Essa constatação, diz Lecourt, pode ser estendida ao conjunto das disciplinas científicas e a todos os ciclos de ensino, médio e superior e em toda a Europa.

Achamos que o mesmo ocorre no Brasil e em outros países da América. Diante disso, concordando com o que afirma Lecourt (2012), já é tempo de *resgatar e reconhecer a importância para a Ciência, de suas raízes filosóficas*.

Essas raízes, segundo Lecourt (2012), podem ser redescobertas *fazendo-se uma reflexão crítica da concepção positivista da Ciência evidenciada na virada do século XIX para o XX*. Essa concepção foi o marco de uma transformação que afetou o desenvolvimento dos conhecimentos fundamentais ao impor a adoção de um ideal de Ciência baseada na mecânica newtoniana que prevaleceu por dois séculos. Isso, agregado a mudanças econômicas e sociais ligadas à revolução industrial, modificou de forma profunda o estatuto social da Ciência e dos cientistas.

Por essa época, a Física, então considerada como “rainha das Ciências”, passou a ser modelo para todas as outras com a adoção de uma metodologia de trabalho que *passou a se constituir como base de todas as pesquisas*. Entretanto, em meados do século XIX emergiram situações inesperadas: a Termodinâmica de Carnot e Clausius fez surgir o conceito de entropia, revelando que os processos irreversíveis, tão abundantes na natureza, não se submetem às equações reversíveis da Mecânica clássica. Esse fato já continha indícios de que essa metodologia não se sustentaria futuramente. Além disso, o eletromagnetismo vem agravar a confusão. Cientistas como Helmholtz, Hertz e Boltzmann, tentam “salvar” o programa mecanicista. Outros, como Ernst Mach, aprofundam o questionamento a este (LECOURT, 2012).

O surgimento da Termodinâmica possibilitou a abertura de novas visões, principalmente daquelas que mostram que as ideias científicas profundas não procedem das simples observações dos fatos, mas de especulações que vão muito além da observação. Uma teoria não se resume exclusivamente a um



cálculo: ela só se constitui por meio de uma polêmica ininterrupta com as evidências, sensíveis ou intelectuais. *O pensamento científico é um pensamento que se desdobra, um pensamento que não para de julgar-se a si mesmo para melhor progredir por meio de retificações sucessivas* (BACHELARD, 2002).

Lecourt (2012) lança a seguinte pergunta: *o que é julgado de si mesmo no pensamento científico, nos momentos decisivos, a não ser os pressupostos que ele herdou de um passado que de forma alguma é questionado, já que outras formas de pensamento e de prática humana encontram-se também nele engajados?*

Ao tentar responder essa questão Lecourt cita a noção de espaço absoluto de Newton e suas fortes impregnações em variados campos: na psicologia, na moral, na política, na teologia etc. Segundo ele, *isso mostra a grande dificuldade para nos libertarmos dela, enquanto que o próprio Newton, por sua vez, fora tão prudente ao cogitá-la.*

É no afloramento dessa dificuldade de libertação que nosso trabalho pretende se inscrever: trata-se de um engajamento na maturação filosófica dos conceitos no ensino de Física. Pretendemos apresentar essa Ciência de forma mais aberta em relação ao que é exterior a ela. Em vez de impor sua autoridade como objeto de fé, ela poderia provocar no espírito do estudante o exercício de situar seu pensamento no lugar adequado.

Concordamos com Bachelard sobre o papel do erro na construção do conhecimento e *que o conceito de obstáculo epistemológico é o elemento fundador da obrigação de errar.* O obstáculo epistemológico se manifesta para mascarar o processo de ruptura entre o conhecimento comum e o conhecimento científico na medida em que o pensamento procura reter o conhecimento no real aparente. Nesse sentido *os obstáculos são vistos como antirrupturas por se constituírem como pontos de resistência do pensamento ao próprio pensamento, uma espécie de preferência pelas respostas e não pelas perguntas* (CANGUILHEM, 1994).

Procuramos na Termodinâmica elaborada por Carnot e Clausius elementos mobilizadores e incitadores, presentes em seu arcabouço teórico que possam sinalizar um movimento em direção ao futuro, antecipando novos modos possíveis de utilização, dispondo-se a acolher o imprevisto. Trata-se de

evitar, tanto quanto possível, a crença de que o futuro não passará, sempre, de um prolongamento do presente.

É nesse sentido que procuramos inserir a Epistemologia no nosso trabalho. A Epistemologia, segundo Japiassu (1991), não pretende impor dogma<sup>11</sup> aos cientistas. Seu papel é de estudar a gênese e a estrutura desse conhecimento e as suas condições de produção.

Como as ciências nascem e evoluem em circunstâncias históricas bem determinadas, cabe à Epistemologia perguntar-se pelas relações existentes entre a Ciência e a sociedade, entre as ciências e as instituições científicas, entre as diversas ciências etc (JAPIASSU, 1991).

### **A questão e a organização da pesquisa**

As considerações feitas anteriormente nos levaram à elaboração da nossa questão de pesquisa:

*Que subsídios poderão ser oferecidos aos professores de forma a contribuir na elaboração de estratégias de ensino que possam levar os estudantes do ensino médio a reflexões sobre a razão de ser, as finalidades e o significado das leis da Termodinâmica?*

A busca da resposta para esta questão levou-nos a refletir sobre os fatores que pudessem ser considerados elementos essenciais a ser trabalhados em sala de aula com vista não apenas à desconstrução de conhecimentos sedimentados pela vida cotidiana como àqueles que pudessem propiciar novas construções (vínculos), permitindo vislumbrar novas possibilidades. Para isso concebemos como instrumentos de investigação as categorias que denominamos *estruturantes*.

Tais categorias foram criadas tendo como base a utilização dos elementos colhidos nos trabalhos de Kuhn, Bachelard e na História da Ciência,

---

<sup>11</sup> Segundo Hessen (2012, p. 29), o dogmatismo (do grego dógma, doutrina estabelecida) é entendido como a posição epistemológica para a qual o problema do conhecimento não chega a ser levantado. Para esse autor, o dogmático não vê o conhecimento como um problema, pois sua visão se baseia na ideia errônea da essência do conhecimento. O contato entre o sujeito e objeto, para o dogmático, não pode parecer questionável, pois ele não vê que o conhecimento apresenta-se numa relação.

redimensionadas para uma possível aplicação em sala de aula com apoio nos trabalhos de Astolfi e Gagliard.

### **Agregando a História da Ciência e a Epistemologia para o ensino de Física**

Nossa adaptação para o ensino da Termodinâmica, de pontos colhidos nas Epistemologias de Kuhn e Bachelard e das contribuições da História da Ciência, apoiada nas ideias de Gagliard (1998) e Astolfi (1999), é centrada nos seguintes pontos:

1- coleta das concepções prévias dos estudantes que se aproximam (ressonâncias) ou se distanciam (barreiras conceituais) do conhecimento científico da Termodinâmica;

2- concepções de Carnot e Clausius com vista à determinação dos conteúdos de ensino;

3- pesquisas didáticas sobre utilização de textos científicos e inserção da linguagem matemática.

Com relação à primeira utilização, entendemos que um dos objetivos da Pedagogia das Ciências é conseguir que os professores ajudem de forma concreta o aluno a compreender os conhecimentos científicos. Acreditamos que partindo dos conhecimentos dos alunos é possível tocar em pontos que possam servir de aproximações e de outros que proporcionem o afastamento de barreiras que obstaculizam o acesso a esses conhecimentos.

Isso significa acabar com a repetição de informações e iniciar o estabelecimento de estratégias que levem o estudante a transformar seu conhecimento de forma a poder diferenciá-lo do da Ciência.

Sobre essa questão, Gagliard (1998), mesmo sem aprofundar uma discussão sobre a Psicologia, o que implica se submeter a riscos de simplificações incorrendo em um erro parcial, considera que existem três tipos de obstáculos à aprendizagem de Ciências e que são derivados de três fatores:

A- do desenvolvimento da inteligência; os denominados obstáculos lógicos que têm sido tratados pela Psicologia Genética;

B- de problemas afetivos ou psicológicos, como a rejeição na classe, a desvalorização do aluno, os tabus etc., que têm sido tratados pela Psicanálise.

C- da estrutura do sistema cognitivo, que chamaremos de obstáculos epistemológicos (barreiras conceituais).

Ao concordarmos com esse autor consideramos que essa classificação se ajusta à organização do nosso trabalho, porém, como ele, sabemos que, na realidade, a incapacidade de construir um novo conhecimento é necessariamente lógica, afetiva e epistemológica, pois não se podem separar esses três níveis. Acreditamos que o tratamento específico dos obstáculos epistemológicos pode ajudar na remoção dos outros dois tipos de obstáculos, ou seja: o aluno que foi capaz de transformar seu sistema cognitivo é capaz de transformar sua estrutura lógica e melhorar a imagem de si mesmo, o que é importante para superar muitos obstáculos afetivos.

A determinação dos obstáculos epistemológicos no nosso caso é redimensionada para determinação tanto de ressonâncias<sup>12</sup> como de barreiras conceituais e pode ser um dos aspectos mais importantes da transformação do ensino de Ciências (e de todo o ensino). Ela permite encará-los desde a perspectiva da construção de conhecimentos e não da memorização de informações, o que significa centrar a atividade na capacidade de aprender. Nessa perspectiva, o estudante deve transformar seu sistema cognitivo em função do que aprende. Os resultados da aprendizagem se medem em função da transformação dos próprios alunos e não em função da quantidade de conhecimentos que podem memorizar.

O que importa é que os estudantes superem os obstáculos que impediam a construção de novos conhecimentos, o que os permite continuar sua aprendizagem depois dos estudos. A escola não é o lugar onde se aprende Ciência e sim onde se transforma o sistema cognitivo para poder aprender ciências.

Delimitar as principais ressonâncias e barreiras conceituais significa identificar quais ampliações conceituais<sup>13</sup> pretendemos que ocorram nos estudantes e estabelecer currículos flexíveis que podem modificar-se, em

---

<sup>12</sup> As ressonâncias são tomadas aqui como aquelas ideias do senso comum que podem ser consideradas próximas das dos cientistas.

<sup>13</sup> As ampliações conceituais não correspondem aqui a refinamentos de conceitos já existentes, mas à incorporação, na estrutura cognitiva dos estudantes, de novos conceitos sobre as mesmas entidades existentes na cultura científica.

função do tempo disponível para superar alguns obstáculos que podem ser considerados os mais importantes diante de tal disponibilidade.

É preciso, entretanto, levar em conta que a análise das concepções prévias pode ser um instrumento eficaz para determinar as ressonâncias e as barreiras conceituais dos alunos, mas é necessário que se conheça, além da Ciência que se ensina também a sua história.

O segundo ponto se refere às contribuições que a História da Ciência e a Epistemologia fornecem e que estão relacionadas aos momentos em que os cientistas se debruçam sobre erros do passado na busca de novos conhecimentos em diferentes etapas históricas do desenvolvimento científico, para que, ao olhar para as concepções dos alunos, possa se fazer a escolha dos conteúdos que merecem ser trabalhados.

Isso não significa postular um paralelismo entre a História da Ciência e o desenvolvimento da inteligência e do conhecimento individual. Esse é um dos pontos do nosso trabalho que se diferencia da proposta de Osterman (1996). Ahamos, concordando com Gagliard (1998) que a Ciência pode dar pistas, porém não elimina a análise concreta dos alunos em uma situação concreta.

Gagliard (1988), ao propor uma centralização nos conceitos estruturantes que correspondem àqueles que uma vez tendo sido construídos pelos alunos determinam uma ampliação de seu sistema conceitual que permite continuar com a aprendizagem, afirma como já foi dito, que é necessário reduzir os temas a ensinar para permitir dedicar mais tempo ao desenvolvimento da capacidade dos estudantes. Em outros termos, os conceitos estruturantes se constituem como um meio para distinguir as concepções em diferentes sistemas de conhecimento e uma base para continuar aprendendo.

*O terceiro ponto nos serve como complemento dos dois primeiros para a verificação da maneira como:*

- 1- metodologias inovadoras utilizadas para trabalhar textos científicos podem ser úteis para o nosso trabalho;
- 2- a semiótica pode nos ajudar na introdução da linguagem matemática no ensino das leis da Termodinâmica.

## As categorias

As categorias estabelecidas deveriam dar conta:

- do caráter consistente das ideias dos estudantes e dos cientistas estudados como também de suas falhas;
- da possibilidade de ampliação de subsídios que pudessem contribuir para remoção das barreiras conceituais dos estudantes com vistas à compreensão das diferentes formas explicativas da Termodinâmica sobre o mesmo fenômeno.

Essas categorias classificadas em primeiras e complementares (cada uma delas abarcando duas subcategorias) são de duas ordens:

**Primeiras** – referem-se aos conteúdos conceituais da Termodinâmica encontrados nos:

- estudantes (SILVA, 2009);
- cientistas (CARNOT, 1987; CLAUSIUS, 1888).

**Complementares** – referem-se a suportes de apoio encontrados em estratégias pedagógicas já testadas tendo como base pesquisas didáticas que abordam:

- temas sobre a natureza do calor (NASCIMENTO, 2003);
- procedimentos que levam à compreensão da formulação matemática de uma lei (CARMO, 2006).

Com relação às subcategorias:

- A primeira se refere aos estruturantes colhidos na nossa dissertação de mestrado e evidenciam que o conhecimento dos estudantes é solidário a uma estrutura e está de acordo com a tendência natural do indivíduo para organizar a informação de que dispõe. Eles podem se aproximar ou se afastar dos conceitos científicos, podendo se constituir como pontos iniciais das estratégias de ensino.

- Na segunda estão os conceitos que permitiram Carnot e Clausius elaborarem a Termodinâmica e se prestam a dois propósitos: 1 - ser confrontados com os dos estudantes; 2 - determinar o conteúdo de ensino.
- A terceira e a quarta foram construídas com base em duas pesquisas colhidas da ampliação bibliográfica. Elas servem como complemento às duas primeiras na medida em que se ajustam aos nossos propósitos de fornecer exemplos de elaboração de estratégias de ensino que levem em conta não apenas as concepções dos estudantes e dos cientistas, mas que deem suporte para montagem de sequências didáticas.

De uma delas colhemos sugestões de como utilizar textos sobre a natureza do calor elaborados por cientistas do século XIX (NASCIMENTO, 2003) e da outra de como trabalhar habilidades matemáticas que possam levar à compreensão da equação da calorimetria (CARMO, 2006). Essas pesquisas destacam o papel do professor como mediador necessário para destacar pontos fundamentais que levem os estudantes a levantamento de hipóteses e argumentações por meio de interações dialógicas sobre questões relevantes do conteúdo disciplinar.

Com isso pretendemos possibilitar a compreensão das leis da Termodinâmica pelos estudantes. Entendemos que além da necessidade da promoção de discussão sobre a natureza do calor presentes no trabalho de Nascimento (2003) é também necessário lançar mão de diversas linguagens que podem ser utilizadas para aprender ciências contidas no trabalho de Carmo (2006). Além disso, o estudo da Termodinâmica deve ter em vista suas profundas implicações em outras áreas do conhecimento humano.

Essa ampliação de oferta de subsídios para o desenvolvimento de estratégias de interações possíveis entre o conhecimento do aluno e o científico deve colocar os estudantes como participantes de um processo que os leve a ver a Ciência como um construto que demanda esforços coletivos e individuais e que, qualquer um deles, se quiser, poderá continuar a trilhar

caminhos que levem a uma compreensão cada vez mais ampla desse processo.

Outra razão para a escolha do trabalho de Carmo (2006) foi por apresentar um ensino que procura evitar a apresentação da equação da calorimetria como um produto final. Ao contrário, oferece um espaço (laboratório investigativo e guiado) em que o estudante, devidamente mediado pelo professor, passa a se inserir num modo de fazer que minimamente se assemelhe aos procedimentos dos cientistas, na medida em que as interações dialógicas devem levar à busca de um consenso sobre a diversidade de ideias.

Uma das bases do trabalho de Carmo (2006) é a semiótica, que é o estudo de como percebemos o significado das coisas usando fontes culturais de sistemas de palavras, símbolos e ações. Isso pode ajudar de forma significativa o ensino e aprendizagem de ciências, uma vez que a considera como um processo social, como algo que aprendemos em grupo, como membros de comunidades, ampliando assim a percepção para além daquela proporcionada por nossa própria individualidade (LEMKE, 2002).

A História da Termodinâmica nos ensinou que o processo de desenvolvimento do conhecimento pode abarcar diversas tradições de pesquisa. Cada uma dessas tradições vai fornecendo elementos para uma nova construção e se constitui por meio de novas *estruturas*. Mas sabemos que isso acaba por gerar inconsistências que poderão levar a novas rupturas, revelando um processo não cumulativo, como aponta Bachelard.

Isso permitiu que olhássemos a história do ensino-aprendizagem de Física como estrutura dinâmica, portanto, sujeita a modificações, em que o passado e o presente (como ocorreu com os trabalhos de Carnot e Clausius) oferecem e continuam a oferecer contribuições para a sua melhoria. Isso nos encorajou a juntar elementos de tradições distintas de pesquisas, levando-se em conta as críticas da comunidade na qual elas se inserem.



*“Que padrão conecta o caranguejo  
com a lagarta, a orquídea com  
a primavera e tudo isto comigo?*

*E a mim, contigo?*

*Gregory Bateson*



TURNER, Joseph Mallord William 1775-1851. The Fighting Temeraire  
Tugged to her Last Berth to be broken up, 1838 – 1839.  
Óleo sobre tela 90,7x 121,6 cm. The national Gallery London

## Capítulo 2

### Contribuições da História da Física e da Epistemologia, as barreiras conceituais e um panorama da Ciência no século XIX

A reprodução do quadro de Turner feito no início do século XIX que se encontra em página anterior ilustra de forma significativa a chegada de novos tempos. Esse artista pinta as fumaças produzidas pela máquina a vapor criando intrigantes atmosferas no seu espaço pictórico. O quadro é a representação de um fato real, a última viagem do Temeraire, um navio da frota de Lord Nelson na batalha de Trafalgar, em 1805. Em 1838, o Temeraire, já obsoleto, foi rebocado para ser desmontado.

Mas, a tela de Turner, com um navio a vapor no primeiro plano e o Temeraire ao fundo a ser rebocado, vai além do registro de um fato. Representa o fim da era de uma era (navegação à vela) e o início de outra (Revolução Industrial). Turner talvez tenha tentado representar a nostalgia do uso das energias naturais e o início da máquina alimentada a carvão (com a conseqüente poluição do ambiente), ao pintar o velho e ultrapassado Temeraire como um pálido moribundo, e o novo barco a vapor, de tonalidade escura, triunfante, soltando fogo, com as suas rodas de pás freneticamente agitando a água.

Ao Refletirmos sobre a navegação à vela e o início da Revolução Industrial evocada pelo quadro de Turner, somos transportados para uma época em que o pensamento da Física não mais se ajustava ao padrão até então existente. Como e quais as razões que produziram a mudança? Qual a sua natureza?

As respostas a essas perguntas exigiram a procura dos fermentos que proporcionaram o surgimento da Termodinâmica. Eles foram encontrados nas obras de Sadi Carnot (1824) e Clausius (1850,1864). Nelas, verificamos que o fenômeno da irreversibilidade se insere de forma irremediável na Física. Essa inserção está relacionada ao estudo do rendimento das máquinas térmicas feito por Carnot.

Além disso, as pesquisas de Kuhn (2011) sobre a descoberta da conservação da energia revelaram uma série de fatores:

1 - Ao longo do século XIX, a Física passou a aparecer em outros campos, fazendo parte das transformações ocorridas em quase todas as profissões. Áreas antigas como a medicina e o direito adquiriram formas institucionais e padrões intelectuais mais rígidos e mais exclusivos. Nas ciências, desde o século XVIII, o número de publicações e de sociedades aumentou rapidamente e muitas, diferentemente do que ocorria nas tradicionais academias e nas suas publicações, restringiam-se a campos específicos.

2 – Alterações graduais que resultaram na construção da identidade da Matemática. Aproximadamente até a metade do século tópicos como mecânica celeste, hidrodinâmica e vibração de meios contínuos e descontínuos constituíam o centro de pesquisa profissional que tomavam o lugar da Matemática.

3 - Trabalhos de Laplace, Fourier e Sadi Carnot foram essenciais para o estudo do calor. A teoria de Fourier impôs o conceito de calor específico e a separação sistemática das noções de calor e temperatura. Por volta do fim do século as contribuições de Laplace e Carnot à teoria do calor exigiram, além disso, o reconhecimento do aquecimento adiabático.

Carnot chegou à primeira versão do segundo princípio da Termodinâmica em 1826, vinte anos antes de vários engenheiros, físicos, fisiologistas e médicos enunciarem o “primeiro princípio” e do aspecto quantitativo da conservação da energia por meio da sua multiplicidade de transformações. Como é que a ideia de degradação, à qual se associa frequentemente o segundo princípio, pode preceder a identificação da energia como invariante geral das transformações físico-químicas e também a existência de relação entre a diversidade dessas transformações? Assevera Prigogine (1993) que o segundo princípio, tal como o formulou Carnot, não tem necessidade do primeiro princípio, ou da noção de energia; situa-se na interface de duas tradições independentes: 1) a da Física do calor como “calórico” e 2) da mecânica racional, que se enquadra numa tradição familiar<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> As questões que Carnot coloca a propósito do funcionamento da máquina a vapor são uma tradução, na linguagem da Física do Calor, da descrição teórica que seu pai, Lázare Carnot, tinha feito das máquinas mecânicas (PRIGOGINE 1993).

Pela importância que representa para a nossa pesquisa, faremos a seguir algumas considerações sobre a gênese da ideia de conservação da energia que resultou, segundo Kuhn (2011), em uma *descoberta simultânea* no século XIX. Em seguida traçaremos algumas considerações sobre o desenvolvimento do conceito de calor que resultou na insustentabilidade da concepção de calórico no século XIX como suportes para compreensão das leis da Termodinâmica elaboradas por Clausius.

É importante salientar que a irrupção de ideias sobre a conservação de energia, ausente no trabalho de Carnot, levou Clausius a olhar esse trabalho com vistas à elaboração de outro que apresentava nova perspectiva.

### **A conservação da energia**

Neste item discutiremos o conceito de energia, aqui investigado sob o ponto de vista de suas origens e das implicações históricas e filosóficas daí decorrentes. O nosso pressuposto é que a gênese do conceito está na noção de invariância, ideia tomada de Lindsay (1975) em seu trabalho *Energy: Historical Development of the concept* do qual foram extraídos fragmentos de seus comentários sobre os artigos dos filósofos e cientistas pré-clássicos. A eles acrescentamos outros, destacando-se os retirados dos originais de Carnot e Clausius cujas leituras e análises estão apoiadas em Fox (1978) e Brush (2003).

Intensamente explorado na comunidade científica a partir do século XIX, o conceito de energia ultrapassou o domínio de sua aplicação na Física, passando a abranger todos os ramos da Ciência. Não só passou a ter um importante papel no desenvolvimento da Física, como também adquiriu grande significado em todos os aspectos da vida humana. Economistas passaram a considerá-lo fundamental para riqueza das nações. A compreensão humana das experiências passou a ser considerada como possível pela interpretação dos fenômenos em termos de transferência de energia de um lugar para outro e sua transformação de uma forma em outra.

Na sociedade o impacto desse conceito é enorme tanto no passado quanto no presente e poderá ser ainda maior no futuro. A natureza desse impacto, segundo Lindsay, pode ser vista sob dois pontos de vista:

1 - O *ideológico*, que reside no fato de que serve como *elemento unificador* em toda a descrição científica de experiências, permitindo que os cientistas pensem de forma mais consistente sobre diversos problemas com vistas à promoção de uma unidade da Ciência. Como se espera que o conhecimento da natureza tornar-se-á mais especializado, o papel da energia adquirirá um maior significado.

2 – O *tecnológico*, que é evidenciado quando se considera o fabuloso aumento médio por pessoa da dependência da energia nos últimos anos. Entretanto, apesar do aumento do bem estar e conforto de milhões de pessoas, esse progresso gerou graves problemas sociais. O fornecimento de energia disponível não está adequadamente distribuído e parte da população continua sem acesso a ela. Além disso, mesmo em locais em que ocorre melhor distribuição, gera subprodutos que poluem o meio ambiente. Para resolver esses problemas é necessária uma aplicação mais racional de energia para que a vida no planeta não seja impossibilitada.

Achamos que o conceito de energia tem uma história que não pode ser negligenciada quando se pretende compreender seu estado presente ou suas implicações futuras. Além disso, e intimamente associado ao desenvolvimento histórico, há o que pode ser considerado significado filosófico do conceito. Os dois aspectos estão estreitamente interligados (LINDSAY, 1975).

Na base do conceito, segundo Lindsay, está a ideia de *invariância*, que aqui possui o significado de *constância no meio de mudança*. Nesse contexto pensamos em qual a sua relação com o que denominamos hoje energia mecânica de um sistema de partículas sujeitas apenas às suas interações mútuas: essa quantidade é uma função das velocidades e das posições das partículas (em determinado referencial inercial) permanecendo constante no tempo, não importando os movimentos que elas possuem.

Abordar historicamente o conceito de energia é uma tarefa árdua. Entretanto, cremos ser plausível considerar que a fonte da ideia está relacionada com a invenção das máquinas (KUHN 2011), por sua importância no desenvolvimento tecnológico na vida dos nossos antepassados.

As considerações em itálico mostradas a seguir foram adaptadas de Lindsay (1975, P. 13-23), e sua inserção aqui se justifica por vir ao encontro ao nosso propósito de resgatar as raízes históricas da ciência.

*Há longo tempo sabe-se que a vida humana é impossível sem o trabalho de alguém, mas procuraram reduzir a carga de pesados trabalhos utilizando dispositivos como alavancas, planos inclinados, sistemas de polias, arcos etc. Esses aparelhos, denominados máquinas simples, devem ter parecido dotados de poderes mágicos aos nossos antepassados, por tornarem fácil o levantamento de coisas muito pesadas ou possibilitarem o alcance de grandes velocidades, como ocorre com as flechas lançadas por arcos.*

*As construções e uso de tais máquinas pode ter levado à conclusão de que a vantagem mecânica proporcionada por elas era sempre acompanhada por uma desvantagem de compensação: a natureza parece não estar inclinada a dar algo gratuitamente. Verificou-se, por exemplo, que ao levantar um corpo de determinado peso, aplica-se a um sistema de polias uma força cuja intensidade é muito menor que a do peso desse corpo. Entretanto, a velocidade com que a corda da polia é puxada é muito maior que a velocidade com que o corpo é levantado. Caso se pretenda puxar a corda com velocidade baixa, o tempo necessário para levantar o corpo aumenta proporcionalmente.*

*O ganho representado pela facilidade na execução do trabalho fornecido pela máquina é acompanhado de uma inevitável perda representada em geral pelo acréscimo do tempo requerido para a realização do trabalho. Esse fato foi explicitamente reconhecido nos escritos sobre Mecânica de Heron de Alexandria<sup>15</sup> por volta de 60 a.C. É nesse peculiar princípio de compensação, em que um ganho é sempre acompanhado por uma correspondente perda num determinado fenômeno, que se encontra a raiz do conceito de energia. O fator compensatório é evidente no comportamento das máquinas simples, em que alguma coisa permanece constante no meio da mudança promovida. Esta constante é “alguma coisa” que mais tarde foi quantificada como energia.*

Segundo Lindsay, apesar de o primeiro tratado de Física da tradição ocidental escrito por Aristóteles (384-322 a.C.), *Physica*<sup>16</sup>, dar substancial atenção aos movimentos, nada apresenta sobre as máquinas. Entretanto, diz Lindsay:

---

<sup>15</sup> Esses escritos podem ser encontrados no *A Source Book Greek Science*, M. R. Cohen e I. E. Drabkin eds., Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1948, pp. 224-227, 230-232, 234-235 e estão reunidos com o título “The dynamics of machinery: the five simple machines” em Lindsay (1975).

<sup>16</sup> Em Lindsay (1975, p. 26-31) pode ser encontrado comentário e tradução para o inglês, de parte da *Physica* de Aristóteles.

vários estudiosos entre os quais Marshall Clagett (famoso historiador de Mecânica) referem-se ao trabalho de um autor denominado pseudo-Aristóteles cujo título em latim aparece com variadas formas: *Mechanica*; *Problemata mechanica* ou *Quaestiones mechanicae*.

Esse autor é um sucessor imediato de Aristóteles<sup>17</sup>. Esse seria o primeiro tratado sobre Mecânica contendo as primeiras tentativas de se explicar o trabalho das máquinas. Do ponto de vista do problema da origem do conceito de energia, sua importância está em fazer uma abordagem dinâmica que está em nítido contraste com abordagens posteriores de Euclides e Arquimedes.

Referenciado em Pierre Duhem<sup>18</sup>, Lindsay diz que o autor da *Mechanica*, usou o axioma básico utilizado por Aristóteles em sua *Physica*: a força exercida pelo “motor” que põe um corpo em movimento é medida pelo peso do corpo e pela velocidade impressa que leva ao movimento. De acordo com essa visão, quando a mesma “força” atua, a velocidade impressa é inversamente proporcional ao peso. Representando a velocidade por V e o peso por W, a “força” por F, Duhem expressa o conteúdo do axioma acima da seguinte forma:

$$F = k V W \quad (1)$$

Onde k é uma constante. Lindsay também afirma que os gregos não usaram essa forma de expressão, eles utilizavam números puros para expressarem relações matemáticas. Eles teriam expressado a constante do axioma na forma:

$$V_1/V_2 = W_1/W_2 \quad (2)$$

---

<sup>17</sup> Para mais detalhes sobre esse trabalho ver Lindsay (1975, p. 32-43).

<sup>18</sup> A respeito dos trabalhos de Pierre Duhem sugerimos a leitura dos seus livros *O valor da Teoria Física* (2008) e *L'évolution de La mécanique*, Paris, A. Joanin et cie., 1903 e *Les originis de la Statique* (1905, 1906).

Segundo a moderna terminologia da Física, se  $F$  for tomado como o equivalente do que hoje denominamos força, a equação (1) não faz sentido. Por outro lado, se  $F$  for interpretado como potência ou taxa com que o trabalho é realizado, à constante  $k$  pode ser atribuído um valor unitário.

Aplicando a equação (1) ao comportamento de uma alavanca com pesos  $W_1$  e  $W_2$  suspensos em suas extremidades e cujas distâncias ao fulcro são respectivamente  $L_1$  e  $L_2$ , a suposição feita por Duhem é que, quando a mesma “força” atua, o ponto mais distante do fulcro se move com velocidade maior que o outro mais próximo dele. O autor convenceu-se disso por causa das propriedades geométricas do círculo. Mas isso é equivalente às relações:

$$V_1 = kL_1, \quad V_2 = kL_2$$

Se essa expressão for combinada com (1) e (2), resulta:

$$L_1W_2 = L_2W_1$$

Que é a lei da alavanca. Com  $VW$  interpretado como poder em vez de “força”, as considerações acima feitas torna-se equivalente ao princípio atual de velocidades virtuais ou trabalhos virtuais. Certamente esta leitura do tratamento aristotélico vai mais além do que atualmente existe. Isso, segundo Lindsay, é um procedimento muito comum entre os historiadores. Possivelmente, segundo Lindsay, a preferência do autor de *Mechanica* pelo método da dinâmica para estabelecer a lei da alavanca é significativo por estar impressionado com o fato de que alguma coisa permanecia inalterada em ambas as extremidades da alavanca apesar da diferença de pesos.

Com relação ao conceito de energia essas considerações adquirem uma interessante dimensão quando constatamos que a explicação dessa lei por Arquimedes deu-se por um caminho totalmente diferente. Ele evitou abordar o movimento em sua investigação teórica, baseando-se inteiramente em considerações sobre o equilíbrio estático dos corpos. Entretanto seu método nada esclarece sobre a ideia de energia.



Lindsay, ao procurar vestígios do conceito de constância no meio de mudança durante o final do século XVI e início do século XVII, cita Simon Stevin (1548-16200) e Galileu Galilei (1564-1642).

Lindsay (1975) cita que Stevin, em seus trabalhos de 1586 e 1608, denominados respectivamente “*De Beghinselen der Weeghconst*” e “*Hypomnemata Mathematica*”, se baseou em Arquimedes, revelando sua discordância com a forma como o método aristotélico descrevia as máquinas. Stevin achava que a razão para o equilíbrio de uma alavanca não se encontra nos arcos descritos pelas suas extremidades. Para ele é o manuseio do plano inclinado que possibilita a compreensão da operação das máquinas.

O seu método fornece uma conexão com o conceito de energia, uma vez que faz suposição da impossibilidade do *moto perpétuo* partindo do repouso. Seu famoso esquema é formado de 14 bolas iguais mantidas sequencialmente em um único circuito simples ligadas por uma corda de massa desprezível e inextensível colocada ao longo de dois planos inclinados de mesma altura e de costas. Um dos planos mantém quatro bolas sobre sua superfície e o outro, de metade do comprimento, acomoda duas. As outras oito estão dispostas simetricamente embaixo do plano.

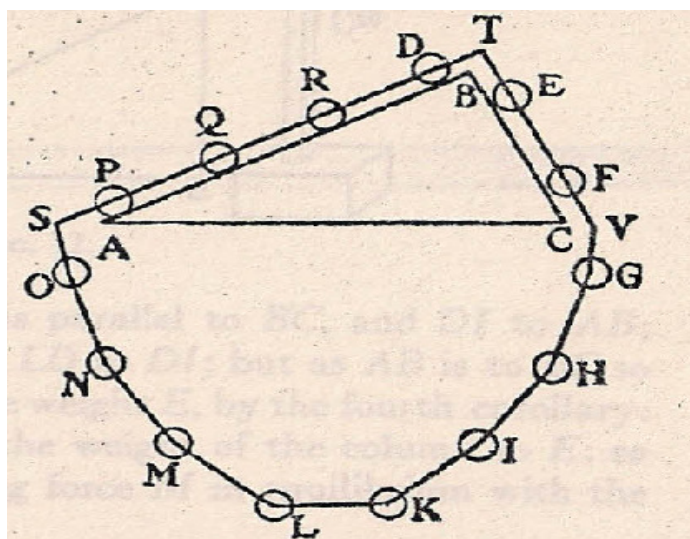


Fig. extraída de Lindsay (1975) da reimpressão do trabalho *The Impossibility of perpetual motion and the problem of the inclined plane*. New York: F. Magie; McGraw-Hill book Company, 1935. (Source book in Physics W.)

Stevin emprega o princípio lógico “dos médios excluídos”, para assumir se as bolas começariam ou não a se mover. Mas se elas se moverem, isso ocorrerá indefinidamente, o movimento perpétuo, situação que Stevin afirma ser impossível. Daí ele concluiu (após cortar as bolas colocadas abaixo dos planos e sobre o solo que em nada contribuíam para o problema devido à simetria) que as bolas sobre o plano permaneciam em equilíbrio. Portanto, o peso que pode ser suportado em qualquer plano é diretamente proporcional ao comprimento do plano. Essa é essencialmente a lei do plano inclinado considerado como uma máquina.

Segundo Lindsay, Stevin teve sorte em sua instalação específica. Estamos mais interessados aqui por sua forte adesão à impossibilidade do movimento perpétuo. Provavelmente ele estava familiarizado com a anterior visão a esse respeito, de Leonardo Da Vinci (1452- 1519) e Girolamo Cardano (1501-1576)<sup>19</sup>. Não há dúvida que esses estudiosos estavam convencidos de que nos fenômenos terrestres não seria possível obter alguma coisa do nada. Que é o que aconteceria se o movimento se iniciasse por si mesmo e persistisse indefinidamente. *Essas são considerações que se articulam com o moderno conceito de energia e podem ser consideradas uma versão epigramática do princípio geral da conservação da energia contido na primeira lei da Termodinâmica.*

Ao se examinar os escritos de Galileu<sup>20</sup>, nota-se que ele compreendeu profundamente o significado do fator compensatório na operação das máquinas que foi por nós interpretada à luz de invariância envolvida no conceito de energia. Na época em que Galileu voltou sua atenção para as máquinas, as leis que regem seu comportamento eram já bastante conhecidas. O curioso é que não há nenhum registro de que Galileu conhecia o trabalho de Stevin, pelo menos durante o período em que proferiu suas palestras que foram reunidas em *On Mechanics* (inicialmente publicado em italiano em 1649, após a morte do autor (LINDSAY, 1975).

---

<sup>19</sup> Os artigos de Leonardo da Vinci e Girolamo Cardano sobre a impossibilidade do movimento perpétuo podem ser encontrados em Lindsay (1975, p. 72-74).

<sup>20</sup> Reimpressões dos artigos “Work Involved in the Operation of Machines,” “Of the Force of Percussion” e “The Pendulum Experiments” podem ser encontrados em Lindsay (1975, p. 82-94).

Segundo Lindsay, nesse livro Galileu mostra-se mais convincente que seu predecessor a respeito do elemento compensador envolvido na ação de uma máquina. No início ele comenta como os “mecânicos” se enganam ao pensar que suas máquinas podem realizar operações que são impossíveis.

Galileu, diz Lindsay, ao se referir aos artesãos (“mecânicos”), explicita que esses enganos parecem a ele, como sua causa principal, a crença de que suas máquinas são capazes de levantar grandes pesos aplicando nelas pequenas forças e que *elas enganam a natureza* e de que *nenhuma resistência pode ser superada por alguma coisa mais poderosa que a força*. Como considera tal crença, falsa, Galileu se propõe *tornar mais evidente a sua verdadeira causa* (LINDSAY, 1975).

Apesar das argumentações de Galileu em sua obra não serem totalmente claras, Lindsay afirma que percebe-se um esforço para esclarecer o fato fundamental de que as máquinas não podem produzir algo do nada, ao afirmar que para *determinada resistência* (a força aplicada), *não há dúvida de que o peso será conduzido, bem como a força aplicada à distância dada; pois mesmo a força* (aplicada) *por ser muito menor como se o peso fosse dividido em valores menores não superior à força aplicada de forma que o peso total seja transferido, como os menores fossem, um de cada vez, ao local designado. Nem pode ser dito no final da operação, que o peso foi transportado por uma força menor, mas sim, por uma força que foi muitas vezes repetida durante um espaço maior percorrido que aquele efetuado pelo peso. Conclui-se que a velocidade da força é muito maior que a velocidade da resistência do peso*<sup>21</sup>, *uma vez que a força motriz desde o instante final ao inicial do movimento foi utilizada repetidas vezes, a força de resistência se deslocou uma única vez* (LINDSAY, 1975).

Dessas afirmações, podemos inferir, diz Lindsay (1975) que Galileu *compreendeu a essência do princípio das velocidades virtuais e do trabalho virtual que será tratado posteriormente por Lagrange*. Percebe-se que esse ponto de vista foi fortemente considerado como válido por Galileu, tanto que ele

---

<sup>21</sup> Aqui o tradutor seguiu as afirmações ao pé da letra de Galileu, que evidentemente é ilógica uma vez que não se pode comparar resistência com velocidade; o que Galileu deve ter pensado é que a velocidade do ponto onde a força é aplicada é tantas vezes maior do que aquela do ponto onde a resistência do peso é aplicada. Para maiores detalhes sobre as afirmações de Galileu ver Lindsay (1975, p. 19)

o retoma na página seguinte do seu tratado. Também enfatiza que a vantagem mecânica que uma máquina apresenta se dá à custa do tempo necessário para que sua função seja realizada.

Apesar de não apresentarmos, de maneira profunda, as tentativas de Galileu para explicar o comportamento da alavanca e do plano inclinado, podemos afirmar que ele se aproxima mais do conceito de invariância no seu famoso experimento do pêndulo concebido para fornecer uma base experimental ao seu pressuposto de que, quando uma bola cai do repouso de uma dada altura acima do solo, depende apenas da altura de queda e não do caminho percorrido por ela. Não é necessário repetir os detalhes aqui, mas eles estão claramente apresentados em seu *Dialogues Concerning Two New Science* (1914).

O que nos parece importante aqui é a percepção de Galileu de que, apesar dos diferentes caminhos, há algo que permanece constante. Hoje, este fato é interpretado como a máxima variação da energia potencial não dependente do caminho e do tempo de queda. O interesse de Galileu pela experiência do pêndulo como exemplificamos, foi estimulado por sua precoce descoberta, quando ainda jovem, na catedral de Pisa, do isocronismo de pequenas oscilações de um pêndulo.

A ideia de conservação na Física foi se tornando cada vez mais acentuada durante o século XVII após a morte de Galileu. Na França, René Descartes (1596-1650) observou que, na colisão dos corpos, também ela ocorria. Isso o levou a estabelecer o que ele denominou de conservação da quantidade de movimento e que hoje é conhecido como *princípio da conservação do momentum*. Segundo Lindsay, Descartes teria ficado tão impressionado com o seu princípio que o generalizou, ao afirmar que é constante o *momentum* total do Universo. Também afirmou que a força seria a entidade responsável pela mudança do *momentum* por unidade de tempo. Cabe aqui uma dúvida: sua visão teria influenciado Newton em sua sistematização da mecânica no *Principia*?

A visão de Descartes teve forte oposição de Leibniz<sup>22</sup> (1646-1716), quem afirmou que a força não se media pelo produto da massa pela velocidade, mas sim, pelo produto da massa pelo quadrado da velocidade que ele denominou de “*vis viva*” ou “força viva” em contraste a “*vis mortua*” ou “força morta” da estática<sup>23</sup>. Essa oposição de Leibniz fez deflagrar controvérsias que se prolongaria por mais de trinta anos e se alimentariam essencialmente de exemplos oriundos da colisão de corpos.

Os cartesianos sustentavam que a soma das quantidades de movimento conserva-se nas colisões. Os adeptos de Leibniz contestavam-no dizendo que nas colisões, a conservação ocorre na soma das “forças vivas”. Tais controvérsias, entretanto, ocorriam com relação às terminologias utilizadas. Ambas as partes concordavam com as mesmas leis das colisões e os erros eram repartidos: os cartesianos orientariam adequadamente as quantidades de movimento e os leibnizianos limitariam a conservação das “forças vivas” apenas ao caso dos corpos perfeitamente elásticos.

Na sua obra *Traité de Dynamique*, D’Alembert (1990) por meio de um estudo profundo e minucioso resolve tais controvérsias utilizando terminologia e definições adequadas.

Transpondo as demonstrações de D’Alembert, (cujo tratamento não cabe no escopo desse trabalho), para uma linguagem mais acessível e da

---

<sup>22</sup> Reproduções de dois artigos de Gottfried Wilhelm Leibniz “The Vis Viva concept: A Brief Demonstration...” e “The Vis Viva Concept: A Dynamical Model...”, podem ser encontradas em Lindsay (1975, p. 119-122). Também pode ser encontrado a reprodução do artigo “Conservation of Quantity of Motion” de Descartes (p. 97).

<sup>23</sup> O argumento de Leibniz segundo Lindsay (1975), de forma simplificada, é o seguinte: Ele imagina duas massas  $m$  e  $4m$ . A primeira delas é abandonada do repouso de uma altura  $4h$  enquanto que a outra cai de uma altura  $h$ . Leibniz assume que cada massa em queda adquirirá o que ele denominou de “força” necessária para ser capaz de retornar à mesma altura inicial de queda. Que é a “força” envolvida na queda da massa  $m$  através de  $4h$  e será suficiente para transportar a massa de volta à sua altura inicial desprezando-se algum atrito ou outra resistência. Mas Leibniz também assume que a mesma “força” necessária para elevar a massa  $m$  à altura  $4h$  é a mesma para elevar a massa  $4m$  à altura  $h$ . Vemos que estamos aqui tratando a palavra “força” como equivalente a “trabalho” na moderna concepção da Física. Por outro lado, vemos que a mesma “força” envolvida no raciocínio de Leibniz não corresponde à mesma quantidade de movimento no raciocínio de Descartes. Pelo raciocínio da queda dos corpos, o corpo de massa  $m$  que cai da altura  $4h$  adquire velocidade duas vezes maior que o corpo de massa  $4m$ . Se denominarmos a velocidade desse último corpo de  $v$ , a do outro será  $2v$ . Nessas condições, a quantidade de movimento adquirido pelo corpo de massa  $m$  será  $2mv$ , enquanto a do outro será  $4mv$ , ou seja, duas vezes maior. Então, diz Leibniz, não há quantidade de movimento nesse caso e, portanto, não poderemos falar, de maneira geral, em princípio de conservação. O problema que se coloca é “o que é conservado aqui?” Para Leibniz é simples: é o produto da massa pelo quadrado da velocidade adquirida. Para ele, no exemplo dado  $m(2v)^2 = 4mv^2$ . A essa quantidade Leibniz denominou “*vis viva*”. Ela está relacionada com o que mais tarde, no século XIX, foi denominada energia cinética que possui valor duas vezes menor que  $mv^2$ .

forma como se apresenta em livros didáticos atualmente, podemos dizer que para uma partícula de massa  $m$ , a força que sobre ela atua pode ser expressa por meio da expressão da segunda lei do movimento de Newton:  $F = d(mv) / dt$ . Essa expressão mostra que a força é a causa da *variação da quantidade de movimento* [ $d(mv)/dt$ ] da partícula. Isso em Descartes significa assumir que a eficiência da força é medida pelo efeito que ela causa na partícula ao longo do tempo:  $\int_{t_0}^{t_1} F dt = (mv_1) - (mv_0)$ . O lado direito dessa equação é a diferença entre o valor do *momentum* entre os instantes  $t_1$  e  $t_0$  entre os quais a força atua.

No caso de Leibniz, a eficiência de uma força é medida pelo seu efeito por meio do deslocamento da partícula de massa  $m$  através do espaço, como mostra a expressão:  $\int_{x_0}^{x_1} F dx = (1/2mv^2)_1 - (1/2mv^2)_0$  que ilustra que o efeito cumulativo da força do deslocamento da partícula (o lado esquerdo é o que chamamos atualmente de trabalho realizado pela força) é igual à variação na quantidade  $1/2mv^2$  entre as posições  $x_1$  e  $x_0$ , originada pela ação da força. Atualmente  $1/2mv^2$  é denominada de energia cinética, e a expressão acima é conhecida como teorema do trabalho-energia ou teorema da energia cinética.

Lindsay (1975) afirma que atualmente existem dúvidas de que foi D'Alembert quem solucionou a controvérsia *momentum versus vis viva*. Para esse historiador muitos conhecedores do assunto não mencionam D'Alembert em seus trabalhos. Parece que autores do século XIX que creditam a D'Alembert a solução da controvérsia tinham maior familiarização com suas inúmeras conquistas no terreno da Matemática e da Dinâmica que com os trabalhos de seus contemporâneos e antecessores. O que se pode afirmar é que D'Alembert forneceu argumentos gerais que a Física moderna considera satisfatórios.

Sobre a questão da primazia da resolução de um problema e do pioneirismo na introdução de uma ideia, Lindsay ainda afirma que há uma versão em que Christian Huygens (1629-1695) foi *o introdutor da ideia de "vis viva" antes de Leibniz*. Em sua obra *Holorogium Oscillatorium*, Huygens discute o pêndulo composto e em seu tratamento utiliza, por diversas vezes, a expressão  $mv^2$ . Mas, segundo Lindsay, o que se percebe é que não há

nenhuma atenção especial sobre essa grandeza e não se percebe referência sobre a eficácia de uma força como também nenhuma relação da sua importância em termos de invariância e conservação e nenhum nome é a ela atribuída. Foram comentaristas posteriores que interpretaram a "*vis viva*" como integrante da lei do pêndulo de Huygens.

Com relação a pioneirismo, Kunh (2011), como veremos mais adiante, diz que se trata de uma questão difícil de ser resolvida, uma vez que envolve um desenvolvimento histórico que prescinde a questão do instantâneo.

Voltando ao *Traité de Dynamique* de D'Alembert (1990), verifica-se que o último capítulo dessa obra, denominado "princípio da conservação da força viva" é totalmente dedicado ao conceito de "*vis viva*" aplicando-a às colisões perfeitamente elásticas, e que está explicitado da seguinte forma: "Quando certo número de partículas colide de forma perfeitamente elástica, a soma do produto de cada massa pelo quadrado da velocidade permanece constante". Esta é a lei da conservação que, entretanto não é deduzida por ele.

A dedução moderna é equacionada utilizando-se o coeficiente de restituição de Newton, em que o valor unitário desse coeficiente é atribuído às colisões perfeitamente elásticas.

Em seu *Traité...*, além do que já foi dito, D'Alembert (1990) também:

- Generaliza o princípio da conservação da "*vis viva*" para aplicá-lo sem fazer a demonstração, a um corpo rígido. Isso é ilustrado com uma série de casos especiais.
- Explicita situações casos em que os corpos do sistema não são isolados. Ele mostra que nessas situações não há conservação da "*vis viva*", mas que a mudança que ocorre corresponde ao que, na moderna terminologia é o trabalho realizado pelas forças externas sobre o sistema. Esse resultado é equivalente ao que atualmente se denomina teorema da energia cinética. Percebe-se que em nenhum momento D'Alembert interpreta seu resultado de conservação da soma das "*vis viva*" como dependente da posição relativa das partículas do sistema. Naquele momento não estava colocada a ideia de energia potencial e por isso não se falava de conservação da energia mecânica, embora o germe da ideia se encontrasse, implicitamente, ali.

- Propõe banir da Mecânica a força causadora da aceleração ou ao menos reduzi-la a uma simples noção derivada, dando primazia à massa e aos elementos puramente cinemáticos.

As descrições do construto de energia apresentadas de forma mais aproximada da atual é percebida na obra que é considerada um dos marcos da História da Física: *Mécanique Analytique*, de Lagrange (1788), cuja publicação inicial ocorreu em 1788 e de cujo conteúdo destacamos os seguintes pontos:

- Proposta de reduzir a teoria da Mecânica e a resolução de problemas sobre ela a fórmulas gerais, cujos desenvolvimentos forneçam todas as equações necessárias à solução de cada problema.
- Reunir e apresentar, do mesmo ponto de vista, os diferentes princípios para facilitar a resolução de questões de Mecânica e mostrar sua dependência mútua.
- Ausência de qualquer figura. Segundo ele sua metodologia não exigia construções nem raciocínios geométricos ou mecânicos, mas apenas raciocínios algébricos.
- Redução de toda estática ao princípio das velocidades virtuais, baseando-se diretamente em certas propriedades das polias e dos fios.
- Concentração de esforços no sentido da formulação mais geral da dinâmica dos sistemas.

Deslocamos, desse ponto em diante, a história da evolução do conceito de energia para reflexões sobre a natureza do calor, tendo em vista como duas concepções distintas podem ser redimensionadas com base numa nova ideia de conservação.

### **Considerações sobre o fogo, flogístico, calórico e a conservação da energia**

As considerações sobre fogo, flogístico, calórico e conservação da energia apresentadas a seguir foram baseadas nos trabalhos de Bachelard



(1971), Silva (2009), Astolfi e Develay (1991), Kneller (1980), Kuhn (2011), Brito (2008), Osvaldo (1998), Henrique (1996), Lindsay (1975) tendo-se em conta que elas são consideradas pertinentes para esse trabalho.

Achamos importante enfatizar que nossa intenção é apresentar indícios de que a Ciência progride com base em concepções oriundas do passado que vão sendo reelaboradas e substituídas por outras, mas não deixam de ser importantes, pois, durante um período, algumas durante séculos, são fecundas, resolvendo de modo satisfatório as necessidades imediatas dessas épocas.

Entretanto, é preciso que se tenha em conta que a aquisição do conhecimento científico pelo estudante não é um refinamento da racionalidade do senso comum. Trata-se sim, da incorporação de uma nova razão que se adquire com o afastamento dos obstáculos epistemológicos. Essa ruptura impede que o conhecimento seja visto com um encadeamento contínuo de ideia, ou seja, não são como elos de uma corrente que vão sendo acrescentadas ao longo do tempo.

Esse processo é complexo, pois a aprendizagem ocorre com a desconstrução do conhecimento anterior. O aluno só compreenderá se lhe forem fornecidos elementos suficientemente adequados que lhe permitam compreender o novo conhecimento. Uma vez compreendido, a substituição do saber antigo pelo novo deverá ficar a seu critério.

É nessa perspectiva que apresentamos algumas considerações sobre o fogo e um pequeno histórico dos conceitos de “*flogístico*”, “*calórico*” e “*energia*” com o propósito de organizar nosso discurso. Eles se constituem como entidades fundamentais para a compreensão das leis da Termodinâmica elaboradas no século XIX por Clausius. A Termodinâmica é um exemplo, na Física, de teoria que conseguiu extrair e sistematizar, para a sua elaboração, elementos de todo o pensamento científico até o século XIX, em diversas áreas do conhecimento, sobre fenômenos relativos ao calor.

Uma dessas áreas foi a da Química, que em seus passos iniciais tinha preocupações com questões relativas ao fogo e se relacionavam ao âmbito da constituição da matéria e de suas transformações.

O fogo já era objeto de preocupações dos filósofos da antiguidade que o viam como um dos quatro elementos constituintes dos corpos: *terra, água, ar e fogo*, propostos em meados do séc. V a.C. por Empédocles, filósofo, poeta,

político e mago grego de Agrigento, na região onde hoje é situada a Sicília, e posteriormente adotados por Platão e Aristóteles.

Para Bachelard (1971), o fogo é, talvez, o fenômeno que mais preocupações traz para os químicos. Segundo ele, nos períodos pré-científicos, é difícil delimitar um tema de estudo, que no caso do fogo é pontuado por *ideias ingênuas como o obstáculo animista e o obstáculo substancialista que se verificam nas explicações sobre ele.*

A substancialização do fogo concilia características contraditórias: pode ser vivo e rápido sob formas dispersas; profundo e durável sob formas concentradas. Um autor do final do século XVIII afirmava:

Na palha e no papel, o flogístico integrante é muito raro, ao passo que abunda no carvão e na pedra. As duas primeiras substâncias, no entanto, ardem ao primeiro contato com o fogo, enquanto que a última leva muito tempo para entrar em combustão. Não se pode explicar essa diferença de efeitos senão reconhecendo que o flogístico integrante da palha e do papel, embora mais raro que o do carvão, está menos concentrado, mais disseminado e, conseqüentemente, mais suscetível de um pronto desenvolvimento (BACHELARD, 1971, p. 187-188).

Bachelard aponta, na mesma obra, que a maneira como uma experiência insignificante, como a de um papel inflamado, é explicada revela que em diferentes materiais há concentrações variadas de flogístico. Isso mostra a necessidade de explicação de pormenores de uma experiência inicial. *A necessidade de explicação minuciosa é muito sintomática nos espíritos não científicos.* A vivacidade de um fogo sugere, assim, falsos problemas: impressiona de tal maneira nossa imaginação infantil que o fogo da palha continua a ser, para o inconsciente, um fogo característico.

Os alquimistas<sup>24</sup> também apresentaram argumentações que foram marcantes ao apontarem que a matéria seria composta de três **princípios**

---

<sup>24</sup> Para Lopes (1990, pp. 25-29), a Alquimia é concebida como uma espécie de arte sagrada, uma vez que os alquimistas não investigam as propriedades das substâncias e suas transformações com o intuito de melhor conhecer a natureza e construir teorias sobre a matéria. Para essa autora, o objetivo do alquimista

**fundamentais** – o *enxofre*, princípio ativo, masculino (o fogo, o sol), o *mercúrio*, princípio passivo, feminino, (a terra) e o *sal* (esses princípios alquímicos nada tinham a ver com as substâncias químicas agora designadas pelos mesmos nomes).

Paracelso (1493-1541)<sup>25</sup>, médico-alquimista suíço, tornou-se o mais destacado defensor dessa corrente.

### O significado de flogístico

No livro *A didática das ciências*, Astolfi & Develay (1991) afirmam que o calor, inclusive nos dias atuais, sempre teve um duplo estatuto:

- Calorimétrico, que apresenta uma abordagem experimental dirigindo-se muito rapidamente às medidas e procurando explicitamente ou não, uma quantidade conservadora.
- Energético, mais voltado à pesquisa de novas causas, dependente de um encaminhamento modelizador, no qual se tenta introduzir resultados de experiências.

A corrente calorimétrica (substancialista) tem origem na antiguidade. Aristóteles tenta descrever o calor como uma das quatro qualidades da matéria junto com o frio, a umidade e a aridez, correspondendo aos quatro estados desta mesma matéria: o fogo, a água, a Terra e o ar. A combinação dois a dois dessas qualidades, permitia criar um dos quatro estados. Nesta concepção não há distinção entre qualidade e substância, o que conduzirá à indagação sobre o caráter do calor e do frio (ASTOLFI & DEVELAY, 1991).

Esses autores afirmam que o poeta latino Lucrecio considerava que o calor escorre do Sol, o frio dos rios, e o fogo, que é constituído de uma substância muito sutil, pode-se transferir através dos poros da matéria,

---

é alcançar a revelação de segredos divinos, a busca do Bem, o autoconhecimento, a transformação de sua alma. A interpretação continuísta da História da Química tende a considerar a Alquimia como uma espécie de infância da Química. Daí o animismo estreitamente associado a sua interpretação da natureza. Nesse sentido, a racionalidade da Química rompe com a Alquimia.

<sup>25</sup> Paracelso possuía uma concepção de mundo que reunia elementos de teologia, filosofia natural e medicina à luz de analogias e correspondências entre macrocosmos e microcosmos. As especulações acerca dessas analogias ocorrem desde épocas pré-socráticas e platônicas e durante a Idade Média.

representação que será encontrada até a Renascença, em autores como Gassendi, Boyle e Galileu.

O caráter científico do conceito de calor surge durante o século XVIII no campo da Química, em pesquisas que, para justificar os resultados experimentais do momento, se baseavam na ideia do flogístico, cuja etimologia é derivada de “arder” em grego.

Em um livro intitulado *Physica subterrânea* (BECHER, 1669), o flogístico é descrito como uma substância responsável pela combustão dos corpos. Ele seria talvez uma mistura de fogo com o enxofre alquímico.

Segundo Brito (2008), em 1703, Ernst Stahl, professor de medicina da universidade de Halle, adota as ideias de Becher e, em sua obra *Specimen Beccherianum*, considera o flogístico um *princípio inflamável*. Nessa obra, descreve que *qualquer metal se constitui como uma combinação entre uma matéria terrosa que depende do metal (denominada “cal”) e uma substância imutável (o flogístico). Quando queimado, o flogístico o abandona sendo absorvido pelo ar, resultando em cinzas, que, sem essa substância para de queimar. De forma inversa, o flogístico retorna a elas ao serem aquecidas.*

Usando terminologia atual, a falta de combustão na ausência de ar se explicava pela necessidade da presença de ar desflogisticado para absorvê-lo. Assim, o fato de uma vela inicialmente acesa dentro de um recipiente fechado se apagar, era explicado devido à saturação do ar por flogístico.

Brito (2008), afirma que Stahl vai mais além ao fazer considerações sobre as propriedades dessa entidade atribuindo-lhe o princípio da cor e do odor dos corpos. *Esse elaborado modelo se constitui como uma teoria inicial no âmbito de determinados fenômenos químicos conseguindo reuni-los num único sistema explicativo.*

Os princípios gerais que orientam essa teoria foram resumidos em um artigo publicado no *Dictionnaire de Chimie* (MACQUER, 1778). Nele Macquer afirma que os químicos dão o nome de flogístico ao *princípio do fogo ou matéria do fogo* e, sendo um dos principais constituintes dos corpos combustíveis, sempre que se combina com uma substância não inflamável, dá lugar a um novo composto capaz de se inflamar; ele não tem a mesma afinidade para todas as substâncias; se combina facilmente com os sólidos, mas tem dificuldade em se combinar com os materiais fluidos leves e voláteis.

Esse modelo, entretanto, embora explicasse parcialmente a combustão e a calcinação revelava contradições com relação ao peso inicial e final da substância: as cinzas resultantes de algumas delas apresentavam peso menor que o do produto inicial, mas, por outro lado, o peso do composto produzido pela calcinação de um metal era maior que o de partida. Esse problema fazia com que os adeptos da teoria tecessem argumentações confusas na tentativa de salvá-la, como as de “peso negativo” atribuído ao flogístico.

Uma melhor sistematização dos conhecimentos da Química passou a ocorrer durante o século XVIII. Várias contribuições nesse sentido começaram a aparecer nos trabalhos de Joseph Black (1728-1799), médico e químico escocês, Henry Cavendish (1731-1810), físico e químico inglês, Joseph Priestley (1733-1804), químico inglês, Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), químico e farmacêutico sueco, Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), químico francês e Daniel Rutheford (1749-1819), químico escocês (BRITO, 2008).

Todos esses cientistas estiveram envolvidos na caracterização de diversos gases. Segundo Brito (2008), a denominação “gás”, *originada do termo grego “khaos” (caos), é atribuída a Jan Baptista Van Helmont (1575-1644), químico flamengo e discípulo de Paracelso, e se referia às “liberações” que se verificavam em alguns fenômenos químicos.* Mas Brito afirma que alguns autores atribuem uma origem flamenga à palavra: “*ghoast*”, *que significa espírito.* O termo difundiu-se por toda a Europa, acabando por estabelecer uma preferência pelo termo “ar”.

Surgiram assim com as descobertas dos cientistas citados diversos “ares”, todos eles de algum modo relacionados com o flogístico. Um dos primeiros gases a ser identificado foi o dióxido de carbono, o “ar fixo”, por Black<sup>26</sup> que o constatou no decorrer de reações químicas envolvendo produtos sólidos. Porém, *alguns autores atribuem a descoberta desse gás a Helmont que lhe deu o nome de “gás silvestre”* (BRITO, 2008).

Através da invenção de um dispositivo que inventou para o recolhimento de gases solúveis na água, afirma Brito (2008), Priestley identificou vários gases. Esse dispositivo o possibilitou isolar o dióxido de carbono produzido na

---

<sup>26</sup> O artigo “The Nature of Heat” de Black e Boyle pode ser encontrado em Lindsay (1975, p. 182-189, 190-203).

fermentação da cerveja, levando-o à detecção do oxigênio. Denominou o oxigênio de “ar desflogisticado” ou “ar bom”. Em sua obra *Experiências sobre as diferentes espécies de ar*, explica as suas descobertas em termos de modelo de flogístico, conceito que adotou até o final de sua vida.

Brito (2008) afirma que Cavendish identificava no flogístico características semelhantes às do hidrogênio que detectou durante reações produzidas pelo contato de metais com ácidos, verificando que ele era muito leve e distinto dos outros que já tinham sido detectados. Segundo ele, esse gás provinha dos metais envolvidos na reação sendo muito leve e inflamável. Em sua obra *Experiments on Air*, segundo Brito (2008), Cavendish apresentou a seguinte composição para o ar atmosférico: 79,167% de ar flogisticado (cuja denominação atual é azoto e argônio) e 20,833% de ar desflogisticado (oxigênio).

Brito (2008), ainda afirma que o azoto foi também identificado em 1772 por Daniel Rutheford, aluno de Black que o denominou de “ar flogisticado” ou “ar nocivo”. E, da mesma maneira que Cavendish, determinou a composição do ar. *Nessa etapa surgiram diversos “ares”: ar fixo (dióxido de carbono); ar flogisticado ou ar morto (azoto); ar desflogisticado ou ar vital (oxigênio), além de outros.*

A explicação para o processo de combustão para muitos desses cientistas é a de que a reação envolvia a captação do flogístico pelo ar. Um fato observado por Cavendish, porém, seria fundamental para o início da descrença dessa explicação: o de que a água não era um elemento simples, mas um composto. Isso viria a ser verificado posteriormente por Lavoisier<sup>27</sup>.

A água, segundo Lavoisier, era formada pela combinação do “ar inflamável” (hidrogênio) e “ar desflogisticado” (oxigênio). *Inicia-se a partir daí, uma nova etapa histórica em que a Química seria considerada uma Ciência, e a etapa anterior, um conjunto de conhecimentos vagos e essencialmente qualitativos, em que o modelo do flogístico, em certa medida, dava conta das explicações* (BRITO, 2008).

---

<sup>27</sup> Em Lindsay (1975, p. 204-205), encontra-se a tradução para o inglês das páginas 4-6 do capítulo 1 do *Traité élémentaire de Chimie* de Lavoisier sobre a introdução do termo calórico para a “substância de calor”.

As novas ideias passaram a ser balizadas por uma tomada de anotações sobre os pesos dos reagentes e produtos das reações, por meio da utilização de balanças. Essas quantificações revelavam que *as substâncias podiam se tornar mais pesadas e não necessariamente mais leves, o que poderia significar que, durante a reação algo entrava, combinando-se com essas substâncias, portanto, não ocorrendo necessariamente algo que escapava delas.* (BRITO, 2008)

As “pesquisas” realizadas por Lavoisier levariam ao abandono do flogístico. Nelas interpretava-se de forma convincente o que ocorria nas reações de oxidação, nas combustões, nas calcinações etc. Esses estudos o levaram a explicar de uma forma totalmente diferente esses fenômenos, ao se basear em meticulosas medições, com uso sistemático da balança, por meio das quais se provava que quando um metal *arde* ganha peso ao invés de perdê-lo. (BRITO, 2008).

Um exemplo interessante do trabalho de Lavoisier é o que apresentou em 1774, à Academia de Ciências de Paris, sobre a calcinação do estanho. Nele diz que introduziu esse metal, previamente pesado, num balão cujo peso era também conhecido. Fechando o recipiente hermeticamente, pesou o conjunto. Procedeu em seguida, a calcinação do metal, que terminou após algum tempo. Pesou então novamente o conjunto, constatando que seu peso não foi alterado. Ao retirar o produto da calcinação verificou que seu peso era ligeiramente maior que o inicial do estanho. Como o peso do balão não se alterara, concluiu que o aumento do peso do metal calcinado só poderia ter ocorrido através de combinação do metal parte do ar contido no recipiente. Repetiu os ensaios com outros materiais, como chumbo, enxofre e fósforo, chegando às conclusões: 1) *a calcinação resultava da combinação do metal com um algum constituinte do ar;* 2) *o ar deveria ser uma mistura de diferentes substâncias* (BRITO, 2008).

Posteriormente, Lavoisier, sempre procedendo a repetidas experiências, apresenta à Academia de Ciências de Paris um novo trabalho denominado “Reflexões sobre o Flogístico, para servirem de continuação à teoria da combustão e da calcinação”. Nesse documento, cujo trecho a seguir é extraído de Brito (2008, p. 55), Lavoisier afirma:

(...) cada um liga a esse termo (o flogístico) uma ideia vaga, que ninguém definiu rigorosamente, reunindo-se assim, no mesmo conceito, propriedades inconciliáveis e contraditórias (...) algumas vezes tem peso, outras não; tanto é fogo livre com fogo combinado com o elemento terroso; tão depressa passa através das paredes dos vasos como estes são impermeáveis para ele; explica a causticidade e a não causticidade.

O estabelecimento das bases da Química moderna por Lavoisier, em que aparece a conservação da massa global quando ocorre uma reação química, *rompe* com a teoria do flogístico.

As considerações que fizemos nesse item mostram aquilo que em Bachelard (1971) nos parece se constituir como uma ruptura. Psicanalisado, o conhecimento anterior, um *obstáculo epistemológico*, descoberto após uma série de erros cometidos, é removido e uma nova maneira de “ver” emerge na comunidade científica.

### **Considerações sobre calor como calórico**

Segundo Astolfi e Develay (1991), o calor não se manifesta unicamente nas combustões, mas também contribui na variação da temperatura de um corpo. Este fato levou, no início do século XVIII, a uma segunda teoria do calor-substância que se desenvolverá paralelamente à do flogístico: a do calórico, enunciado por Wolf em 1720. Esta substância impregnaria toda matéria e seria indetectável quando o corpo atingisse o equilíbrio térmico. Só poderia ser detectada quando o equilíbrio fosse rompido porque seria permutada com outro corpo. As variações de temperatura dos corpos indicariam os deslocamentos deste calórico, do corpo mais quente para o corpo mais frio. A temperatura aparecia como um “grau” de calor, uma medida que permitirá prever o sentido e os valores das trocas. O calor torna-se uma grandeza mensurável, aditiva e que deixa entrever as propriedades de conservação.

A caracterização de calórico como fluido implica propriedades de elasticidade e capacidade de escoar, sem que necessariamente tenha massa.



As propriedades deste fluido muito sutil só podem ser apreendidas pelo seu efeito.

No entanto, os sucessos aparentes dessa teoria do calórico irão colidir com uma barreira: o da massa da substância. Apesar dos esforços de Rumford, não será possível mostrar sua existência (ASTOLFI & DEVELAY, 1991).

Ainda segundo Astolfi e Develay, a corrente energética (mecanicista), caminha paralelamente à calorimétrica. A teoria mecanicista considera que a matéria é formada de partículas, sendo o calor uma troca de movimento entre essas partículas. Afirmam que, desde a antiguidade, Platão formulava a hipótese de que o fogo colocava as partículas de matéria em movimento e que o ar as comprimia. Para ele, o aquecimento de um corpo conduz a um aumento de seu volume, a sua dilatação.

Astolfi e Develay (1991), afirmam que Kepler, Bacon, Descartes, Boyle e Huyghens descrevem, no século XVII, os estados térmicos de um corpo em termos de movimentos ou de vibrações de partículas. Entretanto, o calor continua sendo uma grandeza não objetivável, podendo ser transmitida por contato. Estas bases não permitiam explicar, por exemplo, a distribuição de calor entre dois materiais diferentes. A distinção entre calor e temperatura não aparecia.

Esses autores dizem ainda que em 1784, Laplace e Lavoisier realizaram a síntese entre as teorias mecanicistas e substancialistas, introduzindo a noção de quantidade de calor contida num corpo como a força viva das vibrações distinta dessas vibrações e da temperatura, que é uma medida da agitação das partículas. Astolfi e Develay chamam atenção para o fato notável de esta teoria ter evoluído sem se apoiar em qualquer argumento experimental direto.

Dizem também, que em suas pesquisas, Clausius, Maxwell e Boltzmann, no século XIX, tornarão coerentes as intuições de Lavoisier e Laplace. Em 1900, Gibbs integrará os resultados experimentais na teoria, com a Termodinâmica Estatística.

Astolfi e Develay (1991), afirmam que a hipótese de Platão foi ignorada durante muito tempo, pois se buscava o porquê do fenômeno e se considerava a estrutura da matéria. A descrição de Aristóteles tinha mais aceitação, pois estava mais ligada aos fenômenos sensíveis. Esta situação mostra como é

difícil desligar-se das primeiras impressões e dar o passo que separa a observação da experimentação.

Atualmente percebe-se nas escolas, principalmente na abordagem da calorimetria, que para muitos problemas, a ideia substancialista de calor continua eficaz. Entretanto, essa visão impossibilita que se compreenda a equivalência entre o calor e o trabalho mecânico, constituindo-se como um *obstáculo epistemológico* que precisa ser removido quando se pretende que a visão energética seja a conveniente para novas abordagens dos fenômenos térmicos.

Segundo Astolfi e Develay (1991), muitos autores apontam que outro obstáculo importante no histórico sobre a concepção de calor é a transferência das ferramentas da Mecânica para o campo dos fenômenos térmicos. As analogias são numerosas nas descrições de Descartes, Huyghens e Leibniz, mecânicos notáveis que procuravam descrever os fenômenos térmicos com modelos da Mecânica.

Roger Bacon (1214-1294) e posteriormente Johannes Kepler (1571-1630) achavam, de forma intuitiva, que o calor seria devido ao movimento de partículas internas da matéria. Já Galileu (1642-1727) e Newton (1642-1727) adotaram os princípios do fluido de Aristóteles. Posteriormente as atenções sobre o conceito de calor e as transformações que este provoca deixam o âmbito das especulações qualitativas e entram também no domínio das quantitativas. Mas surgiram algumas dificuldades resultantes de se pensar o calor segundo concepções mecanicistas do universo. As tentativas de se considerar o calor como substância material sujeito a pesagem resultavam em fracasso, pois se verificava que os corpos aquecidos não ficavam mais pesados que antes do aquecimento. Para sair dessa dificuldade optou-se por atribuir ao calor a propriedade de ser imponderável (ASTOLFI e DEVELAY, 1991).

Muitos cientistas adotaram essa propriedade, sendo Black um deles, que, ao se dedicar ao estudo da transição entre os estados líquidos e sólidos, definiu o calor latente e o calor sensível, estabelecendo também uma distinção entre calor e temperatura. É a ele atribuída a hipótese do “calórico” para explicar os fenômenos caloríficos. A partir século XVI, cientistas como Galileu (por volta de 1592), Santorio (1612), Bacon (1620), Torricelli e Otto Guerick

(1672)<sup>28</sup> esforçaram-se na construção de termômetros baseados na dilatação dos líquidos e dos gases. As imprecisões desses primeiros aparelhos levaram a futuros aperfeiçoamentos que buscavam estabelecer precisão na mensuração da temperatura aparecendo na primeira metade do século XVIII, entre outras, as escalas Fahrenheit, Réamur e Celsius

Após a construção dos termômetros surge a preocupação em se distinguir temperatura de “*quantidade de calor*”. Isso foi feito por Black por volta de 1760 que, adepto da teoria do calórico, partiu da ideia de que um corpo acumulava essa substância quando aquecido e a rejeitava quando resfriado. Resulta daí que calor é uma grandeza mensurável, sendo a *unidade* dessa grandeza a quantidade de calor que é preciso fornecer a certa quantidade de um corpo de referência, arbitrariamente escolhido, para elevar sua temperatura de 1 °C. Tomando como padrão 1 g de água, encontramos aí a definição moderna de *caloria*. Entretanto Black desvencilhhou-se em grande parte da arbitrariedade do corpo de referência, elaborando o conceito de *calor específico*<sup>29</sup>.

A noção de *calor latente* foi introduzida por Black particularmente na fusão e na vaporização, mostrando que a fusão de uma determinada quantidade de gelo exige a mesma quantidade de calor. Isso fez com que Lavoisier concebesse o primeiro calorímetro prático.

Essa metodologia para medir quantidades de calor está associada ao espírito de seus promotores, no que se refere à ideia da indestrutibilidade do calórico e foi também uma das causas da dificuldade com que se impôs a ideia da conservação da energia de que trataremos no próximo item.

---

<sup>28</sup> Esses dados foram obtidos no tomo II, volume 3, da coleção História Geral das Ciências, publicada sob a direção de René Taton (cap. III, p. 90, 1960).

<sup>29</sup> O raciocínio de Black, transpondo para a linguagem atual é: “para elevar de 1 °C a temperatura de uma massa d’água é preciso transferir para ela sempre a mesma quantidade de calórico; reciprocamente, quando essa mesma quantidade de água esfria de 1 °C, perde uma quantidade igual de calórico. Caso tal resfriamento ocorra devido ao aquecimento simultâneo, também de 1 °C, de outro corpo de massa  $m'$  é porque o aquecimento da massa  $m$  de água provoca também o aquecimento de uma massa  $m'$  de outro corpo; portanto, para obter o aquecimento da massa ( $m$ ) equivalente à da água, desse corpo, será necessário fornecer-lhe  $m/m'$  vezes mais calórico do que para a água. Tal relação deve ser característica da substância: é o seu calor específico”. Com isso, foi possível passar de um sistema de medida a outro (TATON, 1960, p. 96).

Sabia-se há muito que a fricção desprende calor e desde a descoberta de Denis Papin<sup>30</sup>, que o calor, ao permitir a vaporização da água, possibilita também exercer esforços consideráveis e põe os corpos em movimento.

No início do século XVIII, Savery e Newcomen construíram a primeira máquina a vapor realmente utilizável, que James Watt, em 1767 aperfeiçoou de modo considerável. Cerca de uma década mais tarde, Watt idealiza a máquina de duplo efeito e o regulador à força centrífuga, cujo emprego torna-se economicamente viável (TATON, 1960).

As primeiras experiências sobre condutibilidade caloríficas bem fundamentadas foram realizadas no final do século XVIII, por alguns cientistas entre os quais, Rumford. Elas evidenciavam, como já dissemos, a insustentabilidade da ideia do calórico.

Além disso, só para completarmos um pouco mais nossas descrições, Daniel Bernoulli, por volta de 1728, utilizando ideia de estrutura da matéria, elaborou a “*teoria cinética dos gases*” segundo a qual a pressão exercida por um gás sobre as paredes do recipiente que o contém resulta dos choques, extremamente numerosos, dos “átomos” contra essas paredes. Esta teoria interpreta a lei de Boyle Mariotte da compressibilidade dos gases, mostrando que a temperatura dos gases está vinculada à velocidade de agitação dos átomos, ou, de acordo com a terminologia atual, à sua *energia cinética*. Dessa forma, o calor torna-se assimilável à *energia mecânica*. Mas apenas no século XIX, após os trabalhos de Maxwell e Boltzmann, em particular, é que essa teoria assumirá uma maior consistência na exploração dos fenômenos relativos ao calor.

O que expomos anteriormente revela de alguma maneira, a relação entre aspectos qualitativos e quantitativos, ocorridos com o advento da calorimetria, evidenciando o papel da Matemática na Física.

Entretanto, tal como ocorrera no flogístico, o calórico vinha envolvido por uma série de estranhos atributos – indestrutível, imponderável, dotado de grande elasticidade, autorrepulsivo e capaz de penetrar em todos os corpos.

---

<sup>30</sup> A “marmita de Papin” descrita em 1681 com o nome de “digestor” cujo princípio é: a água aquecida em um vaso fechado só pode vaporizar-se parcialmente, quando a temperatura se torna superior a 100 °C. Correlativamente o vapor sofre uma pressão superior à pressão atmosférica, o que lhe permite, por exemplo, erguer a tampa da marmita (TATON, 1960, p. 98).

Deste modo, quando o corpo diminuía a temperatura o calórico fluía para fora dele e vice-versa.

Assim, os diferentes calores específicos das diferentes substâncias eram explicados considerando que o calórico era atraído de modo desigual pelas diferentes espécies de matéria; por sua vez a dilatação produzida pelo aquecimento explicava-se pela autorrepulsão do calórico; a água era uma combinação de gelo com calórico numa determinada proporção, e o vapor era outra combinação da água com uma maior porcentagem de calórico; daí facilmente se explicava a passagem da água do estado sólido ao líquido e desse ao vapor.

Esse sistema explicativo, entretanto, gerou situações que suscitavam muitas dúvidas principalmente à que se referia à condição de imponderabilidade do calórico. Nesse sentido, as contribuições de Lavoisier para o abandono da ideia do flogístico não impediram que ele adotasse o calórico como um dos seus trinta e três elementos de sua tabela periódica e segundo alguns autores é de sua autoria a utilização desse termo.

Entretanto, segundo Brito (2008), num trabalho apresentado em 1783, com Perre Simon Laplace (1749-1827), à Academia de Ciências, Lavoisier reconhece que não há consenso entre os físicos quanto à natureza do calor ao apresentar a pergunta: é um fluido que penetra nos corpos consoante a sua temperatura e a sua capacidade para retê-lo, ou o resultado da agitação das partículas constituintes da matéria? Ele mesmo mostra-se hesitante, ao afirmar a possibilidade dessas duas hipóteses se verificarem.

No início da revolução industrial, temas relacionados ao calor começaram a despertar interesses de diversos setores da Física, e várias evidências levaram à crise do calórico, uma delas era que a temperatura de um corpo seria consequência da maior ou menor agitação das moléculas constituintes desse corpo. Alguns trabalhos dessa época foram realizados por cientistas como Benjamim Thomson (Conde Rumford) (1753-1814), Humphrey David (1778-1829), James Prescott Joule (1818-1889) Julius Robert Von Mayer (1814-1878), Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), além de outros.

Thomson, trabalhando como engenheiro militar a serviço do governo da Baviera, onde obteve posteriormente o título de conde de Rumford, investigou experimentalmente, por volta de 1798, a produção de calor por atrito numa

fábrica de canhões de Munique. Essa experiência consistiu em fazer rodar uma peça metálica sobre outra, ambas mergulhadas num recipiente com água, podendo assim medir a elevação de temperatura da água, resultante do calor produzido pelo atrito entre as peças.

Verificou que elevando a água à ebulição, o processo podia continuar enquanto as peças continuavam se movendo umas sobre as outras. Verificou ainda, que não se produzia qualquer alteração dos pesos dos corpos. Das conclusões que tirou, Rumford publicou em “Philosophical Transactions” (1798), um artigo em que colocava em dúvida o caráter material de tal substância, ao afirmar que “(...) aquilo que um *corpo isolado ou sistema de corpos* pode continuar a fornecer sem limitação não pode ser uma substância material.”

Atribuindo ao movimento a causa do fenômeno, Thomson praticamente elimina o calórico e preconiza os fundamentos do primeiro princípio da Termodinâmica.

Davy, professor na Royal Institution de Londres publicou, em 1812, resultados de experiências também baseadas em fricção, concluindo neste mesmo ano que “a causa imediata dos fenômenos caloríficos é o movimento”.

Entretanto, nem as conclusões de Davy nem a de Rumford foram suficientes para demover os partidários do calórico como calor-substância. Veremos mais adiante que Sadi Carnot, apesar de ser um dos pioneiros na realização de trabalhos sobre concepções relacionados à ideia sobre conservação da energia, como aponta Kuhn (2011), utilizou a linguagem do calórico, como entidade material, nos seus primeiros trabalhos. Ao formular em 1824, em “Reflexion sur la puissance Motrice de feu”, o que viria a ser uma das versões sobre o segundo princípio da Termodinâmica, considera que uma potência motriz (trabalho) pode ser produzida unicamente numa máquina pela “queda de calórico” de um corpo quente para um corpo frio.

A seguir faremos algumas considerações sobre o panorama do século XIX com relação à crise da concepção do calórico e a descoberta da conservação da energia, tomando como base os estudos de Kuhn (2011).

## O século XIX e a conservação da energia

Na primeira metade do século XIX cientistas<sup>31</sup>, como Marc Séguin em 1839, Karl Holtzman, em 1845, G. A. Hirn, em 1854 e Sadi Carnot, antes de 1832, registraram de forma independente uma relação quantitativa entre trabalho mecânico e calor. Entretanto a *conversibilidade* entre calor e trabalho é somente um caso específico de conservação da energia. Entre 1837 e 1844, C.F.Mohr, William Grove, Faraday e Liebeg descreveram o mundo dos fenômenos como manifestações de uma “única força” que pode ocorrer como forma elétrica, térmica, dinâmica ou várias outras, mas não pode, em todas as transformações que sofre ser criada ou destruída. O que eles chamavam “força” é o que os cientistas viriam a denominar posteriormente de energia. *A História da Ciência não oferece exemplo mais impressionante que esse para o fenômeno conhecido como descoberta simultânea* (KUHN, 2011).

Essa descoberta, segundo Kuhn (2011), foi tornada pública entre 1842 e 1847 por Mayer, Joule, Colding e Helmholtz. Exceto Helmholtz, os outros trabalharam de forma independente, sem que um deles tivesse informação do trabalho outro. Evidentemente em épocas anteriores a atmosfera reinante na comunidade científica europeia continha elementos capazes de conduzir esses cientistas a essa nova visão da natureza. *Quais seriam as fontes que desaguaram nessa descoberta?*

Kuhn (2011) aponta estar seguro de duas dessas fontes: “a disponibilidade dos processos de conversão” e “o interesse pelas máquinas”. Também suspeita de uma terceira fonte: a “filosofia da natureza”<sup>32</sup>.

A primeira dessas fontes decorre principalmente de uma série de descobertas possibilitadas pela invenção da bateria por Alessandro Volta em 1800, a saber: a teoria do galvanismo, a produção de calor e luz pela corrente elétrica e a eletrólise. Além disso, outras descobertas como as possibilitadas pelas demonstrações de Oersted, Seebeck, Peltier, Faraday etc. Todas essas

---

<sup>31</sup> Esses dados foram retirados de Kuhn 2011.

<sup>32</sup> Kuhn (2011), afirma que a filosofia natural ou Naturphilosophie é um movimento filosófico que coloca o organismo como a metáfora fundamental de sua Ciência universal. Seus seguidores buscavam um princípio unificador para todos os fenômenos naturais. Ela poderia ter fornecido um pano de fundo filosófico propício à descoberta da conservação da energia, uma vez que seus fundamentos eram familiares a vários pioneiros.

descobertas confirmavam a suspeita que já vinha de longa data sobre conexões entre fenômenos aparentemente discrepantes.

Apesar de alguns processos de conversão já estarem disponíveis durante o século XVIII, somente nas quatro primeiras décadas do século XIX é que começaram a aparecer, de fato, como processos de conversão. Problemas antes separados passaram a ganhar múltiplas interrelações, delimitando uma “nova aparência” para a Física, revelando-se uma das principais condições para o aparecimento do conceito de energia.

Carnot, apesar de ter encontrado uma relação quantitativa entre trabalho mecânico e calor ignorou os novos processos de conversão e não chegou à conservação da energia ausente em seu principal trabalho. Liebg e Joule, por exemplo, começaram com um único processo de conversão e foram levados, pelas conexões entre as ciências, as todas as partes das redes de conversões que eram evidenciadas pelos processos laboratoriais que proliferaram durante as quatro primeiras décadas do século XIX.

Ainda segundo Kuhn (2011), as pesquisas de Joule evidenciam o modo como a rede de processos de conversão balizou o caminho experimental para a conservação da energia, fornecendo as ligações essenciais entre vários pioneiros. Por volta de 1840, Joule, baseando-se em suas avaliações de motores em termos de trabalho e rendimento, chegou a estabelecer uma relação com o trabalho de Carnot sobre as máquinas térmicas introduzindo o conceito de trabalho mecânico. Pouco a pouco o seu trabalho foi interligado a de outros pioneiros e, quando muitas dessas ligações se tornaram claras, sua descoberta se mostrou semelhante à conservação da energia.

### **Reflexões sobre a quantificação da conservação da energia**

Para se compreender a quantificação da conservação da energia é necessário dar uma visão a respeito dos conceitos quantitativos que estão por trás dessa conservação. Segundo Kuhn (2011), não foi o teorema da “*vis viva*” da Mecânica que serviu de modelo para essa quantificação, mas sim, o extraído da engenharia da água, vento e vapor. O que os pioneiros de fato utilizaram foi o produto da força ( $f$ ) pelo deslocamento do ponto de aplicação dessa força ( $ds$ ) que era conhecida pelos nomes: efeito mecânico, poder



mecânico, poder mecânico, trabalho. Essa quantidade não aparece como uma entidade conceitual independente na literatura da dinâmica até 1820, quando apareceu, na França, uma série de livros sobre teoria das máquinas. Esses livros apresentavam o trabalho como uma entidade conceitual independente e importante e o relacionavam com a *vis viva*. Isso foi decorrência de um século de práticas de engenharia em que sua utilização era independente da *vis viva* e de sua conservação.

Como já vimos, até 1743, a importância geral da conservação da *vis viva* se refere à sua aplicação em problemas de colisão elástica e da queda não livre. Kuhn aponta que D'Alembert em seu *Traité de Dynamique*, só faz referência ao produto da força pela distância em certas aplicações particulares. Outras obras da época, que já foram citadas anteriormente, como a *Mécanique Analytique* de Lagrange e a *Mécanique Celeste* de Laplace, dão ênfases exclusivas a forças centrais deriváveis de função potencial.

Apenas em 1782, Lazare Carnot, em seu *Essai sur les machines en général*, nomeia e prioriza na teoria dinâmica o produto da força pela distância. Mas essa nova concepção só foi empregada ou difundida a partir do final da segunda década do século XIX, por meio das obras de Navier, Coriolis, Poncelet e outros. Todos eles se ocupavam de máquinas em movimento. Disso resulta que o trabalho, a integral da força com relação à distância, foi seu parâmetro conceitual fundamental. Entre outros resultados típicos e significativos dessa reformulação estavam a introdução do termo “trabalho” e de unidades para a sua mensuração, a redefinição de *vis viva* para  $\frac{1}{2} mv^2$ , como uma maneira de preservar a medida conceitual de trabalho, e a formulação explícita da lei de conservação em termos de igualdade entre trabalho realizado e a energia cinética gerada (KUHN, 2011).

Essas reformulações permitiram que a conservação da *vis viva* fornecesse um modelo conceitual adequado para a quantificação dos processos de conversão.

Embora as concepções fundamentais sejam incompatíveis com a conservação da energia, por utilizar a ideia de “calórico”, a obra de Sadi Carnot, *Réflexion sur la puissance motrice de feu*, era suficientemente desenvolvida de forma a conter elementos que levaram Clausius a propor uma harmonização entre o seu conteúdo e as implicações da conservação da

energia apontadas anteriormente. Dessa conciliação decorre a elaboração de uma teoria consistente para a Termodinâmica, que culmina com uma síntese revelada nas formulações matemáticas da segunda e da primeira lei, como veremos no capítulo quatro.

*“.. Quando a gente tenta  
De toda maneira  
Dele se guardar  
Sentimento ilhado  
Morto, amordaçado  
Volta a incomodar.”  
( Revelação. Clodo e Clésio)*



"Boring figure" : Edwin Boring

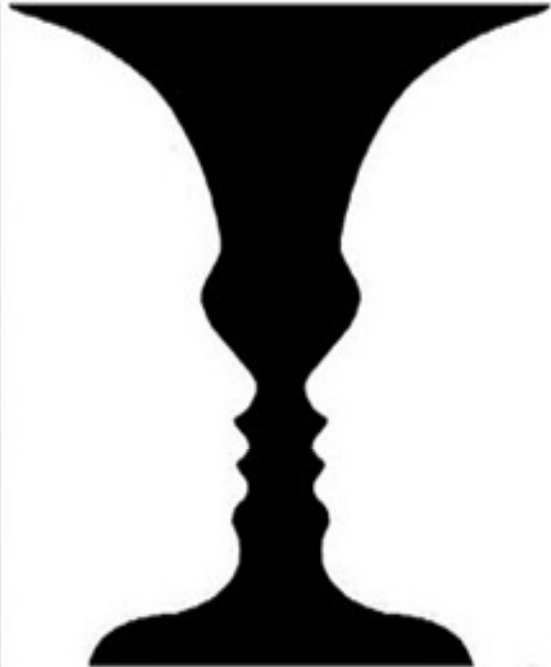


Figura de **Edgar John Rubin**

## Capítulo 3

### A construção das categorias

Como já nos referimos nas considerações preliminares, as pesquisas em ensino de ciências na década de 70 do século XX foram muito frutíferas, pois possibilitaram o surgimento de grande número de publicações especializadas focalizando conteúdos das ideias dos estudantes relacionando-as com os conceitos científicos oriundos da comunidade científica e que eram apresentados nas escolas.

A partir daí surgiu grande variedade de nomes atribuídos a essas ideias. Alguns investigadores se referem a elas levando em conta que toda aprendizagem cognitiva envolve algum grau de desconstrução e reconstrução do conhecimento preexistente. Um grande *status* epistemológico é atribuído às concepções pessoais de cada indivíduo, que são vistas como "ciência da criança e do adolescente", "teoria em ação" ou "estrutura conceitual alternativa".

Recorrendo mais uma vez a Driver (1978; 1994), esses conhecimentos não são irracionais, mas sensatos e úteis. Eles se fundamentam em premissas diferentes das científicas, mas possuem esquemas dotados de certa coerência interna.

Concordamos com Bachelard e achamos que as contradições não são percebidas porque ainda não se apresentou para o sujeito a característica recorrência do obstáculo epistemológico. As diferenças entre o conhecimento do senso comum e o científico se baseiam em dados e lógica distintos. Ambos se constituem como pontos de apoio com os quais o ser humano torna a natureza acessível ao interrogatório racional. Ambos sondam conhecimentos objetivos do universo, agem de forma ordenada, classificando, cada um à sua maneira, as informações que recebem.

Os conhecimentos dos estudantes, segundo Astolfi (2011), são *suas representações do mundo*. Segundo ele, ideias sobre alimentação, lançamento e flutuação de objetos, são adquiridas desde a época da amamentação, do início das brincadeiras e dos banhos e permanecem de forma insistente durante sua vida. Laurence Viennot (1979), ao investigar os conceitos

espontâneos dos estudantes em Mecânica, marcou o início de uma linha de pesquisa em ensino de Física que evidencia que tais conceitos, embora diferentes de seus correspondentes em Física no que se refere à elaboração e interconexão com outros, são também semelhantes e parecem organizados em estruturas com certo grau de coerência interna. Na educação infantil, no ensino fundamental, médio e superior (apesar de tudo que lhes é ensinado, apesar de horas e horas de aprendizado das disciplinas), verifica-se a manutenção desses conceitos.

Apesar da grande variedade de diferentes abordagens e visões, que aparecem na literatura, há pelo menos duas características principais que parecem ser compartilhadas: 1) a aprendizagem se dá por meio do ativo envolvimento do aprendiz na construção do conhecimento; 2) as ideias prévias dos estudantes desempenham um papel importante no processo de aprendizagem.

Muitas investigações mostram que o problema central da educação científica seria o de criar condições para que o aprendiz reflita sobre suas concepções de forma a modificá-las, ou pelo menos limitar o seu uso adotando como instrumento de interpretação do mundo as concepções aceitas pela comunidade científica.

Porém, há um árduo caminho a ser percorrido para que essa nova forma de pensar ocorra, pois a mudança conceitual<sup>33</sup> tem como principal pressuposto o fato de que tais concepções são ideias intuitivas relativamente estáveis, parcialmente consistentes, úteis para interpretação dos fenômenos cotidianos e que constituem o conhecimento do senso comum.

No contexto escolar, (re)conhecer a existência, entre alunos, de formas singulares de compreensão do mundo que se distanciam do conhecimento científico, é valorizar um conhecimento que de fato existe, faz parte do construto humano, é colocado em prática, e que, da mesma forma que na Ciência, não é refutado em determinados meios não científicos.

Na escola, entretanto, tais conhecimentos entrarão em “crise” sendo necessária a elaboração de planejamentos que propiciem uma prática

---

<sup>33</sup> Um exemplo das dificuldades em se promover uma mudança conceitual em um conteúdo sofisticado da Física moderna: a teoria da Relatividade Especial de Einstein pode ser encontrado em Villani & Arruda (1994).

pedagógica que leve a um processo de desconstrução, reconstrução de estruturas o qual permita aceder de forma consistente a outro conhecimento.

Entretanto, embora essa prática possa ser dirigida por um plano estabelecido *a priori*, os resultados do ensino não podem ser previstos ou antecipados. Por isso, deve-se entender o planejamento como estratégia e não como um programa de ensino (MORIN, 1996)

A estratégia compõe cenários de ação que podem se modificar em função de novas informações e imprevistos que emergem no curso das ações. Assim sendo, à medida que os estudantes operam com seus conhecimentos, que são distintos dos científicos, torna-se necessário uma estratégia de interações possíveis e desejáveis entre esses dois sistemas de conhecimentos.

Entretanto, reiteramos que as novidades não estão contidas apenas nos esquemas de partida, mas também está associada a atividades do sujeito com o meio social. No sentido piagetiano (PIAGET, 1983), a interação se apresentará frequentemente perturbações, gerando algo como uma falta que precisa ser preenchida e isso o coloca em marcha, em movimento.

É preciso dizer ainda que a interação do sujeito com os objetos do conhecimento é mediada pela linguagem, pela cultura e pela relação com outros membros da cultura. É por meio do outro que temos acesso à realidade (VYGOTSKY, 1991) e é pelas trocas sociais que a estrutura do raciocínio se desenvolve (PIAGET, 1983).

Nesse sentido, Aguiar Jr. (1992), afirma que *a educação científica deve estar comprometida com a inserção do jovem nas novas esferas de produção cultural da Ciência e da tecnologia, de forma a levá-lo a refletir sobre os impactos dessa atividade na vida contemporânea. Assim, segundo esse autor, os fatores sociais e individuais do conhecimento devem ser considerados elementos complementares e irredutíveis na aprendizagem escolar: de um lado “construir conhecimentos” refere-se a um esforço pessoal e insubstituível de estruturação progressiva do real, em que o sujeito é ativo e criativo; de outro, trata-se de uma construção mediada, apoiada e suportada pelas interações com os outros, acerca de objetos que fazem parte de nossa herança cultural, que é continuamente transformada a cada nova interpretação.*

Entendemos e nesse sentido, concordamos com Aguiar Jr (1992), que *a educação em ciências deve tornar pessoais os significados culturais*

*desenvolvidos pelas comunidades científicas ao longo da história humana, de maneira que a Ciência, enquanto atividade especializada possa ser apreciada, criticada e compreendida por todos.*

Além disso, é necessário que se leve em conta que tal comprometimento não é suficiente para explicar conceitos de Física de forma que os estudantes os usem de maneira segura. Investigações relacionadas a isso mostram (GREA & VIARD, 1995; VIARD & LANGLOIS, 2001) que, mesmo no caso de conceitos aparentemente simples como, por exemplo, o de resistência elétrica, o que a educação em ciências pretende não se concretiza na sala de aula. Isso ocorre porque a forma como os físicos os usam é diferente do uso cotidiano. Tomando-se na Termodinâmica, o caso do ensino da entropia, a estratégia de ensino geralmente utilizada por professores baseada no uso da metáfora da desordem compromete a compreensão dos alunos sobre o assunto (VIARD, 2002). Além disso, a falta do estabelecimento de relações entre os conceitos do aluno e os da Ciência em diversos períodos da história desses conceitos pode comprometer o acesso a um conhecimento consistente por parte dos estudantes, como é revelado em Silva (2009).

Apesar do grande número de experiências pedagógicas existentes e que focalizam o construtivismo, percebe-se que, em sua maioria, o ensino de ciências continua sem apresentar resultados satisfatórios, os alunos continuam sem aprender ou aprendem parcialmente os conhecimentos científicos que a escola se encarrega de transmitir-lhes. Isso nos leva a crer que novos modelos didáticos, resultantes da participação e cooperação de professores, alunos, pedagogos, psicólogos etc., devem ser implementados.

Os resultados insatisfatórios, segundo Gagliard (1998), ocorrem em diversos níveis escolares, em diferentes países, em meios sociais diferentes, e essa conclusão encontrou ressonância no trabalho de Silva (2009). Percebe-se, além disso, que em pouquíssimos casos as estruturas cognitivas são construídas de modo a possibilitar que os estudantes aprendam a como recorrer às ferramentas necessárias que lhes possibilitem continuar aprendendo.

Em outros termos, os estudantes não se apropriam do conhecimento científico que poderia ser útil para melhorar a qualidade de vida, nem são capazes de compreender exatamente quais problemas estão relacionados ao

controle, à produção e à utilização desse conhecimento, além de permanecerem excessivamente dependentes de um instrutor para estabelecerem planos de aprendizagem, mesmo quando finalizam seus cursos (GAGLIARD, 1998).

Tudo isso tem sido debatido em muitos congressos, e as soluções, propostas pela pedagogia das ciências – em particular aquela que leva em conta a análise das concepções espontâneas dos alunos (GAGLIARD, 1998).

Acreditamos que a identificação de antigos e construção de novos conceitos estruturantes, além de permitir uma melhor compreensão dos conteúdos da Ciência, da superação de barreiras conceituais pode ser uma base para continuar aprendendo (GAGLIARD, 1986).

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”.

Reiteramos que um ensino com base nesses conceitos implica a redução dos temas a ensinar para permitir que se dedique mais tempo ao desenvolvimento da capacidade de raciocínio dos alunos e que os conteúdos de Física não devem ser apresentados aos estudantes como um conjunto de verdades imutáveis. Já aprendemos com a História da Ciência que um sistema explicativo válido em determinada época pode não o ser em outra. Além disso, a compreensão da forma de ver da Física não implica superioridade sobre outras formas de conhecimento existente na sociedade. A responsabilidade do professor está em possibilitar meios adequados para que o aluno tenha acesso à compreensão da estrutura conceitual da Física. A escolha dessa disciplina como forma de interpretação do mundo é exclusiva do aluno.

O nosso trabalho tem como objetivo ser uma contribuição a mais para modificação dessa situação. Em vista disso buscaremos subsídios que permitam a construção, pelos estudantes, de vínculos adequados que possibilitem que eles tenham acesso a uma visão de mundo diferente da sua. Esses vínculos deverão possibilitar a compreensão de que a Ciência pode oferecer um conhecimento que vale a pena ser explorado.

Os vínculos serão procurados em investigações didáticas sendo umas delas realizada por nós (SILVA, 2009) e que contempla as concepções dos



estudantes. O trabalho de Silva é complementado por dois outros trabalhos (CARMO, 2006; NASCIMENTO, 2003) que apresentam resultados de sequências didáticas aplicadas em sala de aula.

Além disso, lançamos mão da história e Epistemologia da Ciência tendo em vista uma busca de relações entre as concepções dos estudantes e dos cientistas. Nossa intenção é que diferentes concepções possam ser confrontadas a fim de possibilitar a compreensão de que uma mesma entidade física pode ser entendida de formas diversas.

Essa compreensão que pretendemos que o estudante adquira não visa impor a supremacia de um conhecimento sobre o outro, mas sim, possibilitar uma transformação do sistema cognitivo do sujeito de forma que ele possa fazer suas escolhas e atuar respeitosa e tolerantemente na sociedade em que vive dando a sua parcela de contribuição de forma saudável e consciente.

Da mesma forma que na nossa dissertação, a procura das concepções espontâneas ou alternativas serve a dois propósitos: estabelecer uma relação com as ideias de Carnot e Clausius ao longo da elaboração da Teoria da *Termodinâmica, bem como compará-las com as da Termodinâmica hoje aceitas.*

Para chegar à compreensão mais profunda das concepções dos estudantes e sua relação com um modelo talvez mais articulado, organizamos os resultados obtidos em um quadro tomando como base a análise dos textos de Carnot e Clausius, por sua importância para a compreensão das leis da Termodinâmica com ênfase *nos três tipos de transformação de Clausius: a de calor em trabalho, a de perda da qualidade de calor e a de desagregação.* Agregamos a essas ideias outros conceitos da Termodinâmica e sua concepção científica acreditada.

Nossa intenção foi não perder de vista os elementos mais fortemente ligados às respostas e às teorias dos cientistas que se adequassem à nossa questão de pesquisa e que pudessem estabelecer correlações consistentes entre os diversos sistemas explicativos relativos aos conceitos que pretendemos abordar. Isso nos levou ao estabelecimento dos seguintes estruturantes: *analogia, sistema, transformação, processo e matematização,* com vistas de que os vínculos que permitiram a elaboração tanto das respostas quanto das teorias contemplassem os elementos mostrados na tabela:

<b>Analogia</b>	<b>Natureza do calor</b>	<b>Sistema</b>	<b>Transformação</b>	<b>Processo</b>	<b>Matematização</b>
Com o passado	Quente e frio	Fechado	Como mudança de fase	Narrativo	Simbólico verbal
Com o ambiente	Calórico	Aberto	Na qualidade	Independente do caminho	Simbólico formal
	Energia		No tipo		

### **Revisitando o trabalho de mestrado**

Neste item pretendemos revisitar o trabalho de mestrado, agora na qualidade de dados empíricos, com o propósito de sintetizar os resultados mais significativos sobre as concepções dos estudantes relativas à Termodinâmica. Procuramos apresentar também como esses resultados dão origem às questões que pretendemos investigar.

A pesquisa anterior que respalda esta, como já foi dito, foi qualitativa, baseada na construção de um instrumento para obter os dados pertinentes ao nosso problema e de outro para analisar as respostas. O primeiro instrumento consistiu na apresentação de três questões abertas sobre fenômenos termodinâmicos a alunos em duas salas de aula: uma do terceiro ano do ensino médio e outra do primeiro ano de curso superior de licenciatura em Física.

A coleta de dados serviria como uma primeira incursão no trabalho de investigação. A escolha por estudantes do ensino médio e superior se baseou, inicialmente, nas seguintes curiosidades: as respostas apresentariam níveis de elaboração diferentes? Os alunos de curso superior apresentariam, nestas amostras, concepções dos conceitos da Termodinâmica mais ajustados às concepções científicas?

As questões foram aplicadas pelos próprios professores aos seus alunos, sem a presença do investigador. Eles disseram que as respostas deveriam ser dadas no tempo máximo de vinte minutos, que seriam para o trabalho de pesquisa de um colega e que não serviriam para nota.

O tempo de vinte minutos foi determinado para que os alunos apresentassem por escrito suas concepções espontâneas que brotassem de imediato, pois eram essas primeiras impressões que deveriam se relacionar ou não, com seus conhecimentos, mais resistentes. Esse tempo mostrou-se suficiente.

A análise dos dados brutos obedeceu a vários estágios e implicou num primeiro momento a organização das respostas, separando-as em partes, relacionando estas partes, procurando identificar nelas tendências e padrões relevantes. Num segundo momento essas tendências e padrões foram reavaliados buscando-se relações e inferências num nível de abstração mais elevado.

Durante o segundo momento ocorreu uma delimitação progressiva do foco de estudo. Para isto, foi de substancial importância sugestões dadas pelo grupo de estudos da pós-graduação do qual participamos.

Este grupo, coordenado pela nossa orientadora, se reúne uma vez por semana com a finalidade de discutir o andamento dos trabalhos de cada um de seus integrantes. As sugestões sobre a correção dos rumos que apareciam durante as discussões eram algumas vezes gravadas em áudio, sendo posteriormente transcritas e refletidas, selecionando-se as pertinentes. Tal procedimento, junto com as constantes revisões dos suportes teóricos, contribuiu significativamente para que as categorias que se adequassem ao trabalho fossem finalmente encontradas.

Inicialmente parecia-nos que o número de respostas e os elementos de raciocínio contidos nelas eram insuficientes para que pudéssemos chegar aos nossos objetivos. Entretanto, durante as releituras e discussões a nossa capacidade de percepção foi ampliando de tal forma que chegamos à conclusão que não seria preciso voltar a campo para mais coletas.

De fato, os resultados eram tão interessantes e significativos, trazendo informações bastante relevantes e nos surpreendendo pela novidade e qualidade dos resultados.

As categorias surgiram após as reflexões feitas sobre os comentários e sugestões durante o segundo momento da análise com a adoção de metodologias adequadas para uma análise de dados qualitativos reveladas em trabalhos como *Investigação Qualitativa em Educação* (BOGDAM & BIKLEN,

1994) e *Mergulhos Discursivos* (MORAES, 2005). Isso permitiu uma impregnação cada vez maior no objeto de estudo.

Uma preocupação nossa foi a de que a análise não ficasse restrita ao que estava explícito nas respostas dos alunos, mas procurasse ir mais fundo, desvelando mensagens implícitas e dimensões contraditórias.

Uma mesma resposta poderia ser encaixada em várias categorias, dependendo da quantidade de elementos presentes nas argumentações e cujo conteúdo fornecia subsídios relevantes e que pudessem servir de âncoras a serem vinculadas aos objetivos do trabalho.

Para a nomeação das categorias levamos em conta grupos de respostas cujo conteúdo latente nos levou a uma interpretação invocando a proximidade com as concepções científicas acreditadas ou a consistência no raciocínio aparente, a saber:

**A:** incluíam componentes aceitáveis cientificamente (inclusive aquelas que possibilitavam relações com diferentes etapas históricas da construção da Física).

**B:** continham ideias alternativas afastadas das cientificamente aceitáveis.

**C:** revelavam percepções que se distanciavam do núcleo das questões e de baixo nível de consistência.

**D:** indecodificáveis ou estavam em branco.

Nesta investigação consideramos particularmente interessantes ideias relativas à *natureza do calor, conservação, transformação, sistema, processo e desagregação*, para investigar a estrutura de conhecimento do senso comum tendo em vista essas ideias.

Essas ideias, que se constituem como um modo de explicar do aluno (ERICKSON, 1979), são transpostas aqui da condição de dados observados a dados que subsidiam nossa pesquisa. A análise desse modo de pensar abre possibilidades para uma atuação mais ampla, tendo em vista que esse conhecimento é solidário a uma estrutura. Isso caracteriza uma organização, que, segundo Santos (1998), está de acordo com a *tendência natural do indivíduo para organizar toda a informação de que dispõe*.

Essa organização se mantém coerente para o sujeito em função do instrumento subjetivo, que é calibrado de tal forma a apresentar respostas para

as situações do cotidiano. As limitações desse instrumento subjetivo não provocam situações de conflito de uma maneira geral. No caso da ideia de calor como algo que se diferencia de uma substância raramente ele é solicitado.

Outro aspecto a ser considerado é que durante a percepção intervém uma série de coordenadas de forma que a ideia não é mais justificada. Essas coordenadas podem ser alteradas, solucionando-se conflitos localizados, mas garante-se o núcleo comum, formado pela ideia de calor como substância.

O senso comum apresenta modelos e modos de explicar próprios que valorizam aspectos fenomenológicos que, muitas vezes, não são considerados relevantes nos modos de explicar da Ciência.

Entretanto, é possível encontrar algumas ressonâncias que apontam para possibilidades do estabelecimento de conexões que viabilizam a compreensão de outras formas de se ver o mesmo fenômeno.

### **Os estruturantes nos estudantes**

- **Analogia**

A análise das respostas dos alunos às questões propostas e que tinham relação com o seu cotidiano (panelas com água submetidas a aquecimento ou como locais onde se misturam líquidos de temperaturas diferentes) revelou construtos subjetivos, embora socialmente fundamentados a respeito das propriedades que para os estudantes são relevantes. Esses modelos se organizam com base na experiência do dia a dia, representados na memória episódica deles (DIJK, 2012).

No nosso trabalho, chama-nos atenção o recurso às analogias feito pelos alunos, como é mostrado na resposta:

... sim, *acontece alguma coisa parecida com a água dos rios*, ela se evapora, forma as nuvens e retornam na forma de chuva<sup>34</sup> (M5Q<sub>1</sub>, grifo nosso).

Ao relacionar a água na panela com o que ocorre com água dos rios, percebe-se que o aluno está buscando um conhecimento que construiu com base em informações ou observações relativas a fenômenos que ocorrem no meio ambiente natural para embasar sua resposta. Revela com isso a utilização da analogia como recurso que torna explícita sua forma de explicar o fenômeno por meio de observáveis de fácil acesso aos sentidos.

O raciocínio analógico, que voltaremos a tratar depois com mais detalhes, pode facilitar discussões intermediárias sobre esse tipo de recurso que inclusive é bastante utilizado por professores e que apontaremos mais adiante em Carnot. Para Bachelard, se utilizadas com cuidado, as analogias podem contribuir na conscientização de que é necessário a sua remoção, por se constituir um obstáculo à compreensão das leis da Termodinâmica. Achamos que professores não devem evita-las com o argumento de que os estudantes as confundam com a realidade. Elas se constituem como ferramentas poderosas de compreensão. Evitando-as, corre-se o risco da sua utilização, por parte dos educandos, de maneira incontrolada e irracional. Possibilitar discussões sobre o perigo de sua utilização inadequada é mais razoável do que ignorá-las.

- **Natureza do calor como substância e quente como oposição ao frio**

A resposta a seguir foi dada por um sujeito de pesquisa à questão Q<sub>2</sub>:

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 (M14Q<sub>2</sub>).

---

<sup>34</sup> M5Q<sub>1</sub> significa resposta do aluno 5 do ensino médio à questão Q<sub>1</sub>. A partir daqui, ao nos referirmos aos sujeitos de pesquisa utilizaremos essa notação na seguinte sequência: letra que indica se o sujeito é do ensino médio (M) ou superior (S), seguida por um número entre 1 e 30 que identifica esse sujeito no grupo, finalizando com a letra Q com índice inferior que se refere à questão fornecida.

Nesta resposta, o aluno cita um ambiente a 10 °C como um “local frio”. Ele 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 que calor e frio são entidades diferentes e associadas ao ambiente, predominando o aspecto substancialista, significando que frio e calor podem entrar sair ou ser retirados dos objetos. Respostas semelhantes foram dadas pela quase totalidade dos sujeitos da pesquisa.

A ideia substancialista apresenta ressonâncias com o desenvolvimento histórico de calor. No capítulo 2 vimos que a ideia de calórico, presente no raciocínio de Carnot, já vinha sendo utilizada desde Lavoisier.

Além disso, algumas pesquisas da revisão bibliográfica mostraram que esta concepção também foi detectada não só entre crianças, estudantes do ensino médio e superior, mas também entre professores e livros didáticos.

Fazendo a relação com algumas daquelas pesquisas, percebemos que a afirmação: “... deixa uma delas num ambiente a 10 °C...”, dada por M14Q<sub>2</sub>, revela que o aspecto substancialista é acompanhado de outra ideia: a de contágio, que foi detectada em crianças de seis anos (PIAGET e POSTEL, 1986). Esses autores constataram que essas crianças são capazes de prever o aquecimento ou resfriamento da água, quando se coloca nela um suporte metálico mais quente ou mais frio, por certo tipo de contágio, com base na transmissão espacial e que o suporte esquentará a água sem perder nenhum calor. Segundo eles, “são necessários alguns anos até que se conceba a transmissão térmica”.

Entretanto, verifica-se que às vezes os estudantes consideram que “algo” é transmitido durante os processos que envolvem corpos com diferentes temperaturas, embora às vezes, não seja possível caracterizar esse “algo” como calor. O que é transmitido pode receber o nome de calor ou de energia, como aparece nessa outra resposta à mesma questão:

As temperaturas iniciais só voltarão a serem as mesmas com adição de energia externa através do calor (M6Q<sub>1</sub>).

Percebe-se na resposta que o aluno utiliza a noção de calor como um “meio de transporte” de energia. A colocação, embora confusa, apresenta

alguma ressonância com as concepções de Clausius a esse respeito, como veremos mais adiante.

Entretanto, não podemos afirmar que o aluno tem consciência disso, uma vez que o conceito de energia está fortemente impregnado da cultura social que influencia o seu dia a dia. Muitos trabalhos apresentam grande diversidade de interpretações sobre esse conceito relacionando-o às fontes (combustíveis, Sol, vento, núcleo do átomo); às suas formas de manifestação (elétrica, cinética, potencial) e a muitas outras formas estruturadas no antropocentrismo.

### **Sistema: fechado, isolado e centrado no objeto**

A maioria dos alunos descreve o sistema focalizando exclusivamente o objeto. A água nas questões Q<sub>1</sub> e Q<sub>2</sub>, e o gás na questão Q<sub>3</sub>. No caso da água citada em Q<sub>1</sub>, não faz referência a possíveis interferências entre ela e as superfícies de separação como panelas, canecas etc. e o meio ambiente. A interferência que o sistema recebe é exclusivamente entre o objeto e a fonte de calor, como mostra o exemplo a seguir (o grifo é nosso):

*Acredito que não, pois a água durante o tempo em que a chama estava acesa, houve mudança ou pode ter ocorrido mudança de fase de líquido para gasoso, impossibilitando o retorno do volume original de água na panela (S25Q<sub>1</sub>).*

Essa resposta revela sérias limitações quando se pretende analisar o fenômeno sob o ponto de vista da Termodinâmica<sup>35</sup>, uma vez que nela a delimitação das fronteiras entre o sistema e o ambiente tem de ser bem estabelecida, bem como o tipo dessas fronteiras, para que se possa analisar o que pode atravessá-las ou não.

---

<sup>35</sup> De maneira simplificada, a Termodinâmica, utilizando a terminologia atual e como aparece nos livros didáticos, considera sistema um “recorte” do universo selecionado para estudo. A região fora do sistema normalmente é denominada de vizinhança e a superfície real ou imaginária que se separa o sistema de sua vizinhança é denominada fronteira. A fronteira pode ser fixa ou móvel. O sistema pode ser fechado ou aberto. No sistema fechado nenhuma massa pode entrar ou sair dele. Se, além de fechado, nenhuma energia atravessa a fronteira o sistema é isolado. O sistema aberto envolve fluxo de massa e energia através de sua fronteira (no capítulo 4 a descrição de sistema termodinâmico será retomada com mais detalhes).



Essa ausência de considerações sobre as interações entre o sistema e o ambiente leva a barreiras, como observaram Pacca e Henrique (2004) em um trabalho sobre Mecânica.

Percebe-se às vezes, nas respostas dos sujeitos, referências a grandezas como pressão, volume e temperatura. Entretanto, elas apenas se incorporam aos discursos de forma confusa e desarticulada do ponto de vista da Termodinâmica. Como pode ser visto na resposta:

Quanto maior a pressão maior o volume e a concentração das partículas existentes no gás, portanto há um aumento de temperatura (S21Q<sub>3</sub>).

Percebe-se aí (isso ocorreu para todos os sujeitos de pesquisa) a ausência de relações entre o aumento da pressão e da temperatura do gás com o movimento do êmbolo do recipiente. O aluno não constrói sua resposta com base em reflexões sobre a primeira lei da Termodinâmica. Ele parte da informação que retirou da questão, de que a temperatura do gás na compressão adiabática aumenta. E, se a temperatura aumentou, cada partícula “deve estar dilatada” e como estão mais concentradas em um volume menor do recipiente produzem “aumento de pressão”. Provavelmente ele construiu sua resposta com base em conhecimentos mal sedimentados oriundos da calorimetria. Isso nos remete às características *facilidade, interioridade e positividade* apontadas por Astolfi (1999) ao se referir aos obstáculos epistemológicos de Bachelard.

A ausência de consciência sobre a importância da adoção da concepção de sistema termodinâmico dificulta a percepção das interações entre seus diversos componentes. Isso traz dificuldades na análise do fenômeno, uma vez que o senso comum permanece fortemente centrado no objeto, como mostra Cafagne (1996), ao apontar que algumas vezes os materiais são classificados por propriedades absolutas ou qualidades intrínsecas das substâncias: “o ferro é naturalmente frio, por isso sente-se frio ao tocá-lo. Já o plástico é quente”; “o plástico não deixa o frio entrar por isso é sempre quente”.

Essa questão do absoluto é interessante quando se coloca a questão da construção do conhecimento em discussão. Segundo Bergson (1974), há duas

maneiras profundamente diferentes de se conhecer uma coisa. A primeira implica que rodeemos a coisa. A segunda, que entremos nela. Aquela depende do ponto de vista em que nos colocamos e dos símbolos pelos quais nos exprimimos. Esta não se prende a nenhum ponto de vista e não se apoia em nenhum símbolo. Acerca da primeira maneira de se conhecer, pode-se dizer que ela se limita ao relativo. Quanto à segunda, atinge-se o absoluto, isso, segundo Bergson, toca na questão da inteligência onde ela se apresenta inata.

Com relação à mudança de fase, o raciocínio fortemente centrado no objeto leva a respostas que revelam confusões entre o todo e suas partes. Isso é mostrado no exemplo a seguir, em que o estudante confunde molécula com substância.

... não, pois durante o aquecimento moléculas de água no estado líquido foram esquentadas e vaporizaram-se, a não ser que a panela estivesse tampada (M3Q<sub>1</sub>).

A resposta evidencia um raciocínio que mostra que o aquecimento esquentava a molécula e isso é a causa da sua vaporização, como se molécula, assim como substância, também mudasse de estado. Esse raciocínio também evidencia que o estudante além de confundir molécula com substância ignora a necessidade ou não de fronteiras rígidas e/ou adiabáticas entre o sistema e o ambiente, uma vez que a panela tampada “isolava” o sistema.

Verificamos que a ideia de sistema como fechado ou isolado está fortemente ligada à existência ou não de paredes sólidas: a colocação da tampa evitaria a saída das “moléculas vaporizadas” permitindo o seu retorno às condições iniciais. Percebe-se aí que esse retorno se daria sem que houvesse interação entre a água contida no recipiente e o meio externo às paredes da panela. Essa forma de conceber o sistema se distancia da Termodinâmica, pois impede a percepção dos fluxos de calor entre o sistema e o ambiente.

Embora as questões propostas não se refiram explicitamente a sistemas, as respostas foram suficientemente reveladoras de que enquanto para o aluno o sistema é fechado, para a Termodinâmica ele é aberto. Isso se constitui como uma barreira e como tal precisa ser trabalhada pelo professor, para que o obstáculo epistemológico, de que fala Bachelard, seja removido.

As diferenças fundamentais colhidas nas respostas em relação à Termodinâmica são duas:

- 1- Os alunos não consideram todos os sistemas que interagem.
- 2- Os alunos não descrevem o sistema por meio de variáveis (ou quantidades) de estado termodinâmicas<sup>36</sup>.

As respostas evidenciam que o senso comum constrói o sistema escolhendo os objetos em função da percepção imediata. O ar pode participar do sistema quando a panela está destampada. Quando a panela está tampada o ar não participa do evento.

Entretanto, não se pode deduzir dessa constatação, que o senso comum não percebe processos em que não ocorram “trocas de calor” com a vizinhança. Um exemplo dessa contradição é revelada na resposta dada por muitos alunos à questão Q<sub>2</sub>. Novamente utilizamos a resposta de M14 para ilustração:

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 percebe-se que, o ambiente frio (vizinhança na linguagem da Termodinâmica), esfria uma das porções de água (cede “frio”), enquanto que uma fonte “quente” cede “calor quente” à outra porção. É evidente na resposta a ideia de quente e frio como entidades diferentes, o que compromete a visão da Termodinâmica em que quente e frio são manifestações de uma mesma entidade.

Os procedimentos sistêmicos dos sujeitos de levar em conta apenas objetos, faz com que suas descrições sejam feitas por meio de eventos, propriedades ou funções, a saber:

- *Eventos: “a água aquece”, “está aquecendo” ou “está esfriando”;  
“o vapor se dispersa pelo ar” ...*

---

<sup>36</sup> Na abordagem macroscópica da Termodinâmica, o estado de um sistema pode ser descrito por meio de grandezas tais como a pressão (P), a temperatura (T), o volume (V) e energia interna. Essas grandezas pertencem a uma categoria chamada variáveis de estado ou quantidades de estado. Uma segunda categoria é a de variáveis de processo ou quantidade de processo. Essa segunda categoria de variáveis somente têm um valor diferente de zero se ocorrer um processo no qual a energia é transferida através da fronteira do sistema.

- *Propriedades que descrevem os objetos: “a água é fria”; “a água é quente”; “o vapor é leve” ...*
- *Função do objeto: “a panela sem a tampa deixa o vapor ir embora”; “a panela tampada não deixa o vapor escapar”.*

Também revelam, com frequência, associação de uma propriedade do objeto com o evento (“o vapor por ser leve se dispersa pelo ar”; “a chama quente aquece a água”), levando-os a estabelecer uma relação causa-efeito.

Esses são fatores que levam a barreiras na identificação do que varia e do que se conserva no sistema.

### Processo<sup>37</sup>:

Levando em conta que quando o estudante fala da variação de quaisquer das propriedades do sistema ele está falando que seu estado também varia, podemos dizer que as respostas revelaram uma ideia de processo caracterizado por diversas formas, a saber:

- **Narrativa**

Percebida na justificativa de todas as passagens (descrição do percurso), desde o início até a situação final com abordagem exclusivamente macroscópica como mostra a resposta (os grifos são nossos):

*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 (M5Q<sub>2</sub>).*

---

<sup>37</sup> 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.

Esse modo de pensar parece muito afastado da ideia da Termodinâmica, pois para ela o que importa são os estados inicial e final de equilíbrio nos quais as variáveis constituem-se como grandezas indispensáveis para descrição desses estados. Além disso, a descrição é feita como se um narrador externo estivesse lendo um receituário que deveria ser seguido passo a passo até se chegar ao resultado final.

A narrativa algumas vezes é feita relacionando causa e efeito, justificando todas as passagens, desde o início até a situação final com abordagem exclusivamente macroscópica, como pode ser verificado na resposta à questão Q1 a seguir:

Se o volume diminui, podemos concluir que houve evaporação da água, deste modo não é possível que a água evaporada volte à condição líquida espontaneamente. Não obstante, a panela pode ter se dilatado. Com isso o volume aparente de água pode ter diminuído e conforme a panela for esfriando voltará ao seu tamanho inicial. Consequentemente a água terá o seu volume inicial também (M19Q<sub>1</sub>).

Percebe-se na resposta que o sujeito, partindo da situação final, desenvolve uma explicação com começo meio e fim em termos de ação causal que provocou a impossibilidade do retorno às condições iniciais, como mostra a parte grifada: o dado informado sobre a diminuição do volume leva à conclusão da evaporação e a água evaporada não volta à “condição” líquida. A transformação em vapor é a causa da impossibilidade da obtenção do volume original da água.

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 e de alguns elementos decorrentes de informações obtidas durante aulas de calorimetria na escola: “... a panela pode ter se dilatado.” “... o volume aparente de água pode ter diminuído...”

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, podendo ser

visto como um estágio final do que pode ser chamado de organização homeostática<sup>38</sup> da tradição cultural na sociedade alfabetizada (GOODY e WATT, 1968).

- **Reversibilidade e Irreversibilidade**<sup>39</sup>

Para os sujeitos analisados o retorno às condições iniciais está condicionado ao fato de o objeto estar aprisionado num recipiente, pois ali o sistema seria fechado, caso contrário não haveria essa possibilidade, como é revelado na resposta (os grifos são nossos):

*Sim, mas com a condição de que a panela esteja tampada. A água que sumiu na verdade foi evaporada e, sendo mais leve, tende a dissipar-se. Contudo, se a panela estiver tampada, o vapor será retido e, com a diminuição da temperatura, o vapor acaba voltando ao estado líquido (M8Q1).*

A resposta se fundamenta no fato de que a água do recipiente foi colocada em contato com uma chama que depois foi apagada. Percebe-se que a reversibilidade ocorre com a condição de que a panela esteja tampada e com o afastamento da fonte, o que leva o vapor a retornar ao estado líquido desde que a temperatura diminua.

É interessante perceber nessa resposta que a ideia de reversibilidade está condicionada à manutenção da quantidade de água dentro da panela e à diminuição de temperatura.

Entretanto, diferentemente da Termodinâmica, não se percebe referências a possíveis interferências entre o sistema e o ambiente através das fronteiras do sistema e quais as razões, depois que a chama se apaga, para a ocorrência da diminuição de temperatura do vapor. Tal fato constitui-se um

---

<sup>38</sup> Além do artigo citado, mais detalhes poderão ser encontrados em Goody (2006).

<sup>39</sup> 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.

ponto que deverá ser explorado pelo professor e que será fundamental quando se pretende discutir posteriormente o ciclo de Carnot.

Quando se trata da mistura de porções de água com diferentes temperaturas, como é o caso da questão 2, o aluno não faz relação com a primeira questão e responde de acordo com outros conhecimentos, como pode ser observado nas respostas (os grifos são nossos):

Separam-se os líquidos, aquece-se um copo até chegar a 30 °C e resfria-se o outro até chegar a 10 °C (M2Q2).

*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 (S26Q2).*

A noção de reversibilidade aparece agora como condicionada 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.

Alguns alunos apresentam ideias mais elaboradas quando respondem com base na estrutura interna do corpo. Neste caso se aproximam de uma forma muito remota, da noção científica de irreversibilidade como algo relacionado ao arranjo interno das substâncias, como pode ser visto nas respostas (os grifos são nossos):

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 (M1Q2).*

Não. A água evaporada, que passou do estado líquido para o gasoso não voltará espontaneamente para a panela, *pois uma*

*vez destruída a força que unia a molécula de água, ela não voltará a se unir (M6Q1).*

Não, pois com o aumento de temperatura provocado pela chama a água evaporou, atingindo *a forma gasosa que se espalha pelo ar*, evitando que, de forma natural, essa água retorne à panela (M16Q1).

Percebemos, além do que já foi exposto, que muitos alunos, ao responderem à questão Q<sub>1</sub>, consideram que o retorno espontâneo do vapor às condições iniciais não é possível a menos que alguma alteração ocorra nele. Essas alterações são explicitadas em colocações como: “a temperatura deve ser alterada”, “deve ocorrer aumento na pressão e na temperatura”. Depreende-se daí que tais colocações são explicações superficiais e inconsistentes sob o ponto de vista da Termodinâmica, mesmo quando tentam se fundamentar em variáveis como temperatura, pressão e volume oriundas da educação formal. Isso confirma a ausência de vínculos de que fala Pietrocola (1999).

O distanciamento do conceito científico da ideia da volta do vapor ao estado líquido é revelado pela ausência de colocações sobre interações entre o sistema e o ambiente, como mostram as respostas (os grifos são nossos):

De forma espontânea, não. Já que, parte da água ebuliu, para que seu volume tenha diminuído. *Como não é possível por livre espontânea vontade, fazer a água condensar, (sem alterar a temperatura)*, logo, não é possível (M4Q1).

De forma espontânea não. Pois teria que ocorrer um aumento na pressão e na temperatura (M7Q1).

A noção de irreversibilidade nesse trabalho é a adotada por Clausius e será mostrada mais adiante.



## Transformação<sup>40</sup>:

Para a maioria dos estudantes a ideia de transformação está ligada à mudança de fase, como pode ser verificado nas respostas (os grifos são nossos):

*Sim. O volume diminuiu devido à evaporação. Se a panela foi aquecida com sua tampa vedando-a, então, após algum tempo, as moléculas de água se condensarão e o volume inicial voltará a existir (M14Q<sub>1</sub>).*

Essas ideias permitiram o levantamento daquelas consideradas próximas e distantes das científicas.

As ideias que possuem algumas aproximações poderão possibilitar discussões entre as “semelhanças aparentes” com a finalidade de pontuar as reais diferenças entre as duas visões.

### **As aproximadas são:**

- Descrições sobre “mudança de fase”, que apresentam algumas tímidas ressonâncias, com a ideia de desagregação de Clausius, à medida que se referem ao comportamento dos componentes microscópicos da água.

- “Sistema” como algo que perde ou troca massa com o meio que o envolve, revelando alguma aproximação com o modelo de sistema aberto e fechado da Termodinâmica. Esse ponto se constitui como fundamental para mostrar a importância da utilização do sistema termodinâmico como condição para a compreensão do que se conserva e do que varia no sistema.

### **As distanciadas são:**

*- Indiferenciação entre calor e temperatura.*

---

<sup>40</sup> Essas ideias de transformação aparecerão confrontadas mais adiante com as de Carnot e Clausius. Nosso intuito é mostrar que apenas esse último se refere a ela relacionando-a com a natureza do calor sob o ponto de vista energicista.

- Modelo substancialista<sup>41</sup> de calor.
- Calor e frio como entidades diferentes.
- Falta de percepção dos fluxos de energia entre o sistema e o meio ambiente.
- Frequente utilização da forma narrativa o que revela a existência de uma historicidade, que na Termodinâmica clássica, é enfraquecida pois a ênfase se dá nos estados iniciais e finais do processo.
- Raciocínio linear causal, o que na Termodinâmica se constitui como um obstáculo, pois impossibilita o estabelecimento da relação entre várias variáveis ao mesmo tempo.
- Transporte dos modelos mecânicos para os da Termodinâmica de forma desarticulada, pois não são levadas em consideração as diferentes perspectivas e as implicações delas decorrentes, entre os modelos macro e micro.

As considerações feitas nos parágrafos precedentes também são percebidas em Sciarreta (1987), ao se referir às limitações do senso comum em relação ao conhecimento científico que ele identifica como consequência de um embasamento composto pelos seguintes pontos:

- Uma linguagem que se serve da palavra com significado muito diverso do científico.
- A sensação tátil, que permite relacionar a propriedade do objeto com o corpo humano em função da duração do contato e do ambiente.
- As atuações do sujeito sobre o objeto para controlar as variações do seu estado térmico e do ambiente.
- As sensações visíveis que são ligadas às variações de temperatura.

O raciocínio linear causal entre estudantes franceses é detectado por Viennot (1991) atesta a complexidade do processo do equilíbrio termodinâmico em termos de um raciocínio caracterizado por associação de variáveis em

---

<sup>41</sup> Em A Formação do Espírito Científico, Bachelard (2008), afirma “que por uma tendência quase natural, o espírito pré-científico condensa num objeto todos os conhecimentos em que esse objeto desempenha um papel, sem se preocupar com as hierarquias dos papéis empíricos”. O que prevalece nesse caso é a experiência externa evidente, escapando a crítica do mergulho na intimidade.

função do contexto, ou seja: há uma associação preferencial de variáveis por meio da “colagem” de duas delas, como pudemos observar nas respostas dadas pelos estudantes à questão Q<sub>3</sub> em nosso trabalho, a saber:

- Sobreposição de variáveis: os aumentos de pressão são descritos apenas com o aumento da densidade de partículas durante a compressão adiabática. Não há referências sobre aspectos relevantes tal como a velocidade média das partículas como se verifica na resposta: “como o volume diminui, então as moléculas ficam mais próximas uma das outras; assim há mais colisões e a pressão aumenta”.
- Transporte de modelo mecânico para o termodinâmico: “... as partículas ficam mais juntas, se atritam mais e a temperatura aumenta”.

Insistimos que a identificação desses estruturantes podem ajudar os professores na elaboração de estratégias quando se pretende que os estudantes compreendam os conceitos científicos. Tais obstáculos poderão ser removidos com o fornecimento de atividades que promovam situações problemas em que os alunos percebam que suas concepções não conduzem a soluções satisfatórias sob o ponto de vista da Ciência. Dessa forma, amplia-se o repertório do professor podendo levá-lo a uma atuação que permita colocar o estudante em condições de perceber a importância que o novo conhecimento poderá ter para ele.

Nossa expectativa, nesse trabalho, é de que a apreensão do modo de pensar da Ciência permitirá novas aberturas de possibilidade de explicações tanto para os fenômenos naturais quanto para aqueles verificados nos produtos tecnológicos profusamente colocados à disposição do ser humano, permitindo um ajustamento maior entre os aspectos subjetivos do indivíduo e o mundo à sua volta.

Verificamos também ressonâncias entre as nossas detecções e aquelas de autores da nossa pesquisa bibliográfica, além daqueles que citamos nesse item. Tanto para nós como para muito deles, é fundamental a compreensão dos processos de transformação de energia com base nas interações

envolvidas nos sistemas físicos e não como propriedades intrínsecas dos corpos e, além disso, que os estudantes possam perceber que a conservação da energia só é possível quando acompanhada da degradação.

### **A matematização<sup>42</sup>: aspectos embrionários**

As respostas dos estudantes, como já vimos, revelam recorrências a ideias abstratas e implicitamente relacionadas a um referencial colocado no ambiente, com base no qual estabelecem, embora de forma qualitativa e baseada em sensações, raciocínios que nos parecem “embriões matemáticos”. Para eles, “quente” e “frio” equilibram-se na temperatura ambiente. Percebem-se referências a temperaturas acima do ambiente que podem estar ligadas a temperaturas consideradas altas para o instrumento sensível do ser humano. Do mesmo modo, são observadas temperaturas abaixo da do ambiente, muitas vezes relacionadas ao “calor frio” que é atribuído a corpos com temperaturas baixas.

Ao descreverem a condutividade do calor em misturas de porções do mesmo líquido inicialmente a temperaturas diferentes como apresentada pela questão Q<sub>2</sub>, a maioria dos sujeitos dizem que a porção mais fria se esquentava porque recebe calor da parte quente e vice-versa. O duplo sentido da propagação do calor é típico desse raciocínio: O frio invade o quente e o quente invade o frio, até que não mais produz sensação alguma.

Ao se referir à temperatura de equilíbrio, os estudantes tendem a associar o equilíbrio térmico ao equilíbrio estático significando ausência de visão microscópica do sistema no qual as partículas constituintes da água estariam em movimento.

Percebe-se que, para esses estudantes, em uma temperatura fora da do equilíbrio térmico, o corpo é portador de “algo” que eles denominam “calor” ou “frio”. Sendo assim, ao se misturar duas porções da substância com

---

<sup>42</sup> Pietrocola (2008) propõe duas categorias para analisar a aprendizagem de Matemática dos estudantes e sua relação com a compreensão/modelagem dos fenômenos da Física: habilidades técnicas e habilidades estruturantes. A primeira categoria refere-se ao campo mais “interno” da Matemática e está relacionada ao domínio instrumental de algoritmos, regras, fórmulas, gráficos, equações etc. Essas habilidades, segundo esse autor, são insuficientes para que os estudantes compreendam a Física, pois nela o uso da Matemática tem outro objetivo. Trata-se de outra semiótica. As habilidades estruturantes no ensino de Física devem passar, segundo Pietrocola, pela discussão acerca de modelos e modelização.

temperaturas diferentes, o quente “esquenta” o frio e este por sua vez “esfria” o quente. Esta situação, como observou Cafagne (1996), revela uma visão de equilíbrio relacionada à “ausência de sensação”, que serve de referência para separar o quente do frio, caracterizando um ponto neutro, abaixo do qual estão as temperaturas negativas e acima do qual estão as temperaturas positivas.

Essa visão de equilíbrio parece evidenciar que os estudantes separam as “temperaturas quentes” das “temperaturas frias” por um “ponto neutro.” Esse raciocínio parece baseado na ideia de aniquilação, uma espécie de “choque térmico”: o frio seria correspondente a uma “quantidade negativa”, enquanto que o quente corresponderia a uma “quantidade positiva”. Ao se juntarem, é como ocorresse uma “operação de adição” na qual o resultado seria o ponto de equilíbrio que corresponderia à ausência do quente e do frio. Nesse caso, as quantidades de frio e quente não possuiriam necessariamente o mesmo valor. Essas seriam manifestações de uma matemática embrionária, algo semelhante às “generalizações simbólicas” de que fala Kuhn à qual nos referimos na introdução desse trabalho e que nesse caso são expressas em palavras e dentro de uma perspectiva diferente da científica<sup>43</sup>.

As temperaturas quentes e frias às quais nos referimos no parágrafo anterior nos parecem também ter alguma relação com o fato de que os termômetros usuais normalmente correspondem a uma região da escala termodinâmica de acordo com a função a que se destinam. Os mais conhecidos apresentam escala de 0 a 100, em que o 0 corresponde à temperatura de fusão do gelo e 100, à temperatura de ebulição da água. Nessa escala, convencionou-se que os valores que estão abaixo de zero correspondem a temperaturas negativas e os acima de zero, positivas.

Esse modo de calibrar o instrumento de medida resulta em relativização e pode ser a causa de conflitos na medida em que, de alguma maneira associa temperaturas baixas a temperaturas negativas e temperaturas altas a temperaturas positivas.

---

<sup>43</sup> Autores como Davis e Hersh (1995) defendem que a ampliação da compreensão da Matemática como estruturante do pensamento científico implica em situá-la como uma parte indivisível da Física e a História da Matemática mostra que vários conceitos matemáticos têm suas origens associadas a problemas físicos; eles citam como exemplo a análise de Fourier, que foi motivada por problemas relacionados com cordas vibrantes e propagação do calor. De uma forma inversa, conceitos matemáticos oriundos de um mundo abstrato sem compromisso com aplicações do mundo real foram utilizados por cientistas para a construção de suas explicações teóricas.

O uso de pontos fixos como referências nos termômetros comerciais também apresenta barreiras relacionadas com o conceito de mudança de fase.

Cafagne (1996), afirma que nas visões dos alunos, o valor  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  apresenta interpretação diferente da científica; muitos consideram que a água no estado sólido só é admitida nessa temperatura, ou abaixo dela. Raciocínio semelhante ocorre com a água no estado de vapor:  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou acima dela. Isso evidencia dificuldades de uma compreensão mais consistente em relação à mudança de fase.

A falta de associação dos aspectos qualitativos e quantitativos do fenômeno com o modelo da Termodinâmica resulta no uso indiscriminado de explicações variadas baseadas em modelos diferenciados para as situações que exigem o mesmo modelo e de um mesmo modelo para situações que deveriam se utilizar de modelos variados. Percebe-se isso inclusive em livros didáticos em que, a condutividade e o calor específico são utilizados indiscriminadamente para justificar o aquecimento e o resfriamento dos objetos.

Achamos que chamar a atenção para esses aspectos do pensamento do aluno também poderá contribuir para a diminuição das queixas de muitos professores de que seus alunos não aprendem Física por falta de conteúdos de Matemática.

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.

Geralmente o professor nota a fragilidade do conhecimento dos seus alunos ao propor a resolução de problemas de lápis e papel que normalmente aparecem no final de capítulos de livros didáticos, em listas apresentadas para ser resolvidas e naqueles que são colocados em provas.

Entretanto, essa visão de fragilidade precisa constantemente ser redimensionada. Na verdade, pensamos que esse importante dado revela que os estudantes “não se apossaram do conhecimento que o professor pretenda que ele tenha”. Parafraseando Bachelard em seu livro *A Formação do Espírito Científico*, acreditamos que os professores, principalmente os de Ciências, não compreendem que os alunos não compreendem.

O conhecimento que se pretende transmitir na escola é estranho, não possui significado para eles. É preciso considerar que a mente do aluno não é vazia; durante sua interação com o mundo extraescolar ele foi construindo conhecimentos. Como ele não compreendeu o conteúdo transmitido pelo professor, as respostas que dão continuam se apoiando nos conhecimentos que eles possuem: o conhecimento do senso comum.

O aspecto embrionário de raciocínio matemático é apontado em muitas pesquisas das quais destacamos, mais uma vez, Piaget e Postel (1986) ao citar a influência da questão espacial no raciocínio das crianças que associam o volume de um corpo a uma determinada temperatura com a quantidade de “calor quente” que ele possui. Ao se apresentar a uma criança partes iguais de água à mesma temperatura e separadas por uma parte móvel, ela acredita que quando a separação for retirada, a água ficará mais quente. Como se “mais líquido implicasse em maior temperatura”. Esta constatação também ocorreu nos trabalhos de Erickson (1979) entre crianças de três a onze anos, com relação ao frio: “um grande cubo de gelo demora mais para derreter que um cubo pequeno porque o cubo grande tem uma temperatura mais baixa que o pequeno”.

Essas constatações, acreditamos, precisam ser levadas em consideração antes e durante a introdução do tratamento da Matemática, que consideramos ter um papel de relevância no ensino de Física, apesar do aspecto matemático não se constituir como elemento central do nosso trabalho. Entretanto não podemos deixar de nos interessar por isso. Sobre essas questões tornaremos a falar de maneira mais ampla no próximo capítulo.

*“Somos o que fazemos, mas somos, principalmente, o que fazemos para mudar o que somos.”*

*Eduardo Galeano*

*“Nada existe de permanente a não ser a mudança.”*

*Heráclito*



A Model Scenario of the Flying Classroom <http://www.flickr.com/photos/admsp/>



## Capítulo 4

### Os estruturantes nos cientistas

#### Carnot e Clausius. Enfim, a Termodinâmica.

Neste item destacaremos pontos dos trabalhos de Carnot e Clausius que foram fundamentais para estruturação da Teoria da Termodinâmica que resultou no estabelecimento da primeira e segunda lei por Clausius.

Esses pontos estruturantes foram obtidos por meio da análise da tradução para o espanhol da obra original de Carnot, *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propes a développer cette puissance*, feita por Javier Odon Ordonez (1987).

Agregou-se a elas, como suportes interessantes, a leitura da edição crítica sobre o mesmo trabalho feita por Fox (1978). As passagens mostradas se relacionam aos nossos propósitos e consideramos que são em número suficiente e estão de acordo com o caminho que pretendemos percorrer.

As passagens dos trabalhos de Clausius que mostraremos neste item foram retiradas das edições francesas da coleção “Mechanische theorie der warm” (“Theorie Mécanique de La Chaleur”) traduzidas do alemão e publicadas em 1868 e 1888 respectivamente pela Librarie Scientifique, Industriale et agricole e a segunda pela “Librarie Gauthier-Villars”, em Paris. Nesses trabalhos Clausius reuniu seus artigos anteriormente publicados.

Os estruturantes que colhemos nos trabalhos desses cientistas, fundamentados na Epistemologia de Bachelard, pretendem evidenciar os elementos de pensamentos iniciais, de diferentes visões sobre a natureza do calor, os momentos das rupturas, do papel das analogias como reveladoras da importância de conhecimentos anteriores para a elaboração de novas, como se procedem as sistematizações, os processos e as transformações, bem como destacar o papel da Matemática na concepção de novas ideias, a influência da intuição na matematização, os momentos de síntese e de mais uma nova forma de se pensar em ciência.

Queremos destacar, a impotência que teve para nós a leitura do trabalho de Aurani (1985) por nos oferecer alguns suportes e ideias interessantes

durante a nossa construção do estruturante processo tanto em Carnot quanto em Clausius, uma vez que, a análise de conteúdo dos dois cientistas escolhidos demandava considerações relativas a ajustamentos adequados à nossa proposta que era redimensionar de forma segura considerações que fossem pertinentes ao estudantes de ensino médio e que se relacionassem às respostas colhidas (e reanalisadas) do nosso trabalho de mestrado.

## Os estruturantes em Carnot

### Analogia

O trabalho de Carnot revela o papel que a analogia teve na estruturação do seu raciocínio. Para ele, o calor é uma substância que 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, como é evidenciado na passagem (os grifos são nossos):

(...) poderemos comparar, com suficiente precisão, a potência motriz do calor à de uma queda d'água. Cada umas delas tem um máximo que não podemos exceder, qualquer que seja, por um lado, a máquina em que atua, e qualquer que seja, por outro lado, a substância em que o calor atua. A potência motriz de uma queda d'água depende se sua altura e da quantidade de líquido. *A potência motriz do calor depende da quantidade de calórico usado e do que podemos chamar de altura de sua queda. Isto é, da diferença de temperatura dos corpos entre os quais a troca de calor é efetuada.* (1987, p. 49, tradução nossa) [1]<sup>44</sup>

Foi justamente essa analogia que se apresentou como novidade em sua teoria. A potência motriz dependia apenas da quantidade de “calórico” utilizado e da diferença de temperatura entre as quedas. A concepção de calórico que usou já fora estabelecida desde Lavoisier e era adotada por grande número de

---

44 A partir daqui, em cada citação direta de Carnot e Clausius aparecerá, o item [i], sendo i = 1, 2, 3 ... (número da citação), indicando que ela será reproduzida após o final do capítulo, em *notas*.

físicos e químicos da época. A novidade surpreendeu a comunidade científica, pois durante cem anos, o aperfeiçoamento das máquinas era procurado em substâncias que deveriam ser colocadas no motor, no desenho de suas peças ou em elementos que Carnot provou serem irrelevantes.

A parte que grifamos na citação, representa para nós, o que deveria ter sido na época, um aspecto que deve ter impressionado os leitores da obra de Carnot: a comparação da altura da queda d'água com a diferença dos níveis de temperatura das fontes: O calórico “cai da fonte quente para a fonte fria”. Está aí “o momento da criação” que nos parece semelhante à criação artística. Essa analogia deve ter deixado os contemporâneos de Carnot bastante impressionados

### **Natureza: Calor como calórico**

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):

(...) sua passagem de um corpo cuja temperatura é mais ou menos elevada, a outro cuja temperatura é mais baixa. Sem dúvida, 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. (1987, p. 40, tradução nossa)*  
[2]

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”, que supostamente havia sido quebrado de alguma forma, isto é, por uma ação química como é o caso da combustão ou por alguma outra causa.

De acordo com esse princípio, para produzir potência motriz, não basta produzir calor: tem-se que procurar o frio; o calor sem o frio seria inútil.

Com essa descrição, Carnot reduz o estudo das máquinas térmicas ao modelo das clássicas, das quais o seu pai, Lazare, havia produzido a primeira e mais influente das descrições sistemáticas. O funcionamento das máquinas simples pressupõe o movimento como dado: limita-se a transformá-lo e transferi-lo para outros corpos. Do mesmo modo, para Carnot, dar-se-á o fluxo de calor, que se conserva em todas as transformações que provoca.

### **Sistema:**

A necessidade de Carnot de isolar o sistema se relaciona com a produção de máxima potência motriz e à mudança de volume do vapor d'água decorrente do movimento do pistão na máquina. Carnot percebeu que esse rendimento máximo ocorreria quando o restabelecimento do equilíbrio se efetuasse apenas por meio da alteração do volume do vapor d'água, como se percebe na seguinte passagem:

Levando-se em conta que qualquer restabelecimento do equilíbrio no calórico pode ser a causa de potência motriz, todo restabelecimento do equilíbrio que se faz sem produção dessa potência deverá considerar-se como perdido (...) toda mudança

de temperatura que não se deva a uma variação do volume dos corpos, não pode ser senão, um restabelecimento inútil de equilíbrio no calórico; a condição necessária de máximo é, portanto, *que não se realize nos corpos empregados para realizar a potência motriz do calor nenhuma mudança de temperatura que não se deva a uma mudança de volume*. Reciprocamente, todas as vezes que se cumpra essa condição se obterá o máximo (1987 p. 46-47, tradução nossa) [3]

Fica evidente aí, que a condição que deve ser estabelecida para se obter a maior eficiência da máquina, é a de evitar que durante o processo, o vapor não produza efeitos de dilatação e contração devido ao contato com as paredes do recipiente. Esse raciocínio de Carnot foi elaborado recorrendo aos trabalhos do seu pai, Lazare<sup>45</sup>.

Para Lazare, uma máquina mecânica tem melhor rendimento, quando sua construção e seu regime de funcionamento são tais que os choques, fricções, mudanças bruscas de velocidade são evitadas. Esse raciocínio é baseado nas aplicações da Física de seu tempo: só os fenômenos contínuos são conservativos; todas as mudanças bruscas de movimento determinam uma perda sem recuperação da “*vis viva*” (PRIGOGINE e STENGERS, 1994).

Da mesma forma Sadi Carnot descreve como deve ser a máquina térmica ideal. Ela deverá evitar que a substância que transporta o calórico entre em contato com corpos de temperaturas diferentes. Para isso, concebe um ciclo de tal maneira que nenhuma alteração de temperatura dessa substância resulte de um fluxo de calor entre dois corpos de temperaturas diferentes.

Segundo Aurani (1998), a definição operacional da condição de máximo apresentada por Carnot, pode ser reconhecida hoje como a origem do conceito de ciclo reversível. Os ciclos e sua reversibilidade nortearam os desenvolvimentos posteriores da teoria do calor. Eles se constituíram como suporte aos trabalhos de Clapeyron, Kelvin e Clausius o que permitiu conferir identidade e personalidade à teoria da Termodinâmica.

---

<sup>45</sup> Segundo Prigogine (1993), Lazare Carnot teve, no início do século XIX, grande influência sobre a primeira geração dos manuais de mecânica racional destinados aos alunos das grandes escolas de engenharia que surgiram naquela época.

Ao revelar sua preocupação na busca de princípios gerais, Carnot estabelece que qualquer produção de movimento pelo calor é acompanhada do restabelecimento de equilíbrio no calórico, como pode ser observado na passagem (os grifos são nossos):

Nas operações que descrevemos se reconhece facilmente o restabelecimento de equilíbrio no calórico, sua passagem de um corpo mais ou menos quente a um corpo mais frio. Aqui o primeiro desses corpos é o ar esquentado no fogão, o segundo é a água de condensação. O estabelecimento do equilíbrio no calórico se realiza entre eles, se não completamente, ao menos em parte; ... Assim, a produção da potência motriz na máquina a vapor se deve não a um consumo real do calórico, *senão a seu transporte de um corpo quente a um corpo frio*, ou seja, ao restabelecimento do seu equilíbrio...logo veremos que este princípio é aplicável a qualquer máquina que seja colocada em movimento por meio do calor. (1987, p. 40, tradução nossa) [4]

A referência a duas fontes torna evidente que o sistema deve ser colocado em contato com duas fontes (quente e fria) o que mostra situações em que o sistema, apesar de continuar fechado, deixa de ser isolado durante o ciclo.

A necessidade da existência de duas fontes térmicas para sustentar a ideia de que o calor “cai” da temperatura mais alta (fonte quente) para a temperatura mais baixa (fonte fria) permite identificar elementos da segunda lei da Termodinâmica no raciocínio de Carnot. Isso indica um sentido privilegiado para o movimento do calor. Depreende-se daí que apenas a produção do “calor quente” não é suficiente para dar origem à potência motriz. É necessário que essa qualidade de ser “quente” se modifique, passando para “calor frio”. Esse ponto também se constitui como uma das grandes novidades da teoria de Carnot que será explorada de forma mais consistente posteriormente por Clausius.

Porém a descrição de Carnot evidencia o transporte de calórico entre as duas fontes de forma inalterada: ele é recebido pela substância de transporte (vapor d’água) e despejado na água fria do condensador, sem que haja

alteração na sua quantidade, perdendo, entretanto, qualidade. O calor de temperatura alta passa a ser um calor de temperatura baixa.

A parte da teoria de Carnot que está em desajuste com as descobertas do século XIX é aquela em que, ao considerar o calor como “calórico” (substância), afirma que sua quantidade se conserva ao se deslocar entre as duas fontes. Para ele, segundo a nossa interpretação, a mudança que ocorre no calórico é apenas de qualidade, ou seja, ao “cumprir sua função”, embora se conservando em quantidade, utilizando a terminologia moderna, encontra-se “degradado”.

### Processo:

No trabalho de Carnot (1987), percebe-se o objetivo de estabelecer as leis que regem o funcionamento das máquinas térmicas ideais. Para isso, depois de ressaltar a função da temperatura na realização da *potência motriz*, analisa o ciclo de transformações em uma máquina ideal. A análise do funcionamento da máquina real não favorecia tal visualização, pois a substância transportadora do calórico sempre era modificada, uma vez que o vapor era sempre renovado.

A análise do ciclo ideal ia além dos tratamentos de sua época sobre as máquinas térmicas, pois naquela ocasião, percebia-se grande preocupação com o movimento do êmbolo, ou seja, focalizava-se o momento em que ocorre o trabalho mecânico, mas não se analisava o que ocorria depois da abertura das válvulas de saída do vapor.

Carnot pelo contrário, focaliza sua análise na recuperação do estado inicial, concebendo a série de operações da máquina como um *ciclo fechado*. Para isso se fundamentou em fatos experimentais que mostravam quais eram as melhores maneiras de se obter a variação de temperatura dos gases por compressão ou por dilatação destes<sup>46</sup>. Ele dividiu o processo em quatro fases. Duas isotérmicas e duas adiabáticas. No decurso de cada uma das duas fases isotérmicas, o sistema está em contato com uma das duas fontes térmicas e é mantido à temperatura dessa fonte. Em contato com a fonte quente, absorve

---

<sup>46</sup> Essas fundamentações encontram-se relatadas em nota de rodapé das reflexiones... (CARNOT, 1987, p. 50).

calor e dilata-se; em contato com a fonte fria, perde calor e comprime-se. As duas fases isotérmicas são conectadas entre si por duas fases em que o sistema é isolado das fontes; o calor não entra nem sai mais do sistema, mas varia de temperatura após uma compressão e uma dilatação, respectivamente. A alteração de volume prossegue até que o sistema vá da temperatura de uma fonte à de outra.

*Segundo Aurani (1998), o ciclo ideal de Carnot pode ser descrito em seis passos<sup>47</sup>, a saber:*

- 1- o ar dentro do cilindro é colocado em contato com a fonte quente e entra em equilíbrio térmico com ela; nessas condições a posição do pistão é cd.

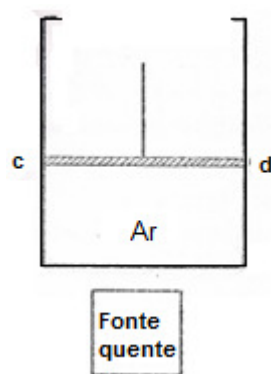


Figura 1: adaptada de Aurani (1998)

- 2- À medida que recebe calor ( $Q$ ), o ar expande-se isotermicamente até que o pistão se posicione em ef.

---

<sup>47</sup> A nossa escolha por fazer adaptação dos passos descritos por Aurani (1998) se situa no âmbito da transposição didática por considerar que essa autora deu um tratamento que nos pareceu adequado aos nossos propósitos. Entretanto, para um mergulho mais profundo a esse respeito, esses seis passos, bem como a figura original que Carnot utilizou em sua descrição, poderão ser encontrados em Carnot (1987. P. 49-55).



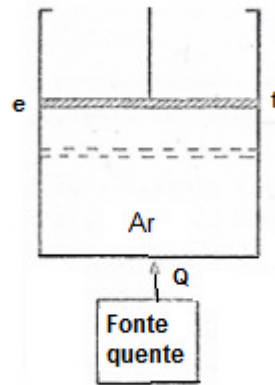


Figura 2: adaptada de Aurani (1998)

- 3- Permite-se a expansão do ar, sem que haja fornecimento de calor, até que o pistão alcance a posição gh.

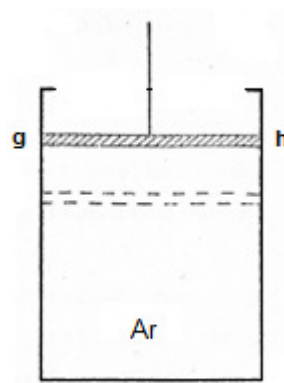


Figura 3: adaptada de Aurani (1998)

- 4- O ar cede calor ( $Q$ ) para a fonte fria enquanto é comprimido até retornar ao volume inicial; entretanto sua pressão e sua temperatura não são as mesmas de (1).

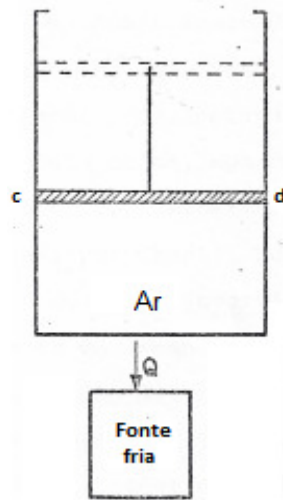


Figura 4: adaptada de Aurani (1998)

5- Comprime-se adiabaticamente o ar até que ele atinja a temperatura inicial; o pistão move-se par  $ik$ .

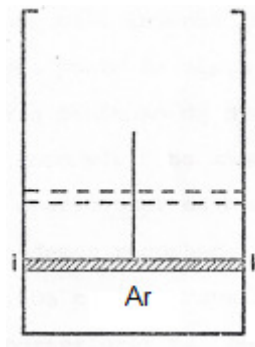


Figura 5: adaptada de Aurani (1998)

6- O ar é novamente posto em contato com a fonte quente e o processo pode ser retomado a partir da etapa (2).

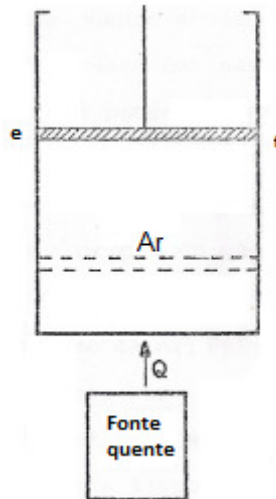


Figura 6: adaptada de Aurani (1998)

A descrição acima, que se ajusta adequadamente à descrição original de Carnot (1987 p.51-53), nos leva, para completarmos um pouco mais nossa descrição, aos comentários de Carnot relacionados à operação no sentido inverso:

Todas as operações descritas acima podem realizar-se em um sentido e em ordem inversa. Imaginemos que depois do sexto período, ou seja, havendo chegado o êmbolo à posição *ef*, faz-se que ele volte à posição *ik* e que ao mesmo tempo se mantém o ar em contato com o corpo o corpo A<sup>48</sup>: o calórico proporcionado por esse corpo durante o sexto período<sup>49</sup> voltará à sua fonte, ou seja, ao corpo A, e as coisas se encontrarão no estado onde estavam ao final do quinto período. Se agora se separa o corpo A e se leva o êmbolo de *ef* a *cd*, a temperatura do ar decrescerá tantos graus quanto havia aumentado durante quinto período. Se agora se separa o corpo A, ela será a do corpo B<sup>50</sup>. Evidentemente se pode continuar uma série de operações inversas das que temos descrito primeiramente: basta situar-se nas mesmas circunstâncias e realizar para cada período um movimento de dilatação<sup>51</sup> em lugar de um

<sup>48</sup> O corpo A a que se refere Carnot, nas nossas figuras é a fonte quente.

<sup>49</sup> O que Aurani denomina de passo, Carnot chama de período.

<sup>50</sup> O corpo B, nas nossas figuras é a fonte fria.

<sup>51</sup> Carnot chama de “dilatação” a expansão do ar.

movimento de compressão e reciprocamente. (p. 53-54, tradução nossa) [5]

Entretanto, como já dissemos, para isso se concretizar implicaria um processo extremamente lento, correspondendo a uma máquina de rendimento muito próximo de zero (processo quase estático), o que significa que a máquina de Carnot tem significado apenas teórico, e não prático.

A ideia da conservação do calórico em Carnot torna o calor, utilizando a terminologia moderna da Termodinâmica clássica, uma variável de estado (o que está em inteira discordância com a concepção de Clausius<sup>52</sup>).

Além de Clausius, esse modo de pensar foi considerado equivocado por muitos cientistas de sua época como vimos no capítulo 2, sendo um deles Rumford, ao descobrir a possibilidade de se extrair de um sistema uma quantidade ilimitada de calor por meio da cessão de energia mecânica. Outros experimentos evidenciaram a possibilidade de mudar o estado de um sistema retirando calor para aquecer um corpo e depois fazê-lo retornar ao estado inicial sem ceder calor, mas cedendo energia mecânica.

Outros questionamentos colocados por cientistas, entre os quais Kelvin, levava a dúvidas sobre a produção de energia mecânica (movimento do pistão na máquina de Carnot), sem que houvesse alguma “compensação”. Essa ideia de compensação foi introduzida por Clausius que redimensionou o conceito de calor cuja implicação no significado de processo termodinâmico foi fundamental.

Além disso, como já vimos, o embrião da segunda lei da Termodinâmica apresentado por Carnot, quando se refere ao sentido do movimento do calórico que flui do corpo mais quente para o corpo mais frio, mostra que apenas a produção do “calor quente” não é suficiente para dar origem à potência motriz. É necessário que haja o “calor frio”. Sem isso, a máquina seria inútil. Percebe-se aí outro aspecto embrionário: o dos processos irreversíveis dos fenômenos naturais que serão explorados com mais profundidade por Clausius.

---

<sup>52</sup> A variável de estado independe do percurso pelo qual o sistema passa de um estado de equilíbrio a outro. Na teoria de Carnot é o que ocorre com o “calórico”. Essa visão, ao adotar a nova ideia de calor, será abandonada posteriormente por Clausius.

## Transformação

O calor é colocado por Carnot como causador de movimento e possuidor de grande força motriz. Isso lhe possibilita grandes *transformações*, como pode ser visto na passagem (os grifos são nossos).

Ninguém ignora que o calor *pode ser causa de movimento* e que inclusive *possui uma grande força motriz*: as máquinas a vapor são provas eloquentes ... Deve-se atribuir ao calor as grandes *transformações* que chamam nossa atenção na superfície da terra; a ele se devem as agitações atmosféricas, a ascensão das nuvens, a queda das chuvas (...) as correntes de água (...) os tremores de terra, as erupções vulcânicas... (1987, p. 35, tradução nossa) [6]

As *transformações* apontadas, entretanto, não se referem à natureza do calor. Elas são atribuídas àquelas detectadas por nossos órgãos sensíveis ou reveladas nas manifestações “naturais”, tais como “agitações atmosféricas”, “ascensão de nuvens”, “correntes de água”, “tremores”, “erupções” etc. Essas visões externalistas, macroscópicas, foram transportadas por Carnot para as máquinas para explicar as razões da ocorrência do movimento através delas. Talvez essa visão tenha o levado a considerar que esse poder inerente, fosse independente da substância utilizada para seu transporte, como pode ser visto na passagem:

Para considerar em todos os seus aspectos como se produz o movimento por meio do calor, é necessário concebê-lo independentemente de todo mecanismo, de todo agente particular; é necessário estabelecer raciocínios aplicáveis, não somente à máquina a vapor, mas também a qualquer outra independente da substância que se utilize e qualquer que seja a maneira que se atue sobre ela. (1987, p. 39, tradução nossa) [7]

Ao citar as máquinas a vapor como exemplo de que o calor possui uma “grande força motriz”, Carnot está se referindo a uma novidade técnica: o homem encontrou uma maneira de transportar o calor da natureza para a máquina. Essa novidade é acompanhada de uma nova questão científica, de uma nova colocação do problema das transformações que o calor faz os corpos sofrer. Isso mostra que a questão da qual nasceu a Termodinâmica não diz respeito à natureza do calor, ou da sua ação sobre os corpos, mas à utilização dessa ação. Trata-se de saber em que condições o calor produz movimento, ou seja, como ele pode fazer girar um motor.

A nosso ver, o mais notável significado de transformação nas colocações de Carnot é aquele relacionado à melhoria das condições sociais que sua utilização proporcionaria mostrando que, para além dos aspectos científicos, são também importantes os sociais, econômicos e políticos.

Ao enumerar diversas aplicações da máquina, Carnot também aponta a dependência que a sociedade do seu tempo passou a manter com ela, devido à promoção de desenvolvimento de regiões com condições desfavoráveis (a ausência de rios e ventos, por exemplo) resultando em transformações sociais e políticas aliadas às mudanças econômicas da revolução industrial. A seguinte passagem ilustra esses aspectos (os grifos são nossos):

O estudo de tais máquinas é de extraordinário interesse, sua importância é imensa e seu emprego aumenta a cada dia. Parecem destinadas a produzir uma grande revolução no mundo civilizado, já que exploram nossas minas, fazem mover nossos navios, dragam nossos portos, forjam o ferro, derrubam florestas, moem grãos, fiam e tecem nossos tecidos, transportam cargas muito pesadas etc. (1987, p.36, tradução nossa) [8]

Não se pode dizer, entretanto, que não ocorra na teoria de Carnot, implicitamente, uma ideia de transformação<sup>53</sup> no sentido que lhe dá Clausius e que está relacionado com sua natureza, pois ele aponta, como já foi dito antes,

---

<sup>53</sup> A palavra transformação com o sentido que estamos tomando nesse parágrafo, não possui o mesmo significado para Clausius.

uma “mudança” na sua qualidade, ou seja, o calórico ao ser despejado na fonte fria, apesar de ter-se conservado em quantidade, é um calor “diferente”, pois sua temperatura é menor que a inicial.

### Matematização<sup>54</sup>

As considerações feitas até aqui mostram aspectos que evidenciam um traço fundamental do desenvolvimento da Termodinâmica que é o da *busca da generalidade*, como comenta Javier Odon Ordóñez na introdução de sua tradução para o espanhol do original de Carnot (1987):

... algumas traduções de anotações de Watt feitas por Carnot apontam os problemas que levaram o primeiro a considerar a conveniência de separar as fontes térmicas em uma máquina de vapor. *Carnot viu nesse processo uma generalidade que provavelmente escapou ao inglês e que foi o ponto de partida de sua análise.* (P. 20, grifo e tradução nossa) [9]

Ordóñez mostra na passagem acima que Carnot ao analisar os estudos de Watt sobre a melhoria da eficiência das máquinas, acaba identificando um aspecto que no nosso trabalho se refere a um elemento detonador da criação do novo, ou seja, o fato fundador como bem o situa Paty (2012), que citamos na primeira página do capítulo 1. Consideramos essa análise de Carnot como um marco para a emergência da Termodinâmica: a procura de uma teoria geral que se percebe em todo o seu trabalho.

Essa busca é revelada na preocupação com uma escala absoluta de temperatura, ou seja, que não dependa das propriedades particulares do termômetro e na procura de estabelecer uma expressão matemática que pudesse ser válida para todas as *transformações* na máquina térmica.

---

<sup>54</sup> Em Carnot (1987 p. 54-91), podem ser encontradas, de forma mais ampla que as apresentadas aqui, das considerações que evidenciam a importância de considerações matemáticas em seu raciocínio que procuram justificar suas conclusões a respeito das diferenças proporcionadas no rendimento das máquinas devido à queda do calórico entre mesmas variações de temperatura entre níveis diferentes da escala termométrica.

Já vimos que o significado dessas *transformações* é ampliado por Clausius, que inclui não só as de calor em trabalho e vice-versa, mas também as de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura, bem como as mudanças no estado de agregação das substâncias.

Além disso, o estudo qualitativo apresentado por Carnot sobre o ciclo reversível apresenta elementos prévios importantes para futuras análises de Clausius ao descrevê-los utilizando os diagramas PXV em seus estudos. Nesses diagramas possibilita-se uma compreensão mais consistente sobre a relação entre o signo<sup>55</sup> e o referente (funcionamento da máquina, movimento do pistão, o papel do condensador e da caldeira etc.).

Um aspecto interessante na obra de Carnot, como mostra a passagem a seguir, diz respeito a suas dúvidas<sup>56</sup> sobre a concepção de calor como calórico. Tal concepção será retomada mais tarde por Clausius revelando outro embrião que possibilitará *novas criações*. Tal ocorre em torno da ideia de que nem todo calor disponível pode ser convertido em trabalho. Esse embrião levaria Clausius posteriormente, a definir entropia (SILVA 2009):

Na queda d'água a potência motriz é rigorosamente proporcional à diferença de níveis entre o reservatório superior e o inferior. *Na queda do calórico a potência motriz, sem dúvida, aumenta com a diferença de temperatura entre os corpos frio e quente; mas não sabemos se ela é proporcional a essa diferença. Porém não sabemos se a queda do calórico, por exemplo, de 100° a 50° proporciona mais ou menos potência motriz que a queda do mesmo calórico de 50° a 0°.* É uma questão que propomos examinar mais adiante. (CARNOT, 1987, p. 49, tradução e grifo nossos) [10]

---

<sup>55</sup> Os gráficos não foram utilizados por Carnot, mas sim, introduzidos por Clausius em seu trabalho de 1834.

<sup>56</sup> Kuhn (2011) menciona Carnot como um dos pioneiros da descoberta da lei da conservação da energia, embora em *Reflexiones* os trabalhos a respeito disso tenha ficado de fora. Segundo Prigogine (1993), a descrição teórica de Carnot em *Reflexiones* se baseia em duas teorias falsas, a da conservação do “calórico” que, passando de uma fonte quente para outra fria, desenvolve uma determinada quantidade de força motriz e aquela segundo a qual o calor específico varia com o volume. Prigogine ainda sustenta que no quadro da teoria do calórico essas duas teorias falsas compõem seus efeitos de maneira tal que a fórmula do rendimento ideal de Carnot resistiu à demolição da teoria do calórico.



Os grifos mostram a preocupação de Carnot sobre o fato de que o rendimento da máquina a vapor seria o mesmo entre intervalos iguais de temperatura e se isso ocorreria da mesma maneira que na queda d'água.

Outro aspecto importante das análises de Carnot, que possivelmente o levou às reflexões consistentes sobre o rendimento das máquinas, refere-se a suas considerações sobre a dependência do calor específico do gás com a temperatura, levando-o à conclusão de que é necessário mais calórico para manter o gás a  $100^{\circ}$  quando se duplica o seu volume do que para manter a temperatura desse mesmo gás a  $1^{\circ}$  durante uma expansão análoga, como mostra a passagem:

Essas quantidades desiguais de calor produzirão sem dúvida, como já vimos, quantidades iguais de potência motriz para quedas iguais de calórico, tomadas a diferentes alturas na escala termométrica, de onde se pode tirar a seguinte conclusão:

*A queda do calórico produz mais potência motriz em graus inferiores que nos superiores.* (Carnot, 1987, p. 75, tradução nossa) [11]

Essas conclusões se basearam em estudos anteriores, fundamentados nos trabalhos de Gay-Lussac, entre outros, que o levaram à conclusão:

*Quando um gás aumenta seu volume em progressão geométrica, seu calor específico cresce em progressão aritmética.* (Carnot, 1987, p. 67, tradução nossa) [12]

Entretanto Clausius, embora partindo de muitos pontos do trabalho de Carnot, redireciona as bases daquele trabalho inserindo-o numa nova perspectiva. Ele passa a descrever o ciclo no novo quadro da *conservação da energia*, no que se refere à insustentabilidade de se considerar a ideia de calor como calórico. A ideia de conservação da energia possibilitou a Clausius estabelecer relações quantitativas entre a porção de calor que é convertida em trabalho e aquela que é perdida para a fonte fria, e as temperaturas envolvidas

no processo. A partir daí, encontrou as expressões matemáticas da primeira e da segunda lei da Termodinâmica.

A impossibilidade de se produzir potência motriz sem o consumo de calórico é feita por Carnot com bases em considerações resultantes de conhecimentos sobre questões relativas ao moto perpétuo tiradas da Mecânica e transportadas para as máquinas térmicas. Para isso considera que se uma máquina pudesse efetuar melhor aproveitamento do calor que outra que contivesse outra substância transportadora do calórico poder-se-ia utilizar a potência motriz adicional para fazer o calórico retornar da fonte fria para a fonte quente sem necessidade de um agente externo. Ou seja, poderia ser utilizada uma máquina adicional cujo conjunto com a outra poderia fazer o calórico retornar da fonte fria para a fonte quente, o que seria um absurdo. A seguinte passagem ilustra esse raciocínio:

(...) seria não somente o movimento perpétuo, mas uma ilimitada produção de potência motriz sem consumo de calórico nem de qualquer outro agente. Semelhante criação é totalmente contrária às ideias aceitas no presente momento, às leis da Mecânica e da boa física; é inadmissível. (CARNOT, p. 45 e 46, tradução nossa) [13]

Carnot aprofunda ainda mais suas reflexões ao reconhecer que sua analogia com o moto perpétuo da Mecânica poderia não se aplicar com relação ao calor. Ele afirma que isso seria pouco provável devido à grande quantidade de tentativas frustradas em outras áreas, dando como exemplo a pilha de Volta que durante algum tempo foi considerada como capaz de produzir movimento perpétuo até que se verificou a falácia.

## **Os estruturantes em Clausius**

### **Analogia**

Como já vimos Clausius, ao propor uma nova leitura para o trabalho de Carnot, descreve a mesma máquina ideal com modificações relativas à

natureza do calor. Esse fato o faz rejeitar a ideia substancialista passando adotar a ideia energicista relacionada à conservação da energia.

Há duas contribuições fundamentais de Clausius no que diz respeito ao trabalho de Carnot. Em primeiro lugar introduz a conversão de calor em trabalho, e a de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura, introduzindo o conceito de transformação, que não pertence à terminologia de Carnot. Em segundo lugar modifica a natureza das relações existentes entre os dois tipos de transformação.

O princípio da conservação da energia que hoje é conhecido como primeira lei da Termodinâmica e o segundo princípio são afirmações que concentram um determinado número de conceitos cuja compreensão necessita uma reflexão cuidadosa sobre o significado do seu enunciado.

Embora seu raciocínio evidencie uma ruptura com o obstáculo substancialista, parece-nos, entretanto, que mantém alguma relação entre a ideia de “perda de qualidade do calor que é jogada na fonte fria” com a analogia hidrodinâmica feita por Carnot.

Entretanto nos trabalhos de Clausius as questões relativas a analogias com as máquinas simples estão enfraquecidas<sup>57</sup> pela sua preocupação com questões que mais se aproximam de descrições que estão em ressonância com experimentos que se relacionavam com a natureza do calor, como as de Rumford, e com a filosofia natural tão em voga no século XIX.

Pudemos verificar, a recorrência de Clausius em sua *Theorie Mécanique*, a utilização do componente *modelos particulares*, que, como sabemos, é um componente da matriz disciplinar de Kuhn, como pode ser visto na passagem (os grifos são nossos):

Vamos, portanto, como ponto de partida de nossa análise, que o calor consiste de *um movimento de muitas pequenas partículas dos corpos* e do éter e que *a quantidade de calor é a mesma da força viva de seu movimento*. No entanto, não faremos nenhuma suposição particular sobre a natureza desse

---

<sup>57</sup> Bunge (2000, p. 43) afirma que “a Termodinâmica foi edificada com a ajuda de analogias hidrodinâmicas. Mas, uma vez construídas as teorias, esses apoios deixaram de preencher qualquer função útil”.

movimento. Nos ateremos à aplicação do calor *ao teorema de equivalência da força viva e do trabalho*, que é verdadeiro independentemente da natureza do movimento; e tomaremos o teorema que resulta desta aplicação para o primeiro princípio da teria mecânica do calor (p. 28) [14]

Essa citação evidencia, em Clausius, o recurso da analogia com modelos mecânicos a relação de *equivalência* entre a sua quantidade e a da força viva, donde se mostra a origem, possivelmente, da frequente utilização desse termo em sua obra.

### **Natureza do calor: energia atrelada à ideia de conservação**

Como já vimos no capítulo 2, experiências efetuadas por Mayer, Joule e Helmholtz, entre outros, pareciam tornar difícil a conciliação entre as conclusões de Carnot sobre a produção de potência motriz do fogo e a concepção de calor como forma de energia. Enquanto Carnot descrevia o processo como uma quantidade de calórico que fluía inalterada do corpo de temperatura mais alta para corpo de temperatura mais baixa, a conservação da energia previa que a quantidade de calor a atingir o corpo frio deveria ser menor que aquela cedida pelo corpo quente. A diferença entre as duas é equivalente à quantidade de trabalho produzido (potência motriz).

A descoberta da conservação da energia evidenciou um desajuste entre essa descoberta e as conclusões de Carnot em seu trabalho sobre a potência motriz do fogo. A concepção de calor como “calórico” que flui de forma inalterada da fonte quente para a fonte fria, violava a nova descoberta.

Na sua teoria mecânica do calor, Clausius tece considerações sobre a natureza do calor de forma clara, como mostram as passagens (os grifos são nossos):

*A opinião mais difundida sobre a natureza do calor é a de olhar para ele como uma substância em particular encontrada nos corpos em quantidades maiores ou menores. É por essa razão que sua temperatura pode ser determinada como mais ou menos elevada e essa substância é também emitida pelos*

*corpos, e, em seguida, atravessa espaços vazios com determinada velocidade e que é o calor radiante.*

Mas, em tempos modernos, outra opinião também surgiu: a de que o calor é um movimento. Nesta visão, o calor se encontra no corpo e o que determina sua temperatura relaciona-se com movimento de átomos ponderáveis em que o movimento do éter contido no corpo também pode tomar parte, sendo o calor radiante apontado como um movimento vibratório do éter. (1888, p. 27 e 28, tradução nossa) [15]

A adoção da nova visão é claramente explicitada por Clausius. A ideia de movimento atribuída ao calor passa a considerá-lo como uma entidade abstrata, oposta ao substancialismo. A nova visão energicista está fortemente condicionada à ideia de “conservação no meio de mudanças” como vimos no capítulo 2.

Além da crítica à concepção de calor como “calórico”, a passagem mostra a preocupação de Clausius em levar em conta questões relativas à propagação do calor pelo espaço não como a emissão de uma substância pelos corpos, mas como resultado de um movimento vibratório do éter. Essas colocações são interessantes especialmente se há pretensão de se discutir a importância do éter (que não nos interessa neste trabalho) no raciocínio científico da época e contido na nova visão<sup>58</sup>.

Nesse mesmo trabalho, com preocupações de bem fundamentar sua visão de calor, Clausius escreve:

Eu não vou analisar aqui os fatos, as experiências e as conclusões que conduzem a essa nova maneira de ver, porque deveria entrar em certos detalhes que encontrariam melhor lugar dentro do corpo do próprio trabalho. Penso que estar de acordo com os resultados deduzidos da nova teoria com a experiência, é a melhor confirmação dos princípios dessa teoria. (1888, p. 28, tradução nossa) [16]

---

<sup>58</sup> A questão da existência do éter será questionada e sua existência abolida pela teoria da relatividade de Einstein.

A busca de uma teoria que estivesse de acordo com experiências relativas ao calor que estavam sendo realizadas levaram Clausius a reflexões que o levariam à expressão do primeiro princípio da Termodinâmica com a adoção da equivalência entre calor e trabalho como veremos mais adiante ao apresentarmos o estruturante *matematização*.

### Sistema: fechado e aberto

Ao analisar a ideia de Carnot sobre a produção de trabalho mecânico Clausius utilizou inicialmente a mesma sistematização efetuada por ele. A ideia de rendimento ideal era suficientemente consistente para resistir à demolição da teoria do calórico e, além disso, foram mantidas as ideias de ciclo reversível e a de que o rendimento não depende da substância de transporte, mas apenas das temperaturas das fontes. A novidade está na conversão de calor em trabalho e de que o calor restante é transferido para a fonte fria.

A introdução do termo *transformação*, introduzida por Clausius e ausente no trabalho quando se refere à passagem do calórico da fonte quente à fonte fria pode se vista na passagem:

Para designar uma destas modificações nós usaremos o termo *transformação*; queremos dizer: que a produção de trabalho é feita por consumo de calor, ou seja, calor transformou em trabalho ou que trabalho se transformou em calor. Podemos da mesma forma considerar como uma *transformação* a segunda modificação que consiste naquela em que o calor passe de um corpo mais quente para um corpo mais frio, ou seja que o calor a uma certa temperatura se transformou em calor a uma outra temperatura.

Ao considerar a coisa dessa maneira, podemos enunciar o resultado de um ciclo fechado simples, dizendo: *que se opera duas transformações, uma transformação de calor em trabalho (ou vice-versa), e uma transformação de calor de uma temperatura mais*

*alta em calor de uma temperatura mais baixa (ou vice-versa); é nessa maneira de se referir às duas transformações que está o significado do segundo princípio fundamental. (Clausius, p. 119, tradução nossa)*  
[17]

Mas a análise de Clausius não para por aí. Posteriormente na sua tentativa de definir a grandeza entropia, abandona o contexto tecnológico do problema do rendimento para enunciar um princípio geral, o segundo princípio da Termodinâmica. As transformações não ideais sofridas por um motor, aquela em que o calor flui para o motor em quantidade maior que a imposta pela relação de compensação pertence à classe geral dos processos irreversíveis, produtores de entropia, que conservam a energia, mas escapam do balanço de conversões reversíveis. A energia “dissipada” irreversivelmente em calor já não está disponível para outras conversões e não pode, em particular, fornecer efeitos mecânicos utilizáveis.

Os dois princípios enunciados por Clausius, o princípio da conservação da energia e o do crescimento da entropia, apresentam-se como princípios universais válidos para a totalidade dos processos naturais, fazendo com que a Termodinâmica deixasse de ser a Ciência das máquinas para ser a Ciência da natureza.

Dessa forma, Clausius amplia sua análise para sistemas abertos dos quais fazem parte corpos celestes, sendo, portanto, subconjuntos do universo. O universo então, como sistema fechado, se encaminharia para a morte térmica (SILVA, 2009).

### **Processo**

Em sua *Theorie Mécanique... Clausius* descreve o ciclo de Carnot tecendo considerações relativas à nova concepção com utilização de diagramas. Analisa o percurso do sistema, de um estado anterior de equilíbrio para o seguinte, de forma distinta da interpretação de Carnot, uma vez que ele passa a pensar de acordo com a nova concepção energética. A partir de interpretações macroscópicas apoiadas no diagrama de Clapeyron, utilizando,

na terminologia moderna, as variáveis de estado pressão e volume, o processo quase estático utilizado por Carnot é descrito em novas bases no qual o calor passa a ser visto como um *recurso mental* conveniente para justificar a transformação de parte da energia contida no vapor em trabalho. O trabalho decorrente dessa transformação ocorre no percurso pelo qual é submetido o sistema. Na nova visão, parte do calor que é transferido ao vapor pela fonte quente é utilizada para realização desse 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 conveniência da utilização do diagrama de Clapeyron como recurso para explicitar as fases por que passa o sistema, durante a realização do ciclo de Carnot, é descrita por Clausius quando se propõe deduzir a segunda lei da termodinâmica como mostra a passagem:

A fim de poder deduzir e demonstrar o segundo princípio fundamental da teoria mecânica do calor, começaremos por considerar, em todas as suas partes, um ciclo fechado de uma natureza particular, e por representá-lo graficamente ...  
...suporemos que a variável de estado do corpo é determinada por seu volume  $v$  e sua pressão  $p$  e utilizaremos um sistema de coordenadas retangulares planas, sendo que a abscissa representa o volume e a ordenada a pressão. Cada ponto do plano corresponde a um estado do corpo... toda modificação do corpo é representada por uma linha em que os pontos inicial e final determinam os estados inicial e final do corpo, cujo curso indica de que maneira a pressão varia com o volume. (P. 90, tradução nossa) [18]

Posteriormente Clausius, como veremos mais adiante, amplia suas considerações ao tratar do *arranjo interno das substâncias* ao trabalhar com processos não cíclicos, que segundo Aurani (1985), o levou a *crer em probabilidades*.



## Transformação

Ao analisar o ciclo de Carnot, Clausius trabalha com a ideia de transformação de calor em trabalho, detectando outro tipo de transformação no processo que é a de energia de uma temperatura à energia de outra temperatura, por efeito da passagem do calor entre o corpo quente e o corpo frio.

Na descrição de Carnot, a relação entre o calor e o trabalho faz-se apenas pela necessidade da passagem do calórico para haver a produção da potência motriz. A ideia de que o calor é transformado em trabalho, embora seja de aceitação geral, não era por si só evidente por causa produção da potência motriz pelo calor: *a transformação de calor em trabalho se constituía como uma nova forma de ver essa potência.*

Em sua “Teoria mecânica” Clausius, expõe de forma clara o ponto “frágil” da teoria de Carnot, como mostra a passagem (os grifos são nossos):

Mas esta maneira de ver está em contradição com as ideias atuais. Para nós, a produção de trabalho exige um consumo correspondente de calor e que, por conseguinte, a quantidade de calor cedida durante o ciclo fechado, deve ser menor que a quantidade de calor recebida. Então, se a produção de trabalho consome calor, ele não pode dizer que se obtém trabalho do nada, mas sim à custa do consumo de calor, pois há, ao mesmo tempo, certa quantidade de calor que é transferida para uma fonte fria. A proposição enunciada por Carnot não só precisa ser mudada, como também as bases sobre as quais ele se fundamentou. (1888, p. 101, tradução nossa) [19]

Na passagem podemos ver que Clausius, fundamenta sua argumentação nos pontos que considera frágeis na teoria de Carnot, confrontando-os com *as ideias atuais*. Isso evidencia para nós que a comunidade científica da época se voltava para a questão da conservação da energia que para nós implica a adoção da ideia de *constância no meio de*

*mudanças* que foi visto no capítulo 2 e que no século XIX culminou com a descoberta da conservação da energia.

Isso nos parece, uma antecipação do que Kunh chamaria mais tarde, em sua matriz disciplinar, de *visões compartilhadas*, pois Clausius se vale da conservação energética de calor para fundamentar suas argumentações contrárias às de Carnot relativas ao calórico.

Com base na conservação da energia Clausius considera que o trabalho realizado pela máquina é uma *transformação* cujo valor *equivale* a uma quantidade igual a que foi perdida pelo calor fornecido pela fonte quente. E, com considerações que nos parece enraizadas na impossibilidade do mótuo perpétuo ele explicita que essa transformação não pode ocorrer a partir do nada, *mas sim à custa do consumo de calor, mas para isso é preciso que certa quantidade de calor seja transferida para uma fonte fria*. Sem isso, não se justificaria o fato de que, para fazer o calor retornar da fonte fria para a quente, é imprescindível realizar trabalho. Novamente verificamos aqui, pontos iniciais de *criações e que* redundariam posteriormente na definição de entropia por Clausius.

Além da transformação de calor em trabalho e de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura, Clausius introduz uma terceira: a de *desagregação*, da qual falaremos um pouco mais no próximo item.

Como já nos referimos no capítulo 1, sobre o papel da criação na ciência, fica evidente aqui que no processo de criação de um conceito, o dado fatural é substituído por representações simbólicas e, como aponta Paty (2012), passa a se constituir como substitutos da realidade concreta.

O conceito de desagregação teve papel fundamental nos raciocínios posteriores de Clausius levando-o a tecer considerações de que perda de qualidade da energia é decorrência do movimento caótico das partículas constituintes do corpo fato que a torna degradada.

### **Matematização:**

A passagem a seguir revela alguns aspectos do papel da intuição do cientista na busca de uma síntese que deveria se expressar por meio de relações matemáticas em que um possível apoio nas experiências da época

apontadas por Kuhn (2011) sobre o *equivalente mecânico do calor* deve ter tido um papel preponderante (os grifos são nossos):

Em todos os casos em que trabalho é produzido pelo *calor*, se consome uma quantidade de calor proporcional ao trabalho produzido e, reciprocamente, o consumo do mesmo trabalho pode produzir a mesma quantidade de calor (CLAUSIUS, 1888, p. 30, tradução nossa) [20]

Percebe-se que a matematização começa e emerge com base na ideia de *transformação e equivalência* denominações fartamente utilizadas por Clausius em sua obra e que estão ausentes nas análises de Carnot. Como vimos no capítulo 2, as ideias de transformação e equivalência foram fundamentadas nos trabalhos dos pioneiros sobre a conservação da energia e que foram apontados por Kuhn (2011). Talvez o núcleo dessas ideias esteja em se considerar que *um consumo de calor dá lugar à produção de uma quantidade equivalente de trabalho* e, reciprocamente, sempre que há um consumo de trabalho com produção de calor pode-se dizer que uma quantidade equivalente de trabalho se transformou em calor. Isso talvez reforçasse as convicções ao fazer ligação entre a “força viva” e “trabalho”, ampliando a afirmação feita na passagem precedente como pode ser visto na passagem:

Enquanto que o teorema da mecânica exprime que a variação da força viva e o trabalho correspondente são iguais entre eles, não há dúvida de que há uma relação de proporcionalidade que exprime a relação entre o calor e o trabalho. (CLAUSIUS, 1888, p. 31, tradução nossa) [21]

Voltamos a afirmar, portanto, que essas passagens são registros de momentos de reflexões básicas de um cientista na busca de relações matemáticas<sup>59</sup> que agregassem de forma sintética todo um processo que

---

<sup>59</sup> Um estudo sobre a relação entre Matemática e Física tanto do ponto de vista filosófico e didático, pode ser encontrado em Ricardo (2012).

consumiu muitos anos de estudo. As considerações feitas de que “variação da força viva” e “trabalho” são iguais entre si, lastreadas na ideia da conservação da energia, permitiram que posteriormente chegasse à expressão matemática da primeira lei da Termodinâmica que se completa ao se referir à parte do calor transferido à fonte fria como se pode ver na passagem:

...mas nossa proposição significa que, simultaneamente, que com aquela transmissão de calor de um corpo frio a um corpo quente, deve haver uma transmissão inversa de calor do corpo mais quente para o corpo mais frio... Essa transmissão simultânea de calor em sentido oposto ou a modificação que por consequência uma transmissão em sentido oposto, deve ser pensada como uma *compensação* da transmissão de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. (CLAUSIUS, 1888, p. 102-103, tradução nossa) [22]

No contexto da época, que reclamava um novo princípio para a teoria do calor, Clausius tece diferentes considerações sobre seu comportamento e sua natureza. Isso o conduziu à convicção de que a tendência do calor de passar dos corpos quentes para os corpos frios e assim igualar as suas temperaturas, tendência que se manifesta na condutividade e na radiação, estão tão intimamente relacionadas à sua essência que isso deveria ser verificado em todas as circunstâncias. Essa convicção fez com que, de forma verbal, enunciasse rudimentos do segundo princípio da seguinte maneira:

*O calor não pode passar por si só de um corpo mais frio para um corpo mais quente* (1888, p.102, tradução nossa) [23]

Em seguida, essa afirmação é complementada por outra (o grifo é nosso):

*Uma transmissão de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente não pode realizar-se sem compensação.* (CLAUSIUS, 1888, p. 103, tradução nossa) [24]

A ideia de compensação nos parece fortemente enraizada nos conceitos oriundos do passado e que se relacionam, na mecânica, como apontamos no capítulo 2, de que a *natureza não está disposta a dar alguma coisa por nada*, mas agora redimensionada por uma visão, que, a partir dos aspectos fatuais, exige um *mergulho* em considerações de ordem que se distanciam das simples evidências, mas que se encontra na ideia da conservação da energia. Para nós parece que a compreensão mais completa do primeiro princípio se dá se for acompanhada simultaneamente de preocupações com o segundo.

Percebe-se, reunindo as três citações diretas apontadas anteriormente que, nas reflexões de Clausius, seu raciocínio se estrutura em três pontos:

1 – na impossibilidade natural do calor de se deslocar do corpo mais frio para o mais quente, como um dado fatural incontestável e que é amplamente confirmado pelas experiências.

2 – de que esse fato localizado pode ser utilizado como justificativa para estabelecer um *princípio geral* para a Termodinâmica.

3 – na necessidade de lastrear suas ideias no ciclo reversível de Carnot, pois é através dele que se percebe a necessidade do estabelecimento do equilíbrio no calórico e que será fundamental como marco para o surgimento da segunda lei.

Esse raciocínio evidencia a forma embrionária do raciocínio de Clausius que se propôs realizar um ajustamento entre a conservação da energia, e a *perda de qualidade* do calor contida na teoria de Carnot, pois eram muitas as críticas a ela. A polêmica que se estabeleceu na comunidade científica da época levaram muitos cientistas, como é o caso de Kelvin, apontarem para a necessidade de ajustar a obra de Carnot à nova ideia.

Clausius, posteriormente se estende a aspectos formais, e, através deles, revela o papel preponderante da Matemática, que se constitui como um *momento da síntese de uma nova forma de pensar*. Em seu trabalho, Aurani (1985) também se refere à importância, para o ensino de física, de se considerar os aspectos embrionários contidos nas reflexões de Clausius e sua pesquisa sobre os aspectos matemáticos que levaram à formulação de suas leis. As colocações de Aurani foram, entre outras, fontes de inspiração na elaboração das considerações que estamos apresentando no restante deste item.

A demonstração que a quantidade de calor ( $Q'$ ) que é transferida do corpo quente para o corpo frio e vice-versa em um ciclo fechado, independe da natureza dos corpos em que se dá a transmissão. Dessa forma, para qualquer ciclo fechado em que se empregam as mesmas fontes quentes e frias, independentemente da substância transportadora, a expressão  $Q/Q'$  é sempre a mesma, sendo  $Q$  a quantidade de calor fornecida pela fonte quente.

Ancorado nas ideias de compensação, equivalência e transformação, Clausius passa procurar a expressão matemática da segunda lei. Para tal atribue valores positivos e negativos às transformações em que a transformação de trabalho em calor é considerada positiva, como também à do calor residual que passa da fonte quente para a fria (AURANI, 1985). A partir daí formula o que denominou de "*Princípio de equivalência das transformações*". A passagem a seguir mostra um fragmento do raciocínio de Clausius sobre o estabelecimento desse princípio:

O segundo princípio fundamental da teoria mecânica do calor pode, após o que vimos, ser enunciado na forma a seguir, forma que parece ser bem conveniente, eu penso, dar o nome de *Princípio da equivalência das transformações*:

*Se denomina equivalentes duas transformações que podem substituir mutuamente uma à outra sem exigir nenhuma modificação restante, a produção, por meio do trabalho, da quantidade de calor  $Q$ , à temperatura  $T$ , ao valor de equivalência*

$$\frac{Q}{f'}$$

*E a passagem da quantidade de calor  $Q$ , da temperatura  $T_1$  à temperatura  $T_2$ , ao valor de equivalência*

$$Q\left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2}\right)$$

*onde  $f$  é uma função da temperatura independentemente da natureza do ciclo ou meio no qual se opera a transformação (CLAUSIUS, 1888; p. 131, tradução nossa) [25]*

A partir da expressão  $\frac{Q}{T}$  Clausius conclui que nos processos irreversíveis a soma algébrica só poderia ser positiva, evidenciando uma direção preferencial para as transformações, demonstrando, através de considerações que não cabem no escopo desse trabalho, que nos processos reversíveis é nula a soma algébrica delas.

Com base em seu conhecimento sobre a expansão dos gases perfeitos, Clausius chama a atenção para o fato de que neles as forças intermoleculares podem ser desprezadas e que durante o aquecimento, a pressão exercida por um gás no recipiente que o contém é uma medida *da força repulsiva do calor contido no gás*. Segundo ele, tal pressão deve ser, de forma aproximada, proporcional à temperatura absoluta.

A lei da proporcionalidade entre a *força ativa* do calor e a *temperatura absoluta* afirma que o trabalho mecânico executado pelo calor em qualquer alteração de arranjo do corpo é proporcional à temperatura absoluta na qual essa alteração ocorre.

Como já dissemos pensar as alterações no arranjo interno dos corpos por ação do calor requer considerações sobre a *força intermolecular* que a força ativa do calor deve vencer para efetuar tais alterações.

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

...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 pode 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. Grifos nossos) [26]

As afirmações contidas nos dois parágrafos precedentes levaram Clausius a considerar que a *reversibilidade* está relacionada à igualdade entre as intensidades de duas forças: a daquela que ele denomina *força do calor e daquela que se opõe a ele*. Quando essas intensidades são diferentes, ocorre processo *irreversível*.

*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*.

Alguns aspectos mais formais do raciocínio de Clausius serão considerados a seguir, apenas para tocar em alguns pontos que ilustram a importância da matemática como *inerente* à física. Mas chamamos a atenção para o fato de que se trata apenas de colocações que podem se encaixar de forma adequada no nosso trabalho. Sua extensão mais profunda foge de nossos propósitos. Para tal, mereceria *mergulhos* que implicam estudos específicos nessa direção o que não é o nosso caso.

Clausius mostra, em sua obra, que no processo reversível, o calor  $dQ$  recebido por um corpo corresponde à soma entre o trabalho  $dL$  (interno e externo) realizado, e  $dH$  que é o calor que permanece no corpo, então:

$$dQ + dH + AdL = 0 \quad (1)$$

Sendo  $A$  o equivalente em calor de uma unidade de trabalho. Esta expressão foi posteriormente denominada de primeira lei da Termodinâmica e foi partindo dela que Clausius obteve a expressão matemática da equivalência das transformações para processos não cíclicos, como veremos a seguir.

Transpondo para a terminologia atual, a primeira lei da Termodinâmica reproduz a lei da conservação da energia em termos da energia interna de qualquer porção de uma substância qualquer. Tal lei explicita que a variação da



energia interna da substância é igual ao calor que ela recebe do meio por conta da diferença de temperatura (entendida aqui como uma “forma de transportar energia”), menos o trabalho que ela realiza sobre o meio (entendido aqui como uma forma de efetuar transformação de energia). Simbolicamente:

$$dU = dQ - dW$$

Sendo  $dU$  e  $dQ$ , respectivamente, variações infinitesimais da energia interna ( $U$ ) e da energia recebida do meio.  $dW$  é o trabalho infinitesimal realizado pelo sistema sobre o meio.

Para mudanças macroscópicas em que o sistema evolui do estado 1 para o estado 2, devem ser somados todos os  $dQ$  e  $dW$  para calcular a variação total de energia interna durante a passagem do sistema do estado inicial para o final:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 dQ - \int_1^2 dW$$

A variação da energia  $dU$  depende apenas dos estados inicial e final, podendo-se dizer que, em cada estado, o sistema possui uma energia interna, portanto ela é uma variável de estado. Entretanto,  $Q$  e  $W$  são variáveis de processo, ou seja, não se pode dizer que em cada estado o sistema tem uma quantidade de calor ou de trabalho.

Na linguagem atual da Termodinâmica, as variações de energia interna são determinadas pelas condições iniciais e finais não pelo percurso. Calor e trabalho referem-se à energia no processo de transferência e transformação. Seus valores são determinados não apenas pelas condições iniciais e finais, mas também pelo caminho seguido, portanto correspondem às variáveis de processo.

Nessa concepção, energia interna<sup>60</sup> passa ser concebida como energia armazenada nos componentes internos do sistema, e trabalho e calor são “formas” de variar a energia interna do sistema.

Das considerações anteriores feitas nesse item, e acrescentando que Clausius deduziu que a função de temperatura  $f$  é a própria temperatura absoluta (CLAUSIUS, 1888, p. 140-142), as duas equações da Termodinâmica foram assim expressas por ele:

$$dQ = dU + dW$$

$$dQ = Tds$$

### **As categorias complementares: ampliação de suportes para atuação do professor**

Neste item nossa intenção é abordar duas pesquisas que foram realizadas com o intuito de analisar aplicações de sequências didáticas, elaboradas por professores durante cursos de formação contínua que visavam:

1- utilização de textos de cientistas abordando controvérsias sobre a concepção de calor como calórico;

2 – mostrar o papel da Matemática nos domínios da Física.

Com isto pretendemos ampliar o leque de subsídios que poderão ser utilizados pelo professor que pretenda elaborar estratégias de ensino que agregue às categorias primeiras outras oriundas de linhas diferentes de pesquisa. Essa ampliação leva em conta a nossa preocupação de não nos atermos apenas ao levantamento das concepções dos estudantes e de alguma relação com as dos cientistas, mas também a como este confronto poderá ser operacionalizado pelo professor que sinta necessidade de conhecer exemplos de algumas práticas realizadas que possam servir de suportes para a sua.

---

<sup>60</sup> Atualmente a energia interna é a que corresponde a todas as formas microscópicas de energia em um sistema. Esta energia está relacionada à estrutura molecular e ao grau de atividade molecular e pode ser tomada como a soma da energia cinética e da potencial das moléculas de um corpo. As energias cinéticas correspondem às de rotação, translação e vibração das moléculas. Numa linguagem mais contemporânea, os elétrons de um átomo também possuem energia cinética de rotação e energia de spin. Outras partículas do núcleo de um átomo também possuem energia de spin. A energia interna também está associada às forças de ligação entre as moléculas de uma substância, entre átomos de uma molécula e entre partículas dentro do átomo e seu núcleo. Evidentemente que há mais desdobramentos que não nos cabe discutir aqui, mas mostrar a importância das considerações de Clausius sobre tais desdobramentos.

Como já apontamos anteriormente, na escola, apesar das muitas investigações na área de ensino e aprendizagem de Ciências sobre a importância de se dar atenção às concepções dos estudantes, a maioria dos professores continua com a ideia de que o conhecimento dos seus alunos é frágil. Eles não percebem que essa avaliação está sendo feita na perspectiva do conhecimento científico.

Essa percepção do professor está fortemente ligada à ideia de que o estudante tem que ser um mero praticante da “ciência normal”, calcada na proposta de resolução de problemas de lápis e papel que em geral aparecem no final de capítulos de livros didáticos, em listas de exercícios ou ainda naqueles que são colocados em provas. Essa forma de ensino revela que em sua maioria os estudantes não compreendem os conceitos científicos e continuam se apoiando nos conhecimentos que possuem: os do senso comum.

Vimos que o conhecimento do aluno não é frágil sob o ponto de vista do próprio aluno, fato que foi tão bem sustentado por Bachelard e que se constitui como uma das características (Positividade) da sua ideia de obstáculo epistemológico. O conhecimento científico que o professor lhe apresenta é que é estranho. O professor durante sua formação não adquiriu a percepção de que o estudante quando chega à escola é como um “estrangeiro” que precisa ser preparado para uma “transformação”. Que o aluno precisa aprender mais do que já sabe. E esse é um processo que exige muito trabalho e dedicação. O professor precisa também aprender a redimensionar sua “forma de ver o aluno”.

Nesse contexto, as atividades e intervenção do professor são descritas como promovendo o pensamento e a reflexão por parte dos estudantes, solicitando argumentos e evidências em apoio às suas afirmações. Para isso é necessário um ambiente que propicie a interação entre os próprios aprendizes, de forma que a troca de informações entre eles proporcione situações tais que o elemento de um grupo possa se beneficiar do conhecimento do outro, criando-se um espaço de cooperação e generosidade que favoreça o amadurecimento coletivo.

Mas, como fazer isso? Um possível caminho que leva à resposta a essa pergunta poderá ser pavimentado por meio dos *estruturantes primeiros* apresentados neste e no capítulo anterior acrescidos dos *estruturantes*

*complementares* que apresentaremos mais adiante neste capítulo. Entretanto, pensamos que tais estruturantes deverão ser apresentados em cursos de formação de professores como subsídios para elaboração de estratégias de ensino.

Até aqui vimos que ideias dos estudantes e dos cientistas foram utilizadas para o levantamento dos estruturantes primários. Agora, a nossa atenção se volta para as pesquisas de Nascimento (2003) e Carmo (2006), na busca dos estruturantes complementares, que serão apresentados em negrito neste item. Esses estruturantes são aqueles que possibilitarão a elaboração de estratégias de ensino com base em exemplos que mostram:

- Como textos científicos podem ser utilizados para evidenciar diferenças entre as concepções dos conceitos científicos entre cientistas em diferentes etapas históricas
- O papel da Matemática nos domínios da Física.

O exemplo de utilização de textos foi extraído da dissertação de Nascimento (2003), relativo à aplicação de um curso de Termodinâmica para alunos do ensino médio de uma escola pública na região de Perus da cidade de São Paulo. Apenas as partes que nos interessam serão descritas a seguir.

### **O trabalho de Nascimento (2003)**

Dos objetivos metodológicos apresentados por Nascimento nos interessa aquele que estabelece que a História da Ciência deve ser utilizada para elaboração de atividades de investigação, em que, de uma interação dialógica, estabelece-se discussões e argumentações entre os estudantes e o professor sobre um texto. Essa escolha se relaciona com a nossa proposta, pois toca na questão da inserção da História da Ciência no ensino de Física.

Isso permite a inserção nas estratégias, de **atividades de diálogo envolvendo leituras e discussões de textos e questões** que devem ser respondidas em pequenos grupos para ser discutidas posteriormente pelo professor e por toda a sala.

Nascimento relata que professores anteriormente treinados, trabalharam com os alunos utilizando três textos de História da Ciência. O primeiro texto tem como título “Termômetros: sua evolução através dos tempos”. O segundo

descreve a experiência de Rumford com a perfuração de canhões (ver anexo 3). O terceiro se refere à convecção. Desses nos interessa apenas o segundo por se relacionar diretamente com os estruturantes primários construídos com base em nossa dissertação.

O texto que descreve a experiência de Rumford foi apresentado aos estudantes após uma demonstração sobre condução de calor nos sólidos, com a finalidade de discutir quais os modelos existentes para o calor e também evidenciar um diálogo entre o processo de construção da Ciência e do conceito de calor pelos estudantes. Pretendia-se também levar os estudantes a identificar a diferença entre o seu conhecimento a respeito do calor e aqueles apresentados no texto de Rumford.

O texto de Rumford é interessante, pois apresenta algumas evidências que o levaram a discordar do modelo de calórico como pode ser visto na passagem:

O que é calor? Há alguma coisa como um Fluido ígneo?  
Há algo que possa ser propriamente chamado de calórico?  
De onde vem o calor que é continuamente liberado (...) nos experimentos (...)? Foi ele fornecido pelas pequenas partículas de metal, arrancadas da massa sólida que foi atritada? Este (...) não pode ter sido o caso.  
Foi ele fornecido pelo ar? Isto não pode ser, uma vez que em três dos experimentos o maquinário esteve imerso em água e o acesso do ar atmosférico foi completamente evitado.  
Foi ele fornecido pela água que envolve o maquinário? Que isto não pode ser é evidente. Primeiro, porque esta água estava recebendo continuamente calor e não poderia dar calor a um corpo ao mesmo tempo em que estava recebendo dele. Segundo, porque não houve nenhuma decomposição química (o que não seria razoável esperar). Se houvesse, um de seus componentes elásticos (mais provavelmente o ar inflamável) deveria ao mesmo tempo ter sido posto em liberdade e, escapando para a atmosfera, teria sido detectado. Embora eu tivesse examinado frequentemente a água para ver se alguma bolha de ar subia através dela e tivesse igualmente

preparado para pegá-las e examiná-las se alguma coisa surgisse, não pude perceber nada: não havia sinal de decomposição de qualquer tipo, nem outro processo químico ocorreu na água (RUMFORD apud NASCIMENTO, 2003).

Nascimento mostra de que maneira **o professor de Física conduz as argumentações** dos alunos sobre o texto de Rumford em que o autor descreve a experiência com a perfuração de canhões e suas dúvidas a respeito da natureza substancialista do calor, que, na época, era adotada por muitos cientistas do século XIX.

O seguinte episódio ilustra os alunos argumentando sobre a dúvida de Rumford durante a atividade proposta (NASCIMENTO, 2003, p. 101).

A1	<i>É... pode o calor ser gerado por...</i>
A2	<i>[interrompe a fala de A1 enfaticamente]: O calor é uma substância?</i>
A1	<i>Ele pensava que o calor era uma substância, ele queria saber o que é calor.</i>
A3	<i>Coloca aí, o calor é uma substância.</i>
A3	<i>É uma substância?</i>
A2	<i>O calor é uma substância?</i>
A1	<i>As dúvidas que ele teve e a dúvida de como o trabalho dele mostra, leva ele a discordar... é que se o calor é uma substância, por que ele pode ser gerado por corpos frio, através do atrito e não precisa de um material quente para existir...?</i>

O episódio a seguir evidencia que *as argumentações feitas pelos alunos originaram-se de questões propostas pelo professor.*

A1	<i>O professor falou do que ele fez, qual foi a experiência dele que ele fez no trabalho.</i>
A3	<i>O que ele usou para fazer?</i>
A1	<i>É aquilo que eu falei agora, que ele...como ele trabalhou com canhão, tal...a fricção...ele tava fora, ele pensava que...ele viu que os dois materiais estavam frios, o canhão tava frio, a broca tava fria, então ele falou, vou pôr [em]baixo d'água, porque pode ser o ar que está esquentando, e ele colocou embaixo d'água, entendeu?</i>
A2	<i>Mas não seria pelo atrito?</i>
A1	<i>Já coloquei que é pelo atrito...</i>
A3	<i>Se vinha do ar ou do metal?</i>
A1	<i>É. Ele queria saber se vinha do ar ou do metal, daí ele colocou embaixo da água.</i>

As evidências do aspecto histórico e problemático do conhecimento científico foram encontradas nas **respostas discutidas por grupos de estudantes e posteriormente escritas** acerca de uma questão que pedia para destacar e comentar no texto de Rumford os aspectos que se relacionavam à sua dúvida sobre a concepção de calor (NASCIMENTO, 2003; p. 105 -106, os grifos são nossos).

*A sua dúvida sobre o calor era, como em pouco tempo o metal produzia calor, mesmo ele sendo perfurado. E de onde vem esse calor. Foi ele fornecido por pequenas partículas do metal, arrancadas da massa sólida que foi atritada (grupo 1).*

Rumford tinha o conceito de que o corpo com maior temperatura transmitia sua temperatura para um corpo de menor temperatura, só que ele observando a perfuração do

canhão veio a dúvida: De onde vinha o calor, já que os dois corpos tinham a mesma temperatura. A segunda dúvida principal: o que é o calor (grupo 2) ?

Dos aspectos relacionados o que fazia com que uma peça metálica adquirisse calor em pequeno tempo sendo perfurada. De onde vinha o calor? O que é calor? Há alguma coisa como fluido ígneo? Foi ele fornecido pelo ar? Foi ele fornecido pela água que envolve o maquinário? *A dúvida dele era como existia o calor, por que o metal ficava quente ao ser perfurado* (grupo 5).

Qual a dúvida que pairava sobre Rumford a respeito da natureza do calor? De onde vem o calor produzido na operação mencionada? O que é calor? Há alguma coisa como um fluido ígneo? Há algo que possa ser apropriadamente chamado calórico (grupo 8)?

As respostas construídas pelos grupos evidenciam o reconhecimento dos aspectos relacionados ao caráter da construção histórica do conhecimento científico ao mencionarem as dúvidas de Rumford acerca da natureza do calor, caracterizando também a dimensão problemática do conhecimento científico ao tocar em aspectos que prenunciam uma mudança na forma de ver os fenômenos da Física.

No trabalho de Nascimento fica evidente que *o professor aparece como mediador*, seja para formular questões que conduzem a discussão aos pontos considerados importantes, seja para encaminhar a discussão para aspectos do cotidiano dos alunos, procurando *falar com os estudantes e não aos estudantes*. Muda-se, portanto o referencial, tratando o conhecimento não como algo que vem do professor, que seria o detentor absoluto do conhecimento (geralmente uma Ciência absoluta, inquestionável), e coloca-se *o conhecimento como algo que pode ser (re)construído pelos estudantes*.

Com isto queremos dizer que é preciso que se tenha em conta também os objetivos mais amplos do ensino, relacionados não só aos conteúdos



específicos, mas a aspectos educativos mais gerais como já apontamos no início deste trabalho ao citarmos, entre outros, o pensamento de Morin.

Os episódios analisados por nós no trabalho de Nascimento, apesar de voltado para uma linha de investigação que visa a enculturação científica, insere-se na nossa proposta de ensino de conceitos como complemento do levantamento das nossas categorias primárias que se ligam especificamente ao levantamento das concepções alternativas e dos cientistas. A integração das duas linhas se justifica pelos indícios de que os alunos podem passar a compreender aspectos epistemológicos e também interagir entre si, de modo que os aspectos sociais do ensino também sejam contemplados.

Descreveremos a seguir os aspectos que nos interessam no trabalho de Carmo (2006), que se relacionam ao papel da Matemática nos domínios da Física.

### **O trabalho de Carmo (2006)**

A pesquisa de Carmo foi realizada em uma escola pública da rede estadual de ensino, localizada na zona sul de São Paulo, que atende o nível médio em todos os períodos.

Os dados coletados por Carmo foram extraídos de filmagens de aulas dadas por uma professora com mais de vinte anos de experiência de magistério na escola pública e dois anos de participação em um grupo que ela mesma fundou e que denominou “Melhoria da Qualidade de Ensino de Termodinâmica no Ensino Médio de escolas estaduais”. A turma escolhida para filmagem das aulas era composta por quarenta e dois alunos regulares, e a média de frequência era de, aproximadamente, trinta alunos.

As aulas filmadas se referiam a uma sequência sobre calor e temperatura que envolvia uma **atividade de laboratório aberto**. No programa da professora, era reservado um total de quatro aulas para essa atividade, além de duas aulas-extras relacionadas às anteriores, que tinham por objetivo a dedução da equação geral da calorimetria.

A parte escolhida para ser analisada por Carmo se referia à parte da sequência em que os aspectos matemáticos são mais importantes, o que inclui

a **passagem dos dados de uma tabela para um gráfico e a extração da expressão matemática deste.**

Na sua análise Carmo se baseou em uma **visão multimodal de comunicação**, que faz uso do diálogo das diferentes linguagens – verbal, gestual, visual etc., observando nos vídeos como ocorrem as relações entre essas linguagens para a construção de significados gráfico-matemáticos no segmento de aula selecionado. Para isso, verificou se elas se especializam ou cooperam no processo, já que se interessava pelo processo ao considerar que a linguagem oral e a escrita não são suficientes para construir os conhecimentos. Ao mesmo tempo, focalizou sua atenção na **construção de significados tipológicos e topológicos**, avaliando como esses recursos aparecem na comunicação da sala de aula e como os gráficos e a Matemática são usados para integrá-los nas aulas escolhidas. Além disso, verificou a forma como é promovida a **familiarização com os processos que levam à construção das linguagens gráfica e matemática**, ou seja, se a professora cria condições para visualização do fenômeno por meio dessas linguagens.

A análise realizada por Carmo evidencia a importância da cooperação e especialização das linguagens para enfatizar tanto os recursos tipológicos quanto os topológicos que elas possuem, explicitando ainda, de que forma remetem ao fenômeno.

Esse trabalho é um exemplo de como a concepção substancialista elaborada por Wolff 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.

Carmo, referenciada no 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 levem a essa fusão.

Em sua pesquisa, Carmo também analisa trabalhos em que os estudantes são colocados em situações consideradas próximas do fazer dos cientistas e que levam 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 num 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.

A análise dos episódios escolhidos por Carmo evidencia a importância do papel das diversas linguagens na construção de significados sobre o aquecimento da água e sobre as incertezas na medida. Os gestos, desenhos e objetos usados possibilitam articular a característica tipológica (quente e frio) usada para descrever o fenômeno com a topologia da natureza (movimentação das moléculas de água no espaço), como tentativa de ativar percepções relativas aos aspectos das descrições macro e micro para os fenômenos físicos.

Carmo considera que a atividade social está relacionada às práticas científicas, o que implica que os estudantes devem aprender a reconhecer as linguagens dessa comunidade, das quais é importante que se façam explícitos os seus recursos.

Por isso que, ao trabalhar um gráfico, o professor deverá explicitar os recursos tipológicos e topológicos dessa linguagem. Dentre os recursos tipológicos tem-se, por exemplo, variáveis como energia, tempo e temperatura. Já os recursos topológicos são os valores das variáveis, forma da curva, com suas inclinações e a organização visual do gráfico.

A importância de explicar esses recursos está no fato de que a linguagem verbal (baseada em recursos tipológicos) é inadequada para expressar variações contínuas ou quase contínuas.

Ao fazer essa explicitação, criam-se condições para que os estudantes possam visualizar as relações entre as variáveis e para que entendam como elas mudam, além de enxergarem as possíveis tendências, possibilitando que eles desenvolvam uma noção mais clara dos significados matemáticos em questão.

Carmo aponta que esses aspectos, que parecem ser triviais aos olhos dos professores, constituem-se como uma dificuldade para os estudantes uma vez que eles desconhecem grande parte do funcionamento dessas linguagens. Para que ocorra a compreensão delas é necessário que a construção de um gráfico seja feita incluindo o uso dos elementos que deram origem a ele.

O gráfico pode ser um excelente recurso para enxergar padrões na atividade científica. Mas também podem limitar a compreensão da Ciência quando utilizados de forma descontextualizada. Nesse caso não haverá uma construção de sua linguagem com os estudantes, pois não verão a necessidade de usá-lo. Sem contextualização não existe problema de pesquisa e não haverá relação entre fenômenos e dados o que implica uma impossibilidade de fusão entre o signo e o referente e de se fazer previsões com essa linguagem.

Vistos dessa forma, os recursos matemáticos servirão como vínculos por meio dos quais os estudantes poderão usá-los como aspectos inerentes da construção dos conhecimentos científicos e como um aspecto fundamental da estruturação dos objetos que serão usados para interpretar o mundo físico. Outro exemplo de vinculação entre a Matemática e a Física pode ser encontrado no trabalho de Silva e Pacca (2011[3]) para o ensino de gravitação.

Aprofundando-se um pouco mais na aprendizagem da linguagem matemática, Carmo mostra que, para aprender Matemática, o aluno deve passar primeiro pela linguagem natural (incluindo oral, escrita e visual) para depois desenvolver uma linguagem mais simbólica. Nesse caminho, argumenta o autor, o estudante deve desenvolver uma percepção geométrica do mundo, criando condições para que essa nova visão seja traduzida numa linguagem gráfica e algébrica. Ele ainda ressalta que esta é a linguagem em que os

alunos mais apresentam dificuldades e, para que elas sejam superadas, é preciso uma tradução da álgebra em linguagem natural (CARMO, 2006).

Carmo ainda aponta que isso é importante porque implica que, para aprender a Matemática das Ciências, é necessário entrar em contato com os fenômenos estudados, conhecendo sua geometria por meio de seus aspectos topológicos. E, nesse processo de tradução de uma linguagem natural/fenomenológica para a linguagem gráfico-algébrica, o fenômeno pode tornar-se transparente ao olhar do estudante.

Por fim, cremos que, ao (re)construir conceitos de Ciência, os estudantes vão se apropriar também da capacidade de discernir aquilo que se assemelha (aproxima) daquilo que se diferencia (distancia) do discurso científico baseando-se na construção integrada, tanto dos itens de conhecimento que lhes proporcionamos por meio do discurso ou do texto científico, multimodal em sua essência, como do texto que já tem em sua mente por suas experiências prévias.

### **O confronto entre as ideias dos estudantes e dos cientistas**

Neste item reapresentamos os estruturantes com vistas a oferecer subsídios para elaboração de estratégias de ensino que coloque os estudantes em condições de estabelecerem relações entre suas ideias, as de Carnot e as de Clausius, tocando em pontos do conteúdo da Termodinâmica que possam levá-los à compreensão de suas leis. Esperamos que o confronto entre as diferentes ideias, bem como procedimentos que possam levar à fusão entre o signo e o referente durante o processo de matematização, possibilitem a construção dos vínculos necessários que resultem numa diferenciação entre a forma de pensar do senso comum e a da Ciência.

### **Analogia**

As teorias elaboradas por Carnot e Clausius revelam a emergência de novas concepções científicas que explicitam de forma mais adequada o comportamento das máquinas térmicas quando confrontadas com concepções anteriores. A analogia feita por Carnot entre a queda d'água que faz mover um

moinho e a queda do calórico entre dois níveis distintos da escala termométrica foi um fato de grande relevância para a elaboração de seu trabalho.

O novo em Carnot não é a produção de força motriz, que tinha sido, como vimos no capítulo 2, uma herança da área da Mecânica. Também não é a restauração do equilíbrio no calórico, que pertencia à ciência do calor por longo período. A novidade está na analogia entre o motor da água e o do vapor. Nas duas situações, a produção de força motriz é associada com a restauração do equilíbrio dos níveis de água, no caso do motor de água, ou entre os níveis de temperatura no calórico, no caso do motor a vapor. Estes pontos não escaparam a Clausius, que analisa a obra de Carnot com muito cuidado, rejeita essa analogia, afasta o obstáculo substancialista e parte da ideia abstrata de que a energia simboliza a invariância como chave da imutabilidade da mudança, como possibilidade de compreender a mudança graças àquilo que, apesar dela, permanece imutável.

No caso dos estudantes percebe-se a recorrência à analogia nas respostas às três questões tanto no que diz respeito à  $Q_1$  no trabalho de Silva, quando se refere ao ciclo da água, quanto na questão  $Q_3$  quando transportam modelos da Mecânica para explicar o aquecimento de um gás na compressão adiabática. Através delas pudemos perceber o papel estruturante das analogias no raciocínio do senso comum.

As analogias podem, num primeiro momento, ser úteis como forma de confrontação das duas formas de conhecimento: o do senso comum e o dos cientistas.

Entretanto isso não nos parece suficiente, pois cientistas constroem suas teorias fortemente motivados pela busca de respostas para problemas que lhes parecem interessantes e que valem a pena ser explorados, como ocorreu com Carnot e Clausius. E tal não é o caso dos estudantes.

Como problematizar situações que levem os estudantes a se interessar pelos conceitos científicos? Como produzir neles um foco? Que vínculo eles deverão construir para relacionar o conceito científico a uma nova realidade?

Uma ideia para que isso ocorra é, depois de apresentação de questões abertas como apresentadas por Silva (2009), com o intuito de verificar algumas concepções alternativas, iniciar uma sequência didática apresentando uma imagem que produza curiosidades nos estudantes e que os conduza a

indagações sobre o que representou as máquinas térmicas para o mundo. Um exemplo de uma dessas imagens é a do quadro de Turner que apresentamos na abertura do capítulo 2. A apresentação da imagem do quadro pode ser acompanhada da pergunta: no quadro de Turner, quais diferenças podem ser detectadas entre as duas embarcações? Há alguma relação entre uma delas e a eolípila?

A eolípila é uma máquina que após ser aquecida, acumula o vapor e este faz mover um dispositivo esférico em torno de um eixo produzindo movimento, conforme ilustra a figura. Dessa forma, há produção de movimento a partir do calor. Portanto, uma máquina térmica, do ponto de vista termodinâmico, retira calor de uma fonte quente, utiliza parte dessa energia na forma de trabalho e rejeita o que restou de energia para uma fonte fria. A figura seguir ilustra este processo.



Essa máquina foi descrita por Heron de Alexandria no primeiro século depois de Cristo, para comprovar a pressão do ar sobre os corpos.

Nossas preocupações sobre as motivações iniciais se fundamentam no fato de sabermos que Carnot focalizou sua atenção no aperfeiçoamento das máquinas térmicas que durante cem anos não tinha sido resolvido convenientemente pelos pesquisadores ingleses e que, se resolvido por ele, poderia trazer vantagens econômicas para a França.

Ao enumerar diversas aplicações da máquina, Carnot mostrou a dependência entre ela e a sociedade de sua época. A máquina a vapor era usada na fiação, tecelagem, fundição de ferro, transporte etc. Elas podiam ser

instaladas em regiões anteriormente pouco desenvolvidas, permitindo sua industrialização. No caso da Inglaterra, eram fundamentais não só na mineração do carvão, mas também por suas implicações políticas e da apropriação do conhecimento decorrente da utilização delas. Carnot afirma que a perda das máquinas térmicas para a Inglaterra seria mais prejudicial que a perda de sua marinha. Para Carnot, conhecer essas máquinas significava proporcionar à França a disputa do poder econômico com a Inglaterra, como pode ser visto na passagem:

Ferro e fogo são, como se sabe, os alimentos, os suportes das artes mecânicas. Pode ser que não exista na Inglaterra um único estabelecimento industrial cuja existência não dependa do uso desses agentes, e que não os empregue fartamente. Privar a Inglaterra hoje, de suas máquinas a vapor seria privá-la ao mesmo tempo de seu carvão e de seu ferro. Seria secar suas fontes de desenvolvimento, arruinar tudo aquilo de que sua propriedade depende, em resumo, aniquilar aquela potência colossal. A destruição de sua marinha, que ela considera sua mais forte defesa, seria talvez, menos funesta. (1987, p. 37, tradução nossa) [27]

De acordo com Ordóñez (apud CARNOT, 1987), na França, entre os séculos XVIII e XIX ocorreu uma intensa corrida para se adquirir um nível técnico aceitável, algumas vezes por seus próprios meios e em outros através de uma espionagem industrial. Neste ambiente, as *Reflexiones* podem ser vistas como uma contribuição de um duplo esforço da ciência aplicada e da indústria.

Entretanto, segundo Ordóñez, as *Reflexiones* não são vistas nessa perspectiva, pois Carnot expressou explicitamente, em sua obra, a pretensão de tratá-la como uma *generalidade científica* o tema da potência motriz do calor.

Historiadores como Cardwell (1971) e Kuhn (2011) destacam a dependência de Carnot aos problemas técnicos de sua época. O problema que Carnot ofereceu a seus contemporâneos, a nosso ver, constiu-se como pontos



que podem ser fecundos quando levados para sala de aula, por se relacionar com aspectos que tocam no resgate das raízes da ciência.

Voltando à preocupação de Carnot com o aperfeiçoamento das máquinas a vapor e conseqüentemente com a melhoria de sua produção, percebe-se, em seu trabalho, a questão norteadora de seus estudos sobre o calor: o limite da potência motriz do fogo. Ao analisar a eficiência das máquinas, estreitamente relacionada com a base do sistema econômico, esse cientista desenvolveu os elementos fundamentais para o estabelecimento das bases da Termodinâmica.

A motivação de Clausius foi outra: ela decorre de uma sensibilização pelas descobertas ligadas à conservação da energia como vimos no capítulo 1, que pareciam tornar difícil a conciliação entre as conclusões de Carnot sobre a produção de força motriz pelo fogo e a concepção de calor como forma de energia. Enquanto Carnot descrevia o processo como uma quantidade de calórico que fluía inalterada do corpo de temperatura mais alta ao corpo de temperatura mais baixa, a conservação da energia previa que a quantidade de calor ao atingir o corpo frio deveria ser menor que aquela cedida pelo corpo quente, a diferença entre as duas sendo equivalente à quantidade de trabalho produzida.

Ao se propor a harmonizar os desenvolvimentos de Carnot e as implicações da conservação da energia, Clausius chegou, como vimos, à formulação matemática da primeira e da segunda lei.

Esses aspectos apontados acima mostram a necessidade de se estabelecer pontos de partida adequados nas estratégias de ensino de forma a ativar nos estudantes interesse pelos conteúdos científicos que se pretende ensinar. Como apresentar situações em que o problema apresentado seja também um problema para o aluno?

O uso das analogias como recurso para explicações verificado nas respostas dos sujeitos de pesquisa no trabalho de Silva (2009) e a importância que elas tiveram para Carnot, nos leva a acreditar que sua inserção em estratégias pedagógicas podem enriquecer o processo aprendizagem e possibilitar a criação de vínculos entre o fenômeno analisado e o conhecimento científico. A analogia também pode ser utilizada como uma modalidade de explicação por parte do professor fazendo com que a introdução de novos

conhecimentos se realize com o auxílio de um conhecimento mais familiar e melhor organizado. Ela pode servir como ponto de partida para a compreensão da nova informação de forma a captar uma estrutura que é estranha ao aprendiz, mas que deve ser integrada a sua estrutura cognitiva.

Entretanto entendemos que o uso de analogias deve ser cuidadoso tendo-se a preocupação em diferenciar o conceito mais familiar ao aluno daquele que deverá ser o alvo. Pois, se tal preocupação não existir corre-se o risco de o recurso analógico contribuir para o reforço das concepções alternativas.

As analogias são modelos particulares, como apontados por Kuhn e constituem-se como conhecimentos solidários a uma estrutura como apontam Villani e Pacca estando presentes de formas diversificadas entre os estudantes e cientistas.

Na *Formação do espírito científico* (BACHELARD, 1996) alerta para o perigo da má utilização das analogias, das primeiras experiências do conhecimento, do conhecimento geral, do abuso das imagens usuais, do conhecimento unitário e pragmático, do substancialismo, do realismo, do animismo, e do conhecimento quantitativo. Por isso, para evitar que sejam utilizadas de forma indiscriminada na vida, elas devem ser reconhecidas como poderosos instrumentos de ensino. Evitá-las seria impossibilitar que os estudantes pudessem discutir as suas potencialidades e os seus limites, percebendo em que medida elas se diferenciam das entidades científicas e quando elas não deveriam ser utilizadas.

Uma ideia para integrar às estratégias dos professores as analogias criadas pelos alunos em resposta às questões apresentadas a eles no trabalho de Silva (2009) é:

- Destacá-las e colocá-las em discussão que envolva a sua importância na explicação.
- Distribuir textos de Carnot e Clausius sobre as máquinas térmicas para que sejam identificadas.
- Colocar em discussão as diferenças entre o uso delas pelos estudantes e pelos cientistas.

## A natureza do calor

Inicialmente faremos algumas considerações sobre pesquisas didáticas (AGUIAR, 1999; HIGA, 1988; HENRIQUE, 1996; SILVA, NETO e CARVALHO, 1998; TRUMPER, 1991) que apontam confusões a respeito de concepções de energia entre estudantes de ensino médio. Essas pesquisas alertam para o fato de que, se tais concepções não forem levadas em consideração de forma a eliminar a confusão entre elas e a concepção científica que se pretende evidenciar, a aprendizagem da Termodinâmica fica comprometida.

Segundo essas pesquisas os estudantes se referem à energia como:

- produtora de calor e fogo.
- produto final de um processo (exemplo: gasolina produz energia)
- resultado de uma transformação (energia elétrica é transformada em calor, que aquece o filamento de uma lâmpada, emitindo luz ).
- propriedade da matéria (capacidade de produzir trabalho por meio da força).
- sinônimo de aquecimento.
- ingrediente ou depósito.
- algo que se conserva.
- algo que não se conserva (exemplo: energia é gerada e consumida).
- associada ao homem (ideia antropomórfica).

Isso mostra a complexidade de se trabalhar um tema de vasta extensão conceitual no seio da sociedade. Trata-se da característica poliformismo do obstáculo epistemológico o que mostra que suas aderências são múltiplas evidenciando a necessidade de que seu aspecto *transversal* deva ser considerado bem como a *superção das suas representações locais (psicanálise do conhecimento objetivo)*.

Com vistas a organizar o nosso discurso é que focalizamos a *ideia substancialista* do senso comum. Essa ideia se refere ao fato de que o senso comum se refere tanto ao *calor* como à *energia* como algo que pode ser “armazenado”, “transferido”, “conservado” ou “não conservado”, e está associada à crença, baseada em sensações como já foi visto, de dois “calores” distintos: o “frio” e o “quente”.

Com esse foco, pretendemos tocar em alguns pontos fundamentais que possam levar os alunos à compreensão de que:

1. O quente como oposição ao frio não é uma ideia aceita pelos adeptos do calórico.
2. O calórico, apesar de útil no estudo da calorimetria não o é para compreensão das leis da Termodinâmica.

Esses confrontos deverão ter como ponto de partida as concepções apresentadas nas respostas às questões  $Q_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) cuja origem está não somente no conhecimento extraescolar, como também no escolar, pois as respostas também revelaram referências aos conteúdos oriundos da educação formal que não foram convenientemente compreendidos.

A constatação de que a Termodinâmica ensinada na escola reforça a ideia substancialista também é apontada por Cafagne (1996) quando afirma que no segundo grau o ensino da Termodinâmica é quase sempre limitado ao estudo da calorimetria, sendo a parte formal desse estudo subsidiada por equações algébricas muito simples. Segundo essa autora, a temperatura é tratada como uma leitura de uma escala na extremidade de uma coluna de mercúrio de um termômetro; o calor é qualquer coisa que deve ser colocada dentro do sistema para aumentar a temperatura, por isso mesmo se identifica com ela; a primeira lei da Termodinâmica raramente é tratada em toda sua extensão, e a segunda sequer é mencionada.

Além disso, segundo Cafagne, esse ensino não toca o ponto mais essencial da Física aí envolvida, uma vez que os modelos explicativos dos alunos, quando tratam dos fenômenos térmicos, continuam sendo o do senso comum, decorrentes das experiências diárias, que são fundamentalmente de dois tipos: os objetos aquecem porque recebem calor e resfriam porque recebem frio. Isso confirma parte das conclusões a que chegamos na nossa dissertação (SILVA, 2009).

As conclusões do mestrado confirmam que o ensino que ainda se realiza na escola apresenta grande dificuldade ao tentar introduzir as noções básicas da Termodinâmica que seria o fundamento da formação de um conhecimento consistente.

As pesquisas de Carmo e de Nascimento que citamos apesar de não ter como ponto de partida a preocupação em se fazer um levantamento das

concepções prévias, são consideradas por nós pesquisas importantes e inovadoras por apresentarem preocupações que tocam em pontos que normalmente são deixados de lado pelo ensino tradicional. Foi por essa razão que nelas recolhemos elementos para uma possível incorporação, resultando numa contribuição substancial para o ensino da Termodinâmica.

Os modos de pensar dos estudantes deveriam, antes de se proceder ao estudo da calorimetria, ser confrontados com o modelo de “calórico” elaborado por Wolff no início do século XVIII.

O calórico era “algo” que impregnaria toda matéria, como já vimos no capítulo 2, e era indetectável quando o corpo estivesse em equilíbrio térmico. Sua detecção só seria possível por meio de sua permutação com outro corpo quando o equilíbrio térmico fosse rompido (ASTOLFI & DEVELAY, 1991).

Mesmo no estudo da calorimetria elaborado por Wolf, o obstáculo de se considerar o “frio” e o “quente”, pelos estudantes, como entidades opostas deve ser trabalhado para que tal obstáculo possa ser removido a fim de possibilitar a compreensão de que o calor possui apenas uma identidade.

Mas como fazer isso?

Uma ideia é utilizar o mesmo caminho proposto para as analogias: após destacar as ideias dos estudantes que deverão ser colocadas em discussão, proceder ao confronto delas por meio de *atividades de diálogo envolvendo leituras e discussões de textos e questões como vistos em Nascimento (2003)*.

Apesar de Nascimento tratar da “crise do calórico” entre os cientistas, a metodologia utilizada pode ser a mesma para a confrontação entre as ideias dos estudantes e a de calórico contida no trabalho de Carnot.

Entretanto, apesar da concepção de calórico ser útil para a compreensão da calorimetria elaborada por Wolff, ela se constitui como uma barreira quando se pretende que os estudantes compreendam as leis da Termodinâmica.

Para esse caso, é preciso a promoção de atividades que visem a remoção do obstáculo substancialista, para que se promova discussões posteriores a respeito das ideias de transformação e equivalência alicerçadas na conservação da energia.

Essa ideia de transformação e equivalência que foi o fundamento de Clausius na elaboração das leis da Termodinâmica se encontra, de forma

embrionária e com outra significação, no raciocínio dos estudantes quando analisamos suas respostas à questão Q<sub>1</sub>. Segundo eles, o volume residual de água na panela após o aquecimento é menor que o inicial porque uma parte da água “*evaporou e se espalhou pelo ar*”. Esse raciocínio é estruturado na ideia de um tipo de conservação: o da massa. É essa grandeza que se conserva no processo. Já a transformação para eles é a de líquido em vapor.

A ideia de conservação que aparece em Carnot, focada no calórico, pode ser levada para discussão procurando mostrar seu significado, problematizando-a com questões do tipo: “o que é conservado nas panelas da questão Q<sub>1</sub> e no recipiente com êmbolo móvel descrito por Carnot?” Em sequência, o recipiente utilizado por Carnot poderia ser mostrado e uma nova pergunta poderia ser: o que se conserva para Carnot também se conserva para Clausius? Textos de apoio e mesmo explicações intermediárias poderiam ser dadas pelo professor com o intuito de fornecer elementos que pudessem ser incorporados nas argumentações dos estudantes.

Em Clausius, como vimos no capítulo 4, há a utilização da ideia de conservação da energia, que apesar de tomar vulto durante a primeira metade século XIX devido à efervescência experimental sobre fenômenos térmicos, possui uma longa história que se enraíza nos períodos pré-clássicos. Essa ideia contraria a concepção que foi utilizada por Carnot de calor como calórico. Elementos históricos sobre a ideia de invariância poderiam constar das estratégias.

A ideia de energia de Clausius relacionada à conservação é, para nós, a mesma de Lindsay apresentada no capítulo 2, “de conservação no meio de mudança” e é a mesma de Feynman (2000), como mostra a passagem (o grifo é nosso):

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. Esse número é, pois, invariante (FEYNMAN, p. 77, 2000).

O grande desafio do professor é fazer com que essa ideia seja compreendida pelo aluno, pois além da diferença existente entre essa concepção e a do senso comum, há outra entre ela e a de calórico. Isso exige metodologias adequadas para tratar de um assunto tão fundamental.

Também para esse caso, a estratégia de Nascimento ao utilizar o texto de Rumford pode ser interessante. Compreendendo a diferença entre calor como calórico e calor como energia, afasta-se o obstáculo e possibilita-se a abertura necessária para iniciar uma discussão sobre os aspectos simbólicos verbais da matematização, abrindo espaço para a compreensão das leis da Termodinâmica.

Com isso a nossa intenção é mostrar que a Física, assim como todas as ciências, desenvolveu-se por causa das modificações teóricas em diferentes épocas, como aponta Bachelard – para quem o processo de construção do conhecimento se dá por meio de um olhar constante sobre um passado de erros, sendo esses erros um fator de grande importância nessa construção. Além disso, é preciso oferecer, como aspectos complementares, espaços para reflexões sobre o fato de que o conhecimento dessas diferentes visões não deve dificultar a convivência social, na medida em que existe o perigo do dogmatismo.

Percebe-se tanto nos estudantes quanto em Carnot e Clausius evidências de valores compartilhados que foram adquiridos durante seu contato com as comunidades em que se inserem.

O grande desafio do professor é fazer com que esses valores sejam percebidos pelos alunos, pois além das diferenças existentes entre os deles e dos cientistas há outros entre os próprios cientistas. Isso exige metodologias adequadas para tratar de um assunto tão fundamental como esse.

## Sistema

Costuma-se afirmar que Newton e Lavoisier foram, respectivamente, fundadores da Mecânica e da Química. Através do uso sistemático da balança, a Química se constitui, a partir daí, como uma área de estudo fundamentada na *conservação* da massa durante as transformações da matéria. Para essa fundamentação os químicos atribuíram grande importância aos *sistemas*

*fechados*, que permitem a identificação através da massa de tudo o que chega e sai do sistema. *No sistema químico de Lavoisier, apenas o calor entra e sai livremente* (STENGERS e PRIGOGINE, 1993); será, portanto, identificado como calórico, conforme já apontamos no capítulo 2, *um fluido desprovido de peso*. Assim, a partir de Lavoisier, o método experimental parece querer eliminar pressupostos teóricos, constituindo-se como um método eminentemente empírico de procura de provas e em severa obediência à natureza.

Entretanto, entendemos que a lógica entre grandezas medidas, que, em Lavoisier, como nos seus sucessores, antecede a experimentação e define o seu caráter sistemático, pressupõe uma teoria. Qualquer fato, aparentemente simples do resultado de uma operação de medida, implica um aparelhamento teórico que condiciona sua produção.

Outros antes de Lavoisier, como é o caso de Joseph Black, em seus estudos de calorimetria, como vimos no capítulo 2, trataram os sistemas como *caixas negras* onde se relacionam de forma quantitativa e sistematizada, calor e temperatura. Mas é Lavoisier quem *generaliza* essa forma de investigação fazendo surgir um novo ideal de conhecimento: todas as grandezas necessárias e suficientes para definição do sistema são mantidas constantes, exceto uma.

Essa metodologia consagrada por Lavoisier levou à definição de variáveis que, aparentemente, está relacionada às *formas de controle do sistema* e às operações que permitem medi-las e mantê-las constantes. A pressão, por exemplo, já não será definida como resultante dos movimentos das partículas constituintes, mas se referirá aos instrumentos que as medem.

Já *não se tentará compreender*, mas relacionar: estabelecer, por exemplo, a variação da pressão em função da temperatura, mantendo constantes o volume e a composição química ou então a temperatura em função da quantidade de calor, quando o volume e a pressão são constantes. A físico-química surgiu destas questões, em aparência puramente empírica, mas na realidade impregnada de teoria e por outro lado, “falsa” pois baseia-se na ideia de que o calor é uma substância que se conserva em todas as suas transformações (STENGERS e PRIGOGINE, 1993).



Em meados do século XIX o princípio da conservação da energia traduz e consagra ao mesmo tempo (e até certo ponto verifica) que o mundo constitui um sistema, que tudo é solidário e relacionado. *Na confusão e enredo aparentes de uma diversidade quase sem fim de causas, efeitos, conversões e disposições, conserva-se a mais perfeita regularidade* (STENGERS & PRIGOGINE, 1993)

Vimos no capítulo 2 que a ideia da conservação da energia possui raízes históricas alicerçadas na ideia de “conservação no meio de mudanças”. Essa ideia, transposta para os objetivos do nosso trabalho, implica uma escolha dos objetos sistêmicos e das propriedades de interação direcionada às situações que envolvem calor, trabalho e conservação de energia alicerçada nos trabalhos de Clausius.

A partir dos trabalhos de Clausius a dimensão teórica da definição de sistema será redimensionada. Mais precisamente a noção do estado termodinâmico receberá uma definição matemática, com a formulação explícita das relações que unem as diferentes variáveis. A Termodinâmica trata o seu objeto como uma caixa negra à qual impõe entradas (variações de temperatura, de volume, de pressão, de quantidade de calor).

Sabemos que o ciclo concebido por Carnot é sede de circulação do calórico e de uma troca entre o movimento perdido por este calórico que “baixa” ou “sobe”, de um nível de temperatura para outro. A energia mecânica produzida ou consumida pelo motor é um exemplo de um sistema de sabedoria e manipulação revelando a importância da imaginação na medida em que se apoia na analogia com as máquinas simples.

A ideia de sistema dos sujeitos da nossa pesquisa, sendo centrada no objeto, como já vimos, impossibilita a interação com o ambiente porque ignora, sob o ponto de vista científico, a possibilidade de interações entre o ambiente e o interior do sistema que decorre do modelo de calor do senso comum. Além disso, como já foi dito, a ideia de sistema dos alunos apresenta dificuldades para que percebam o que se transforma e o que se conserva durante o processo.

A análise dos trabalhos tanto de Carnot como de Clausius revela um sistema como uma descrição abstrata do objeto material que lhe interessa. Trata-se de um recipiente cilíndrico incluindo aí o seu conteúdo interno. As

paredes laterais do cilindro são adiabáticas, a superior móvel, a inferior fixa, mas não adiabática. Dentro das relações possíveis, o objeto a ser analisado é inicialmente separado em pensamento do resto do Universo e, conseqüentemente, reduzido a uma série de características externas que identificam o estado do sistema por meio das variáveis de estado. As variáveis de estado mais importantes são a pressão, o volume e a temperatura.

Para possibilitar a interação entre os sistemas termodinâmicos e o “outro lado do mundo”, outro sistema é selecionado. Ele é a “vizinhança” termodinâmica. O modo como o sistema e a vizinhança interagem é determinado por uma superfície chamada “fronteira” que pode ser tão real, tal como as paredes das panelas das questões  $Q_1$  e  $Q_2$  do trabalho de Silva, ou imaginária quando as panelas estão abertas e o vapor se espalha pela vizinhança, cujo percurso nossa imaginação pode tentar acompanhar. Em Carnot, a fronteira não é fixa uma vez que ela deve participar da realização do trabalho efetuado pela máquina.

Entretanto para Clausius, sistema e vizinhança juntos formam um *supersistema isolado*, no sentido que aquilo que acontece dentro dele não tem influência para além de suas fronteiras.

O princípio da conservação da energia estabelece o limite das trocas de energia, e o segundo, o sentido (determinado pelas temperaturas envolvidas) em que ocorrem as trocas.

Atualmente há dois modos de enunciar a primeira lei da Termodinâmica:

- A energia total de um sistema isolado permanece constante.
- A variação total de energia de um sistema não isolado é igual ao calor a ele adicionado menos o trabalho realizado sobre a vizinhança.

Nos dois enunciados percebe-se a necessidade da compreensão do significado de sistema fechado.

Devido a isso é preciso que se lance mão de estratégias de ensino que possam mostrar as diferenças entre as concepções de sistema do estudante e a da Termodinâmica.

Como já vimos antes, o que é fechado e isolado para o aluno é fechado, mas não isolado para a Termodinâmica. Estabelecer essas diferenças é mostrar um caminho possível para remoção de obstáculos como uma das

condições básicas para a compreensão das interações termodinâmicas sob o ponto de vista da Ciência.

Acreditamos que a tomada de consciência da importância do sistema utilizado pela Termodinâmica pode ajudar num melhor ajustamento das generalizações simbólicas. O uso desse sistema poderá afastar os “raciocínios imprudentes” (em que a resposta é dada antes que a pergunta se torne clara) e também evitar a ambiguidade (argumentações determinadas por uma trama de obstáculos dos quais os mais essenciais são a não percepção das interações entre o sistema e a vizinhança e entre os elementos constituintes do sistema) em que o pensamento se dirige à percepção direta do fenómeno através dos sentidos e considera a natureza como uma série de gavetas distintas onde cada substância é caracterizada como sólido, líquido ou gasoso, apesar de possuir alguma ideia de transformação da água em “sólido”, “líquido” e “gás”).

Segundo Cafagne (1996), no modo de ver da Termodinâmica, o isolamento dos sistemas deve ser antecedido por discussão que leve em conta:

- a identificação dos sistemas que interagem, considerando-se o princípio da conservação da energia;
- redescrever os estados do sistema com os parâmetros da temperatura;
- comparar as temperaturas dos diferentes sistemas;
- verificar como se aplica a segunda lei da Termodinâmica no que diz respeito ao sentido da propagação do calor.

Com base na descrição de Clausius do ciclo de Carnot, apresentamos, a título de exemplo, “bases” para outro caminho:

- Apresentar a figura do sistema utilizado por Carnot e pedir que apontem diferenças entre ele e o da questão Q<sub>1</sub>.
- Elaborar perguntas tendo como suporte um texto adaptado da descrição de Clausius para o ciclo de Carnot do tipo: na descrição de Carnot, qual é a etapa que corresponde à que Clausius aponta como momento em que está ocorrendo transformação de calor em trabalho?
- Que significa para Clausius dizer que o calor residual é transferido para a fonte fria?

- A transformação de Calor em trabalho não é total, por quê?
- O que é que se conserva para Clausius? E para Carnot?

Outros exemplos de caminhos para elaboração de estratégias de ensino podem ser encontrados em trabalhos de Silva e Pacca, (2011[a], 2011[b], 2012, 2013).

Como já apontamos antes, as duas primeiras questões que propusemos para os alunos em nossa dissertação não se referem a sistemas isolados e não reportam situações usualmente tratadas em textos didáticos de Termodinâmica, mas sim, do cotidiano, o que significa que os sistemas permanecem, para os estudantes, sistemas materiais, considerando apenas objetos. Talvez por isso os sujeitos não descrevessem o sistema por meio de variáveis de estado, o que mostra dificuldades de relacionar o cotidiano com os modelos termodinâmicos já abordados em sala de aula.

Nas respostas dadas, verificamos que o ar participa do sistema apenas quando a panela está destampada. O fator unificador foi a massa tomada por eles como a quantidade de água contida inicialmente na panela.

Na segunda questão a condutividade substitui a temperatura. É ela que determina o sentido da transmissão do calor. Isso pode ser percebido quando ele diz que o ambiente frio esfria o objeto quente e uma fonte quente o aquece.

O que nos parece muito interessante na análise dessas duas questões, é que o senso comum trata as paredes da panela como se fossem adiabáticas, pois ignoram a vizinhança. Isso fica mais evidente na questão Q<sub>1</sub> quando afirmam que com a panela tampada o volume de água volta a ser o inicial, pois o vapor “se esfria”. Para muitos alunos o vapor d’água esfria e se condensa porque a chama foi apagada fazendo com que a água retorne ao seu estado inicial, ou seja, sem o “contágio” da chama o “calor deixa de existir” e o volume inicial de água é recuperado. O estado inicial parece ser uma espécie de “lugar natural”, para onde o corpo retorna sempre que a influência externa é afastada.

Proporcionar discussões sobre a importância do sistema para a compreensão da Termodinâmica é fundamental. Para isso, colocar em discussões as panelas e os recipientes que são citados nas questões apresentadas por Silva (2009) aos estudantes e procurar estabelecer as semelhanças e diferenças entre eles e o cilindro com pistão descrito por Carnot pode ser interessante. Outro exemplo pode ser encontrado em Silva e Pacca

(2013), que apresenta sugestões de atividades que se estendem para questões ambientais<sup>61</sup>.

Segundo Stengers e Prigogine (1993), *o abandono do conceito de força como conceito central da Mecânica a favor do conceito abstrato de energia, lagrangiano ou hamiltoniano, conferiu à teoria o seu verdadeiro alcance. A partir daí, em todos os casos, tanto na Dinâmica quanto na Termodinâmica, um formalismo abstrato e coerente permitiu definir o estado de um sistema por meio de certo número de variáveis e de uma função de estado e potencial. É com essa função que se pode deduzir a maneira como o estado se modifica em razão da variação de uma dessas variáveis.*

Entretanto a Física, a partir da irreversibilidade, passa a enfrentar a questão da impossibilidade de reduzir as diferentes teorias a uma única, descobrindo a diversidade qualitativa das definições dos estados correspondentes aos diferentes tipos de sistemas físicos.

### Processo

A forma narrativa com que os estudantes descrevem os processos parece muito afastada da ideia de estados anteriores e estados subsequentes usualmente tratados por Carnot e Clausius. Além disso, a necessidade do senso comum de descrever por meio de relações causais subsequentes será um obstáculo para a compreensão da Termodinâmica, pois tais descrições utilizam uma abordagem exclusivamente macroscópica e local e sem preocupações de generalizações.

Para Carnot, a quantidade de calor se conserva durante o ciclo. A adoção dessa concepção torna o calor uma variável de estado<sup>62</sup>. Sendo assim, a única coisa que poderia ser feita para que a substância transportadora do

---

<sup>61</sup> Para informações de trabalhos que abordam especificamente contribuições da Termodinâmica do não equilíbrio às questões ambientais no ensino ver Caramello (2012).

<sup>62</sup> 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. No caso da água, vapor, água líquida e gelo. É muito remota a consciência, segundo Gibert (1982), de três estados físicos distintos: o sólido, o líquido e o gasoso. As mudanças de fase já eram conhecidas no final do século XVIII, bem como a sua dependência da temperatura. Com o advento da Termodinâmica essa concepção alargou-se não só para abranger o estado físico, mas, dentro deste, todas as possíveis situações definidas pelos valores (quantidades) simultâneos de todas as grandezas características tais como pressão, volume e temperatura. Para mais considerações a esse respeito ver Gibert (1982, p. 238).

calórico voltasse a seu estado de equilíbrio era devolver-lhe a mesma quantidade desse fluido por meio de reações químicas adequadas ou por condução térmica através de uma superfície externa.

Esse modo de pensar, como já vimos, foi contestado por muitos cientistas do século XIX como é o caso de Rumford ao descobrir a possibilidade de se extrair de um sistema uma quantidade ilimitada de calor por meio da cessão de energia mecânica proporcional ao calor retirado. Esses experimentos evidenciaram a possibilidade de mudar o estado de um sistema retirando calor para aquecer um corpo e depois fazê-lo retornar ao estado inicial sem ceder calor.

Experimentos como os de Rumford foram notados por Clausius que, além disso, ao levar em consideração o princípio da conservação da energia acabou por considerar o calor como uma variável de processo e não de estado<sup>63</sup>. A variável de estado passou ao que conhecemos atualmente como energia interna do sistema. Outras variáveis de estado apontadas por Clausius foi o trabalho realizado pela máquina de Carnot e a entropia.

Com relação à primeira lei da Termodinâmica, se o estado de um sistema é alterado, em consequência de receber uma determinada quantidade de calor,  $dQ$  e com isso, o sistema realiza uma quantidade de calor  $dw$ , então a lei da conservação da energia garante: a quantidade de calor recebida  $dQ$  é igual à soma do trabalho realizado  $dW$  e da variação da “energia interna”  $dU$  do sistema. Voltaremos a falar disso com mais profundidade quando nos referirmos à matematização.

No que se refere à reversibilidade, para muitos sujeitos de pesquisa ela aparece condicionada à ação de um experimentador. Isso é detectado nas

---

<sup>63</sup> A ideia de transformação de calor em trabalho e da equivalência numérica entre eles constituiu-se numa forma inteiramente nova de ver a potência motriz das máquinas. Sempre que isso ocorre verifica-se uma variação na energia interna do sistema. Portanto, nessa nova concepção, calor e trabalho, usando a terminologia moderna, passam a ser variáveis (ou quantidades) de processo, dependentes, portanto, do percurso, já que mesmas variações de temperatura entre as fontes, em diferentes pontos da escala termométrica, podem produzir rendimentos diferentes na mesma máquina. A energia interna é que é a variável de estado. Entretanto, várias frases sobre calor de uso corrente hoje – como fluxo de calor, rejeição de calor, adição de calor, remoção de calor, ganho de calor, perda de calor, armazenamento de calor, geração de calor, calor de reação, liberação de calor, calor específico, calor sensível, calor latente, calor perdido, calor do corpo, calor do processo, sumidouro de calor e fonte de calor – não são consistentes com o seu significado termodinâmico atual, o qual o limita a uma forma de transferência de energia durante um processo. Entretanto, essas expressões estão profundamente enraizadas em nosso vocabulário, sendo utilizadas por leigos e cientistas atestando, por trás delas, a persistência da teoria do “calórico”.

respostas dadas à questão Q<sub>2</sub>, quando os alunos dizem que o retorno às condições iniciais requer que a porção de água que está em equilíbrio térmico seja separada em “duas canecas diferentes” para em seguida proceder-se às “variações de temperatura necessárias”. Portanto, sem essas “ações externas” o retorno às condições iniciais não seria possível.

Percebe-se, entretanto, com relação a essa mesma questão que alguns alunos apresentam uma tentativa de explicar a irreversibilidade levantando hipóteses criativas com a introdução de elementos que pudessem “identificar”, cada uma das duas porções durante a mistura, como pode ser visto na resposta:

Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno! Uma hipótese 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, mas acho pouco provável a veracidade desse fato (M<sub>1</sub>Q<sub>2</sub>).

Para o estudante não “há perda de identidade” com a mistura com relação às temperaturas que cada parte carrega. Apesar de não poder vê-lo, acredita que cada uma continua lá. Isso revela uma situação “envolvida em brumas”, um conflito, com ideias de irreversibilidade relacionadas a colocações de Poincaré, (os grifos são nossos):

Se o mundo tende para a uniformidade, não é porque suas partes últimas, inicialmente desiguais, tendem a se tornar cada vez menos diferentes; é porque, deslocando-se ao acaso, acabam por se misturar. (...) *cada grão dessa poeira conserva sua originalidade e não se modela de acordo com seus vizinhos; mas como a mistura se torna cada vez mais íntima, nossos sentidos toscos só percebem a uniformidade. É por isso que, por exemplo, as temperaturas tendem a se nivelar, sem que seja possível retroceder.* Se uma gota de vinho cai num copo d'água, qualquer que seja a lei do movimento interno do líquido, logo verá tingir-se de uma cor rosada uniforme e, a partir desse movimento, por mais que agitemos esse

recipiente, o vinho e a água não parecerão mais poder separar-se. Assim, esse seria o tipo de fenômeno físico irreversível; esconder um grão de cevada num monte de trigo é fácil; encontrá-lo e tirá-lo de lá, é praticamente impossível. Maxwell e Boltzmann explicaram tudo isso, mas quem o percebeu com mais clareza, num livro pouco lido por que é um pouco difícil de ler foi Gibbs, em seus princípios de mecânica estatística (2007, p.116).

Percebemos aí, um exemplo da importância das intuições primeiras, dos pontos que podem servir de intersecções entre os raciocínios de estudantes e cientistas com todas as diferenças que possam existir entre eles. A forma como devem ser utilizadas essas interseções para conduzir as estratégias pedagógicas exige 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.

A resposta dada por  $M_1Q_2$  pode ser um poderoso instrumento para o professor iniciar discussões a respeito dos aspectos macroscópicos e microscópicos da matéria. Considerar a água como constituída de moléculas requer que se introduzam noções de teoria cinética e um aspecto que pode ser interessante para se iniciar essas discussões é: a partir da resposta de  $M_1Q_2$  apresentar a imagem de um quadro pontilhista<sup>64</sup> como o mostrado a seguir:

---

<sup>64</sup> No final do século XIX Seurat, pintor francês, começa a elaborar e experimentar uma teoria própria da pintura, baseada na ótica das cores, a qual corresponde uma nova técnica cientificamente rigorosa. O problema central é a divisão de tons: como a luz branca é resultante da combinação de todas as cores visíveis, o equivalente da luz na pintura não deve ser um tom unido, nem ser obtido com a mistura de tintas, e sim resultante da aproximação de vários pontinhos coloridos que, a certa distância recompõe a unidade do tom.





Sunday Afternoon at La Grande Jatte. Georges Seurat. 1884. Art Institute of Chicago

A estratégia pode prosseguir tocando em pontos da teoria cinética que estabelece relações entre a energia interna da substância e a temperatura absoluta, e torna explícito que é o movimento aleatório das moléculas que determina a temperatura. Essas discussões podem ser o início de um caminho para apresentação qualitativa do conceito de entropia que, no nosso ponto de vista, deve passar inicialmente por discussões sobre a visão de Clausius para posteriormente apresentar, também forma qualitativa a visão de Boltzmann.

Uma sugestão para apresentação do processo reversível utilizado por Carnot é a apresentação para discussão, dos seis passos apresentados nas páginas 126 a 129, pois a exposição feita por aquele cientista mostra a operacionalização possível e o seu caráter ideal. O professor, em momentos em que sua atuação revela-se mais preponderante e necessária, poderá expor seu ponto de vista utilizando argumentos que poderão se tornar mais compreensíveis aos alunos, com relação às variações de pressão, volume e temperatura do ar confinado no recipiente e sua interação com o pistão.

Para complementar uma possível discussão e as argumentações do professor, poderão ser distribuídos textos em que Carnot explicita a origem da potência motriz utilizável no ciclo. Isso poderá tornar acessível a compreensão do moderno conceito de trabalho útil no ciclo ao se discutir a movimentação do

êmbolo. Um exemplo de texto que pode ser utilizado é mostrado a seguir (os grifos são nossos):

Nessas diversas operações percebe-se que o êmbolo sofre um esforço maior que aquele *devido às variações de volume e de temperatura*. Mas, nota-se que em posições idênticas dos pistões a temperatura é maior durante os movimentos de expansão que de compressão. *Durante os primeiros, a força elástica é maior, e em consequência, a quantidade de potência motriz produzida é maior que a consumida para produzir os movimentos de compressão... Assim se obterá um excedente de potência motriz que poderá ser disponibilizado para um uso qualquer.* (CARNOT, 1987, p. 53, tradução nossa) [28]

### **Transformação**

As ideias de transformação dos estudantes, de Carnot e de Clausius, pelas suas diferenças marcantes, também merecem, como todos os outros estruturantes, um tratamento cuidadoso. Já vimos que apenas para Clausius transformação se refere à natureza do calor, e apenas ele conferiu a ela o estatuto energicista, cuja compreensão requer o afastamento do obstáculo substancialista. Com finalidade de organizar nosso discurso vamos relembrar essas ideias:

### **Estudantes:**

Ligadas à mudança de fase<sup>65</sup>, com descrições que apresentam algumas ressonâncias, embora tímidas, com a ideia de desagregação de Clausius, à medida que se referem ao comportamento dos componentes microscópicos da água.

---

<sup>65</sup> Segundo Gibert (1982), Lavoisier, em 1777 assim se referia às transformações de estados: “... quase todos os corpos podem existir em três estados diferentes; ou sob forma sólida, ou sob forma líquida, isto é, fundidos ou sob forma de fluido elástico: estes três estados só dependem da quantidade maior ou menor de calórico de que esses corpos estão penetrados e com o qual estão combinados...”. Vê-se então que essa ideia apresenta ressonâncias com as dos estudantes.

### **Carnot:**

O calor produz movimentos que podem ser observados sobre a superfície da Terra, como deslocamentos do ar atmosférico, terremotos etc., além das que geram transformações sociais e riqueza. Aparece também, de forma implícita, a transformação de calor de uma temperatura à de outra temperatura.

### **Clausius:**

As ideias de transformação se referem às de calor em trabalho, de calor de uma temperatura à de outra temperatura e de desagregação.

Em sala de aula o confronto com essas ideias poderá ser feita através de promoção de discussões sobre os diferentes significados de transformação que aparecem tanto nas respostas dadas pelos estudantes às questões Q1 e Q2, quanto naquelas que foram localizadas em Carnot e Clausius.

Percebe-se aqui a recorrência do obstáculo epistemológico servindo de justificativa para levantamento de concepções prévias, pois possibilita o reconhecimento dos erros dos estudantes (sob o ponto de vista da Termodinâmica). Para que esses erros sejam ativados e posteriormente removidos, é preciso diferenciar entre “começos” e “fundamentos”, segundo a concepção bachelardiana. O fundamento é sempre recorrente: aparece no fim, emerge do trabalho realizado, é o que permite diferenciar o começo da forma que ele era: “*um balbucio infantil*”. A facilidade inicial deve ser ponto de partida de uma *construção* e é o melhor indicador do trabalho intelectual que deve ser realizado.

As diferentes concepções de transformação em Carnot e Clausius se constituem como exemplo da falta em um deles do conhecimento do outro (isso também ocorre entre os estudantes). Na escola, os estudantes podem aprender através que ocorreu entre esses cientistas, a refazer seu funcionamento cerebral para que adquira estágios mais amplos e mais desenvolvidos.

## Matematização

Vimos nas respostas dos estudantes aspectos embrionários de quantificações que foram considerados por nós como raciocínios reveladores de uma pré-matematização, a saber:

- Referências frequentes à temperatura associando-a a leitura na escala de um termômetro.
- Temperatura de equilíbrio térmico associada ao equilíbrio estático na Mecânica.
- Associação de um ponto neutro à temperatura de equilíbrio não atribuindo relações de sinais para as avaliações de quente e frio.
- Conflitos com situações reais e com mudanças de fase devido à forma como os termômetros usuais são calibrados.
- Duplo sentido da propagação do calor.
- Confusão e sobreposição de variáveis.
- Transporte de modelo mecânico para o termodinâmico.

Esses pontos evidenciam dificuldades com relação à utilização da Matemática pelos estudantes, pois se utilizam de forma frequente da palavra com significado muito diverso do científico.

Ao fazer considerações sobre o papel da Matemática na Física, Feynman (2000) afirma:

...a matemática não é apenas outra linguagem: é uma linguagem mais o raciocínio, é uma linguagem mais a lógica, é um instrumento para raciocinar. É, de fato, uma grande coleção de resultados provenientes de pensamentos e raciocínios cuidadosos (FEYNMAN, p. 53, 2000).

Com relação às leis da Física, Feynman afirma que elas são numerosas complicadas e pormenorizadas. Mas todas parecem obedecer a princípios gerais, como é o caso dos princípios de conservação.

A matematização das leis da Termodinâmica em Clausius foi efetuada com base nas ideias de transformação e equivalência atreladas na conservação da energia. Essa conservação corresponde à ideia de que no

universo há um número que pode ser calculado em um dado momento e que, apesar de todas as transformações que sofre, ao se fazer novamente o cálculo, ele sempre é o mesmo.

Não é tarefa simples levar o aluno à compreensão dos aspectos formais contidos na expressão da primeira lei da Termodinâmica. Daí a nossa hipótese de que é necessário fazer um percurso longo, partindo dos conhecimentos prévios, para permitir a mudança da estrutura cognitiva necessária a essa compreensão.

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 os símbolos básicos que devem conduzir à formalização dessa lei.

A teoria cinética dos gases, como já foi dito, 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 Q<sub>2</sub>. 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.

Isso pode facilitar a introdução do conceito termodinâmico de temperatura (T) mostrando que ela está desvinculada de grandezas como massa, comprimento e tempo, podendo ser definida como uma grandeza fundamental por meio da expressão matemática:

$KT = 2/3 (mv_m^2/2)$ , sendo K uma constante que determina a relação entre joule e graus Kelvin).

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

A constatação de uma temperatura que se relaciona com a ausência de agitação média das moléculas de um corpo levou Kelvin à proposição da escala absoluta de temperatura cujo único ponto fixo (o zero absoluto) situa-se a  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tornando coerente a relação dos aspectos simbólicos verbais ou estruturantes matemáticos com a energia cinética: “não há temperaturas negativas, pois não há energias cinéticas negativas”. Este é um ponto importante que pode ser trabalhado em classe utilizando a metodologia proposta por Carmo (2006) para o estudo do aquecimento da água.

Em Clausius, as considerações sobre a ação do calor e a temperatura absoluta esclarecem também o significado conceitual dessa temperatura. Inicialmente, ela aparece relacionada ao calor e ao trabalho que este pode efetivar por meio da “força ativa do calor contido no corpo”; depois, explicita-se sua relação com o trabalho que o calor pode realizar, pressupondo as condições de reversibilidade.

No princípio de equivalência entre as transformações, Clausius quantifica a influência dessa temperatura no equilíbrio das transformações calor-trabalho e de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura.

Dessa forma, a temperatura absoluta não representa apenas uma nova escala de temperatura, mas um novo conceito, baseado nas transformações calor-trabalho e das condições de reversibilidade, mais propriamente, da magnitude da resistência que o calor contido nos corpos pode vencer.

O papel desempenhado pelos gráficos PXV nos trabalhos de Clausius foi importante para se chegar às expressões finais das leis. Tal procedimento não foi utilizado por Carnot em *Reflexiones*<sup>66</sup>. No contexto escolar, os professores podem, ao lado das figuras utilizadas por Carnot na descrição das máquinas térmicas reversíveis, colocar os gráficos utilizados por Clausius (o diagrama PXV que representa o ciclo reversível de Carnot é mostrado a seguir). Isso pode viabilizar que os estudantes efetuem a fusão entre o signo e referente. Essa fusão, a que já nos referimos no trabalho de Carmo (2006), nos

---

<sup>66</sup> Em Fox (1976, p. 192), encontra-se a representação em diagrama PXV do ciclo de Carnot feita por Clapeyron em sua “Memoire sur la Puissance motrice du feu” publicado no Journal de l’Ecole polytechnique, XIV, cahier 23 (1834), 153-90 (156-9). Foi por causa desse trabalho que se deu a redescoberta das “reflexions...” de Carnot, após sua publicação em 1814.

parece bastante significativa, se constituindo como um dos vínculos que poderão possibilitar uma ampliação da visão dos alunos.

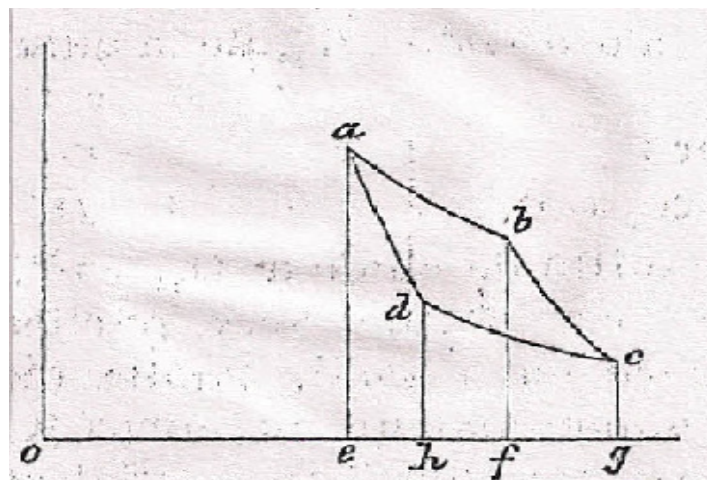


Figura 7: extraída de Clausius (1888, p. 93);  $oe = v_1$  (volume inicial);  
 $ea = p_1$ ; (pressão inicial)

A utilização do gráfico, por Clausius, para descrever o ciclo fechado, é mostrado, em parte, na passagem:

Essas quantidades de trabalho se lêem imediatamente sobre a figura que reproduzimos aqui. O trabalho efetuado para a dilatação  $ab$  é representada pelo quadrilátero  $eabf$ , e, para dilatação  $bc$ , pelo quadrilátero  $fbcg$ . O trabalho consumido durante a compressão  $cd$ , é representado pelo quadrilátero  $gcdh$ , e durante a compressão  $da$ , pelo quadrilátero  $hdae$ . Essas derradeiras quantidades de trabalho são menores que as duas primeiras, por causa da temperatura mais baixa em que se efetuam as compressões e da pressão menor que daí resultou; e, se subtrairmos das primeiras, haverá um excedente de trabalho exterior efetuado, que é representado pelo quadrilátero  $abcd$ , e que chamaremos  $W$ . (1888, p.93, tradução nossa) [29]

As argumentações de Clausius nos parece muito apropriadas para apresentações em sala de aula, no sentido de produzir situações em que as relações entre signo e referente sejam consideradas fundamentais. Estratégias

nessa direção podem ser apoiadas nas considerações que já foram apontadas no trabalho ao nos referirmos ao trabalho de Carmo (2006), a saber: não se faz e não se comunica Ciência somente pela linguagem oral ou pela escrita, mas ao mesmo tempo, deve-se levar em conta **os componentes verbais-tipológicos e matemáticos-gráficos-operacionais-topológicos**<sup>67</sup>. Como já foi dito, estar no mundo da Ciência é combinar discurso verbal, expressões matemáticas, representações gráficas e visuais e operações motoras.

Para obtenção matemática da conservação da energia cuja representação mais recente em livros didáticos do ensino médio é:  $Q = \Delta U + W$ <sup>68</sup>, Clausius faz comentário sobre a nomeação da função U conhecida hoje como energia interna da seguinte forma (os grifos são nossos):

A função U que introduzi nessa ocasião na teoria do calor, é igualmente adotada por outros autores que escrevem sobre essa teoria; ... Em suas memórias de 1851, Thomson a nomeou de *energia mecânica de um corpo num dado estado...* a essa *energia* empregada por Thomson me parece conveniente, pois a quantidade a que se refere corresponde á que é utilizada na mecânica. Me referirei, apartir daqui, como U à quantidade de *energia* de um corpo. (1888, p.42. Tradução nossa) [30]

A leitura dos trabalhos de Clausius evidencia que a expressão da primeira lei da maneira como é apresentada em sua forma mais recente foi escrita por Clausius somente em seus últimos trabalhos, mas para chegar à formulação matemática da segunda lei ele utilizou a expressão  $\Delta Q = DH + AdL$  (SILVA, 2009), em que aparece a função H que para ele representa o conteúdo de calor do corpo.

A apresentação qualitativa da primeira lei por Clausius como a passagem da página 42 do seu livro mencionado acima, leva-nos a refletir sobre uma apresentação mais clara da concepção de calor. Em seu trabalho

---

<sup>67</sup> Os significados dos componentes citados podem ser encontrados no trabalho de Carmo (2006).

<sup>68</sup> Nessa expressão, o calor (Q) e trabalho (W), sendo variáveis de processo não têm o significado de energia, elas apenas são “formas” de transformar e de transferir energia.  $\Delta U$  corresponde à variação de energia interna U, que é uma variável de estado.



isso aparece quando analisa a desagregação interna dos corpos, ou do “arranjo dos constituintes das substâncias” Silva (2009). Ele chama a soma das duas primeiras parcelas de “energia” ( $\Delta Q + W$ ) e cada parcela de “conteúdo de calor” ( $\Delta Q$ ) e “conteúdo de trabalho” ( $W$ ).

Na página 49 de sua “*Teoria mecânica...*”, Clausius deduz a expressão do trabalho realizado por um gás encerrado em um cilindro dotado de um êmbolo móvel partindo de formulações da Mecânica como sendo o produto da força pelo deslocamento. A partir daí, deduz o primeiro princípio escrevendo-o na forma:

$$dQ = du + pdv \text{ (CLAUSIUS, 1888, p. 59) (1)}$$

Em seguida Clausius passa a utilizar diagramas PXV para cálculo do trabalho, passando a analisar o ciclo de Carnot com esse instrumento, estendendo os cálculos para ciclos fechados complexos, chegando à expressão matemática do segundo princípio:

$$dQ = TdS \text{ (CLAUSIUS, 1888, p. 117) (2)}$$

“Nas equações 1 e 2”, diz Clausius na página 252 de seu “*Traité...*”, U e S representam a energia e a entropia dos corpos e dU e dS as variações dessas grandezas; dQ é a quantidade de calor que o corpo recebe para que ocorra sua mudança de estado, dW é o trabalho exterior efetuado e T é a temperatura absoluta em que aquela mudança ocorre.

Por fim, achamos que se durante a explicitação dos seis passos descritos por Carnot do funcionamento de sua máquina térmica juntar-se a descrição do diagrama PXV utilizado por Clausius, poderá ocorrer o favorecimento da compreensão entre o referente apontado por um e o tratamento matemático apontado pelo outro. Dessa maneira, pode-se favorecer a melhor compreensão das generalizações simbólicas em seus aspectos formais na medida em que pode tornar mais clara a *relação entre os signos e os referentes*. Acreditamos que dessa forma o componente da matriz disciplinar de kunh denominado exemplares que se refere às resoluções de problemas possa ser utilizado sem que se constitua como tarefas vazias de significados.

## Conclusões

Retornando à nossa questão de pesquisa “Que subsídios poderão ser oferecidos aos professores de forma a contribuir na elaboração de estratégias de ensino que possam levar os estudantes do ensino médio a reflexões sobre a razão de ser, as finalidades e o significado das leis da Termodinâmica?” , podemos dizer que ela contém nossa aposta de resgatar para o ensino de Física os aspectos filosóficos que estão nas origens dessa disciplina, o que constitui-se como um aspecto integrador que procura romper com a fragmentação e o reducionismo decorrentes dessa separação.

Sendo produtos que emergiram da análise de conteúdo das ideias dos estudantes e dos cientistas sobre a Termodinâmica, esses subsídios nos parecem meios didáticos que vão de encontro aos nossos objetivos. Levados à sala de aula, se constituem como vínculos à medida que pretende direccionar e organizar o intelecto através do rompimento com a realidade do senso comum para que o conhecimento científico se constitua. Da forma como foram construídos nos fazem crer que podem contribuir para elaboração de boas estratégias de ensino.

A matriz disciplinar de Kuhn e as características dos obstáculos epistemológicos de Bachelard nos parecem eficientes no estabelecimento das relações entre as ideias dos estudantes que, testadas e analisadas no trabalho de mestrado foram confrontadas aqui com as ideias de Carnot e Clausius numa dimensão mais profunda.

Relembrando os componentes da matriz disciplinar de Kuhn apontados por Ostermann: *modelos particulares, generalizações simbólicas, valores compartilhados, exemplares*, foram detectados nos estruturantes *analogia, natureza do calor, transformação, sistema e matematização*, como vimos nos capítulos 3 e 4, cada um em maior ou menor grau, tanto nos estudantes quanto nos cientistas.

Essa detecção possibilitou a percepção das barreiras conceituais com base nas características dos obstáculos epistemológicos de Bachelard apontados por Astolfi. Com isso pudemos discutir a necessidade da remoção

dessas barreiras como importante para a ocorrência da compreensão de formas diferentes de ver da Termodinâmica.

O debruçar sobre o passado de erros contidos no desenvolvimento da Termodinâmica que foram aqui traçados nos parece sinalizar como uma maneira eficiente para futuros tratamentos relacionados à estrutura da matéria, tocando em pontos ligados à teoria cinética, às ideias de Boltzmann e desenvolvimentos mais atuais como é o caso da Termodinâmica do não equilíbrio e suas implicações em outras esferas do conhecimento.

Essa forma de encarar o ensino de Física implicou numa busca de suas raízes filosóficas e dos aspectos epistemológicos que daí decorre, levando-nos à crença de que a filosofia e a História da Ciência integradas às aulas de Física e não como disciplinas separadas podem produzir um ensino que prospere em criatividade, uma vez que suas raízes foram reconduzidas ao seu lugar.

Evidentemente esse resgate pode conduzir a erros quando tentar-se a sua aplicação. Mas poderemos aprender com esses erros e corrigir os rumos.

Acreditamos que não é reproduzindo receitas e pedindo aos outros que nos digam como deveríamos produzir nossas satisfações e expectativas que romperemos com o que estamos atados e sairemos da escuridão. É preciso repensar como ensinamos e como deveremos ser capazes de fazê-lo com a qualidade que contenha nossa marca e que permita a nós nos mantermos “em marcha”. Disso depende nosso desenvolvimento.

A compreensão da aprendizagem como expressão de um acoplamento estrutural nos leva a acreditar que esse acoplamento manterá uma compatibilidade entre os aspectos cognitivos do indivíduo e o meio em que ele ocorre. Como já dissemos, a escola deve ser um lugar onde se aprende a transformar a estrutura cognitiva para continuar a aprender.

Nesse sentido, mesmo para aqueles estudantes que não pretendem seguir uma carreira científica, refletir sobre os conceitos da Física e como ocorre a construção desses conceitos pode ser importante para o exercício da cidadania, atuando de forma significativa na sociedade podendo contribuir para evitar a utilização da Ciência em situações que poderão ser predatória e desnecessária.

Tudo que foi colocado nesse trabalho, fruto de um processo exaustivo, mas prazeroso de investigação nos remete ainda a uma antiga questão: como

aprender a ensinar? Não se trata apenas de aprender e ensinar o que foi o passado, mas também de possibilitar a construção do futuro. Mas, o que significa esse futuro, já que ele ainda não existe? Ele está na preocupação dos estudantes? Achamos que o futuro é algo em construção e que diz respeito à totalidade das atividades existentes. Essas atividades deverão impulsionar as ações que mantêm a humanidade em marcha.

Sabemos que possibilitar a compreensão de uma forma distinta de ver o mundo daquela a que estamos acostumados é um trabalho árduo. O espírito pré-científico, usando a terminologia de Bachelard, sempre está presente, pois é sob forma de estímulo que ele formula a primeira objetividade. A necessidade de sentir o objeto, o apetite pelos objetos, essa curiosidade indeterminada ainda não correspondem a um estado de espírito científico. Mas, para se chegar a esse estado é preciso que estejamos abertos à possibilidade de fracasso, pois sem ele o estímulo seria embriaguez; é preciso que o ser humano adquira a consciência de que ele sempre se engana. *Aquele que acha que nunca se engana estaria enganado para sempre e esse seria o mais incorrigível dos erros objetivos* (BACHELARD, 2008).

Sendo coerente com Bachelard, esse trabalho ao procurar, à sua maneira, se debruçar sobre a História da Ciência em busca de um passado de erros e fracassos e tendo a crítica ao aparente malogro da mudança conceitual como um de seus focos, coloca a questão da ausência dos vínculos apontados por Pietrocola, a qual nos referimos na introdução como uma possibilidade a ser considerada. Esses vínculos, consubstanciados por nossos estruturantes e apresentados como possibilidades que poderão diminuir a distância entre a apreensão da realidade do cientista e do estudante, se constituem como uma contribuição possível para um ensino que focaliza o indivíduo bem formado como elemento central do processo que deverá levar à construção de uma sociedade mais justa.

Os estruturantes, surgidos da análise do material fornecido pelos sujeitos de pesquisa e do material bibliográfico, constituem-se para nós como elementos essenciais que possivelmente contribuirão na tentativa de impedir a “agonia” do ensino de Física, a qual nos parece tão bem representada no “escravo agonizante” de Michelangelo que precede a abertura desse trabalho.

O resgate da História e Filosofia da Ciência como componentes presentes durante as aulas de Física com foco na análise de seus fracassos em busca de uma revitalização do ensino de Física é, para nós, muito bem revelada pela escultura de Giacometti e consubstancia-se no ensino, segundo nos parece, por meio da Epistemologia histórica de Bachelard.

Entretanto, é preciso sempre recorrer a Morin para que não se corra o risco de apresentar os conceitos científicos de forma dogmática. A escolha, repetimos, das formas de interpretação do mundo deve ser do estudante, uma vez que, como parece querer comunicar as esculturas “inacabadas” de Michelangelo, a semente do conhecimento já se encontra dentro do sujeito.

Sabemos, entretanto, que uma tarefa desse porte não é simples. Detectamos isso em apresentações que fizemos de trabalhos relativos aos conteúdos dessa tese no VIII ENPEC/I CIEC (Unicamp), no Encontro de Física 2011, (Foz do Iguaçu), no XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (Maresias), entre outros. Apesar da boa recepção desses trabalhos por parte de alguns participantes desses congressos, verificamos, em conversas durante refeições e intervalos entre as apresentações, resistências a esse tipo de enfoque entre professores, o que revela a necessidade do muito trabalho que ainda precisa ser feito.

Além disso, temos em conta que a educação está enraizada na cultura da qual ela tira uma parte de seus valores, sendo essa cultura tanto história e memória de um patrimônio quanto disponibilidade para ocorrências aleatórias.

Por fim, recorrendo mais uma vez a Morin (2012) entendemos que: “somos filhos do cosmos, trazemos em nós o mundo biológico... mas ‘com’ e ‘em’ nossa singularidade própria. Em outras palavras: para enfrentarmos o desafio da complexidade, precisamos de princípios organizadores do conhecimento”. Esses princípios organizadores, representados no nosso trabalho pelos estruturantes, nos levam à expectativa de que a promoção da compreensão das formas de pensar na Física, por meio do enriquecimento das discussões entre os envolvidos com a educação, pode ser um instrumento para o fortalecimento do respeito, compreensão e diálogo entre diferentes formas de cultura.

## Implicações para o ensino

Nesse trabalho examinamos o surgimento do conceito de energia, cuja história começa na intersecção de duas séries de investigações: uma, provavelmente a mais antiga, relaciona-se a movimento, objeto de estudo da Mecânica, enquanto a outra tenta aproximar-se de uma entidade de acesso muito mais difícil, por desconhecimento da sua natureza, embora os seus efeitos fossem evidentes, ou seja, o calor.

O envolvimento dos vários cientistas citados no capítulo 2 sobre os estudos envolvendo os gases mostra que a atribuição da autoria de uma descoberta é um tema muito complexo como observa Kuhn (2011), ao afirmar que isso demanda considerar vários aspectos dentro de um contexto histórico mais amplo. No caso do oxigênio, por exemplo, Scheele, está também ligado a essa descoberta, pois realizou importantes trabalhos fundamentados em cuidadosas observações sobre a composição do ar atmosférico, tendo apontado a existência dessa substância em sua obra *Tratado da química de ar e fogo*, embora fosse adepto da teoria do flogístico (BRITO, 2008).

As considerações de Kuhn também mostram a impossibilidade de se precisar a data de uma determinada descoberta. Sua justificativa se apoia no longo processo em que velhas crenças vão se fragilizando em consequência do surgimento de uma quantidade razoável de *anomalias mal explicadas, fazendo emergir novas regulações*. Achamos, entretanto, por uma questão de trabalharmos com períodos mais curtos, para o nosso trabalho a adoção da visão Bachelardiana dos obstáculos epistemológicos é mais conveniente. Mas, percebemos que tanto em Bachelard quanto em Kuhn, não se pode atribuir, por exemplo, uma data à descoberta do oxigênio.

Na visão kuhniana o paradigma que explica a combustão dos materiais pelo flogístico é totalmente diferente da explicação que toma o oxigênio como fator essencial da reação de queima de um material. No primeiro caso, os materiais combustíveis teriam de conter flogístico; e, no outro, um elemento, o oxigênio, teria de ser subtraído da atmosfera para que o mesmo processo pudesse ser realizado. No paradigma anterior, alguma coisa se perde; no novo, alguma coisa entra na composição provocando uma reação.

Na visão de Kuhn, no paradigma do flogístico certos materiais, depois de queimados, teriam de perder peso. E o problema da visão considerando apenas um dos aspectos é como conseguir passar de um paradigma para outro em que o importante não é o que sai nem o que entra, mas com o que uma reação poderá ser desencadeada. Com formas de pensamento tão díspares, a tradução de um paradigma para outro não pode ser assim tão simples.

Para Bachelard, na nossa interpretação, o flogístico se constitui como um obstáculo à compreensão da nova forma de ver o mesmo fenômeno. Daí a necessidade do seu afastamento. O problema que se coloca aqui é: como possibilitar esse afastamento? Acharmos que o desvelamento, por Lavoisier, na História da Química, de que há conservação da massa global quando ocorre uma reação química levou ao rompimento com a teoria do flogístico, e pode ser considerado como ponto a ser incluído nas estratégias de ensino de Física. Esse pode ser um dos caminhos para uma solução satisfatória para este problema.

Os pontos de vista tanto de Kuhn quanto de Bachelard tornam-se também interessantes, para além do que já foi dito, ao evidenciarem que Lavoisier não deve ser tratado como um herói. Na verdade, seus trabalhos têm a ver com seus predecessores, como também com seus contemporâneos. Acharmos que, apesar de Priestley e Cavendish, por exemplo, serem adeptos da teoria do flogístico, efetuaram experiências que podem ser consideradas importantes para a polêmica que surgiu sobre essa teoria e que resultou em seu abandono.

As duas séries de investigações apontadas no início desse item acabaram por revelar afinidades quanto às suas transformações mútuas: nessa tese essas relações foram evidenciadas por meio do estudo das máquinas térmicas que resultou, no início do século XIX, na caracterização de uma "ciência de calor" possível de ser tratada matematicamente.

Percebemos que a analogia feita por Carnot entre as máquinas mecânicas e térmicas não foi suficiente, pois o paralelismo entre o movimento produzido pelo "fluido calórico" pareceu, para alguns cientistas do século XIX, demasiado simplista, e esse conceito, parecia arbitrário e sem fundamento. No raciocínio de Carnot, havia algo de conservação, mas a equivalência entre o

movimento e calor exigiu a introdução de outro conceito: o de energia, que foi efetuado por Clausius e que redundou posteriormente na definição de entropia.

Esta nova Ciência, a Termodinâmica, foi organizada progressivamente em torno da expressão de duas leis. A primeira, comum à Mecânica e à Termodinâmica: a conservação da energia. A segunda caracteriza as transformações entre diferentes formas de energia, expressando a propriedade fundamental de uma máquina térmica, a saber, a necessidade de produzir o movimento (ou outros efeitos físicos) por meio do calor, tendo duas fontes de diferentes temperaturas.

A formulação quantitativa dos conceitos acompanhada da descoberta de seus princípios esclareceu os conceitos de temperatura, energia, trabalho e entropia, sendo todos interligados por seu conteúdo ou significado físico.

Para que todo esse conhecimento seja transportado para sala de aula, acreditamos que seja necessária a identificação das barreiras e ressonâncias existentes no raciocínio dos estudantes sobre os conceitos abordados por Clausius e Carnot. Insistimos que elas tocam em pontos fundamentais a ser considerados pelos professores ao planejarem suas aulas quando se pretende que os estudantes compreendam os conceitos científicos.

Além disso, as atividades devem privilegiar situações problemas em que os alunos percebam que suas concepções não conduzem a soluções satisfatórias sob o ponto de vista da Ciência. Dessa forma, amplia-se o repertório do professor podendo levá-lo a uma atuação que permita colocar o estudante em condições de perceber a importância que o novo conhecimento poderá ter para ele.

Nossa expectativa é de que a apreensão do modo de pensar da Ciência pelos estudantes permita novas aberturas de possibilidade de explicações tanto para os fenômenos naturais quanto para aqueles verificados nos produtos tecnológicos colocados à disposição do ser humano. Essa apreensão constitui-se em outro ajustamento entre os aspectos subjetivos do indivíduo e o mundo à sua volta.

A nossa aposta é que os estruturantes por nós apresentados possam servir de subsídios a ser contemplados na elaboração de estratégias de ensino, de forma a possibilitar a remoção dos obstáculos que impossibilitam não só a



compreensão das leis da Termodinâmica, como também a de que a conservação da energia só é possível quando acompanhada da degradação.

O estabelecimento do princípio da conservação da energia foi muito impactante para a humanidade, levando a importantes reflexões, a outras formas de cultura e provocando o surgimento de novas concepções como a do ser humano como máquina energética, da sociedade como motor e a da própria natureza como “energia”, ou seja: com poder de criação e de produção de diferenças qualitativas.

A conversão de energia passou a não representar uma destruição de uma diferença, mas a “criação” de outra. Dessa forma, a Ciência da energia passou a revelar e dissimular ao mesmo tempo, e sob formas tradicionais, o poder da natureza.

Além disso, a preocupação com o rendimento dos motores térmicos fez emergir a concepção de processo irreversível na Física que se constituiu como um ponto de tensão cujas implicações são profundas ainda nos dias atuais.

O motor térmico, após o trabalho de Clausius deixa de ser um dispositivo passivo, pois ele é capaz de “gerar” movimento. Nisso está a origem do novo problema posto pelo cálculo do rendimento: depois de uma mudança de estado produtora do movimento, para que a capacidade do sistema seja restaurada é preciso prever um segundo processo que o conduza ao seu estado inicial: uma segunda mudança de estado que compense a mudança produtora desse movimento. Esse segundo processo é o inverso do primeiro, um resfriamento em que o sistema cede calor ao exterior (SILVA, 2009).

Segundo Prigogine e Stengers (1994)<sup>69</sup>, a interpretação de Clausius levou a uma concepção de natureza como um reservatório inesgotável de energia e, acima de tudo, de energia térmica, mas essa energia não pode ser utilizada sem condições, ou seja, nem todos os processos que conservam

---

<sup>69</sup> Em dois artigos, Massoni (2008) e Novaes (2010), podem ser encontradas mais referências a Ylyia Prigogine. O primeiro traz para o debate epistemológico algumas ideias filosóficas de Prigogine enquanto cientista e um pequeno resumo de suas teorias científicas enquanto filósofo, ressaltando de forma simpática suas ideias, apesar do próprio Prigogine não se considerar um filósofo da Ciência. Já no segundo, o trabalho de Prigogine é avaliado de forma crítica, o que revela que a aceitação de suas ideias não é um consenso na comunidade científica. Acharmos, entretanto, que na área da Termodinâmica suas contribuições são interessantes e fecundas, podendo, nos recortes que foram feitos, dar uma contribuição significativa para uma nova forma de se pensar o ensino de Física.

energia são possíveis. Diferença alguma de energia pode ser criada sem destruição de uma diferença ao menos equivalente.

Entretanto Clausius, inicialmente, da mesma forma que Carnot, não se interessou pelas perdas que acarretam, para todo motor real, um rendimento inferior ao previsto pela teoria. Deste ponto de vista, o estatuto da idealização é o mesmo do das máquinas mecânicas: todos os balanços reais são deficitários, *mas só o ideal interessa à ciência*. Sob esse ponto de vista o aluno deve ser alertado, mostrando que o aspecto do “ideal”, embora importante na elaboração da Termodinâmica por esses dois cientistas, constitui-se como um ponto que também atesta sua deficiência, na medida em que se afasta do mundo real.

A questão tecnológica posta por Carnot e Clausius acaba por proporcionar uma abertura para o tratamento de questões relacionadas às dissipações de energia a outras situações. William Thompson, por exemplo, um venerador da obra de Fourier, enunciou na época, a segunda lei da Termodinâmica saltando da tecnologia dos motores para a cosmologia. A partir daí, do mundo conservativo e eterno correspondente à imagem da máquina simples ideal passou-se à incorporação das consequências da propagação irreversível do calor, em que a energia se conserva, mas a conversão de calor em movimento não pode fazer-se senão à custa de um desperdício irreversível.

As diferenças produtoras de efeitos não cessam de diminuir na natureza. O mundo, de conversão em conversão, esgota suas diferenças e se dirige para o estado final definido por Fourier, o estado de equilíbrio térmico em que não subsiste mais diferença que possa produzir um efeito.

Em 1865, Clausius retomando as discussões sobre seu trabalho utilizou uma nova linguagem centralizada ao redor de um conceito que ele denominou entropia, uma função de estado que exprime a distinção entre os fluxos úteis e os fluxos dissipados, ou seja, aqueles que, em uma inversão de funcionamento da máquina térmica, não poderiam ser reconduzidos à fonte quente.

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)<sup>70</sup>.

Essa equação foi deduzida após muitas críticas a muito dos seus trabalhos, e mostra que o aumento da entropia podia ser compreendido como a evolução de um sistema de estados de menor probabilidade para aqueles de maior probabilidade.

Boa parte dos trabalhos de Boltzmann se refere à aplicação da mecânica newtoniana ao movimento de partículas microscópicas como forma de compreender as propriedades macroscópicas da matéria. A transposição das concepções da Mecânica para a Termodinâmica como tentativa de unificação das duas, embora não seja pioneira, trouxe significativa contribuição para a área.

Boltzmann mostra que a energia calorífica não é a energia ordinária, mas uma energia cinética de agitação desordenada, e que a evolução para a desordem dos movimentos moleculares é que cria a degradação. Assim, a segunda lei da Termodinâmica recebe uma explicação mecânica, ao mesmo tempo em que fica caracterizada a condição de sua validade, a saber, a complexidade da matéria referida à nossa escala. O cálculo das probabilidades realiza sua entrada na Física matemática, pois a desordem só pode provir das leis estatísticas (TATON, 1966).

A demonstração de Clausius de que a energia térmica de um gás correspondia à energia cinética de suas moléculas e a teoria de processos de transporte realizada por Maxwell em gases com o uso da lei de distribuição estatística de velocidades das moléculas não resolvia o problema da segunda lei. Elas não explicavam a evolução temporal irreversível da maioria dos processos naturais, ou seja; a flecha do tempo. A segunda lei era “algo

---

<sup>70</sup>  $k$  (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.

estranho” no caminho da unificação da Mecânica com a Termodinâmica. A solução desse paradoxo, segundo Schrödinger, foi a maior contribuição de Boltzmann para Física: mostrar que o que nos parece impossível é apenas improvável.

Boltzmann nos mostrou que as leis da Física não são violadas se os estilhaços de um copo que se quebrou se juntarem naturalmente. Isso não acontece porque a probabilidade disso ocorrer é infinitamente pequena. Para ele, o conceito de probabilidade é fundamental na descrição da natureza<sup>71</sup>.

Entretanto os trabalhos de Boltzmann, assim como os de Clausius, reforçaram uma visão de natureza como degeneração em direção à morte inevitável da desordem aleatória, de acordo com a segunda lei da Termodinâmica.

Essa visão de sistema natural pessimista e ávida por equilíbrio contrasta com o paradigma, associado a Darwin, da crescente complexidade, especialização e organização de sistemas biológicos. A fenomenologia de muitos sistemas naturais mostra que grande parte do mundo é habitada por estruturas coerentes que não estão em equilíbrio, como células de convecção, reações químicas autocatalíticas (PRIGOGINE, 1996) e a própria vida. Os sistemas vivos evidenciam uma marcha que se afasta da desordem e do equilíbrio em direção a estruturas altamente organizadas, nas quais existe distância do equilíbrio.

Em seu livro *O que é a vida?*, Schrödinger (1994) tenta aproximar os processos fundamentais da Biologia, da Física e da Química. Ele percebeu que a vida compreende dois processos fundamentais: um sendo a ordem originada a partir da ordem e outro a ordem originada a partir da desordem. Baseando-se na ideia da criação de ordem partindo da desordem, Schrödinger tenta relacionar a Biologia com as leis da Termodinâmica. Ele notou que os sistemas vivos parecem desafiar a segunda lei da Termodinâmica, para a qual, em sistemas fechados, a entropia do sistema é maximizada. Os sistemas vivos, entretanto, são a antítese de tal desordem. No caso das plantas, verifica-se uma estrutura altamente organizada, sintetizada a partir de átomos e moléculas desorganizadas presentes na forma de gases atmosféricos.

---

<sup>71</sup> Considerações sobre Mecânica estatística podem ser obtidas em Boltzmann (2006).

Schrödinger resolveu esse problema recorrendo à Termodinâmica do não equilíbrio reconhecendo que os sistemas vivos existem em um mundo de fluxos de energia e matéria. Propôs, então, que o estudo dos sistemas vivos deveria ser visto da perspectiva do não equilíbrio o que reconciliaria a autoorganização biológica e a termodinâmica.

Nas suas colocações sobre sistemas, Prigogine (1993), afirma que, de uma maneira ou de outra, o sistema é fechado, completo, autônomo. Pode, em certos casos, ser alimentado do exterior, mas não deve o seu ser específico a outros que não ele próprio. Comunica, por conseguinte, tanto com a ideia das peças montadas em vista de uma modalidade de funcionamento unitário terminal como de um estado idêntico a si próprio emergente da conspiração das partes.

Entretanto, o mesmo autor afirma que, para além das inúmeras possibilidades criativas de se estabelecer a existência de sistemas, há aqueles que integram saber e manipulação de uma maneira muito íntima. São os de troca e circulação. É o caso do ciclo concebido por Carnot como sede de circulação do calórico e de uma troca entre movimento perdido por este calórico que baixa ou sobe de um nível de temperatura a outro e a energia mecânica produzida ou consumida pelo motor.

Indo na direção do raciocínio de Prigogine é possível ampliar as ideias de Carnot, que isola o sistema de forma a conceber o meio ambiente não como sistema fechado, mas aberto onde também há ocorrência de ciclos. Nele há ciclos do azoto, do carbono, do oxigênio no ecossistema, ciclos fisiológicos que constituem o sistema vivo, a circulação de bens produzidos e consumidos, fluxos financeiros, de informações e decisões etc. Por toda a parte há a pergunta: haverá conservação? A eternidade é garantida pelo funcionamento ou as perdas condenam o sistema à morte? Segundo Prigogine cada ano, em cada colheita, tiramos da natureza matérias indispensáveis e que ela não pode reproduzir por si mesma. Esgotamos o solo. Verifica-se por toda parte a problemática: como canalizar os fluxos, como proceder para que o sistema não seja eliminado pela confusão?

É preciso que se leve para a sala de aula também as considerações de que apesar de a Física clássica ter trabalhado com sistemas fechados e isolados, não estamos diante de artefatos ou objetos naturais dos quais temos

razões teóricas para isolá-los. Mas estamos sim dentro de um mundo interconexo de seres vivos e de suas sociedades, com os problemas do urbanismo, da economia, da linguagem. Portanto, torna-se necessário refletir sobre a seguinte questão: “o que significa um recorte que permite identificar um sistema?”.

A Ciência opera com ideias chamadas conceitos, os quais reúnem uma gama extensa de experiências de modo que não tenhamos que inventar novos nomes para descrever cada experiência individual que encontramos em nossa vida cotidiana. Por exemplo, o físico inventa os conceitos de força e massa para ajudá-lo a descrever de forma eficaz e econômica os fenômenos exibidos pelo movimento dos corpos.

Obviamente se podemos encontrar um único nome que pode representar uma ideia sobre vários elementos de nossa experiência isso pode significar que encontramos algo genuinamente econômico e potente. Isso é o que acontece com a ideia expressa pelo nome energia.

Lindsay (1975), *afirma que nenhum outro conceito traz tão significativa unificação de um conjunto tão grande de nossas experiências*. Podemos dizer que *inúmeros aspectos das experiências humanas podem ser descritos como uma transferência de energia* que se apresenta em determinada forma, de um lugar para outro ou uma transformação de uma forma para outra.

Alguns exemplos desses aspectos<sup>72</sup> são:

- Normalmente se diz que no sistema formado por um corpo cilíndrico e pela Terra no qual o corpo é deslocado para cima por uma pessoa num declive, está havendo transferência de energia de membros e músculos da pessoa para o sistema. Ela está sendo representada pela energia cinética de translação e rotação do corpo bem como pelo aumento da energia potencial gravitacional do sistema, pois o corpo se posiciona em níveis cada vez mais altos em relação ao solo. Essa forma de transferência de energia que procura evitar esforços excessivos por parte da pessoa, como vimos no capítulo 2, era utilizada

---

<sup>72</sup> Alguns dos exemplos apresentados também são apontados por Lindsay (1975).

pelos nossos antepassados. O declive (plano inclinado), é uma máquina simples.

- Quando uma lâmpada elétrica é acesa, geralmente estamos utilizando a energia elétrica produzida em uma usina e em seguida transferida para nossa casa. A luz produzida quando o interruptor é ligado é um exemplo da capacidade da energia de se transformar de uma forma em outra.
- Em uma termelétrica, a energia interna contida em fósseis como carvão, petróleo ou gás é transferida na *forma de calor* para as caldeiras. Lá, o calor produz mudança de fase líquida da água para a de vapor. A energia contida no vapor é transformada, em parte, em energia mecânica na turbina. Essa energia mecânica é em seguida transformada em elétrica no gerador de corrente alternada. Esta última é transferida por cabos elétricos para vários lugares onde pode ser novamente transformada.
- Durante o movimento de um carro movido a gasolina, energia química contida na mistura de vapor e ar desse combustível é transformada, pela ação de uma centelha em calor e em energia mecânica dos pistões nos cilindros. A energia mecânica de movimento dos pistões é transferida aos eixos de acionamento e de lá para as rodas.
- O processo de digestão de comida é bastante complicado, mas o importante aqui são as transformações que ocorrem na energia química armazenada no alimento para manter o corpo aquecido e para possibilitar o movimento de suas diversas partes ou na interação do próprio corpo com outras partes do meio ambiente. Há aí outros tipos de transformações tais como em energia elétrica e em várias energias químicas necessárias para o estabelecimento de comunicações entre as diversas partes do corpo permitindo o funcionamento do sistema nervoso. Inúmeros processos biológicos em todo domínio dos seres vivos pode ser interpretado em termos do conceito de energia.

- Os ventos das tempestades e o furacão são outros exemplos de transformação de calor transferido ao ar em energia mecânica; os movimentos resultantes são também amplificados pelo movimento de rotação da Terra. A energia também desempenha um papel característico nos terremotos. Quando em uma massa de rocha se produz uma falha, energia potencial é transformada em energia cinética resultando em uma redistribuição geográfica dos componentes sólidos da região. Isso ocorre porque a crosta terrestre é em certa medida um meio elástico. Esta energia pode ocasionar grande destruição perto da superfície e da fonte. Ela pode ser detectada a grande distância da fonte por meio de sismógrafos.
- A propagação ondulatória é mais um exemplo importante de transferência de energia como ocorre nas ondas luminosas e sonoras. É caso da transferência de energia que vem do Sol. É esta energia que é responsável pela existência e manutenção da vida na Terra. Qual é a origem de toda essa energia que provém da superfície do Sol a uma taxa de  $4 \cdot 10^{23}$  kW? Este tem sido um problema de longa data para os físicos e astrônomos, e só recentemente foi apresentada uma resposta plausível. A fonte de energia solar não decorre de uma simples transformação de energia química em calor como na queima de carvão, mas é atualmente considerada como uma transformação de massa em energia por meio da formação do núcleo de hélio a partir do hidrogênio, um processo termonuclear, que é a base da bomba de hidrogênio.

No âmbito financeiro, o conceito de energia está relacionado com transmissão e transformação, em que a energia elétrica desempenha um papel-chave devido à relativa facilidade com que é gerada, transmitida e transformada.

Segundo Lindsay (1975) houve uma fria recepção de um grupo de políticos que visitou o laboratório de Michael Faraday quando este lhes respondeu à pergunta sobre qual importância prática poderia ter a sua descoberta da indução eletromagnética: “Algum dia, senhores, vocês colocarão



imposto nisto”. A história pode muito bem ser apócrifa. Mas, caso ele tenha feito essa afirmação, tinha absoluta certeza do que aconteceria no futuro.

Com a industrialização, a energia foi considerada algo, para além das formas materiais e objetos a que é aplicada. Ela passou a ser vista como muito parecida com o dinheiro em circulação, independentemente dos objetos que se usou para fazer a troca.

Nas regiões desenvolvidas do mundo crescemos tão acostumados a ter algo interessante sempre que acionamos um botão ou pressionamos o acelerador de um carro, que nos esquecemos de que estes acontecimentos decorrem de transferência e transformação de energia. Pessoas em geral estão atualmente mais conscientes do papel da energia na vida humana por causa dos avisos frequentes na mídia de que a nossa taxa de transformação de energia está rapidamente se tornando grande demais para os recursos que existem à nossa disposição.

A tecnologia moderna está constantemente inventando novas formas de transferência e transformação de energia para atender às reais ou supérfluas necessidades humanas. Isso significa extração mais rápida de combustíveis fósseis e construção em ritmo acelerado de novas usinas de energia que não só levarão ao esgotamento dos combustíveis como aumentarão a interferência no meio ambiente, resultando no que denominamos de “poluição”. Além disso, a população crescente do mundo coloca outra pressão sobre as fontes de energia, pois os povos têm de se alimentar para sobreviver, e o consumo de alimentos é mais um exemplo de transformação de energia.

Um problema essencial que os seres humanos enfrentam atualmente é encontrar novas fontes de transformação de energia que sejam capazes de possibilitar uma existência digna para todos sem produzir poluições deletérias para a própria vida. Costuma-se referir-se a isso como o problema do suprimento de energia.

Pensamos, entretanto, que, para além das considerações feitas sobre energia, cujo apoio em Lindsay (1975) foi muito fecundo, temas como suas transferências e transformações, sua importância em nossas vidas, bem como as coisas terríveis que podem acontecer se suas fontes falharem, algumas perguntas feitas por Lindsay (1975) foram também essenciais no nosso trabalho: o que é essa coisa de que estamos falando? Qual o seu significado e

como ela pode ser medida? É como água, cujo volume pode ser medido em litros? É movimento? É um número?

Sabemos que a energia elétrica utilizada para diversos fins na sociedade é cobrada por uma empresa responsável por seu fornecimento. Mas, é importante saber que há uma longa história por trás disso. Procuramos descrever, no decorrer deste trabalho, aspectos contidos nos trabalhos de Carnot e Clausius que consideramos interessantes e significativos para estruturar o nosso caminho na busca da resposta para o nosso problema de pesquisa. Nisso não houve nenhuma pretensão de esgotar o assunto, mesmo porque não se trata de um trabalho sobre a História da Ciência. Tentamos apenas descrever alguns detalhes científicos desta história. Espera-se que um melhor conhecimento sobre ciência da energia possibilite uma melhor apreciação do que realmente significa a energia para nós, seres humanos.

Outro motivo para a escolha da abordagem da Termodinâmica foi, como já foi dito, dar continuidade ao trabalho iniciado na nossa dissertação de mestrado. As concepções dos estudantes, as de Carnot e Clausius relativas às leis da Termodinâmica foram analisadas com o apoio das epistemologias de Kuhn e Bachelard acrescidas de ideias de Gagliard, Astolfi e Morin, com vistas à abordagem de conteúdos de ensino.

O trabalho de Gagliard nos ajudou a apostar na busca dos estruturantes ao compreender que eles são construtos que devem ser elaborados pelos estudantes e que podem ser entendidos como um conjunto de mudanças que o meio provoca na estrutura cognitiva do sujeito e vice-versa. Nesse sentido estamos considerando que o sujeito biológico é sempre fonte de resposta para o meio no qual se insere.

A estrutura cognitiva do sujeito, quando influenciada pelo meio, pode se transformar. Ao se transformar, responde podendo também provocar mudanças sobre o meio. Ou seja, ao replicar, o influenciado dá sempre a sua interpretação de como percebeu a influência provocada pelo meio. Estabelece-se dessa forma um diálogo, uma transação, sempre recorrente enquanto permanecer o acoplamento estrutural.

Entretanto, é necessário que se diga que a construção dessas estruturas não deve ser vista em termos de previsibilidade. A simples observação do estágio atual do pensamento do estudante e o imediato confronto com ideias

científicas, apesar de necessários, podem não se constituir como elementos suficientes para afirmar que ele atingirá um estágio subsequente em que seria possível afastar o obstáculo que o impede de compreender um pensamento mais “refinado”. Sob esse ponto de vista é que o planejamento do professor deve ser visto como estratégia, pois poderá sofrer modificações ao longo do processo e que algumas vezes sua intervenção é necessária para esclarecer pontos obscuros e acrescentar informações que podem ser importantes para construção dos novos estruturantes.

Ainda há outro motivo que está por trás dos já mencionados. O do fascínio produzido pelas fogueiras das noites de São João há décadas, numa cidade do recôncavo baiano. Por que o fogo transforma as coisas? Por que permite aos corpos entrarem em reação química, se dissolverem, se dilatarem se fundirem ou se evaporarem e, evidentemente, permite ao combustível queimar com grandes desprendimentos de calor e de chamas? De tudo isso que todos sabem e sabiam, vimos que o século XIX vai selecionar isto: a combustão liberta calor, e o calor pode provocar uma variação de volume, quer dizer, pode produzir um efeito mecânico. O fogo é capaz de fazer girar as máquinas de um gênero novo, as máquinas térmicas que, nessa época fazem surgir a sociedade industrial.

A análise feita tanto das respostas dos estudantes como dos cientistas nos revelou algo muito substancial: a “coisa ou o conceito” precede sua nomeação. Isso encorajou o nosso propósito de que não é o nome que importa, mas sim, o conceito. Qual o caminho traçado pelos cientistas que leva à palavra energia? E qual o que leva à entropia? Como levar isso para a sala de aula de forma a permitir a compreensão, pelos estudantes das visões dos cientistas sobre as mesmas entidades? Um caminho possível é a elaboração de sequências de ensino que se iniciam com a utilização das ideias alternativas, como as dos cientistas, seguida da utilização de textos científicos como mostrados no trabalho de Nascimento (2003) e posteriormente a inserção de elementos que levem à compreensão da Matemática nos domínios da Física, como mostrado em Carmo (2006).

As analogias de Carnot, as equivalências e transformações de Clausius, nos parecem razões suficientes para apostar num ensino que produza compreensões transformadoras nos estudantes!

A abordagem das leis da Física, por seus aspectos de generalidade, requer um processo de ensino-aprendizagem que leve o aluno a compreender que a elaboração de novas suposições científicas é uma tarefa difícil, porém possível. Em geral se parte da ideia de que “as descobertas” dos alunos só serão possíveis em condições de “ciência madura”. Esta deve resultar de condições efetivas que permitam a ocorrência de uma aprendizagem significativa, em que os novos conhecimentos se formem com base em uma relação com outros que se formaram antes ou que vão se formando quase simultaneamente, levando à compreensão da diferença entre o conhecimento novo e o anterior. É por esta razão que os professores devem tomar conhecimento do raciocínio dos estudantes.

Segundo Coll (1990), a atividade construtivista do aluno realiza-se sobre conteúdos já bastante elaborados e difundidos. O aluno reconstrói na escola conhecimentos que já foram construídos antes. O professor deve estar engajado nesse processo para que ele não seja aleatório, mas aquele aceito pela atual comunidade científica e cultural. Ele deixa de ser o transmissor de conhecimento para assumir o papel de um guia comprometido com um caminho (SILVA, 2009).

Contudo é preciso que o professor tenha em conta que analogias, substancialismo, sistema, processo, transformação e matematização podem ser ao mesmo tempo estruturantes bons e maus, indispensáveis e prejudiciais. É preciso usá-los enquanto são bons e desembaraçar-se deles quando se tornarem prejudiciais. O processo de ensino aprendizagem precisa ser constantemente psicanalisado para ser coerente com os posicionamentos de Bachelard.

Achamos importante salientar que a utilização de analogias merece algumas considerações que se apoiam em algumas críticas a elas feitas por Bachelard que, apesar de considerá-las um *poderoso instrumento de ensino*, alerta para a necessidade de produzir discussões sobre os perigos de seu emprego indiscriminado que possam levá-las a considerá-las como cópias fiéis da realidade, caso em que se impossibilita a *compreensão* do que se pretende ensinar, reforçando-se os obstáculos epistemológicos e pedagógicos (SANTOS, 1991).

A linguagem analógica é uma forma de raciocínio inerente ao ser humano. Tanto na Ciência quanto na educação, pode ser tomada como uma ferramenta útil no processo de explicação dos conceitos científicos. E o trabalho de Carnot é um exemplo disso. Colocamo-nos assim ao lado de vários autores que, nas últimas décadas, têm tomado a linguagem analógica como uma forma legítima de pensamento, que auxilia no processo de aprendizagem do conhecimento científico por aproximar, como já dissemos, os conceitos considerados teóricos e abstratos das ciências a análogos mais familiares e melhor compreendidos pelos alunos.

Entretanto, enfatizamos que é importante o alerta de Bachelard sobre o perigo do mal uso de analogias, quando são tomadas como cópias fiéis da realidade e se transformam em esquemas gerais que permanecem, em vez de assumirem um papel transitório. Como vimos nesse trabalho, a analogia mecânica que guia a pesquisa de Carnot deixa a natureza do calor envolta em certa imprecisão devido sua interpretação baseada na hipótese do fluido calórico. Entretanto ela permite a seu autor afirmar um princípio que atravessará discussões a esse respeito: a de que o trabalho realizado pela máquina por ele descrita é independente dos agentes postos para seu funcionamento, dependendo da quantidade de calor fornecido e das temperaturas das fontes. A discussão, em educação, das analogias requer a necessidade de uma adequação pelo professor, no sentido de que seja evitada sua utilização de forma irrefletida.

Retomando as nossas preocupações sobre a questão do vínculo entre teoria e realidade, não podemos deixar de enfatizar que a conquista da realidade passa por uma conquista conceitual, começando, o que parece paradoxal, por idealizações. Para isso, segundo Bunge (2008), os pesquisadores extraem os traços comuns de objetos ostensivamente diferentes agrupando-os em espécies, atribuindo-lhes propriedades suscetíveis de ser tratadas por teorias. E essas propriedades não são sensíveis. Evidentemente que esse processo leva ao risco de inventar quimeras. Mas não há outro meio porque a maioria das coisas e das propriedades ocultam-se aos nossos sentidos.

Desde Aristóteles observa-se que não há Ciência a não ser do geral. E isso nos foi revelado ao analisar os trabalhos de Carnot e Clausius. A formação

dos conceitos e leis em Ciência começa por simplificações, mas sua sucessão histórica é um progresso de complexidade. Para que o “real” seja apreendido é preciso afastar-se “das primeiras impressões”, para em seguida adicionarem-se elementos hipotéticos (ou imaginários), mas com uma intencionalidade que vise um enxerto em uma teoria suscetível de ser confrontada com os fatos.

Com relação a sistemas, vimos que Carnot construiu um modelo tipo caixa negra que se constitui numa representação que descreve seu comportamento sem nada revelar sobre as transformações internas sofridas pelo sistema real, mas que satisfazia parcialmente certas necessidades de ordem teórica.

A pesquisa desenvolvida por Clausius levou-o a introduzir outras variáveis que tornou a teoria mais ajustada aos fatos revelados pelas experiências relativas à natureza do calor. Sua construção veio acompanhada de certos traços que podem ser representados, às vezes, graficamente, e de formalismos abstratos que culminaram com as formulações matemáticas das leis da Termodinâmica e do conceito de entropia.

Finalmente, voltamos a enfatizar que o nosso trabalho apresenta subsídios pretendendo estimular o fomento de atividades a ser levadas para a sala de aula, não devendo ser confundido com receitas. Acreditamos que a receita deforma a investigação ao reforçar o emprego do empírico. A atuação do professor não deve se pautar no exagero do peso do que ele deverá reproduzir em sala de aula: pode-se sugerir a aplicação de um corpo de conhecimentos à solução de um problema prático, mas não se pode dizer que o bom resultado obtido na aplicação de uma estratégia possa ser o mesmo em outra escola e em outra sala de aula. Se assim fosse, todas as questões relativas à criatividade, ao inesperado, ao social e ao individual apontadas anteriormente, estariam comprometidas.

### **Considerações finais**

Na abertura da tese de Mariana de Jesus Pedreira Valente (1999) há a reprodução de uma fotografia de uma instalação da bienal de Veneza de 1995, do artista plástico Martin Honert, a qual extraímos para abertura desse capítulo por evocar aspectos que apresentam ressonâncias com todo o conteúdo do

nosso trabalho e também uma pista para o fecharmos, pois o nosso objetivo e esperança é que os subsídios nele contidos realmente cheguem ao seu destino: a sala de aula.

Valente conta que ao se deparar com aquela representação artística, não lhe restou dúvida de como deveria ser a sala de aula: um lugar onde se deveria voar em busca da criação, do espanto, da curiosidade, do calor e da camaradagem em que o passado e o futuro do conhecimento pudessem ser discutidos de forma prazerosa. Para ela, diferentemente de um ensino transmissivo, o contato com as ideias não deve ser seco e frio. Ou, para Vygotsky (1982): "Seria absurdo acreditar na permanência de qualquer ideia que é transferida em estado meramente intelectual em toda a sua secura e frieza".

Em nós, a fotografia dessa representação artística evocou intensamente o espaço de discussão onde muitas vezes as sementes deste trabalho eram levadas para ser apresentadas a colegas da pós-graduação e à Jesuína Pacca, nossa orientadora.

A fotografia se constitui como uma metáfora do voo que ocorria nas tardes de terça-feira, onde nosso grupo se reunia em uma das salas do edifício Basílio Jafet do Instituto de Física da USP.

Essa representação artística se configura como um pouso necessário para nosso grupo. A partir dele efetuávamos uma evasão da vida real (entendida como vida prática, cotidiana). Ali, buscávamos, por meio de trocas de experiências, discussões, leituras de textos e apresentações de fragmentos de trabalhos, a coleta de elementos que possibilitassem a elaboração de trabalhos maiores e mais consistentes que se consubstanciassem em reais contribuições para a melhoria do ensino e aprendizagem de ciências.

Trabalhávamos pedindo ao pensamento a dissipação das brumas e das trevas que, como já dissemos no início desse trabalho, para Morin representa uma situação "complexa", as "situações primeiras". Efetuávamos uma busca da "clareza", das "estruturas" de algo que sistematiza e revela o que a "desordem" ou o "caos" nos esconde.

Naquela sala, a busca da clareza revelava também (que contradição!!!) a necessidade de um mergulho que encontramos tão bem representado na fotografia de um trabalho de David Hockney mostrada a seguir:



*David-hockney-a-bigger-splash. 1967. Web Museum, Paris*

A metáfora do mergulho presente no trabalho de Hockney nos remete a Moraes e Galiazzi (1996) quando afirmam que a análise textual discursiva é uma espécie de mergulho que possibilita a criação de espaços de reconstrução, envolvendo-se nisto diversificados elementos, especialmente a compreensão da produção de significados sobre os fenômenos investigados.

Outro aspecto que vale a pena salientar se refere à atuação da Jesuína, nas reuniões do grupo, que, algumas vezes, relacionava o trabalho artístico com o da investigação no ensino: numa de suas viagens pela Europa para apresentar trabalhos em congressos, ao passar por Florença, na Itália e visitar a Galleria Dela'accademia, adquiriu cartões dos trabalhos "inacabados" de Michelangelo e presenteou-nos com eles no seu retorno à sala do Basílio Jafet, onde sempre relatava as novidades colhidas em congressos de que participava. A fotografia de um desses cartões é apresentada na abertura desse trabalho. Para Michelangelo seriam mesmo essas esculturas inacabadas? Ou uma forma de comunicar a origem e natureza do conhecimento?

A fotografia da escultura "inacabada" evoca em nós semelhanças com o trabalho de Jesuína, ao procurar fazer emergir a figura de seus orientandos,



ajudando-os a remover os aspectos exteriores que os ocultavam, levando-os, através dos referenciais que lhes apresentava e respeitando a individualidade de cada um, a emergirem como investigadores capazes de conduzir suas ações de forma consequente e responsável.

Esta pesquisa, como já foi dito, de cunho qualitativo e teórico, como resultado de voos, mergulhos e remoção de elementos irrelevantes que desvirtuariam seu resultado final, permitiu que chegássemos às conclusões e implicações para o ensino que apontamos anteriormente. Os subsídios aqui oferecidos nos parecem poder contribuir na elaboração de estratégias capazes de fazer emergir os vínculos que permitirão a diminuição da distância entre a concepção de realidade do senso comum e dos cientistas. Entretanto, voltamos a lembrar, atuar para possibilitar a compreensão de como a ciência funciona e da importância de se refletir sobre seus conceitos, não deve ser feita impondo a supremacia de um conhecimento sobre outro. E sobre isso mais uma vez insistimos: a escolha de que ponto de vista assumir deve ser do estudante. Longe do dogma, estaremos contribuindo na construção de uma sociedade, como já dissemos, mais justa, solidária e tolerante.

## Notas

[1] ...se puede comparar con bastante exactitud la potencia motriz del calor con la de una caída de agua; ambas tienen un máximo que no puede sobrepasarse, cualquiera que sea la máquina empleada para recibir la acción del agua, y cualquiera que sea la sustancia empleada para recibir su acción. La potencia motriz de una caída de agua depende de su altura y de la cantidad de líquido. La potencia motriz del calor depende de la cantidad de calórico empleado y de lo que se podría denominar, y efectivamente nosotros lo llamaremos así, la altura de su caída, la diferencia de temperatura de los cuerpos en los que se realiza el cambio de calórico. (CARNOT, 1987 p. 49. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez <sup>73</sup> )

[2] ...su paso de un cuerpo cuya temperatura es más o menos elevada, a otro cuya temperatura es más baja. Em efecto, ¿qué ocurre em uma máquina de vapor cuando está em actividad? El calórico, desarrollado em el fogón, atraviesa las paredes de la caldera, da lugar a la formación de vapor, al que de alguna manera se incorpora. El vapor arrastrándolo consigo, lo lleva primero al cilindro, donde cumple una función determinada, y después lo transporta al condensador, donde se licua por el contacto com el agua fría que allí se encuentra. En último extremo el agua fría del condensador se apodera del calórico desarrollado em la combustión. Se calienta por medio del vapor, como si hubiese estado situada directamente em el fogón. Aquí el vapor no es sino um medio para transportar el calórico; (CARNOT, 1987 p. 40. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[3] Puesto que todo restablecimiento de equilibrio puede ser causa de producción de potencia motriz, todo restablecimiento

---

<sup>73</sup> Utilizamos, em todos citações diretas do Carnot a tradução desse autor devido a uma aproximação maior com a nossa língua.

de equilibrio que se haga sin producción de esta potencia deberá considerarse como pérdida: ahora bien, a poco que se reflexione sobre esto, se advertirá que todo cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen en los cuerpos, no puede ser sino un restablecimiento inútil de equilibrio en el calórico; la condición necesaria del máximo es por tanto *que no se realice en los cuerpos empleados para realizar la potencia motriz del calor ningún cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen*. Recíprocamente, todas las veces que se cumpla esta condición se logrará el máximo. (CARNOT, 1987 p. 46-47. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[4] En las operaciones que hemos descrito se reconoce fácilmente el restablecimiento del equilibrio en el calórico, su paso de un cuerpo más o menos caliente a un cuerpo más frío. Aquí el primero de esos es el aire recalentado en el fogón, el segundo es el agua de condensación. El restablecimiento de equilibrio en el calórico se realiza en ellos, si no completamente, al menos en parte; ... Así pues la producción de la potencia motriz en la máquina de vapor se debe no a un consumo real del calórico, *sino a su transporte de un cuerpo caliente a un cuerpo frío*, es decir al restablecimiento de su equilibrio, ... Pronto veremos que este principio es aplicable a cualquier máquina que sea puesta en movimiento por medio del calor. (CARNOT, 1987 p. 40-41. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[5] Todas las operaciones descritas más arriba pueden realizar-se en un sentido y en un orden inverso. Imaginemos que después del sexto período, es decir, habiendo llegado el émbolo a la posición *ef*, se le hace volver a la posición *ik*, y que al mismo tiempo se mantiene el aire en contacto con el cuerpo A: el calórico proporcionado por esse cuerpo durante el sexto período volverá a su fuente, es decir, al cuerpo A, y las cosas

se encontrarán en el estado donde estaban al final del quinto período. Si ahora se separa el cuerpo A, y se lleva el émbolo de *ef* a *cd*, la temperatura del aire decrecerá tantos grados como se haya aumentado durante el quinto período, y será la del cuerpo B. Evidentemente se puede continuar una serie de operaciones inversas de las que hemos descrito primeramente: basta situar-se en las mismas circunstancias y realizar para cada período un movimiento de dilatación en lugar de uno de compresión y recíprocamente. (CARNOT, 1987 p. 53-54. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[6] Nadie ignora que el calor puede ser la causa del movimiento, que incluso posee una gran potencia motriz: las máquinas de vapor, hoy tan difundidas, son una prueba elocuente ... Deben atribuir-se al calor las grandes transformaciones que llaman nuestra atención en la superficie de la tierra; a él se deben las agitaciones atmosféricas, la ascensión de las nubes, la caída de las lluvias ... las corrientes de agua ... los temblores de tierra, las erupciones volcánicas ... (CARNOT, 1987 p. 35. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[7] Para considerar en toda su generalidad el principio de la producción de movimiento por medio del calor, es necesario concebirlo independientemente de todo mecanismo, de todo agente particular; es necesario establecer razonamientos aplicables, no sólo a las máquinas de vapor, sino a cualquier máquina de fuego imaginable, cualquiera que sea la sustancia que se utilice, y cualquiera que sea la manera que se actúe sobre ella. (CARNOT, 1987 p. 39. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[8] El estudio de tales máquinas es de un interés extraordinario, su importancia es inmensa, su empleo aumenta

cada día. Parecen destinadas a producir una gran revolución em el mundo civilizado. Ya la máquina de fuego explora nuestras minas, hace mover-se nuestros navíos, draga nuestros puertos y riberas, forja el hierro, tala los montes, muele el grano, hila y urde nuestros tejidos, transporta los fardos más pesados, etc. (CARNOT, 1987 p. 36. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[9] ...algunas traducciones de notas de Watt, hechas por Carnot, donde se manifiestan los problemas que llevaron al primero a considerar la conveniencia de separar las fuentes térmicas en una máquina de vapor. Carnot vio en esse proceso una generalidad que probablemente escapó al inglés, y que fue el ponto de partida de su análisis. (CARNOT, 1987 p. 20. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[10] En la caída de agua, la potencia motriz es rigurosamente proporcional a la diferencia de nivel entre el depósito superior y el inferior. En la caída de calórico la potencia motriz aumenta indudablemente con la diferencia de temperatura entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío; pero ignoramos si es proporcional a esa diferencia. Ignoramos, por exemplo, si la caída de calórico de  $100^{\circ}$  proporciona más o menos potencia motriz que la caída del mismo calórico de  $50^{\circ}$  a  $0^{\circ}$ . Es una cuestión que nos proponemos a examinar más adelante. (CARNOT, 1987 p. 49. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[11] Esas cantidades desiguales de calor producirán sin embargo, como hemos visto, cantidades iguales de potencia motriz para caídas de calórico iguales, tomadas a diferentes alturas en la escala termométrica, de donde se puede sacar la siguiente conclusión:

*La caída de calórico produce más potencia motriz en los grados inferiores que en los superiores.* (CARNOT, 1987 p. 75. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[12] *cuando un gas aumenta su volumen en progresión geométrica, su calor específico crece en progresión aritmética.* (CARNOT, 1987 p. 67. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[13] ...seria no sólo el movimiento perpetuo, sino una creación indefinida de fuerza motriz sin consumo de calórico, ni de cualquier otro agente. Una creación semejante es totalmente contraria a las ideas recibidas hasta el presente, a las leyes de la mecánica y a la sana física; es inadmissible. (CARNOT, 1987 p. 45-46. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[14] Nous prendrons donc, comme point de départ de notre analyse, l'hypothèse que la chaleur consiste dans un mouvement des plus petites particules des corps et de l'éther, et que la quantité de chaleur est la mesure de la force vive de ce mouvement. Toutefois, nous ne ferons aucune supposition particulière sur la nature de ce mouvement; nous nous bornerons à appliquer à la chaleur le théorème de l'équivalence de la force vive et du travail, qui est vrai quelle que soit la nature du mouvement; et nous prendrons le théorème qui résultera de cette application, pour premier principe de la théorie mécanique de la chaleur.(CLAUSIUS, 1888, p.28. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[15] L'opinion la plus généralement répandue, autrefois, sur la nature de la chaleur, consiste à regarder celle-ci comme une substance particulière, qui se trouve dans le corps en quantité plus ou moins grande, et qui détermine par cela même leur

température plus ou moins élevée; cette substance est aussi émise par les corps, et parcourt alors l'espace vide, ou bien des espaces qui renferment des masses pondérables, avec une vitesse très grande, ce qui constitue la chaleur rayonnante. Mais, dans le temps modernes, une autre opinion s'est faite jour: c'est que la chaleur est un mouvement. Dans cette manière de voir, la chaleur qui se trouve dans les corps, et qui détermine leur température, est considérée comme un mouvement des atomes pondérables, mouvement auquel l'éther renfermé dans le corps peut aussi prendre part; et la chaleur rayonnante est considérée comme un mouvement vibratoire de l'éther. (CLAUSIUS, 1888, p.27-28. Segunda edição da tradução para o francês dos originaux em alemão e revisada por Clausius)

[16] Je ne veux pas analyser ici les faits, les expériences, et les conclusions qui ont conduit à cette nouvelle manière de voir, parce que je devrais entrer dans certains détails qui trouveront mieux leur place dans le corps de l'ouvrage. Je pense que l'accord des résultats déduits de la nouvelle théorie, avec l'expérience, sera la meilleure confirmation des principes de cette théorie. (CLAUSIUS, 1888, p.28. Segunda edição da tradução para o francês dos originaux em alemão e revisada por Clausius)

[17] En envisageant la chose de cette manière, nous pouvons énoncer le résultat d'un cycle fermé simple en disant: *qu'il s'est opéré deux transformations, une transformation de chaleur en travail (ou vice-versa), et une transformation de chaleur à une température plus haute en chaleur à une température plus basse (ou vice-versa)*; c'est le rapport entre ces deux transformations qu'il s'agit d'exprimer au moyen du second principe fondamental. (CLAUSIUS, 1888, p.119. Segunda edição da tradução para o francês dos originaux em alemão e revisada por Clausius)

[18] Afin de pouvoir déduire et démontrer le second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur, nous commencerons par poursuivre, dans toutes ses parties, un cycle fermé d'une nature particulière, et par le représenter graphiquement...

...supposerons que l'état du corps variable est déterminé par son volume  $v$  et sa pression  $p$ , et nous emploierons un système de coordonnées rectangulaires planes, dont l'abscisse représente le volume, et l'ordonnée, la pression. Alors chaque point du plan correspond à un certain état du corps...En outre, toute modification du corps est représentée par une ligne dont le point initial et le point final déterminent l'état final du corps, et dont la marche indique de quelle manière la pression varie avec volume. (CLAUSIUS, 1888, p.90. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[19] Mais cette manière de voir est en contradiction avec les idées actuelles. Nous admettons, en effet, que la production de travail exige une consommation correspondante de chaleur et que, par suite, la quantité de chaleur cédée au dehors, pendant le cours du cycle fermé, doit être moindre que la quantité de chaleur reçue. Si donc la production de travail consomme de la chaleur, il ne peut pas être question de dire que le travail soit produit de rien, peu importe qu'à côté de la consommation de chaleur il y ait en même temps ou non transmission d'une certaine quantité de chaleur d'un corps plus chaud à un corps plus froid. La proposition énoncée par Carnot n'avait pas seulement besoin d'être modifiée, mais il s'agissait en outre de l'établir sur une base autre que celle qu'il avait donnée à sa proposition. (CLAUSIUS, 1888, p.101. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[20] *Dans tous les cas où du travail est produit par la chaleur, il se consomme une quantité de chaleur*



*proportionnelle au travail produit, et réciproquement, la consommation de ce même travail peut produire la même quantité de chaleur.* (CLAUSIUS, 1888, p. 230. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[21] Tandis que le théorème de mécanique exprime que la variation de force vive et le travail correspondant sont *éguax* entre eux, il n'est question que le *proportionnalité* dans celui qui exprime la relation entre la chaleur et le travail. (CLAUSIUS, 1888, p.31. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[22] ...mais notre proposition signifie que, simultanément avec cette transmission de chaleur d'un corps plus froid à un corps plus chaud, il doit y avoir ou une transmission inverse de chaleur d'un corps plus chaud à un corps plus froid... Cette transmission simultannée de chaleur en sens opposé ou la modification qui a pour conséquence une transmission en sens opposé, doit être regardée comme une *compensation* de la transmission. (CLAUSIUS, 1888, p. 102-103. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[23] *La chaleur ne peut pas passer d'elle-même d'un corps plus froid à un corps plus chaud* (CLAUSIUS, 1888, p.102. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[24] *Une transmission de chaleur d'un corps plus froid à un corps plus chaud ne peut pas avoir lieu sans compensation.* (CLAUSIUS, 1888, p. 103. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[25] Le second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur pourra, d'après ce que nous venons de voir,

s'enoncer sous la forme suivante, forme sus laquelle lui conviendrait assez bien, je pense, le nom de *principe de léquivalence des transformations*:

*Si l'on nomme équivalentes deux transformations qui peuvent se remplace mutuellement sans exiger aucune autre modification restante, la production, au moyen de travail, de la quantité de chaleur Q, à la temperature T, a la valeur d'équivalence*

$$\frac{Q}{f}$$

*Et le passage de la quantité de chaleur Q, de la température T<sub>1</sub> à la température T<sub>2</sub>, a la valeur d'quivalence*

$$Q\left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1}\right)$$

*Où f est une fonction de la temperature, indépendante de la nature du cycle au moyen duquel s'opère la transformation.* (CLAUSIUS, 1888, p. 131. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[26] ...on doit examiner de plus près les phénomènes au moyen desquels la chaleur peut produire du travail. Ces phénomènes peuvent toujours se réduire à ce que la chaleur modifie d'une certaine manière l'arrangement des parties constituantes d'un corps. Ainsi, par exemple, au moyen de la chaleur les corps se dilatent, leurs molécules sont écartées les unes des autres; il faut donc qu'elle vainque d'un côté la cohésion des molécules, d'un autre côté les forces extérieures qui peuvent exister. (CLAUSIUS, 1868, p. 257. Edição traduzida para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

... nous représenterons le degré de division du corps par une nouvelle quantité que nous nommerons la *disgrégation* du corps, et au moyen de laquelle nous pouvons définir l'action de la chaleur em disant simplement *qu'elle tend à augmenter la disgrégation.* (CLAUSIUS, 1868, p. 258. Edição traduzida para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[27] El hierro y el fuego son, como se sabe, los alimentos, los soportes de las artes mecánicas. Puede ser que no exista en Inglaterra un solo establecimiento industrial cuya existencia no se funde en el uso de esos agentes y que no se los utilice con profusión. Despojar hoy a Inglaterra de su máquina de vapor, sería arrebatárle a la vez la hulla y el hierro; sería acabar con sus fuentes de riqueza, arruinar todos sus medios de prosperidade; sería anular su potencia colossal. La destrucción de su marina, que considera su más firme apoyo, tal vez le sería menos funesta. (CARNOT, 1987 p. 37. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[28] En estas diversas operaciones el êmbolo experimenta un esfuerzo más o menos grande del lado del aire encerrado en el cilindro; la fuerza elástica de ese aire varía, tanto por los cambios de volumen como por los de temperatura; pero se debe hacer notar que a igual volumen, es decir para posiciones semejantes del êmbolo, la temperatura es más elevada durante los movimientos de dilatación que durante los de compresión....Así, se obtendrá un excedente de potencia motriz, del que se podrá disponer para um uso cualquiera. El aire nos há servido de máquina de fuego; lo hemos empleado de la forma más ventajosa posible porque no se há hecho ningún restablecimiento inútil em el aquilíbrio del calórico. (CARNOT, 1987 p. 53. Tradução para o espanhol do original em francês feito por Javier Odon Ordoñez)

[29] Ces quantités de travail se lisent immédiatement sur la figure que nous reproduisons ici. Le travail effectué pendant la dilatation  $ab$  est représenté par le quadrilatère  $eabf$ , et, dans la dilatation  $bc$ , par le quadrilatère  $fbcg$ . Le travail, consommé pendant la compression  $cd$ , est représenté par le quadrilatère  $hdae$ . Ces dernières quantités de travail sont moindres que les deux premières, à cause de la température plus basse à laquelle s'effectuaient les compressions, et de la pression plus

faible qui en résultait; et, si nous les retranchons de ces premières, il y aura un excédent de travail extérieur effectué, qui est représenté par le quadrilatère *abcd*, et que nous appellerons *W*. (CLAUSIUS, 1888, p. 93. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

[30] La fonction *U*, que j'ai introduite à cette occasion dans la théorie de la chaleur, a été également adoptée par d'autres auteurs qui ont écrit sur cette théorie; ... Thomson a nommé cette fonction *the mechanical energy of a body in a given state*, ... celui d'*energy* employé par Thomson me paraît très bien convenir, puisque la quantité dont il s'agit correspond tout à fait à celle qui porte le même nom en mécanique. Je me suis donc rallié à cette dénomination, et j'appellerai, par la suite, la quantité *U*, *energie* du corps. (CLAUSIUS, 1888, p. 42-43. Segunda edição da tradução para o francês dos originais em alemão e revisada por Clausius)

## Bibliografia

- ALLCHIN, D. Pseudohistory and Pseudoscience. **Science & Education**, 13, PP. 179–195, 2004.
- ALOMÁ, E.; MALAVER, M. Análisis de Los Conceptos de Energia, Calor, Trabajo, y el Teorema de Carnot en Textos universitarios de Termodinámica. **Enseñanza de Las Ciências**, 25(3): 387-400, 2007.
- AGUIAR Jr, O.; FILOCRE, J. O planejamento do ensino a partir de um modelo para mudanças cognitivas: um exemplo na física térmica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. Florianópolis, V. 19, n.3, pp. 314-340, 1992.
- AGUIAR Jr, O. **Modelo de ensino para mudanças cognitivas: um instrumento para o planejamento de ensino e a avaliação da aprendizagem em ciências**. Tese apresentada na UFMG para obtenção do grau de doutor em educação m ciências e matemática. Belo Horizonte, 2001.
- \_\_\_\_\_. Calor e temperatura no ensino fundamental: o ensino e a aprendizagem numa perspectiva construtivista. **Investigação em ensino de ciências**, v. 4, n. 1, pp. 73-90, 1999.
- \_\_\_\_\_. Planejar o ensino considerando a perspectiva da aprendizagem: uma análise de abordagens didáticas na introdução à física térmica. **Cad.Bras.Ens.Fís**, v.19, n.2: pp.219-241, ago. 2002.
- ALBERT, E. Development of the concept f heat in children. **Science Education**, 62(3), pp. 389-399, 1978.
- ASTOLFI, J. P. **El “Error”, um médio para ensinar** – Colección Investigacion y Enseñanza. Espanha. Diada, 1999.
- \_\_\_\_\_. Reencontrar o sentido e o sabor dos saberes escolares. **Ensaio. Pesquisa em educação em ciências**, v13, n.02, 2011.
- 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.

- BACHELARD, G. **Formação do espírito científico**. Contraponto. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **A filosofia do não**. Abril cultural: coleção os pensadores. São Paulo, 1974.
- \_\_\_\_\_. **O novo espírito científico**. Abril cultural: coleção os pensadores. São Paulo, 1974.
- BACHELARD, G. **A poética do espaço**. Abril cultural: coleção os pensadores. São Paulo, 1974.
- \_\_\_\_\_. **A epistemologia**. Edições 70. Lisboa 1971, 2002.
- \_\_\_\_\_. **A dialética da duração**. Editora Ática. São Paulo, 1994.
- BACON, F. - **Os pensadores**. São Paulo: Abril Cultural, 1984.
- BECHER, J. J. **Physica Subterrânea**. Lipsiae. Ex officina Weidmanniana, 1669.
- BERGSON, H. **Introdução à metafísica**. Abril cultural: coleção os pensadores. São Paulo, 1974.
- \_\_\_\_\_. **A evolução criadora**. Editora Unesp. São Paulo, 2009.
- BOGDAM, R.; BIKLEN, S. K. **Investigação Qualitativa em Educação**. Porto Editora. Portugal, 1994.
- BOLTZMANN, L. Acerca da mecânica estatística. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, pp. 259 – 266. 2006.
- BRITO, A. A. S. “Flogístico”, “Calórico” e “Éter”. **Ciência e tecnologia dos materiais**. Vol 20, n. 3/4, Instituto de Ciência e Engenharia dos Materiais. Lisboa, Portugal, 2008.
- BROOK, A. et Al. **Secondary Students’ Ideas About Particles**. Project, Centre for studies in Science and Mathematic Education, University of Leeds, 1983.
- BRUSH, S. G. **The Kinetic Theory of Gases**. An antology of Classic Papers with Historical Commentary. Imperial College Press. London, 2003.
- BUNGE, M. **Teoria e Realidade**. Perspectiva. São Paulo, 2008.
- \_\_\_\_\_. **Física e Filosofia**. Perspectiva. São Paulo, 2000.
- CAFAGNE, A. **Concepções alternativas em termodinâmica: a atribuição de causalidade**. São Paulo. Dissertação de mestrado. Instituto de Física/ Faculdade de Educação da USP, 1991.

- \_\_\_\_\_. **Concepções em termodinâmica: o senso comum e o conhecimento científico.** São Paulo. Tese para obtenção do título de doutor em didática. Faculdade de Educação, USP, 1996.
- CALLEN, H. B. **Thermodynamics.** New York, London, Sidney. Ed. John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- CANGUILHEM, G. **Études d'histoire et de philosophie des sciences.** Paris: J. Vrin, 1994.
- CARAMELLO, G. W. **Aspectos da Complexidade: Contribuições da Física Para a Compreensão do Tema Ambiental.** Tese apresentada no Instituto de Física e à Faculdade de Educação da USP para obtenção do Título de Doutor em Ensino de Ciências. São Paulo, 2012.
- CARDWELL, D. S. L. **From Watt to Clausius.** Cornell university Press. Itaca. New York, 1971.
- 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.
- CARNOT, S. **Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrolarr esta potencia** y otras notas de caráter científico (Introducción, traducción y notas de Javier Odon Ordóñez). Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- CARVALHO ET AL **Ciências no ensino fundamental: o conhecimento físico.** São Paulo. Editora Scipione, 2005.
- CARVALHO, A. P. C.; CAPPECHI, M. C. V. M. **Es posible introducir a los alumnos al universo de las ciências?** Cambio conceptual y representacional in El aprendizaje y La enseñanza de La ciência, cap.16. pp. 265-285. Machado Libros, Espanha, 2008.
- CLAUSIUS, R. **Theorie Mécanique de la chaleur.** Gauthier – Villars, Paris, 1888.
- \_\_\_\_\_. **Theorie Mécanique de la chaleur.** Librairie Scientifique, Industriale et agricole. Eugène Lacroix, editeur, Paris, 1868.

- CLOUGH, E. E.; DRIVER, R. Secondary students' conceptions of the conduction of heat: bringing together scientific and personal views. **Physics Education**, 20(4) pp. 176-182, 1985.
- CHALMERS, A. F. **O que é ciência afinal?** Brasiliense, São Paulo, 1995.
- COHEN I. B. **O nascimento de uma nova física.** Gradiva. Lisboa, 1988.
- COLL, CÉSAR – **Psicologia e Currículo** – Uma aproximação psicopedagógica à elaboração do currículo escolar. Ática. São Paulo. 1987.
- D' ALEMBERT, J. L. R. **Traité de dynamique.** Seceux: Jacques Gabay. Paris, 1990
- DAVIS. P.; HERSH, R. **A Experiência Matemática.** Gradiva. Lisboa, 1995.
- DRAGO, A. Machh's Thesis. Thermodynamics as the Basic Theory for Physics Teaching. **Science & Education**, 3; pp.189-198, 1994.
- DRIVER, R. H. & EASLEY, J. Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent Science students. **Studies in Science education**, 5, pp.61-84, 1978.
- DRIVER, R. Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. **Enseñanza de Las Ciencias**. 4(1) , pp. 3-15, 1986.
- DRIVER, R. et al. Constructing Scientific Knowledge in the Classroom. **Educational Researcher**. pp. 23(7): 5-12, 1994.
- DUHEM, P. **Les Origines de la Statique.** 2 vols, pp. 5-12. Paris, 1905, 1906.
- \_\_\_\_\_. **L'évolution de la Mécanique.** A. Joanin et cie. Paris, 1903.
- \_\_\_\_\_. **O Valor da Teoria Física.** Luso Sofia. Covilha, 2008.
- ERICKSON, G. L. Children's conceptions of heat and temperature. **Science Education**, 63, pp.221-230, 1979.
- FEYNMAN, R. P. **O que é uma Lei Física?** Gradiva, Lisboa, 2000.
- \_\_\_\_\_. **Física em 12 lições.** Ediouro. Rio de Janeiro. 2005.
- FOUREZ, G. Crise no ensino de ciências? **Investigação em ensino de ciências** – ISSN 1518-8795, 2004.
- FOX, R. Sadi Carnot. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu.** Édition critique. VRIN, Paris (1978).
- FREIRE, P. – **Pedagogia da Autonomia: saberes necessários à prática educativa.** São Paulo, Paz e Terra, 1996;



GAGLIARD, R. Los Conceptos estruturales en la aprendizaje por investigacion. **Enseñanza de Las Ciencias**, 4 (1), pp. 30-35, 1986.

\_\_\_\_\_. **Teacher training and multiculturalism**. International Bureau of Education. Genebra, 1995.

\_\_\_\_\_. An Integrated Model for teaching training science in multicultural contexts. **International Bureau of Education**. Genebra, 1994.

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

GAGLIARD, R.; GIORDAN, A. **La historia de las ciencias: una herramienta para La enseñanza**. Enseñanza de Las Ciencias, 4 (3), pp. 253-258, 1986.

GALILEO, G. **Dialogues Concerning Two new Sciencies**. Mcmillan. New York, 1914.

GARCÍA A.V.; CARMONA, G. A.; BARRIO, S. O. Estratégias operativas en La resolución de problemas matemáticos en el ciclo medio de la E.G.B.

**Enseñanza de Las Ciencias**, 6(3), pp. 251-264, 1988.

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

GIBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1982.

GOMBRICH, E. H. **A História da Arte**. Zahar. Rio de Janeiro, 1979.

\_\_\_\_\_. **Arte e ilusão**. Martins Fontes. São Paulo, 1986.

GOODY, J. **As consequências do letramento**. Paulistana. São Paulo, 2006.

GOODY, J. & WATT, I. **The consequences of literacy**. In literacy in traditional societies. Cambridge University Press New York, 1968.

GRÉA, J. & VIARD, J. From Language to concepts appropriation in physics, in C. Bernardini, C. Tarsitani and m. Vicentini (Eds), Proceeding of the International conference: Thinking Physics for teaching. **Plenum Press**, New York, 1995.

GULLAR, F. Não basta parecer novo. **Folha de São Paulo**, Ilustrada, E8, domingo, 6 de janeiro, São Paulo, 2013.

HARMAN, P. M. **Energy, Force, and Matter**. The conceptual development of nineteenth-century physics. Cambridge University Press. London, 1985.

HESSSEN, J. **Teoria do conhecimento**. Martins fontes. São Paulo, 2012.

- HIGA, T. T. **Conservação da energia: estudo histórico e levantamento conceitual do aluno**. Dissertação de mestrado. Instituto de Física da USP. São Paulo, 1988.
- HENRIQUE K. F. **O pensamento físico e o pensamento do senso comum: a energia no segundo grau**. Dissertação de mestrado em ensino de ciências modalidade física. Instituto de Física, USP, São Paulo, 1996.
- HÖTTECKE, D. Learning Physics with History and Philosophy of Science on effective implementation strategies for an old approach in school Science Teaching in Europe, em “**A pesquisa em ensino de física e a sala de aula: articulações necessárias.**” pp. 45 a 77, SBF, São Paulo, 2010.
- INHELDER, B. PIAGET, J. P. **Da Lógica da Criança à Lógica do Adolescente**. Pioneira. São Paulo, 1976.
- JAPIASSU, H. **Introdução ao pensamento epistemológico**. Francisco Alves Editora. Rio de Janeiro, 1991.
- JAPIASSU, H. **Para ler Bachelard**. Francisco Alves Editora. Rio de Janeiro, 1976.
- KANT, I. **Os pensadores**. VOL 1, Nova Cultural, São Paulo, 1987.
- KNELLER, G. F. **A Ciência como atividade humana**. Zahar, Rio de Janeiro, 1980.
- KHUN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo, Perspectiva, 2000.
- \_\_\_\_\_. **A tensão essencial**. Coletânea de artigos onde se destaca, o que trata da conservação da energia como descoberta simultânea (cap.4). Editora Unesp, São Paulo, (2011).
- \_\_\_\_\_. **O Caminho Desde a Estrutura**. São Paulo, Unesp, 2003.
- LAVOISIER, A. *Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*, 2 vols. Paris: Chez Cuchet, 1789. Reprinted Bruxelles: Cultures et Civilisations, 1965
- LAGRANGE, J. L. **Mécanique Analytique**. Librairie Scientifique et technique. Paris, 1965.
- LECOURT, D. **A cientificidade**. In A Religação dos Saberes. Jornadas temáticas idealizadas e dirigidas por Edgar Morin. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 2012.

LEMKE, J. L. Investigar para el futuro de la educación científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir. **Ensenanza de las Ciências**. 24(1), pp.5-12, 2006.

\_\_\_\_\_. Enseñar todos los lenguajes de la ciencia: palabras, símbolos, imágenes, y acciones. In M. Benlloch (ed.), **La educación en ciencias**. Paidós. pp. 159-186. Barcelona, 2002.

LINDER, C. J. A Challenge to Conceptual Change. **Science education**, 77(3), p. 292-300, 1993.

LINDSAY, R. B, **Energy: Historical Development of the concept**.

Comentários e relação de artigos relativos ao conceito de energia desde Aristóteles até meados do século XIX, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc Stroudsburg, Pensilvânia, 1975.

LOPES, A. R. C. **Bachelard: O Filósofo da Desilusão**. Cad.Cat.Ens.Fis., v.13, n3: p.248-273, dez.1996.

\_\_\_\_\_. Livros **didáticos: obstáculos ao aprendizado da ciência química**. Dissertação de Mestrado. Iesae/FGV. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_. **A concepção de fenômeno no ensino de química brasileiro através dos livros didáticos**. Química Nova. v. 17, n. 4, pp. 338-41. São Paulo, 1994.

LUDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. EPU. São Paulo, 2007.

MACEDO, L. **Ensaio construtivistas**. Editora Casa do Psicólogo. São Paulo, 1994.

MACQUER, M. **Dictionnaire de Chimie**. Chez Theophile Barrois Libraire. Paris, 1778.

MARTINS, A. F. P. **Concepções de estudantes acerca do conceito de tempo: uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard**. Tese de doutorado. FEUSP. 2004.

MARTINS, I. Explicando uma explicação. **Revista Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências**. Volume 01, número 1 – Belo Horizonte, setembro de 1999.

MARTON, F. Phenomenography- Describing Conceptions of the world around us. **Instructional Science**, 10, pp. 177-200, 1981.

MASSONI, N. T. Ilya Prigogine; uma contribuição à filosofia da ciência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. V. 30, n. 2, 2308, 2008.

MATTHEWS, M. R. História, Filosofia e Ensino de Ciências: A Tendência Atual de Reaproximação. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, v. 12, n. 3: p. 164-214, dez. 1995.

MENEZES, L. C. **A matéria: uma aventura do espírito**. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2005.

MORAES, R.; Mergulhos Discursivos: análise textual qualitativa entendida como processo integrado de aprender, comunicar e interferir em discurso. In: **Metodologias Emergentes de Pesquisas em Educação Ambiental**. Unijuí, P. 85-114, 2005.

MORAES, R.; GALIAZZI, M. C. Análise Textual Discursiva: Processo Reconstrutivo de Múltiplas Faces. **Ciência & Educação**, v. 12, n. 1, pp. 117-128, 2006.

MORENO, A.; WALDEGG G. La Epistemología Constructivista y la didáctica de las ciencias: ¿Coincidencia o Complementariedad? **Investigación didáctica. Enseñanza de las ciencias**, 16(3), 421-429, 1998.

MORIN, E. **O Método II. A vida da vida**. Tradução Maria Gabriela de Bragança. Publicações Europa-América. Portugal 1999.

\_\_\_\_\_. **O Método 4. As ideias. Habitat, vida, costumes, organização**. Tradução Juremir Machado da Silva. Sulina. Porto Alegre, 1998.

\_\_\_\_\_. **O Método 5. A humanidade da humanidade**. Tradução Juremir Machado da Silva. Editora Meridional. Porto Alegre, 2002.

\_\_\_\_\_. O problema epistemológico da complexidade. Europa-América. Lisboa, 1996.

\_\_\_\_\_. **Introdução ao pensamento complexo**. Editora Sulina, Porto Alegre, 2006.

\_\_\_\_\_. **Ciência com consciência**. Editora Bertrand Brasil Ltda. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **A religação dos saberes**. Editora Bertrand Brasil Ltda. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **Educação e Complexidade**. Cotez editora. São Paulo, 2000.

MORTIMER, E. F. Conceptual change or conceptual profile change? **Science & Education**, 4(3), 267-285, 1995.

\_\_\_\_\_. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? **Investigação em ensino de ciências** 1(1) 20-39, 1996.

NASCIMENTO, V. B. **Visões de ciência e o ensino por investigação**. Dissertação (mestrado) – Faculdade de educação da USP, São Paulo, 2003.

NOVAES, M. Ilya Prigogine: uma Visão Crítica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. V. 32, n. 1, 1306, 2010.

OLIVEIRA, C. M A.; CARVALHO, A. M. P. O Conhecimento Físico e a Linguagem. **XV Simpósio Nacional de Ensino de Física**. v. 1.pp. 2680-2688, Curitiba.2003.

OSTERMANN, F. A Epistemologia de Kuhn. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, V. 13, pp. 184-196, 1996.

PACCA, J. L. A. Anotações de aula da disciplina Construtivismo e aprendizagem significativa, 2006.

PACCA, J. L. A.; HENRIQUE, K. F. Dificultades y estrategias para La enseñanza Del concepto de energia. **Enseñanza de las Ciencias**. 22(1), pp. 159-166, 2004.

PARUELO, j. ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS Y FILOSOFÍA. **Enseñanza de las ciencias**, 21 (2), pp.329-335, 2003.

PATY, M. **Do estilo em ciência e em história das ciências**. 292 estudos avançados 26 (75), 2012.

PERELMAN, C. **Analogia e Metáfora**. Enciclopédia Einaudi. Argumentação, v.11. Imprensa Nacional/Casa da Moeda. Lisboa, 1987.

PIAGET, J. GARCIA, R. **Psicogênese e História das Ciências**. Publicações Dom Quixote. Lisboa, 1987.

PIAGET, J. POSTEL, L. A. Construcción y Validacion de las teorías Científicas. Paidós, Argentina, 1986.

PIAGET, J. **A equilibração das estruturas cognitivas**. Zahar. Rio de Janeiro, 1975.

\_\_\_\_\_. **A epistemologia genética**. Abril cultural, coleção os pensadores. São Paulo, 1983.

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.

\_\_\_\_\_. Mathematics as structural language of physical thought.

Vicentini, M. & Sassi, E. (org.). **Connecting Research in Physics Education with Teacher Education** volume 2, ICPE – book, 2008.

POINCARÉ, H. **O Valor da Ciência**. Contraponto, Rio de Janeiro, 2007.

POPPER, K.R. **Conhecimento objetivo**. EDUSP. São Paulo, 1975.

POSNER, G. J. ET AL. Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. **Science Education**, 66(2), pp. 221- 227, 1982.

POZO, J. I. Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la ciencia como cambio representacional. **Enseñanza de Las Ciencias**, 17(30), 513-520, 1999.

\_\_\_\_\_. **A solução de problemas**. Artmed. Porto Alegre. 1998.

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

PRIGOGINE, I. In: -Pasternack, G. P. **Do caos à inteligência artificial: quando os cientistas se interrogam**. Ed. UNESP. São Paulo, 1993.

PRIGOGINE, I. **Sistema**. Enciclopédia Einaudi, volume 26, Imprensa da casa da moeda, Portugal, 1993.

\_\_\_\_\_. **Criatividade da natureza e criatividade humana**. Estudos da complexidade 2. Editora Sulina, Porto Alegre, 2009 [2].

\_\_\_\_\_. **Ciência razão e Paixão**. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2009 [1].

\_\_\_\_\_. **As leis do caos**. Editora Unesp. São Paulo, 2002.

QUEIROZ, G. P. C. **Professores artistas-reflexivos de física no Ensino Médio**. Tese (Doutorado em Educação) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.

RESNICK, L. Vers une théorie cognitive de la didactique. **Actes V<sup>es</sup> journées de chamonise sur l'éducation scietifique**, Paris, Université Paris VII, 1983.

RICARDO, E.C. **Elementos físicos e matemáticos da mecânica analítica, a relação entre as duas ciências e a vigilância epistemológica**. Tese apresentada à Faculdade de Educação, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Livre-Docente, são Paulo, 2012.

\_\_\_\_\_. Problematização e Contextualização no Ensino de Física. In: CARVALHO, Anna Maria P. (org.). **Ensino de Física**. Coleção Ideias em Ação. Cengage Learning. São Paulo, 2010.

- ROTH, W. M. & LAWLESS, D. Science, Culture, and the Emergence of Language. **Science education**, vol. 86, Issue 3, pp.368-385, 2002.
- ROTH, W. M. Competent Workplace Mathematics: How Signs Become Transparent. **International Journal of Computers for Mathematical Learning**, vol.8, N.2, 2003.
- ROZIER, S. VIENNOT, L. Students' reasonings in thermodynamics. **International Journal in Science Education**, 13(2): pp. 159-170, 1991.
- RUMFORD, C. **An Experimental Enquiry Concerning the Source of the Heat which is excited by Friction**. Philosophical Transaction of the Royal Society p.102, London, 1798.
- SANTOS, M. E. V. M. **As concepções alternativas dos alunos à luz da Epistemologia bachelardiana**. In: Mudança conceitual em sala de aula, um desafio pedagógico. Lisboa: Livros Horizonte, 1991.
- SCHRÖDINGER, E. **What is life?** Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- SCIARRETTA, M. R. Proprietà termiche della materia. **In Atti del VI Convegno del GNDF/CNR**, p. 51-84, Firenze, 1987.
- SHAYER, M.; WYLAM, H. The development of the concepts of heat and temperature in 10-13 years-old. **Journal of Research in Science Teaching**, 19(5). Pp. 419-434, 1981.
- SILVA, D. N. **A Termodinamica 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.; PACCA J. L. A. Reflexões sobre visões da termodinâmica do equilíbrio e do não equilíbrio no ensino médio. Trabalho apresentado no **Encontro de Física 2011**, Foz do Iguaçu, Paraná, 2011 [a].
- 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 [b].
- SILVA, D. N.; PACCA J. L. A. Contribuições de Brahe, Kepler, Newton e da matemática no ensino da gravitação. Trabalho apresentado e publicado nos anais do **XIXSnef**, UFAM, Manaus, 2011 [3].

SILVA, D. N.; PACCA J. L. A. “Quente e Frio”, “Calórico” e “Energia” : Três Visões Distintas Sobre Calor. Trabalho apresentado no **XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**, Maresias, São Paulo, 2012.

SILVA, D. **Estudo das trajetórias cognitivas de alunos no ensino da diferenciação dos conceitos de calor e temperatura**. Tese de doutorado. FEUSP, São Paulo, 1995.

SILVA, D; NETO, V. F; CARVALHO, A. M. P. Ensino da distinção entre calor e temperatura, uma visão construtivista. **Questões atuais em ensino de ciências**. Escrituras Editora, p. 61-75. São Paulo, 1998).

SILVEIRA, F. L. A Filosofia da Ciência de Karl Popper: o racionalismo critic. **Revista de Enseñanza de la Física**. v. 10, n. 1, pp. 33-42, , Cordoba, 1997.

SILVEIRA, F. L. ET AL. Um teste sobre calor, temperatura e energia interna. Comunicação apresentada no **IX Simpósio Nacional de Ensino de Física**. São Carlos, 1991.

SILVESTER, D. **Um olhar sobre Giacometti**. Cosac e Naif. São Paulo, 2012.

SIMON, S. The impossibility of perpetual motion and the problem of the inclined plane. **Harvard University Press**. 1935.

SOLBES, J; TARIN, F. Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. **Enseñanza de Las ciencias**, 16(3), pp. 387-397. Espanha, 1998.

SOLBES, J; TARIN, F. La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados. **Enseñanza de Las ciencias**, 22(2), pp. 185-194. Espanha, 2004.

SOUZA FILHO, O. M. **Evolução da ideia de conservação da energia: um exemplo de história da ciência no ensino de física**. Dissertação de mestrado em ensino de ciências modalidade física. Instituto de física, USP. São Paulo, 1987.

SOUZA, V. C. A.; JUSTI, R. Interlocuções possíveis entre linguagem e apropriação de conceitos científicos na Perspectiva de uma estratégia de modelagem para energia envolvidas nas transformações químicas. **Ensaio-pesquisa em educação em ciências**. V. 13, n.02, mai-ago, pp. 31-46, Belo Horizonte, 2011.

STAHL, G. E. **Specimen Beccherianum**. Lipsiae: Gleditsch, 1703.

TATON, R. (Org). **História Geral das ciências**. Tomos II (3<sup>o</sup> vol.), e III (1<sup>o</sup> vol.). Difusão européia do livro. São Paulo, 1966.



TIBERGHIEU, A. The Development of ideas with teaching. **Children's Ideas in Science**. Milton Keynes, Open University Press, 1985.

TIBERGHIEU, A.; DELACOTE G. Resultats preliminaires sur la conception de la chaleur. **Physics Teaching in School**, London, Taylor & Francis, G., 1979.

VALÉRY, P. Discours sur L'esthétique. Discurso feito no **Segundo Congresso Internacional de Estética e Ciências da Arte**. Pléiade, t. 1, pp. 1297 e 1310. , Paris, 1937.

VALENTE, M. J. **UMA LEITURA PEDAGÓGICA DA CONSTRUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE ENERGIA**. Tese de doutorado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 1999.

VIARD, J. Using the history of Science to teach thermodynamics at the university level: the case of the concept of entropy. **University C1. Bernard Lyon**, France, 2002.

VIARD, J & LANGLOIS, K. F. The concept of electrical resistance: How Cassire's philosophy, and early developments of electrical circuits theory, allow a better understanding of students' learning difficulties. **Science Education**, 10(3), pp. 267-286. 2001.

VIENNOT, L. Spontaneous reasoning in elementary dynamics. **European Journal Science Education**, 1(2), pp.205-221, 1979.

VIENNOT, L.; CHAUVET, F. Two Dimensions to Characterize research-based teaching strategies: examples in elementary optics. **International Journal Science Education**, 1997.

VYGOTSKY, L. **A formação social da mente**. Martins Fontes. São Paulo, 1991.

\_\_\_\_\_. **La Imaginación y el Arte en la infancia**. Akal editor, Madrid, 1982.

\_\_\_\_\_. **Pensamento e linguagem**. Martins Fontes, São Paulo, 1987.

VILLANI, A.; ARRUDA, S. M. Conceptual Change and Special Relativity Theory. Trabalho apresentado na **Conferência Internacional: 'Thinking Science for teaching: the case of Physics'**. Roma, 1994.

VILLANI, A.; PACCA J. L. A. Construtivismo, conhecimento científico e habilidade didática no ensino de ciências. **Revista da Faculdade de Educação**. Vol. 23 n. 1-2, São Paulo, 1997.

VILLANI, A. Conceptual Change in Science and Science education. **Science Education**, 76(2), 223-237. 1992.

\_\_\_\_\_. **Ciência razão e Paixão**. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2009.

ZANETIC. Física e literatura: construindo uma ponte entre duas culturas. **História, ciência e saúde**. Manguinhos, v.13, p. 55-70. 2006.

# Anexos

**(Folhas de questões fornecidas aos estudantes)**

**NOME** \_\_\_\_\_

Série \_\_\_\_\_

Questão 1

Uma panela com água foi colocada sobre uma chama que após algum tempo foi apagada. O volume de água inicialmente existente na panela diminuiu. É possível, que de forma espontânea, o volume original de água volte a existir?

**NOME** \_\_\_\_\_

Série \_\_\_\_\_

Questão 2

Temos duas canecas com água até a metade; numa delas a temperatura da água é de  $10^{\circ}\text{C}$  e na outra é de  $30^{\circ}\text{C}$ . 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?

**NOME** \_\_\_\_\_

Série \_\_\_\_\_

Questão 3

Em uma compressão adiabática de um gás perfeito, a pressão e a temperatura aumentam. Pensando no gás s como algo formado por partículas, explique porque isso ocorre.

## Quadro de ideias dos alunos

Sistema	Processo	transformação	Calor	Energia	Partículas
<i>aberto</i>	<i>evolução</i>	<i>Calor- trabalho</i>	<i>Identidade</i>	<i>identidade</i>	<i>identidade</i>
<i>fechado</i>		<i>Sentido</i>	<i>qualidade</i>	<i>conservação</i>	
<i>isolado</i>		<i>desagregação.</i>			

### SISTEMA

**Aberto** : - Há perda de substância para o ambiente  
 - Parte da substância se dispersa no ambiente

**Fechado**: - não há perda nem dispersão no ambiente

**Isolado**: - confunde-se com sistema fechado

### PROCESSO

**Evolução**: - descrito de forma narrativa  
 - transporte de modelo mecânico

### TRANSFORMAÇÕES

**Calor- trabalho** – associado à mudança de fase

**Sentido** – ligado à idéia de espontâneo como propriedade natural do corpo.

- associado à atuação do experimentador sobre o sistema.

- associado à idéia de sistema fechado.

**Desagregação** – dispersão

- quebra de forças entre moléculas

<b>CALOR</b>
--------------

<i>Identidade - substância</i>
--------------------------------

<b>Qualidade</b> – ligada à temperatura como nível térmico.
---

<b>ENERGIA</b>
----------------

<i>Identidade - movimento</i>
-------------------------------

<i>Conservação – nada foi detectado</i>
---

<b>PARTÍCULAS</b>
-------------------

<i>- Identidade - semelhante ao de um corpo.</i>
--

<i>Podem: variar de volume, ser atritadas, gerar calor durante choques.</i>
---



## Texto de Rumford fornecido aos estudantes

(NASCIMENTO 2003)

### **CALOR: SUBSTÂNCIA?**

Estando recentemente encarregado da superintendência de perfuração de canhões, numa oficina de arsenal militar em Munique, fiquei impressionado com o considerável grau de calor que uma peça metálica adquire, em pequeno tempo, sendo perfurada; e com o calor até mais intenso (maior que o da água fervente como comprovei pela experiência) das lascas metálicas originadas pela perfuração.

Quanto eu mais pensava nestes fenômenos mais eles pareciam ser para mim curiosos e interessantes. Uma completa investigação deles parecia, ao mesmo tempo, oferecer uma satisfatória interpretação para a natureza oculta do calor e nos tornar capazes de tecer algumas conjeturas razoáveis em relação à existência ou não de um fluido ígneo: um assunto que há muito tem dividido a opinião dos filósofos. (...)

De onde vem o calor produzido na operação acima mencionada?

É ele fornecido pelas lascas metálicas que são separadas do metal pelo perfurador? Se este fosse o caso, então, de acordo com as modernas doutrinas de calor latente e de calórico, a capacidade de calor das partes do metal reduzidas em lascas deveria não somente ser mudada, mas a mudança sofrida por elas deveria ser suficientemente grande para justificar o calor produzido.

Mas tal mudança não ocorre. Tomando iguais quantidades em peso destas lascas e de finas camadas do mesmo bloco metálico, separadas por meio de uma serra muito boa, coloquei-as a uma mesma temperatura (igual à da água fervente), em quantidades iguais de água fria (temperatura de 59,5°F); a porção de água na qual as lascas foram colocadas não foi mais ou menos aquecida que a outra de água, na qual as placas metálicas foram colocadas.

Este experimento foi repetido várias vezes; o resultado foi sempre o mesmo e não pude determinar nada, nem mesmo que a mudança tinha sido

produzida no metal pela produção de lascas, através da observação de sua capacidade para o calor.

É, pois, evidente que o calor produzido não podia ter sido fornecido pelo “gasto” do calor latente das lascas metálicas (Magie, 1935; p. 151-152<sup>74</sup>).

“O que é calor?” Há alguma coisa como fluido ígneo? Há algo que possa ser propriamente chamado calórico?

Temos visto que uma considerável quantidade de calor pode ser produzida na fricção de duas superfícies metálicas e libera um constante fluxo, em todas as direções sem interrupções e sem nenhum sinal de diminuição ou esgotamento.

De onde vem o calor que é continuamente liberado desta maneira nos experimentos precedentes? Foi ele fornecido por pequenas partículas do metal arrancadas da massa sólida que foi atritada? Este, como já vimos, não pode ter sido o caso.

Foi ele fornecido pelo ar? Isto não pode ser, uma vez que em três dos experimentos o maquinário esteve imerso em água e o acesso do ar atmosférico foi completamente evitado.

Foi ele fornecido pela água que envolve o maquinário? Que isto não pode ser é evidente. Primeiro, porque esta água estava recebendo continuamente calor e não poderia dar calor a um corpo ao mesmo tempo que o recebe dele. Segundo, porque não houve nenhuma decomposição química (o que não seria razoável esperar). Se houvesse, um de seus componentes elásticos (mais provavelmente o ar inflamável) deveria ao mesmo tempo ter sido posto em liberdade, escapando para a atmosfera, teria sido detectado. Embora eu tivesse examinado frequentemente a água para ver se alguma bolha de ar subia através dela e tivesse igualmente preparado para pegá-las e examiná-las se alguma surgisse, não pude perceber nada: não havia sinal de decomposição de qualquer tipo, nem outro processo químico ocorreu na água. (...)

Não devemos esquecer de considerar esta mais remarcável circunstancia, na qual a fonte de calor gerada por fricção parecia evidentemente inexaurível.

---

<sup>74</sup> Esta referência é feita por Nascimento (2003).

É forçosamente necessário admitir que o que um corpo isolado ou sistema de corpos podia produzir de modo contínuo, sem limitação, não podia ser substância material e parece-me extremamente difícil, senão impossível, imaginar algo capaz de ser produzido ou comunicado da forma como o calor o foi nestes experimentos, exceto se ele for movimento. (Magie, 1935, p. 160-161<sup>75</sup>).

---

<sup>75</sup> *Referência feita por Nascimento (2003).*