

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO
LINHA DE PESQUISA: ESTRATÉGIAS DO PENSAMENTO E
PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO
GRUPO DE ESTUDOS DE PRÁTICAS EDUCATIVAS EM
MOVIMENTO - GEPEM

Ensino de Entropia: um enfoque histórico e epistemológico

Zanoni Tadeu Saraiva dos Santos

NATAL/RN
2009

Ensino de Entropia: um enfoque histórico e epistemológico

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte para a obtenção do título de Doutor em Educação.

Área de concentração: Estratégias do Pensamento e Produção do Conhecimento

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marta Maria Castanho Almeida Pernambuco

NATAL/RN
2009

Catálogo da Publicação na Fonte. Bibliotecária Verônica Pinheiro da Silva.

Santos, Zaroni Tadeu Saraiva dos.

Ensino de entropia: um enfoque histórico e epistemológico / Zaroni Tadeu Saraiva dos Santos. – Natal, 2009.
169 f.

Orientadora: Profa. Dra. Marta Maria Castanho Almeida Pernambuco.

Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Sociais Aplicadas. Programa de Pós-Graduação em Educação. Linha de pesquisa: estratégias do pensamento e produção do conhecimento.

1. Ensino de Física - Tese. 2. Entropia - Tese. 3. História da Ciência - Tese. 4. Epistemologia da Ciência – Tese. I. Pernambuco, Marta Maria Castanho Almeida. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

CDU 53:37

ZANONI TADEU SARAIVA DOS SANTOS

ENSINO DE ENTROPIA : UM ENFOQUE HISTÓRICO E
EPISTEMOLÓGICO

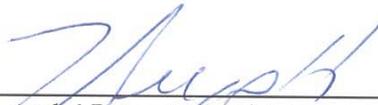
Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação
em Educação da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte, com pré-requisito para a
obtenção do grau de doutor.

Aprovado em 31 / 08 / 2009

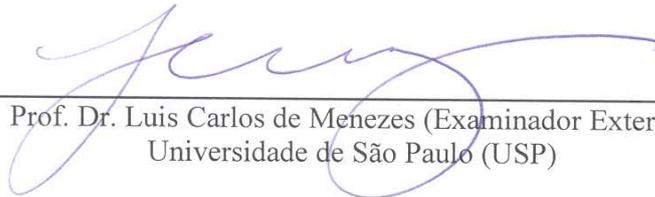
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª Marta Maria Castanho Almeida Pernambuco (Orientadora)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Prof. Dr. Jose André Peres Angotti (Examinador externo)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)



Prof. Dr. Luis Carlos de Menezes (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo (USP)



Prof. Dr. André Ferrer Pinto Martins (Examinador interno)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Prof.ª Dr.ª Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (Examinador Interno)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Dedico este trabalho aos meus alunos.
Pois são eles, afinal, a razão maior pela qual continuo a pensar e trabalhar
com educação.

Agradecimentos

Nenhuma tarefa é de um homem só. Por isso gostaria de agradecer a todos que contribuíram para que eu construísse este trabalho; quero primeiramente agradecer à Professora Marta Pernambuco por me permitir compartilhar de seu entusiasmo pelas idéias, dedicação à educação e seriedade de propósitos. Agradeço aos colegas do GEPEM que me abriram a porta para uma visão mais abrangente do processo educativo. De forma especial agradeço à Companheira Hostina de quem pude contar com o apoio amigo e ter proveitosas discussões que contribuíram de maneira definitiva na concepção e construção deste trabalho. Ao meu irmão Ticiano que, valendo-se de suas prerrogativas de professor da UNICAMP, me deu acesso a parte importante da bibliografia usada neste trabalho. Finalmente agradeço a Avany por ter mantido a esperança; ela, Flora e Nina que são grande parte da longa história que me trouxe até aqui.

“Apreciei muito a segunda floração da vida, que chega quando já terminou nosso período de emoções e comprometimento pessoal, e quando de súbito verificamos — vamos dizer, por volta dos cinquenta anos — que uma nova era se abre perante nós, cheia de motivos sobre os quais podemos meditar, estudar ou ler.”

Agatha Christie (1890-1976)

Resumo

A construção racional necessária à sistematização do conhecimento científico na física acarreta dificuldades de entendimento de alguns dos seus conceitos. Um conceito que apresenta, de forma exemplar, esta dificuldade - tanto de aprender quanto de ensinar - é o conceito de entropia. Esta tese propõe a construção de um roteiro didático que se constitui num percurso histórico e epistemológico para a entropia, com a intenção de contribuir para o ensino deste conceito e, de maneira geral, para o ensino da física. A premissa básica para a construção do roteiro é que, através de uma revisão histórica do desenvolvimento do conceito, nos moldes sugeridos pela epistemologia de Bachelard (1884-1962), é possível tornar mais significativo o conhecimento a ser ensinado e aprendido. Inicialmente fiz um pequeno memorial com o objetivo de dar ao leitor um panorama das inquietações, interesses e reflexões que teci em minha vida pessoal e profissional com relação à ciência e seu papel e que me levaram a construir esta tese. A estratégia para a construção do roteiro foi dividir o conteúdo usual da termodinâmica básica em três momentos de modo que estes se constituam em "unidades epistemológicas", ou seja, momentos que possam ser identificados a partir do pensamento predominante na construção do conhecimento científico: Um momento técnico empirista, um momento racionalista positivista e um momento racionalista pós-positivista. A transição de um momento para outro implica uma ruptura com o pensamento anterior. Entretanto, o progresso na construção do conhecimento na área é evidente. Como parte final do trabalho, apresento uma análise de elementos da epistemologia de Bachelard presentes em cada momento. Esta análise é o componente fundamental do roteiro didático que me propus a construir. A forma como construí este percurso para a entropia pode contribuir para a construção de percursos outros, na física ou em outras ciências, com vistas a desvelar significados e humanizar o conhecimento científico.

Palavras-chave: ensino de física, entropia, história da ciência, epistemologia da ciência.

Abstract

The rational construction necessary to systematize scientific knowledge in physics, introduces difficulties of understanding in some of its concepts. One of these concepts which exemplify properly this difficulty – in learning or teaching – is entropy. This thesis propose the construction of a didactic route which constitute itself a historical and epistemological course to entropy, intending to contribute for teaching this concept as well as other physics concepts. The basic assumption to build this route is that through the historical review of the development of this concept in the way suggested by Bachelard's (1884-1962) epistemology it is possible to make subjects, to be taught and learned, more meaningful. Initially I composed a brief biographical note to give the reader an idea about the issues, interests and reflections, related to science, and how I dealt with them in my private and professional life, as well as the role they played to lead me to write this thesis. The strategy to construct the route to entropy was to split the usual contents of basic thermodynamics in three moments in a way they can constitute "epistemological units", which can be identified by the way of thinking in the corresponding moments of scientific knowledge production: a technical and empiricist moment, a rationalist and positivist moment and a post-positivist rationalist one. The transition between each moment is characterized by a rupture with the former way of thinking; however the progress in the construction of knowledge in the area is evident. As the final part of this work I present an analysis based on elements of Bachelard's epistemology that are present in each moment. This analysis is the basic component of the didactic route that I propose myself to build. The way I made this route guide to entropy could contribute to the construction of other didactic routes in physics and other sciences, in a way to unveil hidden meanings and as a tool to humanize scientific knowledge.

Keywords: Physics teaching, entropy, history of science, epistemology of science.

Resumen

La construcción racional necesaria a la sistematización del conocimiento científico en la física genera dificultades de entendimiento de algunos de sus conceptos. Un concepto que presenta, de forma ejemplar, esta dificultad – tanto de aprender como de enseñar – es el concepto de entropía. Esta tesis propone la construcción de un guión didáctico que se construye en un recorrido histórico y epistemológico para la entropía, con la intención de aportar la enseñanza de este concepto y, de modo general, la enseñanza de física. La premisa básica para la construcción del guión didáctico es que, a través de un repaso histórico del desarrollo del concepto, en los moldes sugeridos por la epistemología de Bachelard (1884 – 1962), es posible hacerse más significativo el conocimiento a ser enseñado y aprendido. Inicialmente hice un pequeño memorial con el objetivo de darle al lector un panorama de las inquietudes, intereses y reflexiones que tejí en mi vida personal y profesional con respecto a la ciencia y su papel y que me llevaron a construir esta tesis. La estrategia para la construcción del guión fue dividir el contenido usual de la termodinámica básica en tres momentos de manera que éstos se constituyan en “unidades epistemológicas”, o sea, momentos que puedan ser identificados a partir del pensamiento predominante en la construcción del conocimiento científico: Un momento técnico empirista, un momento racionalista positivista y un momento racionalista post-positivista. La transición de un momento para otro implica en una ruptura con el pensamiento anterior. Entretanto, el progreso de la construcción en el área es evidente. Como parte final del trabajo, presento un análisis de elementos de la epistemología de Bachelard presentes en cada momento. Este análisis es el componente fundamental del guión didáctico que me propuse a construir. La forma como construí este recorrido para la entropía puede contribuir para la construcción de otros trayectos, en la física o en otras ciencias, con vistas a desvelar significados y humanizar el conocimiento científico.

Résumé

La construction rationnelle nécessaire à la systématisation de la connaissance scientifique en physique entraîne des difficultés de compréhension de certains de ses concepts. Un concept qui présente de façon exemplaire cette difficulté – aussi bien d'apprentissage que d'enseignement – est celui d'entropie. Notre thèse propose la construction d'un plan didactique constitué d'un parcours historique et épistémologique pour l'entropie, dans l'intention de contribuer à l'enseignement de ce concept et, de manière plus générale, à l'enseignement de la physique. La prémisse qui est à la base de la construction de ce plan est celle selon laquelle, par la révision historique du développement du concept, selon le modèle suggéré par l'épistémologie de Bachelard (1884-1962), il est possible de rendre plus significative la connaissance à enseigner et à apprendre. J'ai d'abord fait un petit compte-rendu dans le but de donner au lecteur un panorama des inquiétudes, questionnements et réflexions que j'ai tissés, au long de ma vie professionnelle et personnelle, par rapport à la science et à son rôle, et qui m'ont conduit à construire cette thèse. La stratégie de construction du plan a consisté en une répartition des contenus usuels de la thermodynamique de base en trois moments, de façon à ce que ceux-ci deviennent des "unités épistémologiques", c'est-à-dire des moments qui puissent être identifiés à partir de la pensée prédominante dans la construction de la connaissance scientifique: un moment technico-empiriste, un moment rationaliste-positiviste et un moment rationaliste-postpositiviste. La transition d'un moment vers l'autre implique une rupture avec la pensée antérieure. Cependant, les progrès dans la construction de la connaissance dans le domaine sont évidents. Enfin et pour finir, je présente une analyse d'éléments de l'épistémologie de Bachelard présents à chacun de ces moments. Cette analyse est la composante fondamentale du plan didactique que j'ai proposé de construire. La façon dont je l'ai construit pour le cas de l'entropie peut contribuer à la construction d'autres parcours didactiques, en physique ou dans d'autres domaines scientifiques, dans le but de révéler des significations et d'humaniser la connaissance des sciences.

Sumário

Resumo	4
Abstract	5
Resumen	6
Résumé	7
Sumário	8
1 Introdução	10
1.1 Dos brinquedos às aulas de Física	11
1.2 O nascimento de uma dúvida	21
1.3 Como resolvê-la	35
1.4 Por que Bachelard	39
2 A origem da termodinâmica	44
2.1 Os primórdios: Carnot	45
2.2 Um instante de certezas: Clausius	70
2.3 Explicando o impossível: Boltzmann	97
3 Uma visão Epistemológica da Termodinâmica Básica	116
3.1 O calórico como obstáculo epistemológico	117
3.2 Um perfil epistemológico do calor	124
3.3 Epistemologia da irreversibilidade	129
3.4 Imagens e metáforas no reino da entropia	140
Conclusão	149
Referências	158

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo dos principais eventos da história da termodinâmica.	29
Figura 2 - Trabalho degradante de crianças e mulheres nas minas de carvão da Inglaterra no Séc. XVIII. As crianças e as mulheres eram preferidas pela menor probabilidade de revolta contra as condições de trabalho.	47
Figura 3 - Máquina a vapor de Savery, construída com a finalidade de retirar água das minas de carvão.....	49
Figura 4 - A Máquina a vapor de Newcomen foi a primeira máquina a vapor viável para uso industrial.....	50
Figura 5 - Máquina a vapor de Watt.....	55
Figura 6 - Templo positivista no Brasil onde foi grande a influência de Auguste Comte.....	75
Figura 7 - Aparato original utilizado por James Joule.....	81
Figura 8 - Dmitri Ivanovich Mendeleev, criador da tabela periódica dos elementos.....	98
Figura 9 - Túmulo de Boltzmann em Viena.....	101
Figura 10 - Representação gráfica da distribuição estatística das velocidades moleculares de um gás em diferentes temperaturas.....	104
Figura 11 - O demônio de Maxwell, selecionando moléculas de acordo com sua energia cinética	106
Figura 12 - Representação esquemática de uma máquina térmica.....	122
Figura 13 - Diagrama do perfil epistemológico do calor	126

1 Introdução

1.1 Dos brinquedos às aulas de Física

Montar, brincar e aprender.

No tempo e lugar da minha infância as crianças faziam seus próprios brinquedos. Construíamos carros de lata, pipas¹, barcos, armas, etc. Não se tratava de um carro qualquer ou de uma arma qualquer. Construíamos, na verdade, mecanismos relativamente sofisticados de direção e suspensão dos carros, sistemas de freios para carros de rolimã, sistemas aerodinâmicos para manter as pipas no ar. Fundíamos e moldávamos chumbo para pesca, construíamos bombas hidráulicas com tubos de PVC para molhar as pessoas no carnaval. Dentre as armas havia uma particularmente interessante que usava um mecanismo de ar comprimido dentro de um tubo de caneta. O artefato disparava pequenas “balas” de papel molhado, com velocidade suficiente para deixar uma marca vermelha e dolorida na pele da vítima.

Havia um brinquedo que utilizava o princípio de compressão de um combustível para produzir uma explosão (princípio do motor Diesel) que era bastante engenhoso: colocava-se pólvora, retirada dos palitos de fósforo, dentro do buraco das chaves (aquelas usadas em armários e guarda-roupas). Colocava-se, então, um prego fechando o buraco da chave e por meio de um barbante, que ligava a chave ao prego, batia-se o prego com força na parede de modo a comprimir a pólvora e causar uma explosão. Normalmente a chave era jogada para trás com força, mas na nossa ânsia de produzir explosões cada vez maiores, muitas chaves dos armários abriam-se em pedaços e eram inutilizadas.

¹ Lembro que o sistema de “cabresto e rabo,” que mantinha o equilíbrio aerodinâmico da pipa, consumia muito tempo e necessitava de muitos testes.

Na construção destes brinquedos tínhamos freqüentemente que enfrentar problemas técnicos como a escolha do material mais apropriado para construir um freio ou como fixar materiais variados usando recursos mínimos. Os materiais se restringiam àqueles disponíveis em nossas casas ou que conseguíamos nas sucatas das oficinas. Raramente comprávamos alguma coisa para as montagens. A grande exceção era a linha para empinar as pipas, tanto que nossa maior preocupação durante os “acidentes” não era perder a pipa, mas recuperar a linha.

Havia um prazer em encontrar as soluções para esses problemas técnicos, em inventar a partir do que aprendíamos. Não “valia” trazer um carro bonito que o pai pagou a um artesão para fazer ou comprou no mercado. A idéia era mostrar habilidade, trocar idéias, aprender com os outros... Fazendo a retrospectiva da construção e utilização desses brinquedos, vejo que aplicávamos muitos conceitos de física, métodos de testes e ensaios de forma intuitiva e informal. A principal fonte de conhecimento era o amigo, o pai, a mãe (minha mãe me ensinou a fazer cola de goma e da seiva do cajueiro) e a principal forma de confirmação era fazer funcionar. Desta época surgiu o prazer de construir coisas e de aprender para fazer. Eu me sentia totalmente absorvido por estas atividades. Não cansava. Não me chateava com os erros. Tentava mais uma vez, discutia com os colegas, brigava, mas no final, quando funcionava, todos ficávamos bem e contentes.

Na escola

Gostava de ciências e tinha uma habilidade natural com as línguas estrangeiras. Só isso me interessava de verdade. Não media esforços para reproduzir as experiências sugeridas pelos livros e visitava os navios no porto de Natal para tentar conversar com os estrangeiros. Meus projetos de ciências eram elogiados pelos professores. A ciência, além de permitir a construção de brinquedos interessantes, abria a possibilidade de um mundo novo de perguntas e respostas. Carreguei comigo por vários anos uma pergunta que a professora de ciências não me respondeu: “Se a Terra é como uma bola, como a água dos oceanos fica presa nela sem derramar?”

Questões simples, que no dia-a-dia passavam até despercebidas, ganhavam uma dimensão inesperada, como também surgiam questões nunca antes pensadas. Ao chegar ao ensino médio, na Escola Técnica Federal do Rio Grande do Norte - ETRN, me encaminhei de forma natural ao curso de mecânica. Queria construir brinquedos maiores. Mexer nas máquinas. Eram os anos 70 do milagre brasileiro e meu pai havia comprado seu primeiro fusca. Na oficina onde ele normalmente fazia reparos havia um rapaz tímido que sabia tudo sobre carros. Desmontava e montava um motor “de verdade” e fazia-o funcionar sem problemas. Aquilo era um espetáculo para mim, mas na escola técnica havia mais palavras do que máquinas.

Na verdade, não aprendi a construir quase nada, apenas tinha que aprender a desenhar um parafuso ou uma engrenagem obedecendo todas as normas. Construir peças genéricas, que não se aplicavam a nenhuma máquina em particular, mas que deveriam estar perfeitas. Não lembro de ter construído um objeto útil completo durante aquele curso. E minha mãe cobrava esse conhecimento quando as coisas quebravam em casa: “Você,

que é mecânico, conserte isso aqui!” Ou então dizia: “Tenho a impressão que você vai para essa oficina só para sujar essa bata de graxa, pois não vejo você construir nada”. E ela, de certa forma, tinha razão.

A ideologia da época, e talvez até de hoje, para formação de um técnico de nível médio, é a de que ele será o profissional que não precisará necessariamente ter a habilidade de construir ou montar uma máquina. Ele deverá “coordenar tarefas”: ler projetos, orientar trabalhadores, definir estratégias. Então por que as aulas na oficina? No estágio que fiz em uma grande fábrica de autopeças percebi que esta escola não tinha condições de capacitar eficientemente o aluno nem para a prática nem para o tipo de técnico gerente que se propunha. E, também, que eu não havia aprendido as tarefas básicas da profissão.

Embora o curso técnico em mecânica não tenha sido exatamente empolgante, havia, na ETFRN, os laboratórios de ciências da natureza. Fazia experimentos de física com medidas, construção de gráficos, montagens de circuitos elétricos e artefatos mecânicos. Na biologia, vi uma célula pela primeira vez através do microscópio. O fato de a Escola ter laboratórios de ciências, onde tínhamos a oportunidade de fazer relação entre o mundo da sala de aula, do quadro e do giz com objetos e instrumentos específicos das ciências foi de imensa importância na minha decisão futura sobre a carreira a seguir. Olhando retrospectivamente, o fato do laboratório de mecânica não ter um automóvel, por exemplo, com o qual pudéssemos estudar pode ter sido determinante na minha escolha. Apesar de o caminho óbvio de quem concluiu um curso técnico em mecânica ser a engenharia, veio a dúvida sobre que curso escolher na universidade. Onde eu poderia novamente encontrar aquele prazer de aprender, para fazer funcionar ou encontrar aquelas questões instigantes e desafiadoras? A resposta estava nas experiências das aulas de ciência da escola primária e de física do segundo grau. Havia invenção, engenhosidade, desafio e ludicidade.

Desisti de ser engenheiro e passei a querer ser cientista. O engenheiro se aproximava mais, a meu ver, da figura do capataz do que do projetista e inventor. Para essa escolha, foi importante a figura de um professor de física. Engenheiro eletricitista por profissão, naquele momento, por alguma razão, estava dando aulas de física. Suas histórias eram empolgantes. Alguns colegas de sala diziam que eram todas histórias inventadas e mentirosas, mas eu me impressionava com a relação que ele fazia entre os assuntos estudados, sua vida de engenheiro na CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco e nossa vida de adolescentes. Ele tinha exemplos reais e respostas reais que não eram apenas números sem significado. Havia um mundo de tecnologia e de fenômenos interessantes por trás daqueles números. Todas essas inquietações me levaram a escolher o vestibular de física.

Cursar a graduação em física, ao contrário do que eu esperava, foi algo comparável a cruzar um deserto: O formalismo puro e árido que deveria ser dominado, a paisagem seca onde a vida raramente aparecia. No deserto não existem dúvidas, são apenas as certezas incontestáveis. E quem poderia duvidar da areia quente, do calor do sol e da poeira? Vendo-me diante daquele deserto só havia uma coisa a fazer: cruzá-lo. E, naquele tempo (final dos anos setenta), a ciência nada mais foi para mim que um deserto inquestionável, em capítulos. Diante dela não havia espaço para as dúvidas ou para o erro. A reflexão era plana, a explicação era apenas matemática. A ciência mais uma vez me foi apresentada desconectada do mundo das coisas. Havia uma excessiva ênfase na matemática e esta falava por si só. Realizar uma demonstração matemática plausível substituía qualquer outra explicação. Nenhuma palavra foi dita sobre epistemologia ou filosofia da ciência.

Vim conhecer filósofos como Thomas Kuhn e Karl Popper ao frequentar o curso de filosofia, depois de graduado em física, e estes me proporcionaram um entendimento mais abrangente do fazer científico. Em uma análise retroativa, entendo que a produção do conhecimento

científico se dá necessariamente pela construção racional do argumento e pela matematização deste argumento. Entretanto, do ponto de vista epistemológico, diria que se cometeu naquele curso um engano fundamental: Fez-se um processo inverso no qual a reflexão sobre o problema científico a ser estudado acontecia após a construção do argumento da resposta; construía-se as teorias para depois se formular os problemas. Dentro desta perspectiva, ser um bom matemático ajudava bastante, mas muitas vezes não era suficiente para a resolução dos problemas visto que o entendimento do “mecanismo” da física, que consideramos fundamental para a reflexão crítica, era negligenciado. Sendo grande parte das argumentações de caráter matemático, as outras habilidades mentais, motoras ou relativas ao pensamento filosófico eram secundárias, senão desnecessárias. Sobre isto compreendo que ter habilidade com a ferramenta não significa necessariamente entender o mecanismo, muito menos seu processo de criação e invenção.

Como bolsista do recém-construído laboratório de ensino de física na Universidade Federal do Rio Grande do Norte meu trabalho era separar, entre um amontoado de equipamentos, o que se usaria na mecânica daquilo que se usaria na eletricidade, na térmica e assim por diante. Para isso, me valia dos manuais e dos meus conhecimentos de inglês. Pelo fato do laboratório estar ainda em fase de organização, tive pouquíssimas aulas de laboratório durante o curso e as duas lembranças mais significativas no campo experimental foram um sucesso e dois fracassos: o sucesso foi construir um pequeno fogão solar usando espelhos. Os fracassos foram tentar por semanas repetir a experiência de Millikan com um velho equipamento e depois as montagens experimentais das aulas de eletrônica que nunca funcionaram.

O que procuro, desde a construção dos brinquedos até as aulas de física, é compreender o mecanismo, pensar a construção da ciência, trocar experiências sobre esse pensar e essa construção. Esta sempre foi a minha expectativa em relação à ciência: um conhecimento que tem razões

para ser construído, que reflete as aspirações e os limites humanos. Muitas vezes não entendia porque deveríamos estudar tal ou qual assunto ou porque era importante estudar o movimento dos planetas e as leis de Kepler e Newton.

O Professor

Em 1985 fui aprovado em concurso público como professor de física da ainda Escola Técnica Federal do Rio Grande do Norte, depois de uma breve passagem pela rede estadual de educação e pelo ensino nas escolas de inglês. Começou então efetivamente a minha carreira como professor de física. Naquele momento eu já havia cursado quase a totalidade de uma graduação em filosofia, o que despertou em mim a consciência de que a ciência era um belo edifício construído ao longo dos séculos e não um deserto plano e árido. Mas, na ETEFRN, o ensino técnico precisava da física como uma “ferramenta para as disciplinas técnicas que os alunos iriam ver mais à frente”. Esta era a visão da época para o ensino de física na ETEFRN. E para levar adiante esta tarefa havia um livro didático concebido para alunos que pretendiam fazer vestibular para as engenharias. Os autores aprimoraram uma técnica de resolução de problemas-padrão que se mostrou bastante eficiente para as provas do vestibular, mas não muito apropriado para quem estuda numa escola técnica e quer uma física aplicada. Quer dizer, mesmo o propósito de uma física como simples “ferramenta para o ensino técnico” não era alcançado. Mais uma vez eu estava diante de uma ciência sem vida e agora seria parcialmente responsável por reproduzi-la. Se aquilo me incomodou como estudante, incomodava muito mais como professor. Comecei então a busca por soluções e isto se constituiu numa pesquisa pessoal, não sistemática por novas abordagens e livros didáticos diferenciados. Mais uma vez o laboratório de ensino de física (o mesmo no qual estudei) seria parte de uma solução. Os velhos manuais Leybold que um dia usei para organizar o laboratório de física na UFRN foram novamente visitados, desta vez para a montagem de experimentos para os meus alunos.

Naquela época o uso do laboratório possuía a forte conotação de “comprovação” de um fato teórico e o aluno seguia uma breve receita para obter o resultado esperado. Eventualmente, alguns alunos “moldavam” os resultados experimentais para que esses se adequassem ao que era teoricamente esperado. A natureza poderia estar errada, mas a física, não. É interessante como os estudantes, ainda hoje, questionam mais o fato natural do *que* o fato teórico.

O CEFET- RN e as constantes mudanças

Nos anos 90, o ensino técnico e tecnológico foi alvo de mudanças das mais variadas magnitudes e que causavam mais instabilidade que transformações efetivas no ensino e nas instituições. Uma dessas mudanças afetou diretamente os professores das disciplinas não técnicas. Esta mudança levaria à extinção o curso de nível médio formal integrado ao curso técnico profissionalizante. As escolas, que haviam se transformado em Centros Federais de Educação Tecnológica – CEFET, teriam um prazo para, gradativamente, ir reduzindo as matrículas nessa modalidade de ensino até sua extinção. Ao final de alguns anos teríamos apenas o ensino técnico profissionalizante direcionado para alunos egressos do ensino médio. O que fariam os professores de português, de matemática, de física? Os de matemática poderiam encontrar guarida nos cursos de informática; os de física na mecânica, na geologia, nas ciências dos materiais; os de biologia na área ambiental, por exemplo. E os das ciências humanas em geral, para onde iriam?

Logo no primeiro momento vários professores deixaram suas coordenações de origem e se transferiram para aquelas com mais afinidades com sua disciplina. Alguns, entretanto, resolveram que deveriam esperar mais e se manter na sua área. Eu fiz esta última opção, mas tratei de procurar qualificação adicional: cursos na área de petróleo,

como parte de projetos conjuntos com a Petrobrás e pós-graduação na área de energia e dispositivos térmicos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN.

O CEFET/RN nunca aderiu totalmente à proposta do governo de extinguir o curso técnico integrado ao ensino médio. Manteve turmas de ensino médio regular que depois poderiam complementar sua formação com disciplinas técnicas. A proposta foi finalmente revogada no governo atual. As disciplinas se agruparam em áreas de acordo com a organização proposta pelos Parâmetros Curriculares Nacionais. No início dos anos 2000, um novo programa governamental levou o CEFET, quase que forçosamente, à criação de cursos de licenciatura.

Ensinar a Ensinar

O curso de licenciatura em Física teve início no CEFET/RN no segundo semestre de 2002. Foi formatado a partir da interpretação de um grupo de educadores da instituição sobre o Parecer 09/2001 do Conselho Nacional de Educação - CNE. Este parecer traz sugestões para que os cursos de licenciatura adotem uma modalidade diferente daquela, segundo o texto do parecer, conhecida como “três mais um” na qual o aluno cursava três anos de disciplinas da física (praticamente um bacharelado inteiro) e mais um ano de disciplinas pedagógicas. A interpretação feita sem a participação dos professores de física quando da formatação do curso de licenciatura em física criou, em oposição aos “três mais um”, o “um mais três”. Ou seja, a proporção da carga horária entre as disciplinas era de três horas-aulas de disciplinas humanísticas para cada hora-aula de disciplinas da Física. Sendo eu o coordenador do curso à época da avaliação para o reconhecimento pelo MEC/INEP, tive que dar muitas explicações que não tinha. A proposta da equipe avaliadora foi aprovar o curso com pendência, na condição de que reformulássemos todo o projeto. Deveríamos dar especial atenção ao parecer 1.304/2001 do CNE/CES de 06/11/2001 que estabelece as diretrizes curriculares

nacionais para os cursos de física. Este parecer define o que é o físico-educador, o físico-pesquisador, o físico interdisciplinar e o físico-tecnólogo com suas respectivas funções. Nesse processo de reformulação tivemos a oportunidade de pensar detalhadamente a formação que pretendíamos dar aos nossos alunos, lembrar como foi a nossa própria formação e o que é ser um bom professor de física. Uma das nossas preocupações, enquanto professores, era possibilitar ao aluno da licenciatura o entendimento da ciência como um empreendimento humano e, como tal, sujeito a erros, dúvidas e incertezas. Um conhecimento que é construído também pelo espírito da época, pelas necessidades e anseios humanos e não somente por gênios reclusos que receberam o privilégio de ler a natureza. Essa era a hora de pensar que professor nós gostaríamos de formar e quais os meios para atingir nossos objetivos.

Dentro desta perspectiva de ensinar a ensinar, nós, professores do CEFET/RN, nos encontramos numa situação que considero privilegiada. Todos nós atuamos simultaneamente no ensino médio e na formação de professores. Temos a oportunidade de fazer a integração das duas realidades com aplicação dos conhecimentos adquiridos através de programas de monitoria, mostras de ciência e seminários. As atividades no curso de licenciatura se enriquecem pelos anos de experiência dos professores e pela proximidade intensa com os alunos e com os futuros professores. Do ponto de vista pessoal, foi essa nova perspectiva profissional que fez vir à tona alguns questionamentos sobre a disciplina e seu método de ensino como também necessidades teóricas dadas às novas demandas de extensão e pesquisa. A tese de doutorado, aqui apresentada, tem a perspectiva de suprir, em certa medida, essas necessidades.

1.2 O nascimento de uma dúvida

O meu primeiro contato efetivo com o conceito de entropia foi na universidade e a lembrança mais forte é de não ter entendido bem o significado daquela equação. Mas, tinha que seguir em frente e tentar resolver este pequeno problema de entendimento depois. O professor, por sua vez, fez um comentário rápido e passou a resolver alguns exercícios para “aplicar” o novo conceito. Nas disciplinas posteriores da licenciatura essa grandeza era citada vez ou outra, mas nunca com a ênfase e a necessidade teórica de outras grandezas como energia, por exemplo. Concluído o curso, passei a repetir o mesmo “procedimento metodológico” com respeito ao conceito de entropia, que me foi apresentado na graduação. A maior parte das vezes o conceito não era sequer mencionado, pois na época poucos livros didáticos do ensino médio tratavam especificamente deste conceito.

Na verdade, o enfoque metodológico da física, de uma forma geral, estava baseado nos modelos de resolução de problemas numéricos padrão e numa interpretação utilitarista da física como ferramenta para o ensino técnico. Se não havia questões referentes à entropia nos livros, ela simplesmente era esquecida, assim como questões não numéricas que tratassem da “obviedade” expressa na segunda lei da termodinâmica. Havia uma preocupação quase exclusiva com o resultado numérico das questões. A interpretação mais apurada das leis e princípios só veio acontecer para mim em uma fase posterior. Entretanto, estamos falando de uma das leis mais importantes da física, a segunda lei da termodinâmica, que pode ser aplicada a inúmeros processos e situações e que define um sentido preferencial para os processos naturais. Como é possível que uma lei fundamental seja tratada de forma tão desleixada? Apesar disso, naquela época, já havia no grupo de professores do CEFET/RN uma preocupação com o enfoque histórico e com a

contextualização dos conteúdos como forma de motivar os alunos. E optamos, os professores da área de física, por adotar uma metodologia de ensino baseada na proposta do GREF². Apesar dos “incômodos” causados pela antiga metodologia, só houve uma discussão significativa sobre a forma de ensinar física nas escolas de no ensino médio do estado do RN por volta de 1998. Naquele ano foram introduzidas mudanças importantes no vestibular da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Dentre elas, a que mais chamava atenção era a introdução dos conteúdos de física moderna na prova. Além dessa mudança, que para alguns parecia apenas quantitativa, no sentido de ser mais um conteúdo, houve uma mudança qualitativa importante, também, nos conteúdos de física clássica da prova. Esta deixava de ser um apanhado de questões, selecionadas dentre os inúmeros conteúdos, que exigiam essencialmente habilidades de cálculo. Dentro daquele novo enfoque, o objetivo não era apenas saber se o aluno conhecia (ou decorava) uma equação para aplicar números³. Ele passava a exigir dos candidatos conhecimentos mais sólidos quanto ao conteúdo das leis e princípios fundamentais como seus limites de validade, aplicações tecnológicas etc.

As mudanças na prova do vestibular da UFRN provocaram uma pequena revolução entre os professores de física do estado do Rio Grande do Norte. Uns exultaram, outros se revoltaram. O fato é que a nossa maneira de ensinar seria alterada, de alguma forma, a partir de então. Neste contexto, o tratamento didático das leis ganhou uma nova dimensão. Por exemplo, raramente se ouvia falar - antes da mudança - nos limites de validade das leis de Newton para o ensino médio, nas implicações da segunda lei da termodinâmica e, por sua vez, no conceito de entropia. Depois das modificações ocorridas no vestibular foi esboçado um movimento de mudança.

² GREF – Grupo de Reelaboração do Ensino de Física – USP. Este grupo propõe uma metodologia de ensino baseada na construção do conhecimento a partir do estudo de objetos tecnológicos e fenômenos naturais para as leis e princípios gerais da física.

³ Algumas questões da prova chegam, inclusive, a apresentar a equação necessária à resolução da questão.

Com a criação do curso de licenciatura em Física do CEFET/RN, me interessei pela disciplina de Termodinâmica Básica com a usual bibliografia: Halliday, Sears e Tipler. A tarefa, naquele momento, seria ensinar a quem vai ensinar. E tomei como princípio que, além de trabalhar os conteúdos de física, teria também que me preocupar em como um aluno de licenciatura, futuro professor, iria ensinar o que aprendeu. De uma forma geral, ou pelo menos no princípio da carreira, ele vai reproduzir o modo como lhe ensinaram.

Na minha atuação como professor, tanto do ensino médio como da licenciatura em física, o tópico *segunda lei da termodinâmica* passou a ser uma preocupação constante, na medida em que não me sentia satisfeito com o conjunto das minhas explicações, principalmente no que se refere a uma lógica histórica e epistemológica para a abordagem do assunto. Então, como tratar didaticamente esse assunto passou a ser o problema de todo semestre. Na tentativa de encontrar respostas para algumas dúvidas que me perseguiram, iniciei uma pesquisa em fontes outras que não os livros didáticos, como forma de obter respostas mais atuais e notei que aquele tipo de dúvida não era exclusivamente meu. A discussão abrange tanto aspectos didáticos como aspectos intrínsecos ao próprio conceito. Destaco abaixo alguns aspectos desta discussão:

A segunda lei da termodinâmica é uma das construções intelectuais mais intrigantes de todos os tempos. Desde sua primeira formulação no século XIX, tem sido fonte de discussões acaloradas entre cientistas das mais variadas origens, nos mais variados ramos da ciência. Apesar de seu foco ser os sistemas microscópicos, algumas vezes tem sido abusivamente aplicada até mesmo a fenômenos sociais, gerando interpretações que poderíamos classificar, no mínimo, como perigosas. (OLIVEIRA; DECHHOUM, 2003, p.359)

A conexão entre a 2ª lei e a irreversibilidade é um dos problemas mais profundos da Física (NUSSENZVEIG, 1981, p.252)

A entropia é o assunto mais temido na química universitária básica - por estudantes - devido a sua complexidade, por professores porque os estudantes falham em entender seus princípios básicos (LAMBERT, 2006, p.13)

Entropia não é desordem nem tem nada a ver com coisas misturadas, como cadeiras desarrumadas e cartas embaralhadas. (LAMBERT, 2006, p.13)

Essas dificuldades parecem residir na falta de correspondência entre o modelo macroscópico das leis da termodinâmica, (relações de energia que empregam grandezas fenomenológicas) e o modelo cinético molecular da matéria. Ambos modelos teóricos, um macroscópico e outro microscópico se apresentam habitualmente na sala de aula, de modo que esta falta de conexão seria em parte proveniente do ensino. (ZAMORANO et al, 2006, p.392)

De todos os conceitos difíceis da Física Clássica - aceleração, energia, campo elétrico - o mais difícil é entropia. Até mesmo Von Neumann afirmou que "ninguém realmente sabe o que é entropia". (STYER, 2000, p.1090)

Até então a questão que eu colocava se restringia a uma alternância entre explicações microscópicas e macroscópicas, apresentada pelos livros didáticos, para as leis da termodinâmica. A idéia de entropia como "medida da desordem" foi o elemento detonador de uma dúvida: como Clausius não tratou de estatística, qual a necessidade/utilidade de um conceito que só encontra aparentemente uma definição ou explicação satisfatória *a posteriori* em Maxwell e Boltzmann?

A questão de como tratar didaticamente a segunda lei da termodinâmica e seu conceito associado à entropia envolve os aspectos levantados principalmente por Viard (2005) quando lança as perguntas baseadas nos trabalhos de Carnot e Clausius como eles próprios tentaram responder:

O que é esta coisa desconhecida que aparece no campo da ciência, que analisa as relações entre propriedades térmicas e mecânicas dos corpos de acordo com Maxwell quando ele define termodinâmica?

Por que é necessário introduzir uma nova grandeza física?

Podemos atribuir um significado físico a esta nova grandeza?
(VIARD, 2005, p.02)

A respeito da questão do tratamento estatístico da entropia, Tarsitani e Vicentini (1996) comentam:

Nenhuma fórmula estatística relacionando um conceito indefinido como entropia, com outro conceito indefinido como *desordem* irá ajudar em um melhor entendimento do conceito de entropia. (TARSITANI; VICENTINI, 1996, p.61)

Com relação ao uso da metáfora da desordem na explicação do conceito de entropia, Viard (2005) argumenta, baseado em suas pesquisas com alunos de Termodinâmica e Física Estatística, que este é um *remédio que mata mais do que cura*. Em uma amostra de dez alunos, nove associaram entropia a desordem e apenas um foi capaz de responder corretamente a uma questão simples de entendimento do conceito. De forma geral, diz o autor, os alunos associam entropia à desordem espacial e esquecem a parte cinética da entropia.

Percebo aproximações entre estas questões e algumas perguntas e afirmações que coletei informalmente com meus alunos para tentar ilustrar o desconforto deles quanto às definições lacônicas apresentadas nos livros:

- ♦ Afinal, irreversibilidade não é algo assim como a gravidez? Ou é irreversível ou não é.⁴
- ♦ A queda de um ovo é mais ou menos reversível do que a queda de um prato?
- ♦ Como podemos calcular a variação de entropia da queda de um ovo?
- ♦ Se a máquina de Carnot é reversível ela tem rendimento 100%. Certo?

⁴ A pergunta se refere a uma definição, encontrada num livro didático, de entropia como "a medida da irreversibilidade dos processos".

- ♦ A entropia pode mudar de acordo com o observador? Para minha mãe, meu quarto está sempre uma bagunça, mas para mim está perfeitamente em ordem.

- ♦ O tempo passado é menos organizado que o tempo futuro, pois com o tempo futuro podemos realizar trabalho.

A questão que aqui se apresenta não é o mérito das perguntas nem as respostas que possamos lhes dar, mas, mais precisamente, o procedimento didático que conduz a elas. Frequentemente, os procedimentos que encontramos nos manuais incluem o uso concomitante de explicações microscópicas e macroscópicas para os fenômenos térmicos ou a troca abrupta entre elas.

Antes de tentar qualquer resposta fiz um levantamento preliminar em livros didáticos de Física⁵ do nível médio procurando, desta vez, identificar as minhas preocupações primeiras: o uso da história da ciência e da tecnologia como ferramentas para o ensino e o enfoque epistemológico relacionado à alternância, ou não, de visões microscópicas e macroscópicas.

Nesse levantamento, procurei identificar:

a) Se a forma de apresentação do conteúdo tem relação com o seu desenvolvimento histórico. No caso da termodinâmica, se o caráter peculiar⁶ de seu desenvolvimento histórico foi observado.

b) Se existe uma sequência epistemologicamente coerente de apresentação dos conteúdos. No caso da termodinâmica, se há superposição de visões macroscópicas e microscópicas na explicação dos conceitos.

⁵ Foram incluídos entre os livros pesquisados todos os recomendados pelo PNLEM – Programa do Livro Didático do Ensino Médio (04) além do PSSC e GREF, dois títulos com enfoques filosóficos bem definidos para o ensino de física.

⁶ Este caráter peculiar se refere ao fato de que o principal produto tecnológico, a máquina a vapor, precedeu o desenvolvimento teórico da disciplina.

c) Se o texto usa elementos da tecnologia acessíveis ao aluno como estratégia explicativa dos conceitos. Por exemplo, se é feita uma relação entre uma máquina real e a máquina de Carnot como forma de explicar a segunda lei da termodinâmica e o conceito de entropia. (ver tabela 1)

Tabela 1 – Abordagem dada à termodinâmica por livros-textos de física do ensino médio.

LIVRO/ AUTOR	Abordagem predominante da Termodinâmica			Abordagem do conceito de Entropia	
	Micro/CM	Macro/LG	Hist/Tec	Macro/FN	Micro/DES
Penteado		X			X
Beatriz Alvarenga		X	X		X
Alberto Gaspar		X	X		X
Sampaio & Calçada		X			X
Toscano		X			X
PSSC	X				
GRAF		X	X	X	

LEGENDA

Micro/CM – abordagem microscópica baseada na teoria cinético-molecular da matéria.

Macro/LG – abordagem macroscópica / Lei dos Gases.

His/Tec - abordagem fundada em elementos históricos e da tecnologia.

Macro/FN – abordagem macroscópica fenomenológica.

Micro/DES – abordagem microscópica que associa entropia à desordem.

A partir dessa análise, resumida na tabela 1, verifiquei a predominância quase absoluta da abordagem macroscópica para as leis da termodinâmica. A 2ª lei é majoritariamente explicada em termos da irreversibilidade das trocas de calor ou da impossibilidade de uma máquina térmica transformar todo calor que recebe em trabalho. No entanto, para o conceito de entropia, há uma “descontinuidade” entre dois enfoques principais: o primeiro trata apenas da irreversibilidade de alguns processos físicos, inclusive das trocas de calor e é feita uma menção de que existe um conceito que expressa essa irreversibilidade, chamado

entropia, com o complemento de que, se o processo é irreversível, ocorre um aumento de entropia. O segundo enfoque é uma tentativa de fazer tratamento microscópico com elementos estatísticos, associando o conceito à desordem dos sistemas. Vale salientar que, com exceção de dois textos, o tratamento teórico se resume a exemplos qualitativos do tipo “coisas misturadas”, ou seja, a entropia é associada meramente a uma desorganização espacial das coisas e não há referência a estados energéticos.

Embora, do ponto de vista histórico, se considere a máquina de Carnot como a fonte teórica da segunda lei⁷, não se encontra nos textos uma relação clara entre esta máquina e o conceito de entropia. O conceito de entropia aparece de forma descontextualizada, isto é, sem relação clara com o funcionamento das máquinas térmicas atuais, antigas, ou processos termodinâmicos mais gerais.

O que quero aqui salientar é que a maioria dos livros analisados faz um percurso didático essencialmente macroscópico da termodinâmica até à segunda lei. Então, repentinamente, há uma predominância quase total da explicação microscópica para a entropia. A pergunta que me fiz ao realizar esta análise foi: Existe uma razão coerente para este “salto”, ou trata-se apenas de uma maneira cômoda de dar uma explicação para algo complicado?

Com relação ao aspecto do desenvolvimento histórico da termodinâmica, me refiro ao fato do aparecimento das máquinas a vapor precederem o seu desenvolvimento teórico. Na figura 1 temos a representação de uma linha do tempo para alguns acontecimentos históricos relevantes, relativos à termodinâmica. O fato mais característico do que chamo de caráter peculiar da história da termodinâmica é que o livro no qual Carnot coloca a questão fundamental sobre o limite de

⁷ A máquina de Carnot impõe um limite teórico ao rendimento das máquinas térmicas, o que implica na impossibilidade da transformação total de calor em trabalho numa máquina cíclica. Este vem a ser um dos enunciados da segunda lei da termodinâmica.

rendimento das máquinas térmicas é publicado quase 100 anos depois do aparecimento das primeiras máquinas a vapor. Toda a revolução econômica e social desencadeada pela máquina de Watt aconteceu sem que se tivesse formalizado os princípios teóricos fundamentais da termodinâmica como o da conservação da energia ou a equivalência entre calor e trabalho mecânico.

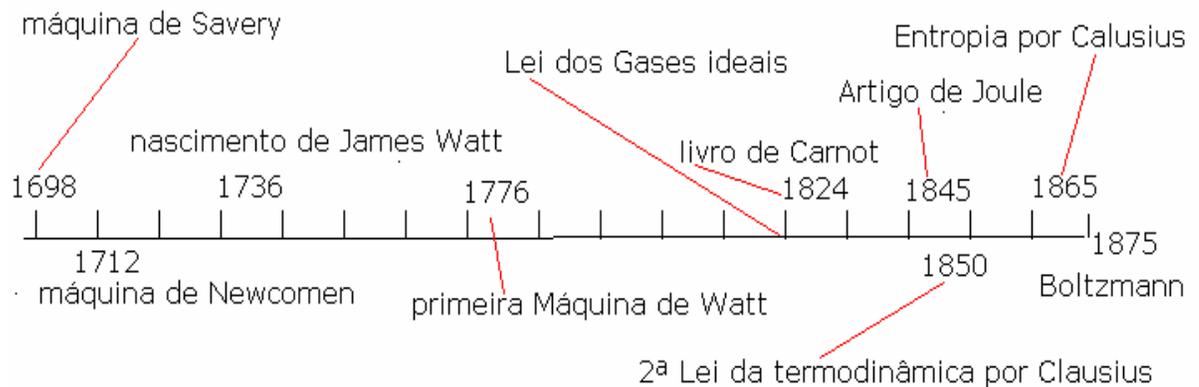


Figura 1 - Linha do tempo dos principais eventos da história da termodinâmica.

A seguir mostro, na tabela 2, uma sequência típica dos conteúdos como aparecem nos livros didáticos e as datas de suas respectivas elaborações e/ou descobertas, em contraposição à linha do tempo mostrada na figura 1. Mesmo considerando que um conteúdo não deve necessariamente ser apresentado em estrita sequência histórica, vale a pergunta sobre qual a razão de tal sequência.

Tabela 2 – Sequência típica de conteúdos da termodinâmica nos livros didáticos de Física.

1930	Lei zero da termodinâmica: tem a função de fundamentar o conceito de temperatura, mas este é também explicado como relativo à energia cinética das moléculas.
1800	Lei dos gases ideais: descreve macroscopicamente o comportamento térmico dos gases como forma de introduzir a idéia de trabalho realizado por um gás.
1845-1847	Equivalente mecânico do calor, energia térmica: trata o calor como uma forma de energia. Faz a descrição da experiência de Joule sem referência à primeira Lei.
1780	Calor específico, calor latente e capacidade térmica são aqui apresentados com uma linguagem que remete ao calor como um fluido (calórico). O objetivo é, basicamente, medir "a quantidade de calor".
1847	Primeira lei da termodinâmica: tem o objetivo de definir o conceito de energia interna e o princípio da conservação da energia.
1850	Segunda lei da termodinâmica: trata basicamente da impossibilidade de transformar integralmente calor em trabalho, numa máquina térmica.
1700	Máquinas térmicas: descreve-se o princípio de funcionamento das máquinas térmicas e os seus ciclos de transformação de calor em trabalho. Exemplo típico: o motor de combustão interna do ciclo Otto.
1824	Ciclo de Carnot.
1875	Interpretação estatística da Entropia.

A sequência apresentada nos livros didáticos, na qual há idas e vindas no tempo, poderia indicar uma ordem epistemológica coerente. Entretanto, não é o que me parece para a maioria dos livros. Os textos do GREF e PSSC (Physics Science Study Committee) assumem antecipadamente suas posições epistemológicas: o GREF assume os postulados da teoria cinética molecular clássica e o PSSC, a posição estritamente estatística. Entretanto, o primeiro negligencia uma explicação mais aprofundada da entropia e o segundo uma relação com os objetos tecnológicos e a contextualização histórica.

Da mesma forma que quase a unanimidade dos livros didáticos de física faz uso de uma associação entre entropia e "desordem", as

propostas de abordagem para um melhor entendimento da segunda lei da termodinâmica e da entropia partem da crítica a essa associação. Os autores citados anteriormente apresentam situações em que a metáfora da desordem não se aplica para, em seguida, lançarem suas sugestões.

Lambert (2002) chama a desordem de *a muleta quebrada para sustentar a entropia* e afirma que esse foi, acima de tudo, um artifício elaborado para a visualização e não *uma causa física ou teórica fundamental* para um maior valor da entropia. Assegura que a natureza da entropia é mais bem ensinada, primeiramente, pela descrição da sua dependência da dispersão da energia (na termodinâmica clássica) e pela distribuição de energia entre um enorme número de movimentos moleculares relacionados a microestados (na termodinâmica molecular). *A variação da entropia é uma propriedade dependente da energia. Esta é sua essência*, diz (LAMBERT, 2002).

Viard (2005) inicia seu artigo argumentando que normalmente, em suas explicações, os professores de Física partem de uma palavra para um conceito. Isto não funciona bem para a entropia visto que o termo não se compara a nenhum outro termo conhecido, como a palavra resistência aplicada ao conceito de resistência elétrica. No caso da entropia recorre-se à metáfora da “desordem” como estratégia explicativa, o que, segundo o autor, é “um remédio que mata mais do que cura”, como já citado.

A proposta lançada pelo autor é que alunos e professores percorram a “estrada para a entropia” traçada com trechos escolhidos dos textos originais de Carnot e Clausius. Passo a passo, vão sendo analisados os argumentos que levam a uma grandeza física necessária dentro do contexto da 2ª lei. O autor recupera, através desse caminho, uma teoria quantitativa das transformações formulada por Clausius.

A questão agora é encontrar a lei de acordo com a qual nós possamos representar matematicamente estas transformações, de modo que sua equivalência resulte da igualdade de seus valores. Podemos chamar o valor matemático de uma transformação de *valor de equivalência*. (CLAUSIUS in VIARD, 2005, P.6)

Esta grandeza é expressa então por Q/T e a segunda questão a qual o autor se dedica diz respeito ao significado físico deste quociente. A resposta encontrada por ele refere-se ao trabalho realizado pelo calor na *desagregação* das partículas do corpo (gás). A parte do calor que é transmitida de um corpo a outro sem a realização de trabalho não é abordada.

Oliveira e Dechoum (2003) fazem uma revisão da segunda lei e da máquina de Carnot como forma de esclarecer, segundo eles, pontos teóricos importantes. A entropia não é discutida enquanto conceito. Os autores partem da equação consagrada por Clausius ($dS = dQ/T$) e o objetivo é mostrar que o ensino da segunda lei se torna mais claro com o uso do diagrama ($T \times S$) o que não substitui as construções baseadas no diagrama ($P \times V$) que o estudante se depara antes de aprender o conceito de entropia. Segundo os autores, enormes ganhos didáticos são possíveis com esta forma de ensino como, por exemplo, a visualização mais clara do rendimento de qualquer máquina térmica reversível.

Baierlein (1994) propõe uma inversão temporal partindo da abordagem microscópica /estatística e chegando à equação de Clausius. Adota analogias e exemplos específicos e chega à conclusão de que *não há nada de errado em se referir à entropia como medida da desordem desde que se tenha o cuidado de relacionar desordem com falta de correlação e, portanto, com multiplicidade de estados*. Segundo o autor, é a multiplicidade que tem precisão suficiente para servir como base para uma teoria física.

A abordagem feita por Tarsitani e Vicentini (1996) envolve a construção de mapas conceituais dos principais livros-textos usados em

(cursos universitários básicos. Este trabalho tem como propósito analisar os livros sob três critérios: 1) a arquitetura conceitual do livro e a inter-relação entre os princípios (postulados) e conceitos fundamentais. 2) a relação entre o aporte fenomenológico da termodinâmica e o aporte microscópico e 3) o desenvolvimento histórico dos próprios textos didáticos que evidenciarão não apenas um aspecto histórico da termodinâmica, mas principalmente o desenvolvimento didático da disciplina. O objetivo é identificar similaridades e diferenças entre a abordagem epistemológica dos diversos textos. Por estes autores, ficamos sabendo que a forma mais comum de arquitetura conceitual dos livros didáticos é derivada do texto de Planck "Tratado sobre Termodinâmica"(1945). Esta arquitetura não faz referência ao mundo microscópico e, segundo os autores, Planck acreditava que a entropia é um conceito tão fundamental quanto a energia e deve ser entendida com base na evidência fenomenológica.

A minha atenção está voltada para a conclusão dos autores de que a maior parte dos livros que apresentam arquiteturas conceituais fenomenológicas (incluindo o Theory of Heat, de Maxwell) apresenta a hipótese da estrutura atômica como um artifício conceitual.

A hipótese da estrutura particulada da matéria é usada meramente como ferramenta intuitiva para justificar a existência de variáveis macroscópicas extensivas como energia interna e entropia. (TARSITANI; VICENTINI, 1996)

Voltemos, pois, ao ponto de partida. O conceito de entropia foi estabelecido sem a necessidade da abordagem microscópica, o que não justifica a prevalência de explicações microscópicas e conseqüentemente a metáfora de desordem. Partilho do entendimento de Planck quanto ao status dos conceitos de entropia e energia. Esta tese propõe, portanto, elementos para o tratamento didático da entropia no ensino médio que auxiliem na compreensão da importância deste conceito no corpo teórico

da termodinâmica clássica. A partir da explicação clássica macroscópica, proponho então, fazer a ponte para a interpretação estatística moderna.

As propostas didáticas dos autores apresentados acima procuram, na quase totalidade, formas alternativas de explicação para um conceito de uma maneira que me parece ainda isolada do contexto da segunda lei. A questão é, essencialmente, abordar a necessidade do conceito, como argumenta Viard (2005). Acredito também que à medida que for traçado o percurso histórico que levou ao conceito de entropia, teremos uma explicação consistente sem a necessidade de recorrer a imagens metafóricas e analogias como principal suporte explicativo. A proposta que apresento tem semelhança metodológica com a de Viard (2005) no sentido de construir uma “estrada para a entropia”. Entretanto, esta estrada não seria construída *apenas* sob um ponto de vista histórico, mas teria em sua base *momentos epistemológicos* bem definidos e internamente consistentes. Entendo que a maior parte dos problemas enfrentados no ensino da termodinâmica tem sua nascente na “salada epistemológica” apresentada pelos livros didáticos e seguida pelos professores. A construção de um percurso didático para a entropia com vias epistemológicas definidas e apropriadas para níveis de ensino ou finalidades didáticas específicas, me parece, não foi ainda devidamente considerada.

1.3 Como resolvê-la

Como visto anteriormente, um problema exemplar da dificuldade de ensino e da aprendizagem dos conceitos físicos é o conceito de entropia, no ensino médio e universitário básico. Podemos sempre encontrar na literatura alguma nova tentativa de melhorar a forma como este conceito é apresentado didaticamente. Estas tentativas me parecem sempre endógenas, ou seja, tratam de apresentar soluções internas a uma forma tradicional de apresentação do conteúdo. O olhar que é lançado sobre o problema me parece sempre insuficientemente abrangente. Na maioria dos casos estas novas tentativas não fazem referência ao uso da história da termodinâmica ou, menos ainda, à história “sob” a qual a termodinâmica foi criada. Outro aspecto também ignorado com muita frequência diz respeito ao processo de construção deste conhecimento, seu desenvolvimento enquanto uma teoria do calor e suas transformações. A história peculiar da termodinâmica⁸ me permite avaliar que um tratamento histórico e filosófico apropriado do assunto pode desempenhar um papel central no entendimento dos seus conceitos por parte dos alunos e contribuir para explicações mais consistentes por parte dos professores. Parto da avaliação das sequências didáticas comumente aceitas e usadas na maioria dos livros didáticos para questionar as situações onde existe alternância entre épocas históricas, entre explicações atomistas e energetistas do calor e alternâncias entre a visão macroscópica e microscópica da matéria. Esta situação de confusão epistemológica é, para mim, a principal fonte de problemas didáticos tais

⁸ Este ramo da Física se desenvolveu independentemente do paradigma newtoneano. Seu objeto tecnológico precedeu a uma formulação teórica que pudesse ser considerada paradigmática. Até este objeto tecnológico estar bem desenvolvido não havia uma “matriz disciplinar” que definisse generalizações simbólicas e exemplares nem um consenso da comunidade científica em torno das questões fundamentais de uma teoria do calor e de suas propriedades. (DELIZOICOV, 1991)

como imprecisões, simplificações e uso inapropriado de metáforas e analogias.

Proponho um tratamento histórico e filosófico da termodinâmica que faça relação entre desenvolvimento técnico, estrutura econômica e social e a construção do conhecimento científico, de modo a tornar mais explícita a natureza da ciência enquanto atividade humana. O objetivo embutido na proposta é fazer com que o aluno, de alguma forma, se reconheça nos problemas históricos do conhecimento científico e que possa ver a ciência também como uma “criadora de problemas”⁹ e não como o oráculo que pode prover sempre todas as respostas.

Considero o problema tratado aqui, um problema de natureza essencialmente didática: em que aspectos a história e a filosofia da ciência podem contribuir na construção de um roteiro didático para a termodinâmica de nível introdutório. Minha idéia central é fornecer elementos históricos e epistemológicos para que se possa construir um roteiro didático para o ensino do conceito de entropia que contemple três aspectos norteadores: o aluno e seu meio social como parte ativa do processo de ensino e aprendizagem; a história da ciência como fonte de busca do caráter histórico do conhecimento científico; e o corpo teórico da física tal como foi socialmente construído. Esta proposta tem claras influências do programa de pesquisa desenvolvido por Pernambuco, Delizoicov e Angotti (2002) de uma perspectiva freireana para o ensino de ciências.

Minhas experiências como professor me estimulam a organizar o conteúdo da termodinâmica em partes independentes que possam ser didaticamente consistentes e que, além disso, formem um conjunto de conhecimentos cientificamente coerente. Pensei, portanto, em três etapas para a abordagem do desenvolvimento da termodinâmica: A primeira,

⁹ A tradução para o inglês deste termo como “Troublemaker” daria um tom irônico de “encrenqueira.”

técnica, relativa ao funcionamento das máquinas compreenderia desde a invenção da máquina de Savery até a publicação do livro de Carnot; A segunda, científica clássica, no sentido que temos uma formulação teórica bem estabelecida que compreende toda a segunda metade do século XIX; E a terceira, uma explicação mecânica do comportamento térmico da matéria e o desencadeamento de uma nova forma de descrição do fenômeno físico. Este período tem início com formulação da teoria cinética dos gases e vai até o início do século XX com o nascimento da física estatística de Boltzmann. Chamo estas três etapas ou partes de MOMENTOS HISTÓRICO-EPISTEMOLÓGICOS (MHE) e tratarei de descrevê-las e analisá-las nos capítulos que se sucederão.

Quando iniciei este estudo, os momentos estavam “carregados” da perspectiva do desenvolvimento histórico com base na sequência de fatos e na procura de uma coerência entre estes fatos. No decorrer do trabalho, a perspectiva filosófica de cada momento foi sendo construída, tanto com base na minha “intuição” de que eles eram cientificamente coerentes, quanto a partir de elementos da filosofia de Gaston Bachelard a propósito da maneira como se dá o desenvolvimento do conhecimento científico, da qual fui me aproximando cada vez mais. Considero fundamental à construção deste trabalho a suposição de que o processo de aquisição de conhecimento por parte dos alunos pode ser consideravelmente facilitado pela aproximação que possa ser feita entre este e a maneira de produção da ciência pelos cientistas. Porquanto se trata essencialmente do ato de conhecer e de transformar conhecimento comum em conhecimento científico.

Construí a idéia dos três MHE com a intenção de que seja possível também estudar a termodinâmica sob a ótica do conceito de entropia. Deste modo, este conceito estará presente em cada momento de modo que tenhamos a condição de observar o seu desenvolvimento ao longo dos três períodos. Para tanto, quero deixar, na descrição de cada

momento, indícios de questões que impliquem na necessidade do conceito para a completude de uma teoria do calor.

No capítulo a seguir abordo os três MHE com suas principais características históricas e científicas. No capítulo três revisitarei os momentos históricos epistemológicos com o objetivo de procurar uma correlação entre os fatos históricos e científicos apresentados e os diversos aspectos da epistemologia Bachelardiana. Meu objetivo é propor para o ensino da termodinâmica e, particularmente, para o conceito de entropia uma ferramenta epistemológica que possibilite trazer o aluno, com seus conhecimentos e suas concepções sobre a natureza e a tecnologia, para o centro do processo de aprendizagem. Que este aluno possa ter acesso a um conhecimento científico legítimo em termos de sua historicidade, do seu caráter provisório e de sua significação humana e social.

1.4 Por que Bachelard

A escolha de Gaston Bachelard como principal referencial teórico deste trabalho nasceu de alguma lembrança ancestral da minha passagem por um curso de filosofia e por leituras esporádicas deste filósofo. A parte da sua epistemologia mais guardada na minha memória é um quadro explicativo da idéia de um “racionalismo aplicado”. Este seria o ponto de equilíbrio entre duas visões epistemológicas extremas – o realismo e o idealismo - na construção do conhecimento científico. Esta memória é forte, talvez, por romper com uma postura dualista cartesiana ostensiva, na filosofia de modo geral e na filosofia da ciência em especial, para a qual eu muitas vezes não via uma saída plausível. O papel da técnica como mediadora entre o racional e o real parecia vir ao encontro do antigo desejo manifestado desde o tempo da construção dos brinquedos na infância até a minha compreensão do que seja ensinar ciências. Ou seja, da construção dos brinquedos às aulas de física.

Minha prática como professor também indicava a importância da história da ciência no processo de aprendizagem. Em Bachelard me deparei com uma epistemologia intrinsecamente histórica. Ele nos diz que o conhecimento científico se constrói a partir da reparação dos erros históricos. Deste modo *só podemos efetuar uma reflexão crítica sobre a produção dos conceitos ao nos debruçarmos sobre a história das ciências* (LOPES, 1996). Comecei, então a construir uma conexão entre história e epistemologia que me parecia necessária na idealização dos “momentos históricos epistemológicos”, estes ainda sem uma estrutura definida. A idéia de traçar o caminho do conceito de entropia desde seu nascedouro como forma de torná-lo significativo para o ensino de física se mostraria compatível com a epistemologia de Bachelard na medida em que esta

permitiria perceber quais as retificações feitas, quais os obstáculos e as rupturas epistemológicas presentes. Lopes (1996) nos diz que, na epistemologia de Bachelard, a ciência é um processo de produção da verdade; é o trabalho dos cientistas no processo de reorganização da experiência em um esquema racional.

A importância conferida por Bachelard ao erro e ao pensamento que os alunos trazem da sua experiência de vida me parece também apropriada para uma situação de ensino. A idéia é que precisamos errar em ciência, pois o conhecimento científico só se constrói pela retificação desses erros. Os erros, que normalmente são desprezados pelos professores, mostram-se sob outro ponto de vista: não o do erro simétrico da verdade, mas o dos obstáculos epistemológicos. Estes se constituem em elementos próprios do pensamento que devem ser considerados não como pertencentes ao objeto científico ou à fraqueza dos sentidos humanos, mas intrínsecos ao ato mesmo de conhecer. A forma de superação desses obstáculos é o que Bachelard chama de psicanálise do conhecimento objetivo. Os obstáculos epistemológicos se encontram no domínio do conhecimento comum, do mundo dado, constituído por fenômenos. Por outro lado, o conhecimento científico se estabelece em um mundo recomeçado, estruturado em uma fenomenotécnica. (LOPES, 1996). A diferença entre fenômeno e fenomenotécnica está em que o fenômeno é o real dado, o mero evento, sem um componente racional estruturado em uma fenomenotécnica. Esta se constitui na capacidade de não apenas explicar fenômenos, mas de produzi-los. O fato só é científico quando pode ser produzido artificialmente.

Na análise de Canguilhem, citado por Lopes (1996), encontrei uma justificativa preciosa para a minha proposta de construir um percurso histórico para a entropia: *Na medida em que a história das ciências é uma história julgada, esse julgamento se faz através da análise dos obstáculos epistemológicos. Tal análise é que permite à história das ciências ser autenticamente uma história do pensamento.*

Este ponto de vista, a meu ver, coloca uma luz sobre o papel da história da ciência no ensino: a reconstrução de uma história do pensamento. Esta reconstrução aponta para questões outras como o caráter significativo do conhecimento científico e os processos cognitivos no ensino de ciências. Tomando estes aspectos do pensamento de Bachelard, acredito ter organizado uma estrutura teórica para a construção dos três momentos históricos epistemológicos que estão na base da proposta desta tese. Posteriormente, ou talvez tardiamente, no processo de construção deste trabalho, tive a oportunidade de conhecer mais um aspecto da epistemologia de Bachelard que complementa o processo de psicanálise do conhecimento objetivo: a noção de perfil epistemológico. Bachelard argumenta em seu livro *A Filosofia do Não* que os conceitos científicos estão sujeitos a um processo de evolução idêntico:

Pode-se discutir muito acerca do progresso moral, do progresso social, do progresso poético, do progresso da felicidade; existe, no entanto um progresso que é indiscutível; o progresso científico, considerado como hierarquia de conhecimentos no seu aspecto especificamente intelectual. (BACHELARD,1978, p.12)

A evolução de um conceito científico se dá por sua passagem através das doutrinas filosóficas, numa ordem estabelecida: animismo – realismo – racionalismo tradicional(positivista) – racionalismo complexo – racionalismo dialético. O autor nos dá o exemplo do conceito de massa que vai desde a sua associação ao volume do corpo – quanto maior, mais pesado, melhor, mais gostoso etc; passa pelo empirismo do uso da balança como um instrumento ainda não racionalizado; depois atinge um estágio racional, com a mecânica de Newton, no qual passa a ser entendido como uma relação matemática entre outras duas grandezas. É um padrão de definição do pensamento científico, juntamente com o espaço e o tempo. O passo seguinte, o racionalismo complexo, é quando a massa encara uma “abertura” na sua concepção, passa a ter uma *estrutura funcional interna, ao passo que até então todas as funções da*

noção de massa eram de certo modo externas, que só se encontravam em composição com outras noções simples. (BACHELARD, 1978, p.18)

Estamos no domínio da relatividade onde a massa de um corpo depende da velocidade deste corpo:

A relatividade descobre que a massa, outrora definida como independente da velocidade, como absoluta no tempo e no espaço, como base de um sistema de unidades absolutas, é uma função complicada da velocidade. (BACHELARD, 1978, p.18)

A ultima estação da viagem do conceito de massa através das doutrinas filosóficas se estabelece na mecânica surracionalista de Dirac, como a denomina Bachelard, ou num racionalismo dialético. Aqui encontramos uma noção aparentemente estranha de massa negativa que praticamente não contém traços de uma realidade palpável, mas encontra um fundamento experimental na descoberta do elétron positivo.

Quero enfatizar que este projeto de elaboração dos três momentos histórico-epistemológicos objetiva traçar uma evolução do conceito de entropia paralela à evolução do conceito de calor na termodinâmica aos moldes de um perfil epistemológico sugerido por Bachelard. Dividi o conteúdo da termodinâmica em três partes - os três momentos histórico-epistemológicos - que, embora não se refiram a doutrinas filosóficas específicas, foi uma tentativa de colocar cada um deles o máximo possível dentro de correntes de pensamento.

Este processo já estava em construção quando me deparei com a noção de perfil epistemológico, que forneceu um ponto de vista mais abrangente para o trabalho. Acredito que os três momentos: um técnico, um científico e outro, digamos, pós-científico são adequados ao propósito didático deste trabalho, mesmo sabendo que um conceito científico, em seu processo de evolução, passa por um número maior de doutrinas filosóficas, com maior ou menor intensidade. A noção de perfil epistemológico se constitui em mais uma ferramenta especializada que

ajudará a compor estes momentos e não uma receita a ser seguida "religiosamente" até porque o perfil epistemológico tem um carácter pessoal, como deixa claro o próprio Bachelard.

2 A origem da termodinâmica

“A ciência deve mais à máquina a vapor do que a máquina a vapor à ciência”

L.J. Henderson
(1878- 1942)

Neste capítulo descreverei as três etapas do caminho para a entropia que denominei momentos históricos-epistemológicos. A construção desta descrição indica uma sequência didática para a termodinâmica introdutória. Não há necessariamente uma sequência cronológica dos fatos aqui descritos, mas acima de tudo procurei encontrar uma coerência de natureza epistemológica para o assunto.

2.1 Os primórdios: Carnot

Este primeiro momento histórico-epistemológico é caracterizado pelo desenvolvimento técnico, quase artesanal, da máquina a vapor. Cronologicamente se inicia por volta de 1690 com a tentativa de resolver um problema de engenharia: retirar a água que inundava as minas de carvão da Inglaterra. Para isto foram criadas as primeiras bombas a vapor que deram origem ao uso do calor como propulsor de máquinas. Veremos que o momento se apresenta como pré-paradigmático para a ciência do calor, tanto em relação a sua natureza física quando às suas propriedades de geração de trabalho nas máquinas.

O uso do carvão como combustível na Inglaterra foi intensificado já na segunda metade do século XVI com a crescente escassez de madeira e conseqüente elevação do seu preço. Embora o carvão fosse um combustível que as pessoas evitassem usar devido ao mau cheiro que exalava quando queimado, não houve alternativa. Pequenas e médias indústrias como vidraçarias, cervejarias e olarias e até mesmo consumidores domésticos, tiveram que aderir ao combustível fóssil mais barato e abundante. Segundo Debier; Deléage; Hémerly (1993), o fato de a população inglesa ter dobrado entre 1530 e 1700 foi crucial para que uma crise energética se instalasse neste período, o que levou à mudança de hábitos de consumo de energia naquele país. Os autores consideram que a troca da madeira por carvão se constitui em uma verdadeira

revolução energética visto que marca a passagem da utilização em larga escala de energias renováveis como madeira, vento e água para o uso de combustíveis fósseis não renováveis.

Este foi sem dúvida, um ponto capital na supremacia manufatureira e mercantil que [a Inglaterra] conquistará e uma das fontes essenciais de acumulação capitalista inglesa, considerando-se o excedente produzido pela troca desigual que vai estabelecer-se, desde então, entre mercadorias industriais produzidas graças a um fluxo crescente de energia fóssil e produtos agrícolas importados. (DEBIER; DELÉAGE; HÉMERY, 1993, p.152)

Não foi necessariamente o uso em larga escala de máquinas a vapor que desencadeou a utilização de grandes quantidades de carvão mineral. A máquina a vapor foi parte de uma solução para o já crescente consumo do combustível. O primeiro fator a impulsionar o uso do carvão foi seu uso nas fundições, que precisou de adaptações tecnológicas para se tornar viável. Este uso na indústria do ferro fez aumentar a demanda pelo combustível já que a indústria metalúrgica crescia a passos largos com a mecanização da indústria têxtil. A indústria têxtil usava como força motriz principalmente as correntezas dos rios e desníveis de água para funcionar suas máquinas. A máquina a vapor aparece pela primeira vez no contexto da revolução industrial como elemento auxiliar no bombeamento de água para elevação dos níveis dos reservatórios. Era uma forma de melhorar o desempenho das máquinas hidráulicas.

O segundo fator para o incremento no uso do carvão foi seu baixo custo de produção e de transporte. A escassez da madeira fez com que as fontes ficassem cada vez mais distantes e a estrutura precária das estradas encarecia o transporte. As bases das ferrovias nasceram da criação de trilhos nas minas de carvão onde os carros de transporte de minério se moviam. Estes trilhos foram se estendendo para fora das minas, o que mais adiante viria a se tornar uma grande rede de transporte de carga e de passageiros.

A manufatura do algodão se desenvolvia rapidamente com a invenção de novas e maiores máquinas movidas à força hidráulica, à energia dos ventos, e à força animal. A força humana era usada em pequenas máquinas domésticas visto que uma importante parte das tarefas desta indústria era feita por famílias em suas casas usando estas pequenas máquinas manuais. Com esta matriz energética as exportações britânicas de tecido de algodão se multiplicaram por dez entre 1750 e 1769. A tecnologia necessária até então no processo de mecanização da indústria estava bem estabelecida pelo conhecimento dos processos essencialmente mecânicos usados nas rodas d'água, teares etc. A mecânica de Newton era a base teórica predominante nestes processos.

Fonte: <http://www.gutenberg.org>

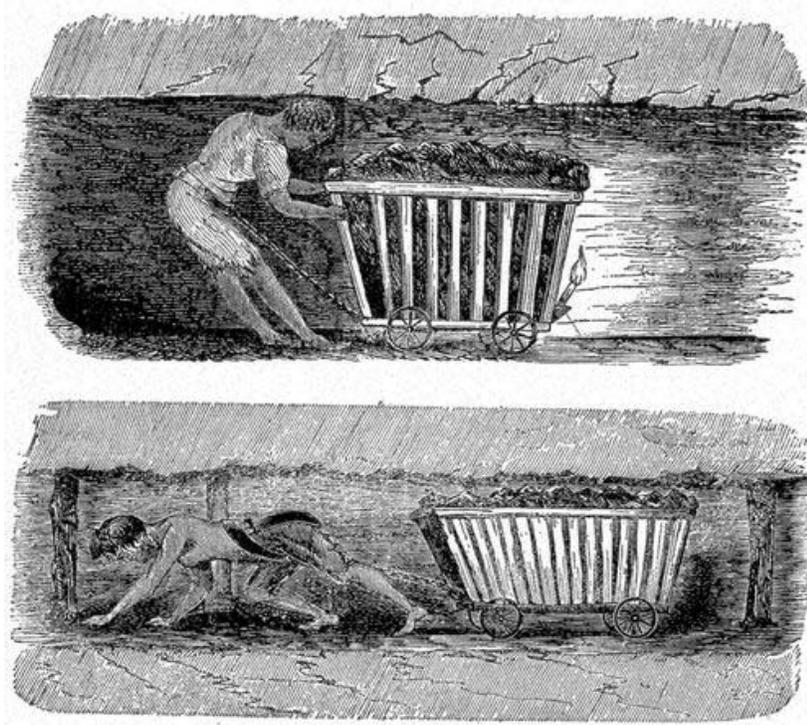


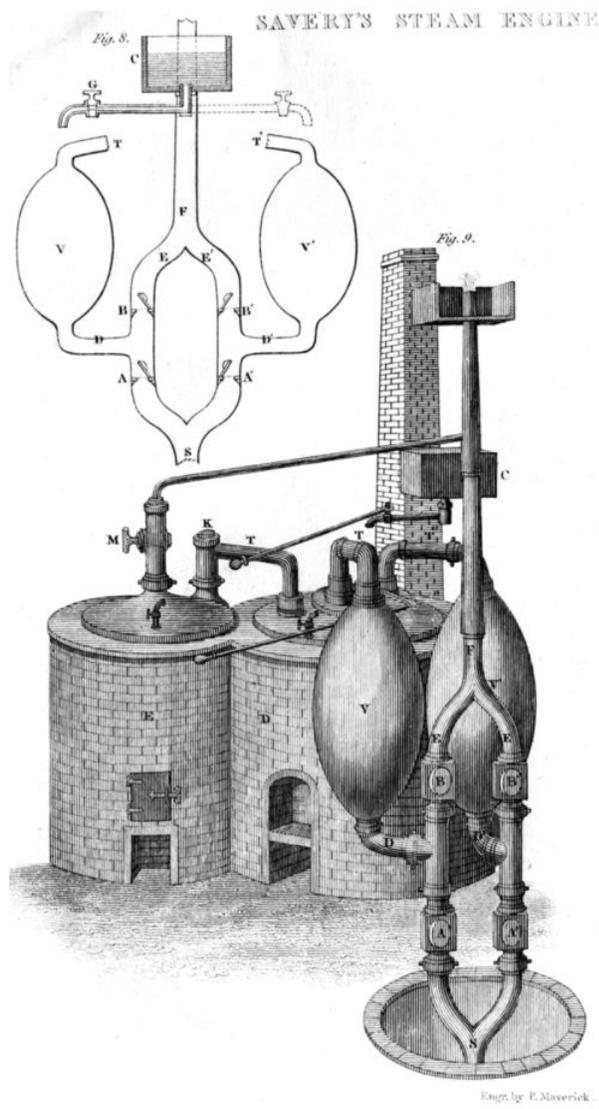
Figura 2 - Trabalho degradante de crianças e mulheres nas minas de carvão da Inglaterra no séc. XVIII. As crianças e as mulheres eram preferidas pela menor probabilidade de revolta contra as condições de trabalho.

A demanda sempre crescente pelo carvão tornou as minas cada vez mais profundas, o que gerava problemas de inundações, ventilação e transporte do minério até a superfície. A possibilidade de produzir altas e

baixas pressões usando vapor fez com que fossem tentadas soluções de máquinas que usassem a força de expansão e de condensação do vapor para realizar o trabalho de bombear água. Para isso foram importantes os conhecimentos sobre o comportamento dos fluidos e pressão atmosférica.

Considera-se que primeira bomba construída com a finalidade de retirar água das minas deveu-se ao engenheiro militar Thomas Savery. Esta máquina foi por ele chamada "amiga dos mineiros". Este era também o título do seu livro. Não se sabe ao certo quantas destas máquinas foram construídas e quantas delas funcionaram satisfatoriamente. O mais provável é que não tenham sido usadas exceto como modelos de demonstração.^A

Apesar do provável fracasso da máquina de Savery, a indústria precisava constantemente de carvão e as minas não podiam parar.



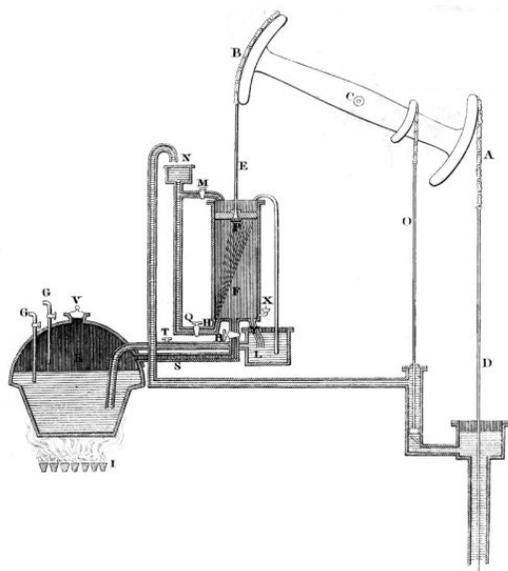
Engr. by P. Maverick. Fonte: <http://www.kuhf.org>

Figura 3 – Máquina a vapor de Savery construída com a finalidade de retirar água das minas de carvão.

A primeira bomba atmosférica a vapor técnica e economicamente viável e, portanto, usada comercialmente, foi a Máquina de Thomas Newcomen em 1712¹⁰. A máquina de Newcomen foi extremamente importante. *Foi talvez a primeira grande invenção feita por um inglês que levou à supremacia da tecnologia britânica que duraria cerca de 150 anos* (CARDWELL, 1971, p.15).

¹⁰ Foi a primeira máquina a usar o sistema de cilindro e pistão para realizar trabalho, princípio de funcionamento que persiste até hoje nos motores de combustão interna.

A natureza da entidade física que a fazia funcionar era desconhecida. Fosse fogo ou calor, não era decisivo desde que a máquina fosse capaz de realizar o trabalho. Por isso era popularmente conhecida como máquina de fogo. Ao contrário da máquina de Savery, esta já contava com um sistema básico de automação e controle; as válvulas abriam e fechavam automaticamente, o que minimizava os perigos para um operário trabalhando constantemente próximo à máquina com vapor a altas temperaturas e pressões.^B



Fonte: <http://www.kuhf.org>.

Figura 4 – A Máquina a vapor de Newcomen foi a primeira máquina a vapor viável para uso industrial.

Como podemos notar, Debier; Deléage; Hémery defendem uma posição que coloca a disponibilidade de uma nova fonte energética como a causa principal da futura supremacia econômica inglesa para o estabelecimento de um novo modelo econômico mundial. Hobsbawm (2007a) prefere olhar as razões políticas e sociais que contribuíram para o fato. Algumas condições para que a revolução industrial acontecesse na Inglaterra naquele momento são apontadas por este autor:

O lucro privado e o desenvolvimento econômico tinham sido aceitos como os supremos objetivos da política governamental [...] A política já estava atrelada ao lucro. O dinheiro não só falava como governava. Tudo que os

industriais precisavam para serem aceitos entre os governantes da sociedade era bastante dinheiro. (HOBBSAWM, 2007a, p.55)

Outra questão levantada por Hobsbawm que considero importante é localizar no tempo o fato ou os fatos que indicaram que uma revolução industrial havia se instaurado.

O que significa a frase, *a revolução industrial explodiu?* Significa que a certa altura da década de 1780; pela primeira vez na história da humanidade, foram retirados os grilhões do poder produtivo das sociedades humanas, que daí em diante se tornaram capazes da multiplicação rápida, constante e até o presente ilimitada, de homens mercadorias e serviços. ...Nenhuma Sociedade anterior tinha sido capaz de transpor o teto que uma estrutura social pré-industrial, uma tecnologia e uma ciência deficientes, e conseqüentemente o colapso, a fome e a morte periódicos, impunham à produção (HOBBSAWM, 2007a, p.50)

Localizar o início da revolução industrial na década de 1780, como o faz Hobsbawm, significa reconhecer um período de cerca de 70 anos após a construção da primeira máquina térmica viável (de Newcomen), e cerca de 10 anos após o lançamento da máquina de Watt, o que indica que além da máquina a vapor, outras condições tiveram que ser atendidas para a consolidação do novo sistema de produção nas dimensões necessárias para criar um novo sistema fabril. Para dar uma idéia, *a primeira máquina a vapor encomendada para um trabalho que não era bombear água foi feita pelos Wilkinson em 1775* (DEBIER; DELÉAGE; HÉMERY, 1993, p.160), ou seja, poucos anos antes da nova década na qual Hobsbawm situa *a libertação das sociedades humanas dos grilhões do poder produtivo*. A máquina a vapor teve papel importante na expansão mundial de uma revolução que inicialmente era restrita à Inglaterra.

Outro ponto de vista que quero enfatizar é o estado da produção de conhecimentos científicos e tecnológicos capazes de influenciar, ou não, a revolução industrial na Inglaterra. Quanto a isto Hobsbawm não poderia ser mais claro nas suas afirmações:

Qualquer que tenha sido a razão do avanço britânico, ele não se deveu à superioridade tecnológica e científica. Nas ciências naturais os franceses estavam seguramente à frente dos ingleses, vantagem que a Revolução Francesa veio acentuar de forma marcante, pelo menos na matemática e na física, pois ela incentivou as ciências na França, enquanto a reação suspeitava delas na Inglaterra. [...]

Oxford e Cambridge, as duas universidades inglesas, eram intelectualmente nulas [...]

Os alemães possuíam instituições de treinamento técnico como a *Bergakademie* prussiana, que não tinham paralelo na Grã-Bretanha, e a Revolução Francesa criou um corpo único e impressionante, a *École Polytechnique*. [...]

A educação inglesa era uma piada de mau gosto, embora suas deficiências fossem um tanto compensadas pelas duras escolas do interior e pelas universidades democráticas turbulentas e austeras da Escócia calvinista. [...]

Felizmente poucos refinamentos intelectuais foram necessários para se fazer a revolução industrial. Suas invenções técnicas foram bastante modestas e sob hipótese alguma estavam além dos limites de artesãos que trabalhavam em suas oficinas ou das capacidades construtivas de carpinteiros, moleiros, e serralheiros. (HOBSEAWM, 2007a, p.52-53)

Vejamos então um pouco do panorama científico do período no que diz respeito a uma ciência do calor. A escala termométrica Fahrenheit foi criada em 1720 e a escala Celsius em 1742. Construía-se termômetros para experiências com dilatação de sólidos, líquidos e vapor. Havia um interesse especial sobre as propriedades deste último, entretanto eram estudos essencialmente empíricos que se direcionavam mais precisamente a uma utilização nas máquinas térmicas. Havia uma idéia inicial sobre capacidade térmica¹¹. Conhecía-se, já de algum tempo, a relação entre temperatura e volume de um gás e o princípio de conservação do calor era referido sem maiores preocupações como conservação do fogo. Apenas em 1756 William Cullen observou que a água ferve a temperaturas mais baixas quando submetida a pressões mais baixas e as

¹¹ A capacidade térmica expressa o aumento de temperatura experimentado por corpos diferentes quando recebem a mesma "quantidade de calor".

discussões de Black sobre calor latente de vaporização¹² só apareceriam por volta de 1760.

O calor era referido indiscriminadamente como fogo, calórico ou calor. Obviamente, havia nos espíritos científicos a necessidade de encontrar uma resposta para a natureza própria do calor. Entretanto, por volta de 1760, Joseph Black afirmou que *as discussões sobre a natureza do calor não seriam muito úteis no presente estado do conhecimento* (Cardwell, 1971). Por outro lado, embora a disputa em alguns meios acadêmicos a respeito das duas visões do calor fosse bastante acirrada, aparentemente ela não chegava aos ambientes industriais. Black foi responsável pelas primeiras idéias de capacidade térmica e chegou bem perto do conceito de calor específico. Foi o responsável pelo conceito de calor latente para o qual desenvolveu experimentos e argumentos claros. Ele era professor na universidade em que James Watt trabalhava como técnico construtor de aparelhos científicos. Como não fazia parte da elite, Watt dificilmente teria um cargo de professor na rígida sociedade de classes inglesa. Era, portanto, um artesão qualificado. Entretanto, Watt tinha bom trânsito com o Professor Black, muito provavelmente devido a seu excepcional talento. Os estudos de Watt sobre a máquina a vapor começaram com a tarefa de consertar um modelo em escala reduzida da máquina de Newcomen que era usada em aulas de ciências naturais, mas que, por alguma razão, não era capaz de manter um funcionamento contínuo. Foi do estudo deste modelo reduzido de uma máquina de Newcomen que James Watt desenvolveu as idéias para sua primeira máquina lançada em 1776, mais de 60 anos após o aparecimento da máquina de Newcomen.

A natureza revolucionária do desenvolvimento feito por James Watt na máquina a vapor se deu a partir de um problema fundamental da

¹² Calor latente de vaporização é a grandeza que expressa a quantidade de calor necessária para evaporar determinada quantidade de uma substância. Neste caso o interesse principal era a água.

máquina de Newcomen. O vapor, ao chegar ao cilindro, recebia um jato de água fria para condensar-se e produzir o vácuo. Portanto, quanto mais fria fosse esta água e quanto mais frio o cilindro estivesse, melhor para o rendimento da máquina. No próximo ciclo, o novo vapor que chegava ao cilindro precisaria encontrá-lo quente para produzir a máxima expansão possível. Entretanto, iria encontrá-lo frio. Isto levava à condensação parcial do vapor antes mesmo dele empurrar o pistão para continuar o ciclo, ou seja, parte do vapor condensava antes de realizar o trabalho, reduzindo sensivelmente o rendimento da máquina, como foi constatado por Watt. Se quisermos resumir isto na forma de um problema técnico podemos dizer que para se obter o rendimento máximo o mesmo cilindro deveria estar bem frio em um dado momento e bem quente, logo imediatamente depois.

A solução encontrada por ele foi usar dois cilindros, um sempre quente e outro sempre frio.¹³ O cilindro quente recebia o vapor e o enviava para o condensador onde ele seria resfriado produzindo o vácuo¹⁴. A invenção do condensador é citada em toda a literatura como a inovação revolucionária que permitiu à máquina de Watt se tornar imprescindível em qualquer projeto industrial da época.

Assim como não existia algo como uma ciência formal que explicasse a natureza do calor, tampouco existia uma termodinâmica que permitisse quantificações e previsões sobre o processo de transformação de calor em trabalho. Como consequência, tornava-se difícil pensar antecipadamente no consumo de carvão ou rendimento das máquinas de forma segura. Os melhoramentos eram feitos na medida em que as máquinas iam sendo construídas. Para a máquina de Watt, foi realizado

¹³ São as chamadas “fonte quente” e “fonte fria”, comumente referidas nos livros didáticos de física, sem que o aluno saiba exatamente a razão da sua importância.

¹⁴ O detalhamento deste procedimento, como também a descrição dos processos experimentais realizados por Watt são, a meu ver ferramentas, didáticas poderosas. Nelas podemos ver o nascimento das idéias posteriormente desenvolvidas por Carnot: a separação entre as fontes quente e fria e a manutenção das temperaturas dessas fontes o mais constante possível como forma de obter máximo rendimento.

um primeiro conjunto de procedimentos experimentais anteriores à sua construção com o objetivo deliberado de melhorar o rendimento. James Watt, apesar de não possuir formação acadêmica utilizou dados científicos e realizou experimentos coerentes com a atividade científica. ^C

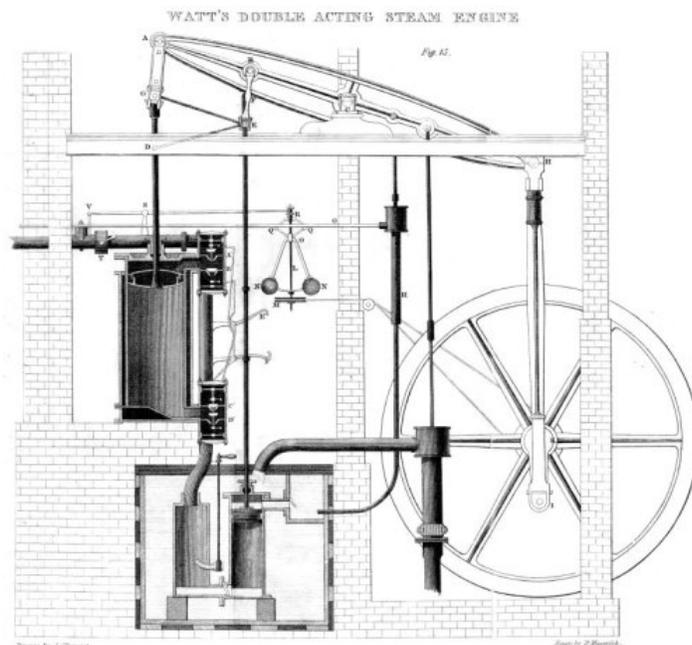


Figura 5 – Máquina a vapor de Watt

Fonte: www.kuhf.org/cdprojects/steam/images/1784wattengine.jpg

Como foi possível fazer funcionar uma máquina térmica ou mesmo fazer uma revolução industrial com tão pouca termodinâmica? Só mesmo à custa de muito carvão. O rendimento estimado de uma máquina de Newcomen não era superior a 1%¹⁵. Apesar desse rendimento irrisório, uma máquina a vapor ainda podia produzir 30 vezes mais que um operário. Esta é uma razão tecnológica para a superioridade mercantil inglesa e para o desenvolvimento posterior das máquinas a vapor.

¹⁵ O rendimento de uma máquina é a relação entre o consumo de energia e o trabalho realizado. Nesse caso, do calor produzido por 100 kg de carvão colocados na máquina, apenas o correspondente a 1kg iria resultar em trabalho útil, o restante era desperdiçado na própria máquina e lançado ao ambiente. Nos dias atuais o motor de um automóvel tem rendimento de aproximadamente 20%, enquanto um motor elétrico tem rendimento de mais de 80%.

Entre 1750 e 1769 a exportação Britânica de tecidos de algodão aumentou mais de dez vezes. Assim a recompensa para o homem que entrou primeiro no mercado, com as maiores quantidades de algodão era astronômica e valia os riscos da aventura tecnológica. (HOBBSAWM, 2007a, p.59)

Do ponto de vista tecnológico não importava saber qual a natureza própria do calor: se uma substância sutil nomeada por Lavoisier como calórico ou se uma causa dinâmica devida ao movimento das partículas dos corpos. A concepção substancialista do calórico prevalece, em parte, devido à influência dos químicos franceses e suas recentes descobertas. E porque a concepção de calor como movimento das partículas tinha, além de outros problemas, um pequeno enigma: é o movimento das partículas que produz calor ou é o calor a causa deste movimento?¹⁶ Cardwell (1971) argumenta que a teoria do calórico tinha uma "lei de conservação" na qual ele não pode ser destruído nem criado¹⁷, enquanto a dificuldade principal da hipótese mecânica do calor é justamente a falta desta mesma lei de conservação.

Estamos ainda na segunda metade do século XVIII e esta questão só seria satisfatoriamente resolvida com o artigo de James Joule em 1845. A questão sobre a qual todos concordavam com respeito ao calor era que fosse qual fosse sua natureza física, este se conservava. Esta noção de conservação, se tomarmos por base a teoria prevalecente do calórico, se baseava mais em idéias substancialistas que normalmente atribuem perenidade, imutabilidade e outros atributos especiais aos fluidos e éteres e não propriamente em medidas e experimentos deliberadamente realizados para determinar algum parâmetro de convertibilidade. As intuições e aproximações eram comuns e, neste caso, influenciadas pelas características atribuídas à substância do calórico.

¹⁶ Para um detalhamento da teoria do calórico e o embate com a teoria mecânica do calor ver Aurani (1986).

¹⁷ Este princípio de conservação era plenamente aceito e tem raízes muito mais antigas na ciência.

Nas duas primeiras décadas do século XIX havia muitas especulações sobre a natureza do calor, como também uma profusão de inventos como máquinas de ar, máquinas de fogo, de água e combinações destas. A meteorologia já entendia o calor como a causa geral dos fenômenos atmosféricos, correntes marinhas etc. A força motriz do ciclo hidrológico foi entendida como sendo o calor. A geologia, que estava nos seus primórdios, destacava também o calor como responsável por erupções e movimentos sísmicos. Começava-se a reconhecer uma máquina cósmica do tipo do relógio cósmico sugerido por Descartes, Newton e Galileu e o combustível fundamental para a máquina cósmica era o calor. Depois do aparecimento das máquinas a vapor, a partir do qual este poder do calor ficou muito mais visível do que a evaporação da água dos lagos e oceanos, passou a pairar sobre o mundo a idéia do imenso poder do calor. *A impressão causada pela locomotiva colocou o vapor e seu agente, o calor, no centro das atenções: o calor como motor básico do mundo* (CARDWELL, 1971, p.188). Deve ter contribuído também para isso o estupendo desenvolvimento econômico que acontecia na Inglaterra.

Uma teoria do calor começava a se desenhar no horizonte pela constatação de que o princípio de funcionamento das máquinas térmicas era muito diferente daquele das leis do movimento de Newton. Seria o primeiro ramo da física teórica a não estar baseado nas leis do movimento de Newton (CARDWELL, 1971). O que levou necessariamente à ciência da termodinâmica foi a máquina a vapor, pois os fenômenos meteorológicos e geológicos eram relativamente sutis enquanto as máquinas causaram uma mudança radical no estilo de vida das pessoas comuns. O que chama a atenção é o discernimento que um cientista deveria possuir, na época, para escolher dentre tantas possibilidades que se abriam no cenário do conhecimento técnico e das invenções, aquela que seria viável transformar em algo que se pudesse chamar de ciência. Mas foi isto o que

fez Léonard Sadi Carnot (1796-1832), talvez influenciado pelo aspecto econômico e político das máquinas a vapor, ao qual ele mesmo refere.

Tratarei a seguir dos aspectos científicos do livro de Carnot que caracterizam esta obra como o marco inicial de uma teoria termodinâmica. Esta exposição tem por objetivo principal evidenciar a síntese realizada por Carnot depois de aproximadamente um século de uso da máquina térmica e também dar um termo de conclusão a este primeiro MHE. Levantarei os aspectos da física de Carnot que originaram os conceitos e leis fundamentais válidos até hoje. É dentro desta exposição que pretendo indicar a importância de seus estudos para o ensino da termodinâmica atual. Se nesta obra está a gênese da termodinâmica enquanto construção teórica, nada mais legítimo do que enfatizar quais questões, métodos e soluções que ela apresenta para ser considerada como tal. Além do que, o papel periférico oferecido ao estudo do ciclo de Carnot na Física do ensino médio e universitário básico será questionado justamente a partir dos elementos apresentados aqui. Outra razão para que esta exposição seja feita é o resgate histórico, fundamental na elaboração do percurso didático para a entropia. E mais fundamentalmente oferecer condições para a posterior caracterização dos obstáculos epistemológicos presentes.

Nicolas Léonard Sadi Carnot foi um dos frutos da École Polytechnique citada por Hobsbawm como um exemplo da superioridade científica e tecnológica francesa no século XVIII.¹⁸ O seu livro "*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur lês machines propes a développer cette puissance*" (1824) é considerado o marco do nascimento da termodinâmica como ciência.

¹⁸ Entre os professores da Escola podemos citar Lagrange, Fourier, Laplace, Ampère, Malus e Dulong; entre estudantes que se tornaram professores estavam Coriolis, Poisson, Gay-Lussac, Petit e Lamé; outros estudantes foram Fresnel, Biot, Carnot (Sadi) e Clayperon.

No momento em que o livro foi lançado, a máquina térmica já era uma realidade tecnológica e comercial com mais de cem anos de uso. Já tinha uma importância política que ia além da simples competitividade comercial, como enfatiza Carnot:

As máquinas a vapor já trabalham em nossas minas, impelem nossos navios, escavam nossos portos, forjam ferro, carregam as mais pesadas cargas etc. (CARNOT, 1988, p.3).

Tirar da Inglaterra hoje suas máquinas a vapor seria tirar ao mesmo tempo o ferro e o carvão. Seria secar todas as suas fontes de riqueza, arruinar tudo de que sua prosperidade depende, em resumo, aniquilar seu poder colossal. A destruição de sua marinha, a qual ela considera sua mais forte defesa, seria talvez menos fatal. (CARNOT, 1988, p.5)

Para que um país dependa de forma tão intensa de determinado objeto tecnológico este deve estar em um grau de desenvolvimento teórico bastante avançado, se pensarmos sob um ponto de vista atual. Mas isto não era necessariamente verdade à época de Carnot. Ele considerava que apesar do uso generalizado destas máquinas, o fenômeno de produção de movimento a partir do calor não tinha sido considerado de um ponto de vista suficientemente geral. Ou seja, o fenômeno da geração de trabalho a partir do calor era ainda estudado em cada modelo de máquina particular o que, como diz Carnot, torna difícil o estudo de leis gerais que se apliquem a qualquer tipo de máquina. Como enfatiza Aurani (1986), *os avanços na produção de potência motriz do calor tinham sido obtidos mais a partir de tentativas intuitivas, com forte componente do acaso, e sem preocupação com uma sistematização teórica.*

A questão central que Carnot coloca e que se propõe a responder em seu livro é se *os possíveis melhoramentos nas máquinas a vapor têm um limite determinado pela natureza das coisas ou se poderão ser feitos indefinidamente.*

Carnot se propõe a estabelecer os princípios gerais do funcionamento de todas as máquinas térmicas imagináveis, independentemente do mecanismo ou de qualquer agente particular.

Estamos, portanto, num momento de síntese no qual todo um desenvolvimento técnico vai ser sistematizado em um princípio geral universalmente válido¹⁹. Antes de tudo ele tenta, nesta obra, estabelecer uma nova cosmologia do calor em termos de suas propriedades dinâmicas e não sobre a natureza do calor. A necessidade do novo conhecimento é revelada na questão central do livro. É uma questão tanto técnica quanto teórica. As máquinas térmicas passaram por grandes melhoramentos e os engenheiros e técnicos estavam constantemente propondo novos modelos e construindo novos protótipos. Novos modelos incluíam também novas substâncias como agentes para o transporte do calor através da máquina.

A questão que tem sido frequentemente levantada é se a potência motriz do calor é irrestrita, se os possíveis melhoramentos nas máquinas a vapor têm um limite determinável. Um limite o qual a natureza das coisas não permitirá que seja ultrapassado de qualquer que seja o modo, ou se ao contrário, esses melhoramentos podem ser continuados indefinidamente. Vimos procurando há tempos, e continuamos procurando até hoje saber se há agentes preferíveis ao vapor de água para produzir força motriz do calor; se o ar atmosférico, por exemplo, não apresentaria, a este respeito, maiores vantagens. (CARNOT, 1988, p.5).

Aliada a esta questão está a constatação de que com relação à máquina a vapor, apesar de já ter seu uso amplamente difundido, o *fenômeno da produção de movimento pelo calor não tem sido considerado*

¹⁹ A questão da universalidade do princípio de Carnot assume uma importância fundamental no estudo da termodinâmica, visto que estabelece um limite teórico, não apenas para as máquinas conhecidas, mas para qualquer máquina térmica construída em qualquer tempo, qualquer que seja a substância de trabalho utilizada. A razão pela qual este princípio não tem uma posição central dentro do sistema explicativo (didático) da termodinâmica é, para mim, desconhecida e de difícil aceitação dentro de uma perspectiva histórica do ensino. Outra questão que considero fundamental quanto ao princípio estabelecido por Carnot é que ele independe de qual seja a natureza física do calor. Apesar de posteriormente ter-se demonstrado a incompatibilidade da utilização teórica do calórico no ciclo de Carnot, este ainda continua válido quanto aos seus principais objetivos.

de um ponto de vista suficientemente geral. (CARNOT, 1988, p.6). Isto revela, como já dissemos, o interesse do autor em estabelecer princípios gerais para a um conhecimento eminentemente empírico. O estabelecimento de princípios gerais ou, como identificado por Delizoicov (1991) na obra de Thomas Kuhn, a identificação da existência de “generalizações simbólicas” em uma teoria seria um primeiro passo para o estabelecimento de uma matriz disciplinar ou paradigma científico.

A primeira frase do livro de Carnot é: *Todo mundo sabe que o calor pode produzir movimento.* Esta frase direta, sem maiores argumentações, se refere à imensa popularidade da máquina a vapor, dado o impacto que ela teve sobre a sociedade da época. Logo em seguida ele detalha a ação do calor em fenômenos menos evidentes:

O calor também é responsável pelos grandes movimentos que acontecem na Terra. Causa agitação na atmosfera, ascensão das nuvens, a queda da chuva e de meteoros, as correntes de água que cortam a superfície do globo, as quais o homem tem usado apenas uma pequena porção. Até os terremotos e as erupções vulcânicas são resultado do calor. (CARNOT, 1988, p.3)

Essas informações são indicadoras do conhecimento que se tinha sobre processos de conversão do calor em outras formas de energia. Como será visto mais adiante, a familiaridade com os processos de conversão de energia e a sua disponibilidade foi o que, segundo Kuhn (1959) contribuiu decisivamente para que vários cientistas chegassem a um princípio de conservação da energia. Embora não possa afirmar categoricamente que Carnot propôs um princípio de conservação da energia, é possível indicar, a partir desta sua afirmação e de conclusões posteriores, a existência, no mínimo, de uma relação qualitativa entre calor, trabalho e outras formas de energia²⁰. Há uma discussão sobre o assunto na qual alguns autores propõem que Carnot teria implicitamente

²⁰ Devemos sempre lembrar que para Carnot o calor era uma substância: o calórico.

usado um princípio de conservação equivalente à primeira lei da termodinâmica.

A questão de identificar a razão da opção de Carnot pelo calórico pode ser discutida sobre diversos aspectos²¹, até mesmo sobre um aspecto, digamos, “psicanalítico”, tendo em vista que seu pai Lazare Carnot (1753-1823) era especialista em máquinas hidráulicas e foi o responsável pela educação do jovem Sadi até os 16 anos, quando este ingressou na Escola Politécnica de Paris. Podemos encarar esta adesão como política, no sentido em que ela se alinhava ao pensamento dos cientistas franceses que certamente gostariam de ver suas idéias como hegemônicas. Devemos supor também que Carnot, com sua sólida formação científica, certamente tinha conhecimento da hipótese dinâmica do calor²² e poderia ter feito referência a esta em sua obra.

Dentro da tarefa de saber qual o limite para o rendimento das máquinas a vapor, Carnot estabelece uma primeira condição:

A produção de movimento nas máquinas a vapor é sempre acompanhada por uma circunstância sobre a qual devemos fixar nossa atenção. Esta circunstância é o re-estabelecimento do equilíbrio do calórico; ou seja, sua passagem de um corpo a uma temperatura mais alta para outro a uma temperatura mais baixa.

E continua:

a produção de força motriz é devida não a um consumo real de calórico mas ao seu transporte de um corpo mais quente para um corpo frio.

[...] devemos ver que este princípio é aplicável a qualquer máquina colocada em movimento pelo calor. (CARNOT, 1988, p.6-7)

²¹ Posteriormente iremos nos dedicar a uma análise epistemológica do calórico a partir da noção de obstáculos epistemológicos proposta por Bachelard.

²² Nesta hipótese o calor é entendido como resultado do movimento das partículas do corpo e que a transmissão desse movimento seria responsável pela transmissão de calor entre os corpos.

Neste ponto, identifico um dos enunciados da segunda lei da termodinâmica relacionado à necessidade do re-estabelecimento do equilíbrio do calórico de uma temperatura mais alta para uma temperatura mais baixa²³. É importante notar também a generalização segundo a qual este princípio de funcionamento é válido para qualquer máquina térmica. Para haver produção de trabalho ou potência motriz (como era chamado na época) a partir do calor, qualquer que fosse o dispositivo utilizado, deveria haver uma diferença de temperatura. Esta condição continua válida até nossos dias apesar de a concepção, adotada por Carnot, do calor como uma *substância* que se conserva não ser mais aceita.

A idéia de conservação do calórico aparece no livro de Carnot quando ele faz explicitamente uma analogia entre o funcionamento das máquinas térmicas e o funcionamento das máquinas hidráulicas, já há muito estudado.

A força motriz de uma queda d'água depende de sua altura e da quantidade de líquido; a força motriz do calor depende também da quantidade do calórico usado e do que pode ser chamado, e que de fato iremos chamar, *a altura da sua queda*, ou seja a diferença de temperatura entre os corpos entre os quais o calor é trocado. (CARNOT, 1988, p.15)

Esta analogia é perfeitamente válida para a concepção adotada do calor como uma substância. Esta substância tem pelo menos uma propriedade semelhante a da água: a água, na roda d'água, não desaparece depois de impulsioná-la para realizar trabalho. Assim, o calórico também se conservaria depois de realizar o trabalho na máquina a vapor. O que é efetivamente responsável pela realização do trabalho na máquina térmica é "a queda" do calórico de uma temperatura mais alta para uma temperatura mais baixa. E não é apenas a queda em si, mas seria possível que quedas iguais em níveis diferentes causassem efeitos diferentes em relação ao trabalho realizado?

²³ O enunciado de Clausius da Segunda lei da termodinâmica estabelece que *o calor não pode, espontaneamente, passar de um corpo mais frio para outro mais quente.*

Na queda do calórico a força motriz indubitavelmente aumenta com a diferença de temperatura, mas nós não sabemos, por exemplo, se uma queda do calórico de 100 para 50 graus fornece mais ou menos potência motriz do que a queda *deste mesmo calórico* de 50 para zero. (CARNOT, 1988, p.15)

É importante perguntar qual teria sido a motivação de Carnot para esta questão visto que ela não se aplica às máquinas hidráulicas: uma queda d'água de 5 metros de altura causa sempre o mesmo efeito, seja ela de dez metros para cinco ou de cinco para zero. Posteriormente ele irá mostrar que existe sim uma diferença na força motriz produzida.

A analogia com a queda d'água deixa de ser válida exatamente na condição de convertibilidade de calor em trabalho. Quando o calor deixa posteriormente de ser entendido como uma substância e passa a ser equivalente a movimento, o movimento produzido na máquina térmica é parte deste calor. Ele foi "convertido" parcialmente em trabalho e esta parcela que foi convertida não existe mais enquanto calor.

Foi esse exatamente o ponto levantado por Clausius a respeito da aplicação da "nova" teoria dinâmica do calor sobre os princípios estabelecidos por Carnot. A conservação deve ser de uma grandeza comum ao calor e ao movimento: a energia.

Depois do princípio geral de funcionamento das máquinas térmicas, outra noção importante produzida na obra de Carnot é a construção de um ciclo fechado para a máquina térmica. Aurani (1986) sugere que Carnot teria chamado a atenção pioneiramente para a idéia de uma máquina trabalhando em um ciclo fechado. A autora argumenta que no funcionamento das máquinas térmicas da época, o caráter cíclico não era evidente. Estas máquinas recebiam vapor de uma caldeira, transformavam a expansão deste vapor em trabalho e o rejeitavam depois de condensado, na forma de água quente. Na máquina de Watt, por exemplo, o vapor que é condensado não volta à caldeira. A idéia de um ciclo termodinâmico fechado supõe que a substância usada para

realização de trabalho deve voltar ao ponto inicial nas mesmas condições de temperatura e pressão a cada ciclo. Entretanto, dentre os muitos projetos e protótipos de máquinas térmicas da época havia a tentativa de construir uma máquina que usasse o ar como substância de trabalho – e o próprio modelo teórico de Carnot é suposto usar o ar como substância de trabalho. O primeiro a conseguir uma máquina do tipo foi o reverendo Robert Stirling (1790-1878) em 1818. O motor Stirling, como hoje é chamado, usa ar como substância de trabalho em um ciclo fechado. O ar no interior da máquina não é renovado, apenas troca calor com as partes quente e fria da mesma, produzindo movimento. É possível e provável que Carnot tivesse conhecimento desta máquina ou pelo menos das tentativas anteriores dos engenheiros em fabricá-la.

A idéia de trabalho em ciclos é inerente à construção das máquinas térmicas. Poderíamos ter uma máquina que transformasse calor em trabalho sem operar ciclicamente, apenas se seu tamanho fosse infinito. Do ponto de vista prático, toda máquina tem um tamanho finito dado que, se ela expande para realizar trabalho, essa expansão é limitada pelas suas próprias dimensões. Há, pois a necessidade do retorno do pistão a uma posição inicial.

A condição de reversibilidade da máquina de Carnot era usual para os construtores de máquinas hidráulicas. Era uma meta a ser atingida, construir a máquina capaz de transmitir movimento em ambos os sentidos com o mínimo de perdas nessa transmissão. Tampouco a idéia de rendimento foi uma criação de Carnot. Esta idéia era comum entre os construtores de máquinas hidráulicas. O objetivo era obter a maior quantidade de trabalho possível a partir da queda d'água disponível. A existência de ciclo fechado e reversível é, portanto, anterior à publicação do livro de Carnot – pelo menos enquanto prática.

A condição básica para o funcionamento das máquinas térmicas, como vimos, é a diferença de temperatura, mas Carnot estava realmente

interessado na condição de *máxima potência* das máquinas. Para obter este objetivo estabeleceu outra condição importante:

Toda variação de temperatura que não seja causada por uma variação de volume ou uma ação química (o que não é o caso aqui) é necessariamente devida à passagem direta do calórico do corpo mais quente para o corpo mais frio. Esta passagem ocorre principalmente pelo contato dos corpos a diferentes temperaturas, portanto tal contato deve ser evitado o máximo possível.

A condição necessária para o máximo é então que em corpos utilizados para produzir potência motriz do calor não deva ocorrer qualquer variação de temperatura que não seja devida à variação de volume. (CARNOT, 1988, p.13)

Em uma tradução atual, esta condição corresponde a uma situação de mínima entropia. Em uma máquina térmica de rendimento máximo não deve haver nenhum contato entre corpos de diferentes temperaturas durante sua operação.

Esta condição pode ser associada, em uma situação didática, ao funcionamento da máquina a vapor de Watt. O grande diferencial da máquina de Watt foi justamente a criação de dois reservatórios térmicos: quente e frio. Tanto na máquina de Savery como na máquina de Newcomen, o problema principal era o contato do vapor com superfícies de temperaturas diferentes. Como já expliquei anteriormente, nestas máquinas o cilindro deveria estar ao mesmo tempo quente e frio. Há aqui, uma oportunidade de fazer didaticamente uma relação entre ciência e tecnologia, remeter o fato teórico do ciclo de Carnot à descoberta revolucionária de Watt ou vice-versa. Esta relação acontece tanto no sentido usual no qual o desenvolvimento científico proporciona avanço tecnológico, como no caso especial da termodinâmica no qual o avanço tecnológico antecedeu o desenvolvimento teórico.

A construção teórica de um ciclo termodinâmico com as condições já referidas leva Carnot à conclusão de que esta é a maneira mais eficiente de produzir trabalho numa máquina térmica que funcione entre

duas fontes térmicas a temperaturas específicas. Uma máquina que por ventura tivesse um rendimento maior que esta máquina reversível, sendo acoplada para funcionar juntamente com ela, levaria ao funcionamento do conjunto sem o consumo de energia. Ou seja, levaria ao moto perpétuo, o que Carnot considerava inaceitável. Esta demonstração é usual nos livros didáticos atuais como forma de provar que a máquina de Carnot é a mais eficiente possível, ainda com o argumento da impossibilidade do moto perpétuo.

A segunda questão fundamental que Carnot se propõe a responder em seu livro diz respeito à substância de trabalho usada nas máquinas. Esta questão nasce também como resposta aos experimentos com máquinas que usavam substâncias diferentes do vapor de água na busca de maior rendimento.

É natural aqui colocar esta curiosa e importante questão: é a potência motriz do calor invariável em quantidade ou ela varia com o agente empregado para realizá-la como a substância intermediária selecionada como o sujeito da ação do calor? Questionamos-nos se esta quantidade de potência motriz é necessariamente limitada, se ela varia com a substância empregada para realizá-la, se o vapor de água oferece, nesta situação, mais ou menos vantagem que vapor de álcool, de mercúrio, um gás permanente, ou qualquer outra substância. (CARNOT, 1988, p.9).

A este respeito Carnot chega a uma proposição geral:

A força motriz do calor é independente do agente empregado para realizá-la: sua quantidade é fixada somente pelas temperaturas dos corpos entre os quais é efetuada, finalmente, a transferência do calórico. (CARNOT, 1988, p.20)

O estabelecimento desta regra geral tem uma consequência importante na termodinâmica que é a formulação de uma escala absoluta de temperatura por Lord Kelvin. Até então, a definição dos padrões de temperatura eram feitos com base na expansão de um gás. Entretanto, esta expansão não é idêntica para todos os gases em todas as temperaturas. Na máquina de Carnot, a quantidade de trabalho realizado

depende apenas da diferença de temperatura sob a qual a máquina opera independentemente do mecanismo utilizado e principalmente da substância empregada pela máquina. Temos, portanto, uma grandeza - o trabalho, dependente unicamente de outra grandeza - a temperatura, sem interferência de nenhuma condição de experimentação. A relação entre a quantidade de trabalho realizado e as respectivas temperaturas de operação é sempre constante o que permite o estabelecimento de um padrão para determinação absoluta das temperaturas.

Temos, portanto, um conjunto de conhecimentos que abrange desde a invenção da primeira máquina a vapor até a publicação do livro de Carnot que nos oferece a condição de análise dos conceitos sob um ponto de vista histórico e permite o olhar sob a ênfase de alguns aspectos da epistemologia de Bachelard. Que obstáculos epistemológicos podemos identificar nesta fase que nos indiquem um caminho para a revisão histórica destes conceitos.

^A A máquina de Savery era composta basicamente de um grande cilindro de metal que era preenchido com vapor proveniente de uma caldeira. Então, o fornecimento de vapor era fechado e o cilindro banhado com água fria. O vapor era condensado no interior do cilindro, formando um vácuo e a água sugada por um tubo que ia até um poço ou um reservatório cujo nível de água não poderia estar mais de 10 metros abaixo da máquina. Quando o cilindro enchia de água, o suprimento de vapor era aberto novamente e a pressão deste vapor empurrava a água do cilindro para um reservatório em um nível mais elevado. Quando o cilindro estava novamente cheio de vapor, o suprimento era fechado e o ciclo era reiniciado. Todo o controle de abertura e fechamento das válvulas era manual. Entretanto, estava criado o princípio de uma máquina térmica que trabalhava em ciclos. Além de outros problemas técnicos e o perigo de trabalhar com altas pressões e temperaturas, o vapor que era condensado e, portanto, perdido durante o aquecimento do cilindro de metal e durante o fornecimento da pressão na superfície da água fria indicava que a máquina era cronicamente ineficiente.

^B Mais uma vez um cilindro era preenchido com vapor, mas uma extremidade era aberta e um pistão se movia alternadamente para cima e para baixo por meio de uma corrente ligada a uma barra oscilante em torno de um ponto de equilíbrio. Na outra extremidade da barra havia um contrapeso que tinha a função de levantar o pistão e trazer vapor para dentro do cilindro. Quando o cilindro estava cheio, o suprimento de vapor era fechado e a água fria lançada no seu interior de modo a criar um vácuo. A pressão externa (atmosférica) empurrava o pistão para o fundo do cilindro, realizando trabalho de meio ciclo. A água de condensação era então fechada, o vapor readmitido e o próximo ciclo começava com o pistão elevando novamente o cilindro.

^C No inverno de 1763-4, ele [Watt] estava empenhado em consertar um modelo de uma máquina de Newcomen que era usada nas aulas de filosofia natural do professor Anderson. Quando terminou o trabalho, notou que a pequena máquina realizava apenas

alguns ciclos, ficava sem vapor e parava. Isto o intrigou. Do mesmo modo que a máquina da qual ela era uma réplica em escala, o modelo deveria trabalhar de forma perfeita e satisfatória. Por que então a disparidade entre o desempenho da máquina grande e da pequena? Watt sabia que o metal frio condensa vapor e ele estava alerta para o fato de que o pequeno cilindro se tornava muito quente quando estava cheio de vapor. Ele, portanto, pensou que como o volume no cilindro modelo era muito menor - em proporção de área da superfície interior - do que no cilindro grande, o vapor no cilindro pequeno deveria ficar exposto a uma superfície relativamente maior de metal frio do que no cilindro grande. Isto, portanto, esfriaria e condensaria mais facilmente. Devido então ao "efeito de escala" a máquina de cilindro pequeno não poderia trabalhar tão eficientemente quanto a grande. Se o aquecimento e resfriamento do cilindro de metal era um fator limitante no desempenho da pequena máquina de Newcomen, isto afetaria seriamente a eficiência de uma máquina grande? Em caso afirmativo: poderia o desperdício causado por este fato, ser eliminado ou drasticamente reduzido?

O passo seguinte de Watt foi medir o consumo real em cada ciclo da máquina e compará-lo com a quantidade necessária para encher um volume igual ao do cilindro. Ele mediu o volume de vapor produzido pela evaporação de certa quantidade de água e encontrou que uma polegada cúbica de água produzia cerca de um pé cúbico de vapor. Depois, medindo a quantidade de água evaporada de uma caldeira em um dado tempo ele pôde encontrar o volume de vapor realmente fornecido à máquina e compará-lo ao volume teoricamente necessário, o qual era simplesmente o volume do cilindro multiplicado pelo número de ciclos efetuados. O primeiro volume se mostrou ser várias vezes maior do que o segundo: o excesso, evidentemente, representa a quantidade de vapor necessário apenas para aquecer o cilindro depois dele ter sido esfriado pela água fria de condensação. O desperdício era então muito sério. (Texto traduzido de CARDWELL, 1971, p.42)

2.2 Um instante de certezas: Clausius

O primeiro momento se caracterizava principalmente pelo desenvolvimento técnico em lugar de um desenvolvimento científico, no sentido de que não havia propriamente uma ciência paradigmática nos termos descritos por T. S. Kuhn ou por estarmos ainda em um período pré-científico, de acordo com a descrição de Bachelard. A questão central da natureza do calor era ainda disputada por duas correntes de pensamento. A corrente predominante naquele momento, dos franceses Lavoisier e Laplace, se não tomava claramente o partido do calórico, tampouco fazia a defesa do calor como gerado a partir do movimento das partículas constituintes da matéria.

O MHE descrito anteriormente tinha também uma situação cronológica mais determinada em que o desenvolvimento da máquina térmica era *aparentemente* linear. Este segundo momento se caracterizará pela situação de síntese das discussões que foram se construindo depois do desenvolvimento da mecânica de Newton, não apenas na física do calor, mas em outras áreas do conhecimento. Veremos um domínio científico francês, com o aparecimento de matemáticos importantes e o renascimento e grande desenvolvimento da química.

A supremacia francesa no mundo científico, do final do século XVIII até a primeira metade do século XIX, se deveu justamente ao impulso dado às ciências pela revolução francesa que transformou a educação científica e técnica do seu país. Isto é creditado principalmente à criação da Escola Politécnica que foi um centro onde se formaram grandes matemáticos e físicos. A escola politécnica teve imitadores por toda a Europa exceto na Inglaterra onde apenas a imensa riqueza do país tornou possível a criação de laboratórios particulares como o de Henry Cavendish

e o de James Joule. Podemos identificar este momento como notadamente *científico*, com a formalização das duas leis da termodinâmica²⁴ que momentaneamente resolveram a questão da natureza do calor e sua aplicação às máquinas térmicas, coerentemente com o que havia proposto Carnot.

Kuhn (1959) vê um momento de síntese na formalização do princípio de conservação da energia: um conjunto de experimentos e fenômenos que vinham sendo estudados nas mais diversas áreas da ciência convergiu para uma idéia central, a de que existe uma grandeza comum a todos estes fenômenos e que esta grandeza se conserva. Farei, portanto, uma caracterização do segundo MHE tendo como ponto de partida os fatos que desencadearam a descoberta do princípio de conservação da energia. Nesta perspectiva, apresentarei brevemente um panorama do ambiente social e científico da segunda metade do século XIX, período ao qual Eric J. Hobsbawm dedica um livro cujo título "A era do Capital" já nos diz muita coisa a respeito:

Se olharmos retrospectivamente para as ciências naturais e sociais do período, ficaremos espantados com sua impressionante confiança em si mesmas. Isso era mais justificado talvez nas ciências naturais do que nas sociais, mas era um fato igualmente marcante. Os físicos que pensavam haver deixado aos seus sucessores pouco mais para fazer do que resolver problemas menores, expressavam o mesmo estado de espírito que August Schleicher, que tinha certeza de que os arianos haviam se comunicado na mesma língua que ele havia há pouco reconstruído. Esse sentimento não era tanto baseado nos resultados - os das disciplinas evolucionistas dificilmente eram suscetíveis de falsificação - mas na crença da infalibilidade do método científico. Ciência "positiva", operando com fatos objetivos precisos, ligados rigidamente por causa e efeito, e produzindo "leis" uniformes e invariáveis além de qualquer modificação proposital, era a chave mestra do universo, e o século XIX a possuía.

²⁴ A primeira lei, ao mesmo tempo em que estabelece a equivalência entre o trabalho mecânico e o calor, é um princípio de conservação da energia de aplicação universal. A segunda lei estabelece um sentido preferencial para os fenômenos naturais e para as trocas de calor.

(HOBSBAWM, 2007b, p.372)²⁵

O espírito da época era de que, com o método científico, poder-se-ia reduzir todas as outras atividades intelectuais às ciências. A própria idéia do “fim da física”, lançada por William Thomson (Lord Kelvin) é bem característica deste espírito. Ele chegou a desaconselhar seus alunos a seguir carreira nesta ciência, pois a maioria dos problemas havia sido resolvida. A mecânica de Newton, o eletromagnetismo e a termodinâmica já possuíam suas leis “invariáveis” e baseadas em um sólido formalismo matemático, de modo que esta carreira não seria uma das mais estimulantes. Segundo Kelvin, havia apenas duas pequenas nuvens no horizonte da física e que certamente se dissipariam com o uso paciente do método e das leis²⁶. Como exemplo desta tentativa de redução de todos os conhecimentos ao conhecimento científico posso citar a obra do escritor Arthur Conan Doyle (1859-1930) que criou o personagem Sherlock Holmes. O personagem diz usar o método científico (indutivo positivista) na investigação dos crimes, obtendo sempre sucesso. Outro exemplo é a obra do pedagogo Hippolyte Léon Denizard Rivail (1804-1869) conhecido como Allan Kardec que pretendia uma explicação da natureza que incluísse também os fenômenos espirituais. O “Livro dos Espíritos” é uma das suas obras centrais nesta tarefa. Foi escrito sob a forma de perguntas e respostas; respostas estas que teriam sido dadas por espíritos e recebidas por médiuns:

30. A matéria é formada de um só ou de muitos elementos?

R - De um só elemento primitivo. Os corpos que considerais simples não são verdadeiros elementos, são transformações da matéria primitiva.

31. De onde se originam as diversas propriedades da matéria?

²⁵ Esta citação nos remete de forma clara à visão que ainda temos hoje sobre ciência e ensino de ciências; leis gerais imutáveis fortemente fundadas na idéia de causa e efeito que não refletem a forma como realmente a ciência se produz e progride.

²⁶ Estas “pequenas nuvens” foram justamente os problemas que desencadearam toda a revolução da física na virada do século, exemplificada pela teoria da relatividade de Einstein e pela hipótese quântica de Planck.

R – São modificações que as moléculas elementares sofrem, por efeito da sua união em certas circunstâncias. (KARDEC, 2007, p.75)

A teoria da evolução de Darwin veio dar mais um impulso na crença da superioridade do pensamento científico que desta vez chegava a contestar a própria veracidade da bíblia, propondo uma origem para as espécies absolutamente contrária à versão apresentada no livro do Gênesis. O homem deixava de ser a suprema criação de Deus para ser simplesmente um parente evolutivo dos macacos. Apesar de controversa, a teoria da evolução de Darwin deu uma explicação bastante satisfatória para a origem das espécies. Foi uma revolução numa era de certezas.

Dentro deste cenário, a filosofia tradicional perdeu espaço para a ciência a ponto de haver uma filosofia que procurava “adequar” o pensamento filosófico ao “infalível” método científico: o positivismo, cujo principal pensador foi Auguste Comte (1798 -1857). Segundo Rosa (2006, p.73) o positivismo restringe o conhecimento ao conhecimento científico. O autor tenta resumir o pensamento positivista em sua versão “canônica”, caracterizando-o basicamente por sua visão do método das ciências naturais, em alguns pontos principais:

- A ciência deve basear-se na observação empírica.
- As observações se limitam aos fenômenos revelados à sensibilidade humana.
- A realidade não revelada pelos fenômenos não é alcançável e devemos evitar tratar como real o que não for diretamente observável.²⁷
- Devemos proceder por indução para obter as leis da natureza e estabelecer a partir delas as teorias formais.
- As teorias apenas estabelecem relações entre fenômenos e permitem fazer previsões a serem verificadas experimentalmente.

²⁷ Referente a este ponto irá surgir uma contenda com os físicos atomistas, principalmente com Boltzmann e sua interpretação estatística das grandezas termodinâmicas.

A filosofia de Comte, apesar de ser essencialmente formulada com base nas ciências naturais, era encarada por este como o paradigma da Sociologia, a qual deu o nome de “a física social”, uma vez que, segundo Comte, os fenômenos sociais podem ser percebidos como qualquer outro fenômeno natural. A sociologia, portanto, e não a física, seria a ciência positivista por natureza. A física e o progresso tecnológico dela derivado foram com certeza a inspiração maior do pensamento positivista que “idealizou” regras e procedimentos como se estes fossem característicos das ciências naturais e especialmente da física. A física não nasceu com o positivismo, mas o positivismo nasceu da física ou do que Auguste Comte e seus seguidores pensavam sobre o que seria esta ciência e como ela funcionaria.

Para Rosa (2006, p.74) as características do saber positivo de Comte são ser preciso, útil e relativo, em oposição ao vago, supérfluo e absoluto. Para ele, são três os estágios do conhecimento humano: o “teológico” ou “fictício”; o “metafísico” ou “abstrato”; e o “positivo” ou “científico”. No primeiro, as explicações dos fenômenos são dadas com base no sobrenatural; no segundo, já há explicações baseadas na ciência, mas ainda há misticismo; e no terceiro, atinge-se o estado no qual as leis gerais “positivas” livraram o homem do engano. A idéia de progresso é tida como incontestável. É um dos pilares do pensamento econômico, social e mesmo filosófico. Colocar dúvidas sobre uma idéia que podia ser comprovada pelo desenvolvimento experimentado nas décadas anteriores ao positivismo seria como contestar uma lei física estabelecida.²⁸

O que quero enfatizar aqui não é propriamente o pensamento de Auguste Comte, mas evidenciar a influência que o desenvolvimento científico associado ao progresso material teve nas diversas áreas do conhecimento.

²⁸ Neste sentido, *O Capital*, de Karl Marx foi descrito em 1875 por um especialista anônimo alemão como: *a obra de um autodidata ignorante do progresso dos últimos 25 anos.* (HOBSEBAWM b, p.364)



Figura 6 – Templo positivista no Brasil onde foi grande a influência de Auguste Comte.

A física chegou a um ponto de maturidade que servia de modelo para todas as outras ciências nascentes como a sociologia, a psicologia e a antropologia. Do ponto de vista da física térmica, entretanto, a questão que ainda se colocava no fim da primeira metade do século XIX era a da natureza do calor. Benjamim Thompson (1752-1814), o Conde de Rumford, já havia apresentado alguns argumentos importantes contra a teoria do calórico cerca de cinqüenta anos antes sem, contudo, conseguir convencer a maioria influente da comunidade científica. Ele estudou materiais como madeira, pele e penas para explicar suas propriedades isolantes térmicas. Segundo Cardwell (1971), ele propôs que estas substâncias transmitem calor de forma menos eficiente que o ar porque reduzem o movimento deste ar no seu interior que é predominantemente composto dele. O principal argumento de Rumford, que advogava incansavelmente que “o calor não pode ser uma substância material”, diz respeito à produção de calor por atrito. É bem divulgada, na história da

ciência e até mesmo nos livros didáticos de física, sua série de experiências com a perfuração de canhões na Baviera. Ele observou que durante a perfuração, brocas cegas liberavam mais calor do que brocas afiadas, o que contradiz a teoria do calórico que estabelece que a liberação do calórico se dá à medida em que o corpo vai sendo destituído de sua estrutura original. A broca cega retira bem menos material do metal do que a broca afiada e, entretanto, produz mais calor. Segundo os cálculos de Rumford “em pouco tempo ela poderia liberar mais calor do que o necessário para fundir a peça inteira” Müller (2007). Ele notou que enquanto houvesse movimento haveria liberação de calor e seu argumento era que nenhuma substância material pode ser produzida indefinidamente a partir de um corpo qualquer. Ele também escreveu um artigo sobre o peso do calórico. Em se tratando de uma substância material (como listado por Lavoisier em seu livro), o calórico deveria ter massa. Sua experiência consistia em pesar cuidadosamente uma barra de gelo na iminência de fundir-se e posteriormente pesar a água correspondente, que supostamente havia recebido grande quantidade de calórico em forma do já conhecido calor latente. A quantidade de calor necessário para a fusão do gelo seria, segundo Rumford, suficiente para levar uma massa igual de ouro a uma temperatura em que esta se tornasse “vermelho brilhante” (CARDWELL, 1971). Ele chegou mesmo a calcular um equivalente mecânico do calor, cinquenta anos antes do experimento conclusivo de Joule. O artigo que trata do calor produzido por atrito foi publicado em 1798 e devemos lembrar que o livro de Carnot que (ainda) adota a concepção do calórico como substância do calor viria apenas em 1824.

Na verdade, Rumford não acabou com a teoria do calórico porque não estabeleceu uma teoria dinâmica do calor. Inicialmente ele não relacionou o calor com a “vis viva” (energia cinética) das partículas

constituintes da matéria. Outra razão que consideramos de importância dentro da questão epistemológica levantada neste trabalho²⁹ é que

As propriedades do calórico não eram bem conhecidas nem bem claramente definidas de modo que a doutrina pudesse ser falsificada pelos experimentos simples de Rumford. (CARDWELL, 1971, p.)

A geração de calor por atrito era bastante difícil de explicar pela doutrina do calórico, mas a imagem do calor sendo “espremido” para fora de um gás como a água para fora de uma esponja é muito convincente para mentes com fortes influências substancialistas³⁰. Rumford tampouco chegou a esclarecer suficientemente a natureza do calor como “movimento”. Segundo Muller (2007), Rumford argumenta em favor de sua teoria do calor que, embora talvez nunca saibamos a natureza última do deste, podemos estudar seus efeitos em corpos materiais de forma semelhante ao feito por Newton ao estudar a gravidade e seus efeitos e formular leis sobre ela sem saber exatamente a natureza última deste agente.

Vemos que, desde o início, a busca pela natureza própria do calor está relacionada aos processos de conversão das formas de energia. É neste sentido que Kuhn (1959) vai discorrer sobre a importância desses processos de conversão - de força motriz, vis viva, potência, eletricidade, calor etc. - na elaboração da hipótese da conservação da energia. Seu artigo intitulado “A conservação da energia como descoberta simultânea” coloca, como um dos fatores que levaram ao estabelecimento deste princípio, “a disponibilidade dos processos de conversão”. Veremos que os quatro cientistas que apresentaram publicamente o princípio de conservação da energia, entre 1842 e 1847, partiram de uma forma ou de outra de processos de conversão (assim como já o havia feito Rumford). Estes cientistas foram: Mayer, Joule, Holding e Helmholtz que, segundo

²⁹ O caráter substancialista do calórico seria justamente a causa da imprecisão e do caráter vago de duas propriedades.

³⁰ Vale lembrar que neste mesmo período a eletricidade era considerada - e plenamente aceita - como um fluido sutil semelhante ao calórico.

Kuhn (1959, p.321), estavam, *além de bem afastados, em completa ignorância um do outro - com exceção do último.*

O primeiro deles, Robert Mayer, era médico sem formação universitária em física e recebia aulas particulares de física de um professor amigo. Entretanto, suas especulações se mostraram bastante originais e úteis na forma como ele relacionava a força das marés com o calor do sol, a radiação luminosa com processos químicos e a energia química como conectada às funções vitais. Mayer empreendeu uma viagem pelo pacífico como médico de um navio mercante e nesta viagem pôde observar alguns fatos decisivos na formulação das suas idéias:

1. O navegador teria lhe dito que a água do oceano se torna mais quente durante a tempestade.
2. Em pacientes sangrando, ele observou que, nos trópicos, o sangue venoso tem coloração semelhante ao sangue arterial.

A primeira observação pode ser interpretada como um aquecimento da água causado pelo seu movimento, ou seja, conversão de movimento em calor. E a segunda indica que a desoxigenação do sangue é mais lenta nos trópicos, pois menos calor deve ser produzido pelo corpo para manter sua temperatura. Esta conclusão não é tão simples quanto parece, pois implica reconhecer o processo de respiração como parte de uma reação de combustão no organismo humano. Reconhece também a influência do calor externo na quantidade de calor produzido no interior do corpo. Até este ponto a conservação de energia proposta por Mayer baseava-se principalmente numa fenomenologia e num argumento lógico, e não em medidas. "O efeito deve ser igual à causa": *causa aequat effectum*. Mas Mayer calculou também um equivalente mecânico do calor e de uma forma interessante: na verdade não fez nenhum experimento, apenas calculou este equivalente a partir da diferença entre os valores do calor específico dos gases à pressão constante (C_p) e a volume constante (C_v), sendo esta diferença causada por ser parte do calor destinada à realização

de trabalho pelo gás. Seu resultado inicial foi que a queda de um corpo de uma altura de 365 metros corresponde ao aquecimento de uma massa igual de água de 0° C para 1° C. Segundo Muller (2007), Mayer supera Carnot e Clapeyron em relação a uma concepção da conservação da energia quando em sua concepção sobre a natureza do calor e o funcionamento das máquinas térmicas. Mayer observa que o calor absorvido pelo vapor é sempre maior que o calor liberado durante a sua condensação e que a diferença seria justamente o trabalho útil realizado pela máquina.

Mayer fez muitas outras experiências. Relatou que um canhão, quando atira uma bala, se torna mais frio do que quando a pólvora é queimada dentro do canhão sem a mesma bala. Ele quer indicar que parte da energia térmica liberada na queima da pólvora é convertida em movimento da bala. A mesma idéia é extrapolada para o metabolismo dos animais e do homem quando ele propõe que o calor liberado pelo processo químico de digestão ou combustão interna dos alimentos pode ser parcialmente convertido em trabalho. Assim sendo, ao realizar trabalho, o corpo fica mais frio. As partes mais ativas do corpo seriam mais frias do que as menos ativas. Cita a bíblia como prova do seu argumento, usando o trecho em que Deus diz a Adão: - *Comerás o pão com o suor do teu rosto*. Mayer parece pensar que o texto se refere ao fato de que Adão irá trabalhar com as mãos e os pés e que estes, portanto, suarão menos do que a cabeça que está pouco ou nada envolvida na atividade. A aceitação de Mayer como um dos descobridores da conservação da energia não foi tão simples. Os fatos de não ser físico de carreira, ter comportamentos considerados excêntricos e ser extremamente rebuscado na sua escrita dificultaram o processo. Mayer sofreu de depressão, chegou a ser internado e banido da profissão de médico e só posteriormente foi reconhecido – ainda em vida - pelo seu trabalho.

Outro pioneiro na descoberta do princípio da conservação da energia foi James Joule, filho de um rico produtor de cerveja que, por essa razão, tinha dinheiro suficiente para construir um laboratório completo para estudos científicos do filho. O trabalho de Joule foi mais experimental que os anteriores. O nome "efeito Joule" foi dado em sua homenagem ao efeito de aquecimento de um fio percorrido por uma corrente elétrica. Sua primeira medida de um equivalente do calor para outra forma de energia foi justamente com a eletricidade: um equivalente mecânico da corrente elétrica. Joule percebeu que poderia haver uma relação entre o aquecimento produzido pela corrente em um fio e a potência mecânica usada para girar o gerador. Mas o maior interesse era ainda resolver o problema da natureza mecânica do calor de uma forma que não deixasse muitas dúvidas. Joule teve, no início de sua carreira, artigos rejeitados para publicação por serem considerados especulativos. A partir de então, passou a ter como propósito perseguir a alta precisão das medidas e a descrição minuciosa dos experimentos e dos métodos utilizados. A sua experiência mais famosa é brevemente descrita por ele próprio em uma carta aos editores da revista *Philosophical Magazine*:



Figura 7 - Aparato original utilizado por James Joule.
Fonte: wikipedia

O aparato exibido perante a Associação consistiu de pás de bronze trabalhando horizontalmente em uma lata de água. O movimento pode ser comunicado a estas pás por meio de pesos, polias, etc. exatamente como descrito em um artigo anterior. As pás se movem com grande resistência em uma lata com água, de forma que os pesos (cada um de quatro libras) desciam na lenta taxa de um pé por segundo. A altura das polias a partir do chão era de doze jardas, e conseqüentemente, quando os pesos desciam esta distância eles tinham que ser enrolados de volta para cima de modo a renovar o movimento das pás. Depois de esta operação ter sido repetida dezesseis vezes, o aumento de temperatura da água foi determinado por meio de um termômetro muito sensível e preciso. (Joule, 1845)³¹

³¹ Para termos uma idéia das capacidades experimentais do laboratório de Joule, ele era eventualmente capaz de medir 0,005°F de forma confiável e os dois cientistas - Joule e Kelvin - usaram tal precisão de medidas para mostrar que a temperatura do ar cai ligeiramente quando este se expande no vácuo. (MÜLLER, 2007, p.24)

Em sua carta à citada revista, Joule menciona a evolução dos resultados e diz que é levado a concluir que *a existência de uma relação de equivalência entre o calor e as formas comuns de potência mecânica está provada; e suponho como 817 lb, a média dos resultados de três distintas classes de experimentos como o equivalente, até que experimentos mais acurados tenham sido feitos.* (Joule, 1845)³²

Joule faz um comentário deste resultado em termos de energia cinética das partículas da água. Nota-se que ele não tinha apenas uma correspondência matemática entre duas grandezas, mas uma compreensão que é compatível com a teoria cinética da matéria. Podemos interpretar a expressão “a vis viva das partículas da água” como uma antecipação do conceito de energia interna sendo a soma das energias cinéticas das partículas. Na verdade Joule e Kronig gradualmente chegaram à conclusão de que a energia térmica de um gás é a energia de movimento (energia cinética) de suas moléculas.

Admitindo que os resultados estejam corretos, é óbvio que a *vis viva* das partículas de uma libra de água a (digamos) 51° é igual à *vis viva* de uma libra de água a 50° mais a *vis viva* que seria adquirida por um corpo de 817 lb. depois de cair uma altura perpendicular de 1 pé. (Joule, 1845)

Entretanto, nenhum dos pesquisadores anteriores conseguiu chegar a uma formulação matemática da primeira lei da termodinâmica justamente pela falta de uma grandeza que fizesse a síntese de todas as “forças”, “vis vivas” e “potências motrizes” estudadas nos seus diversos processos de conversão. Existia uma relação clara e experimentalmente medida entre os efeitos térmicos, elétricos, magnéticos e químicos com o trabalho mecânico, mas faltava ainda uma conexão teórica entre todos os processos e que fosse não apenas medida, mas explicada na sua convertibilidade entre os vários fenômenos. A formulação da lei da conservação da energia é comumente atribuída a Helmholtz por ter

³² O resultado, citado como 817 libras, refere-se ao peso que seria suspenso a uma altura de um pé. Esta potência mecânica equivaleria ao calor necessário para elevar a temperatura de uma libra de água 1 °F.

tornado a explicação da relação entre calor e trabalho um tanto mais complexa. Para Helmholtz,

These facts no longer permit us to regard heat as a substance, for its quantity is not unchangeable. It can be produced anew from the vis viva of motion destroyed; it can be destroyed, and then produces motion. We must rather conclude from this that heat itself is a motion, an internal invisible motion of the smallest elementary particles of bodies. If, therefore, motion seems lost in friction and impact, it is not actually lost, but only passes from the great visible masses to their smallest particles; while in steam engines the internal motion of the heated gaseous particles is transferred to the piston of the machine, accumulated in it, and combined in a resultant whole. [...] What appeared to the earlier physicists to be the constant quantity of heat is nothing more than the whole motive power of the motion of heat, which remains constant so long as it is not transformed into other forms of work, or results afresh from them. (HELMHOLTZ, 1863)

O pensamento de Helmholtz sobre o movimento dos átomos e a atração entre eles torna o sistema mecânico mais complexo do que qualquer outro sistema macroscópico. Helmholtz também não obteve sucesso em escrever a primeira lei da termodinâmica em sua forma matemática por falta de um elemento importante: o conceito de energia interna e sua relação com calor e trabalho. Esta relação só será feita posteriormente por Clausius, com a introdução do modelo cinético dos gases e em conexão estreita como a segunda lei da termodinâmica. Um conceito de energia interna precisaria de uma aplicação das leis da mecânica ao movimento dos átomos.

A teoria de Joule propõe uma convertibilidade entre trabalho e calor. A princípio esta convertibilidade aparenta ser apenas quantitativa, ou seja, uma equivalência numérica entre o efeito do trabalho e a temperatura da água. Mas, a partir das argumentações de Joule, infere-se que esta convertibilidade está necessariamente associada ao movimento das partículas da matéria. *O calor é uma forma de energia* e esta energia é basicamente a energia do movimento, a *vis viva* das moléculas.

Clausius resume desta forma o momento teórico que parece consolidar o novo status do calor como movimento:

As investigações cuidadosas de Joule, nas quais o calor é produzido de várias maneiras diferentes pela aplicação de trabalho mecânico, provam quase certamente não apenas a possibilidade de aumento na quantidade de calor em qualquer circunstância, mas também a nova lei de que a quantidade de calor desenvolvido é proporcional ao trabalho realizado na operação. A isto deve ser adicionado que outros fatos recentemente se tornaram conhecidos e que dão suporte a visão de que calor não é uma substância, mas consiste no movimento das menores partes dos corpos. Se esta visão for correta, é admissível aplicar ao calor o princípio geral da mecânica de que um movimento pode ser transformado em trabalho, e de tal maneira que a perda de energia cinética é proporcional ao trabalho realizado.

Estes fatos com os quais Carnot estava também bem familiarizado, e a importância dos quais ele reconheceu expressamente, quase que nos compele a aceitar a equivalência entre calor e trabalho, na hipótese modificada de que a realização de trabalho requer não apenas uma troca na distribuição de calor, mas um consumo real deste, e que reciprocamente, o calor pode ser produzido novamente pela realização de trabalho. (CLAUSIUS, 1850)

William Thomson (1824-1907), embora sendo escocês, era discípulo dos mestres franceses e trabalhou durante um ano na França, no laboratório de Victor Regnaut. Desde então assumiu a defesa da teoria de Carnot e fazia algumas objeções à teoria de Joule. A principal questão de Kelvin em relação à teoria de Joule era: o que acontece com o seu efeito mecânico quando o calor flui de um corpo mais quente para um corpo mais frio?

A questão faz sentido no momento em que o princípio de conservação do calor³³ é amplamente aceito. Sendo o calor uma forma de movimento dos átomos e moléculas, este movimento se transfere através de uma máquina para a substância de trabalho, o que, por sua vez, produz trabalho mecânico. O que acontece com este mesmo efeito

³³ A nossa atenção deve se voltar para o fato de que, neste momento, conservação do calor não é a mesma coisa que a conservação da energia. O calor, a princípio, se conservaria qualquer que fosse sua natureza, movimento ou substância.

mecânico quando o calor simplesmente passa, por condução, de um corpo mais quente para um mais frio sem realizar trabalho? “Que efeito é então produzido em lugar do efeito mecânico que é perdido?” Kelvin levanta a questão sem saber, na verdade, o que fazer com ela. Segundo Cardwell (1971), nesta questão está a chave do desenvolvimento posterior da termodinâmica.

O próximo passo neste desenvolvimento é precisamente a resposta que Clausius tenta dar à situação causada por Kelvin. O que chamo aqui de “situação” se refere ao fato de que a pergunta de Kelvin tem seu desdobramento em um dilema: apesar de toda a evidência experimental coletada desde Rumford, as especulações de Mayer, os experimentos acurados de Joule e os argumentos de Helmholtz, a energia térmica – como movimento – é conservada ou não? A questão de Kelvin é coerente com a teoria de Carnot e, ao mesmo tempo, não nega de forma alguma as evidências da teoria dinâmica do calor. É apenas uma objeção de caráter fundamental que um grande cientista sempre faz. Vemos que a pergunta de Kelvin se encontra justamente numa fronteira conceitual entre calor como substância e as fortes evidências do calor como movimento, mas ainda com questões fundamentais a serem explicadas.

O que Clausius (1822-1888) faz com relação ao problema proposto por Kelvin é trocar a perspectiva da resposta que talvez fosse inicialmente esperada por este último, qual seja uma reformulação geral da teoria de Joule. A nova teoria do calor não está em oposição à Teoria de Carnot como um todo, mas se opõe à afirmação particular de que “nenhum calor é consumido ou perdido em uma operação cíclica”. Clausius vai propor duas formas de transformação: uma de calor em trabalho e outra de calor a uma temperatura em calor a outra temperatura. Começa então, com a pergunta de Kelvin e com a resposta de Clausius, a nascer o conceito de entropia.

Rudolf Julius Emmanuel Clausius entendeu que não há

contradição entre os dois princípios, desde que o Princípio de Carnot sofra pequena modificação:

(1) Clausius aceita os resultados de Joule: Calor é trabalho, logo se trabalho é obtido, calor é consumido.

(2) Clausius corrige Carnot: O calor retirado da fonte quente não pode ser todo ele transferido, mas parte é consumida. Ele distingue, pois, duas operações nas máquinas térmicas:

(i) Transformação de calor em trabalho ou consumo de calor: Parte do calor recebido da fonte quente é transformada em trabalho, durante a expansão isotérmica.

(ii) Transporte de calor da fonte quente para a fonte fria: A parte restante do calor, que foi recebido da fonte quente, e transferida para a fonte fria, durante a compressão isotérmica. (DIAS, 2001, p.230)

Vemos na citação acima que, para Clausius, havia “consumo” de calor para sua transformação em trabalho. Não se tratava até aqui da interpretação do calor como “energia em trânsito” - para usar a expressão tão querida dos autores de livros didáticos. Na prática, o que nós professores fazemos é uma pequena (ou grande?) confusão entre uma “definição” de calor como processo de transferência de energia e uma explicação posterior para o funcionamento das máquinas térmicas a partir da interpretação de calor como uma “forma de energia”. Energia esta que pode ser “consumida” na sua transformação em trabalho³⁴. O uso indiscriminado dos termos calor e energia também é uma possível fonte de mal entendidos: considera-se usualmente a interpretação de Clausius de que o calor é *consumido* e *transformado* em trabalho mas a energia se conserva como uma grandeza transcendente. A definição de calor como “energia em trânsito” nasce depois de uma formulação matemática da primeira lei, a partir da interpretação cinético-molecular dos gases.

Rudolf Clausius é o responsável por esta formulação matemática da primeira lei da termodinâmica. Como foi dito anteriormente, a formulação

³⁴ Esta é mais uma das nuances da construção do conceito de calor que é completamente ignorada nos livros didáticos. São duas concepções diferentes, apresentadas indistintamente aos estudantes sem nenhuma consideração adicional. E vem somar-se ao uso, um tanto involuntário, da noção de calor como substância.

matemática de um princípio geral da conservação da energia teria a necessidade do estabelecimento do conceito de energia interna. Este, por sua vez, implica uma aproximação com a interpretação mecânica do comportamento dos gases. No momento da elaboração do conceito de energia interna há uma superposição quase inevitável entre os enfoques microscópicos e macroscópicos da teoria do calor, embora seja possível deduzi-la usando apenas argumentos macroscópicos. (Ver NUSSENZVEIG, 1981)³⁵

Na demonstração feita por Dias (2001) inicialmente Clausius obtém a equação $dU = -pdV + dQ$ para o princípio de Joule e mostra que este é um princípio de conservação. Em um ciclo, o calor total pode ser re-estabelecido se invertermos o sentido de operação da máquina térmica. A quantidade de calor U (energia interna) da substância de trabalho volta às suas condições iniciais após completar o ciclo. Não me deterei aqui a discutir os detalhes desta dedução matemática. Entretanto, é importante ressaltar o papel do conceito de energia interna nesta transição entre o micro e o macro. Tarsitani;Vicentini (1996) argumenta que o enfoque microscópico normalmente apresentado nos livros didáticos tem a função [quase exclusiva] de explicar o que é esta “energia interna” de um corpo material.

Já no âmbito da segunda lei, Clausius faz uma generalização do teorema de Carnot na qual mostra esta equivalência das transformações³⁶ cíclicas na máquina reversível. Pode-se demonstrar que as transformações

³⁵ A distinção que farei entre o MH2 e o MH3 não está na simples oposição entre explicações macro e microscópicas da matéria. Para a formulação da primeira lei, Clausius precisou usar um modelo mecânico de gás. Entretanto, sua formulação é determinista. A ruptura entre os dois momentos citados está precisamente na inserção do indeterminismo na ciência física através de explicações probabilísticas.

³⁶ Na tradução inglesa feita por W. F. Magie (1935) esta expressão é escrita como “transformation content” ou, literalmente, conteúdo de transformação.

realizadas em vários ciclos de Carnot acoplados são tais que $\sum Q_1/T_1 - Q_2/T_2 = 0$ ou, o que é o mesmo, $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$. Esta demonstração está disponível tanto nos textos universitários básicos como em alguns livros para o ensino médio.^D

Depois de fazer tal demonstração Richard Feynman comenta:

[...]o resultado de toda a análise, o grand finale, é que Q_1 está para T_1 assim como Q_2 está para T_2 , quando a máquina absorve energia Q_1 à temperatura T_1 e entrega Q_2 a uma temperatura T_2 . Desde que a máquina seja reversível, esta relação entre os calores deve ser atendida. É tudo o que há: este é o centro do universo da termodinâmica³⁷.

Depois acrescenta:

Se isto é tudo o que há para a termodinâmica, porque este é um assunto considerado tão difícil?

Ele mesmo responde mais adiante:

[...]é difícil porque cada um usa uma abordagem diferente. Se pudéssemos nos sentar um dia e decidir sobre nossas variáveis, e amarrá-las, tudo isso seria bem mais fácil. (FEYNMAN, 1977, p. 44-9)

Feynman, com certeza, se refere às dificuldades em torno do conceito de entropia definido em termos de Q/T . Esta demonstração matemática do conceito de entropia tem sido apresentada de várias formas, com as mais diversas – e até temerosas – interpretações. Apesar disso podemos encontrar formulações bastante aceitáveis.

(iii) O Teorema de Carnot, como generalizado por Clausius, é mais bem entendido assim: Dado que o Princípio de Carnot é uma condição de conservação no ciclo reversível e dado que a quantidade conservada é função de Q , T_1 e T_2 apenas, Clausius supôs que ela tivesse a forma $Q f(T)$; então, ele prova que a equação que os $Q f(T)$'s, nas várias fases do

³⁷ Na expressão original em inglês: That is all there is to it: that is the center of the universe of thermodynamics.

ciclo, tem de obedecer $\oint \frac{dQ}{T} = 0$. (DIAS, 2001, p.232)

O princípio de Carnot seria, portanto, também um princípio de conservação. Mas conservação de quê? De uma grandeza que é função da relação entre calor e temperatura. Clausius vai chamar de entropia a grandeza que se conserva em uma transformação reversível, como no caso da máquina de Carnot³⁸.

Uma observação é pertinente, neste ponto, para dar ênfase à questão do uso constante de uma metáfora da desordem para a explicação do conceito de entropia. Temos uma definição que se baseia exclusivamente numa argumentação macroscópica da termodinâmica. Esta argumentação está fundada na busca de Clausius por uma grandeza que pudesse expressar a condição de reversibilidade ou irreversibilidade de um processo. Se a soma algébrica desta grandeza for zero em ambos os sentidos do processo, este é reversível; e se, por outro lado, a soma algébrica citada for diferente de zero, o processo é irreversível. A energia de qualquer processo sempre se conserva. Não importa que este seja reversível ou irreversível, não há como distingui-los apenas usando o princípio da conservação da energia. A entropia é, então, a grandeza que pode nos dizer matematicamente se um processo é ou não reversível.

Outra questão que quero abordar é quanto a *o que* a entropia mede; poderíamos fazer uma lista das diversas “definições” que encontramos nos manuais de física, entretanto estamos tratando da chamada entropia termodinâmica, ou seja, o conceito de entropia derivado do funcionamento de uma máquina reversível de Carnot.

³⁸ Vemos mais um exemplo da importância teórica de Carnot para a termodinâmica. A entropia ser deduzida a partir da idéia de um motor de rendimento máximo. Continuamos, pois, a procurar as razões para que o assunto “ciclo de Carnot” seja relegado ao final do capítulo dos livros, pobremente apresentado no apagar das luzes da termodinâmica (e do semestre letivo).

Uma pequena variação de entropia dS é definida como igual a uma pequena quantidade de calor entrando ou saindo de um corpo reversivelmente, dividida pela temperatura absoluta do corpo (T). Se o calor entra no corpo sua entropia aumenta, se o calor deixa o corpo sua entropia diminui. (DUGDALE, 1998, p. 40)

Mesmo um autor cujo livro se intitula "Entropia e seu significado físico", não deixa claro em sua definição o que a entropia macroscópica efetivamente *mede* enquanto grandeza.

Poderia, já a seguir, fazer as considerações sobre o enunciado da segunda lei da termodinâmica relativo ao aumento da entropia em um sistema fechado etc. Entretanto, vou voltar um pouco mais atrás na história e compor um quadro mais didático das condições para o aparecimento dos diversos enunciados da segunda lei.

A idéia de *mudança progressiva*³⁹ é, segundo Brush (1988), uma das idéias iniciais a respeito do comportamento assimétrico da natureza em suas transformações e que vai desembocar na segunda lei da termodinâmica. No paradigma Newtoniano, as leis que explicam o universo são reversíveis. O universo de Descartes era uma máquina perfeita mantida em funcionamento pelos cuidados constantes da providência divina. Podemos hoje apenas imaginar se foi possível pensar o mundo de forma totalmente reversível. No final do século XVII Laplace (1749-1827), que dedicou grande parte do seu tempo ao estudo de astronomia, propôs uma hipótese sobre a criação do sistema solar que ficou conhecida como "a hipótese nebular". Resumidamente, ele propunha que o sol foi originalmente uma nuvem de gás gigante que se contraiu devido à gravidade e ao resfriamento. Pedacos da nuvem que se deslocaram do sol original formaram os planetas repetindo o mesmo processo inicial. Na Geologia havia hipótese similar na qual a Terra foi gradativamente esfriando desde a sua formação. Fourier (1768-1830) foi além, demonstrando matematicamente que, no processo de condução, o

³⁹ Progressive change, no texto original.

calor flui do mais quente para o mais frio. Lançando, segundo Brush (1988), as bases para a confrontação entre o princípio da reversibilidade nas leis da mecânica e da irreversibilidade na teoria do calor.

Não era trivial que houvesse na natureza uma assimetria, uma tendência à dissipação. Neste sentido William Thomson escreveu em 1852 um artigo intitulado "*Sobre a tendência universal para a dissipação da energia*" que responde, em termos, à sua própria pergunta sobre o que é feito do calor não transformado em trabalho. Suas principais conclusões neste artigo são:

Há no presente, no mundo material, uma tendência universal à dissipação da energia mecânica.

Qualquer restauração de energia mecânica sem algum equivalente de dissipação é impossível e provavelmente nunca efetuada por meio de matéria organizada, seja provida de vida vegetal ou sujeita à vontade de uma criatura animada.

Dentro de um período finito de tempo [já] passado, a Terra deve ter sido e, dentro de um tempo finito a vir, a Terra voltará a ser, de novo, incapacitada para habitação do homem, como constituído no presente, a menos que operações tenham sido ou estejam para ser realizadas, as quais são impossíveis sob as leis as quais as operações conhecidas, acontecendo no presente, no mundo material, estão sujeitas.⁴⁰ (THOMSON, 2007)

Clausius, por sua vez, fez uma afirmação pura e simples a este respeito: a de que é impossível o calor fluir espontaneamente de um corpo frio para um corpo quente. Segundo Cardwell (1971), "*a experiência comum de incontáveis gerações de tempos imemoriais está para ser elevada a axioma científico*". É conhecido por todos que não podemos simplesmente retirar calor da cozinha para aquecer a comida,

⁴⁰ Do original: Within a finite period of time past, the earth must have been, and within a finite period of time to come the earth must again be, unfit for the habitation of man as at present constituted, unless operations have been, or are to be performed, which are impossible under the laws to which the known operations going on at present in the material world are subject.

tornando o ar do ambiente mais frio. Modernamente o enunciado de Clausius é apresentado como:

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. (NUSSENZVEIG, 1981, p.335)

O enunciado de Kelvin, da segunda lei, é mais explícito com relação à necessidade de uma “dissipação” ou desperdício de energia decorrente da geração de trabalho, a qual ele se refere no seu artigo de 1852:

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho. (NUSSENZVEIG, 1981, p.334)

A segunda lei da termodinâmica é também conhecida pela afirmação de que é impossível construir um moto perpétuo de segunda espécie. O que, na prática, seria construir um motor que funcionasse retirando calor residual do ambiente, tornando-o mais frio. Carnot (1988, p.7) expressa esta impossibilidade quando afirma que “a produção de calor sozinha não pode gerar potência: é necessário que exista o frio; sem ele o calor é inútil”.

Uma máquina térmica que tivesse rendimento igual a 1 seria extremamente vantajosa. Isto se explica visto que o motor não precisaria de dois focos, um mais quente (caldeira) e outro mais frio (condensador), e poderia funcionar à custa do esfriamento de qualquer dos corpos que nos rodeiam, por exemplo a crosta terrestre ou os oceanos, até temperaturas mais baixas que as dos corpos circundantes mais frios. Este motor recebeu o nome de moto perpétuo de segunda espécie. Como este motor não contradiz a primeira lei da termodinâmica não é evidente a impossibilidade de sua construção. (FRISH; TIMOREVA, 1967, p.309)

Um dos problemas centrais que me propus a discutir neste trabalho foi tratar a relação entre os enunciados da segunda lei e o conceito de entropia; como a entropia pode ser vista em cada um dos enunciados é, para mim, uma excelente forma de traçar um roteiro para o entendimento do conceito. Como já discutido aqui, anteriormente, o conceito de

entropia guarda relação direta com a questão da reversibilidade e irreversibilidade. O enunciado da segunda lei da termodinâmica relativo à entropia nos diz que:

A entropia do universo nunca decresce: não é afetada por processos reversíveis e cresce em processos irreversíveis.”
(NUSSENZVEIG, 1981, p.378)

Nussenzveig esclarece que a palavra “universo”, neste caso, não se refere propriamente ao universo cosmológico, mas mais a um sistema fechado (ou termicamente isolado) e pode ser identificado com o sistema solar para a maioria dos processos em escala terrestre. Uma outra idéia que aparece no final do século XIX decorrente do princípio da entropia crescente é aquela da morte térmica do universo: se a entropia tem sempre tendência a crescer, ou seja, se existe uma tendência natural ao equilíbrio, o universo com todas as suas transformações (inclusive a vida) tende a um estado de equilíbrio no qual nada muda, nem mesmo há transmissão de energia entre os corpos (calor e movimento). Assim sendo, o universo entraria em equilíbrio térmico e este seria nosso tranquilo fim. Segundo Brush (1988), esta idéia teve repercussão na Europa neste período e pode ser associada a uma atmosfera pessimista conhecida como “fin de siècle. O fim do mundo havia deixado de ser apenas uma expectativa de cunho religioso, pois já havia uma lei científica para ele: a segunda lei da termodinâmica. Um livro chamado “O fim do mundo” publicado em 1894 pelo escritor Camille Flammarion (1842-1925) fazia um retrato assombroso do fim dos tempos com base na nova idéia de morte térmica do universo sem a menor preocupação sobre qual escala de tempo envolveria tal evento.

Uma outra forma de expressar o princípio do aumento da entropia é o que relaciona este conceito ao tempo. Os processos naturais observáveis são todos, a princípio, irreversíveis: queda dos corpos, morte de plantas e animais, esfriamento da Terra etc. O exemplo mais comum

nos livros didáticos é a queda de um ovo⁴¹; observar uma imagem de vídeo na qual o ovo esparramado no chão se recompõe e volta para cima da mesa vai contra toda a nossa experiência diária e o chamado bom senso. Esta imagem implica “reverter” o sentido do tempo, pois o sentido do tempo, na nossa experiência mais primária é aquele no qual os processos irreversíveis acontecem. É aquele em que os ovos quebrados nunca voltam para cima da mesa. O sentido do tempo é aquele, portanto, no qual a entropia aumenta. O tempo, que na física de Newton é uma grandeza escalar, parece agora ter uma característica vetorial, qual seja “*um sentido de propagação*” se me for permitido assim dizer. Na literatura, este sentido para o tempo é conhecido como “seta do tempo” e guarda sempre relação com a segunda lei da termodinâmica. A idéia de desordem associada à entropia, que discutirei mais adiante, já aparece nos livros didáticos subliminarmente quando o ovo cai ou quando vemos a degradação do corpo de uma bela atriz que envelheceu.

^D ENTROPIA

Nós obtemos a equação

$$\int \frac{dQ}{T} = S - S_0 \text{ a qual, enquanto arranjada diferentemente, é a mesma que foi usada}$$

anteriormente para determinar S.

Se desejarmos designar *s* por um nome apropriado podemos dizer que é o *conteúdo de transformação* do corpo, do mesmo modo que *U* é o conteúdo de calor e trabalho do corpo. Todavia, como eu acho que é melhor dar nomes a grandezas com estas, que são importantes para a ciência, a partir das línguas antigas, de modo que elas possam ser introduzidas sem mudanças em todas as línguas modernas, eu proponho o nome da grandeza *S* a *entropia* de um corpo, da palavra grega *ητροπη*, uma transformação. Eu intencionalmente formei a palavra entropia de modo a ser o mais similar possível à palavra energia, visto que ambas as grandezas, conhecidas por estes nomes, são tão proximamente relacionadas uma com a outra no seu significado físico que uma certa similaridade nos seus nomes me parece vantajosa. [...] Finalmente eu devo me permitir tocar num assunto cujo tratamento completo não será colocado aqui, porque os argumentos necessários para este propósito tomariam muito espaço, mas o qual eu acredito que mesmo a pequena indicação a seguir não será sem interesse, a qual irá contribuir para o reconhecimento da importância das grandezas que eu introduzi na formulação da segunda lei da teoria mecânica do calor. A segunda lei, da maneira que eu a formulei, estabelece o fato de que todas as transformações que ocorrem na natureza ocorrem em um certo sentido que eu tomei como positivo, deles mesmos, ou

⁴¹ Suponho que o uso freqüente da imagem da queda do ovo como exemplo de irreversibilidade reflete o desconforto psicológico que nos causa pensar a dificuldade de limpar a sujeira da clara e da gema no chão da cozinha e reforça o sentido de irreversibilidade.

seja, sem compensação, mas que eles podem apenas ocorrer em sentido oposto ou negativo de um tal modo que sejam compensados por transformações positivas que ocorrem ao mesmo tempo. A aplicação desta lei ao universo leva a conclusão a qual W. Thomson [Kelvin] primeiramente chamou a atenção e sobre a qual eu já falei em um recente artigo publicado. Esta conclusão é que se entre todas as mudanças de estado que ocorrem no universo as transformações em um sentido excedem aquelas no sentido oposto, então a condição geral do universo irá mudar mais e mais no sentido anterior, e o universo irá persistentemente se aproximar de um estado final.

A questão que agora emerge é se este estado final pode ser caracterizado de uma maneira simples e definitiva. Isto pode ser feito, tratando as transformações, como eu fiz com grandezas matemáticas, cujos valores equivalentes podem ser calculados e unidos em uma soma por adição algébrica.

Nos meus artigos já publicados desenvolvi tais cálculos com respeito ao calor presente nos corpos e para o arranjo dos constituintes dos corpos. Para cada corpo há duas grandezas. O valor de transformação de sua quantidade de calor e sua desagregação, a soma das quais é a entropia. Isto, entretanto não completa a tarefa. A discussão deve ser também estendida ao calor radiante, ou expresso de outra forma, ao calor transmitido através do universo na forma de vibrações progressivas do éter, e também para tais movimentos que não podem ser compreendidos sob o nome de calor.

O tratamento destes últimos movimentos, pelo menos enquanto movimentos de massas ponderáveis, podem ser brevemente acomodados, desde que através de um argumento simples cheguemos à seguinte conclusão: se uma massa, que seja tão grande em comparação com a do átomo, pode ser considerada como muito pequena, [e] se move como um todo, o valor de transformação deste movimento deve ser visto como desprezivelmente pequeno em comparação com sua energia cinética; do que segue que tal movimento é transformado em calor por resistência passiva, então o valor equivalente da transformação não-compensada que então ocorre é simplesmente representada pelo valor de transformação do calor produzido. O calor radiante, entretanto não pode ser tratado tão brevemente, visto que há ainda a necessidade de um tratamento especial de modo a descobrir como o seu valor de transformação pode ser determinado. Embora no artigo que foi recentemente publicado e que já me referi anteriormente, eu já discuti o calor radiante em sua conexão com a teoria mecânica do calor. Eu reservo para uma futura consideração uma aplicação mais particular da teoria mecânica do calor e especialmente da lei de equivalentes de transformação para o calor radiante.

Por agora irei me restringir a anunciar como resultado do meu argumento que se nós pensarmos sobre aquela grandeza a qual com referência a um único corpo eu chamei sua entropia, como formada de uma maneira consistente, em consideração a todas as circunstâncias, para todo o universo, e se usarmos em conexão com ela o outro conceito mais simples de energia, podemos expressar as leis fundamentais do universo que correspondem as duas leis fundamentais da teoria mecânica do calor na forma simples a seguir.

1. A energia do universo é constante.
2. A entropia do universo tende para um máximo.

(CLAUSIUS, 1865)

“Parece-me que há alguma coisa nesta hipótese molecular que certamente não é apenas uma mera hipótese, mas uma realidade”.
Lord Kelvin (1824 -1907)

2.3 Explicando o impossível: Boltzmann

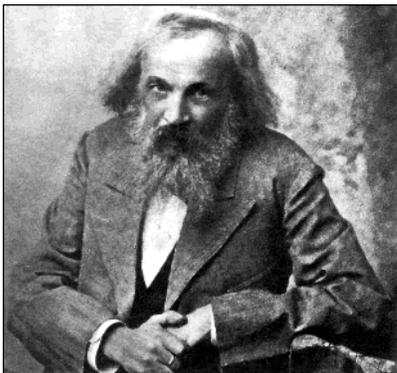
Já descrevi o século dezenove como uma era de certezas no mundo científico. Se não de certezas acerca da maioria dos fenômenos e técnicas, pelo menos a certeza de ter encontrado um conjunto de métodos, teorias e ferramentas matemáticas capaz de dar esta confiança à maioria dos cientistas. Foi neste espírito que William Thomsom “previu” o fim da física. Para ele havia apenas duas pequenas nuvens no horizonte desta ciência: o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley⁴² e a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido (radiação do corpo negro)⁴³. Esta certeza estava embasada no sucesso da mecânica de Newton em conjunto com as ferramentas matemáticas sofisticadas como a de Hamilton, que descrevia movimentos complexos como o do peão e teve a capacidade de prever a existência de um planeta no sistema solar, ainda não observado. Todo o arcabouço teórico da física clássica estava construído: a mecânica, o eletromagnetismo, a física ondulatória e a termodinâmica. Posteriormente, Maxwell realizou uma grande síntese matemática na qual a física ondulatória e o eletromagnetismo se fundiram através de suas quatro famosas equações.

Paralelamente a estas certezas continuava a se desenvolver, como um fogo enterrado, uma discussão que remonta à Grécia antiga: a natureza contínua ou discreta da matéria. Desta feita, esta discussão seria em torno da validade da hipótese atômica que estava sendo proposta como explicação microscópica do comportamento macroscópico dos gases.

⁴² A experiência de Michelson-Morley pretendia medir a velocidade de deslocamento da Terra em relação ao “éter”. Para isso usava medidas da velocidade da luz através do “éter”, em várias direções na Terra e esperava encontrar valores diferentes desta velocidade. O resultado negativo seria explicado por Einstein anos depois.

⁴³ Na verdade a quantidade de nuvens era tanta que a tempestade estava prestes a desabar.

Ora, então vejamos: Estamos no final do século XIX, às vésperas de uma revolução científica iniciada por Einstein e Planck e ainda às voltas com uma questão ancestral sobre a natureza contínua ou descontínua da matéria. Mas esta discussão não nasceu aí. Ela vem se desenvolvendo na termodinâmica desde as primeiras discussões sobre a natureza do calor: substância ou movimento. Passa pelo trabalho de Daniel Bernoulli que já em 1738 propôs que os gases eram formados por um número muito grande de moléculas e que estas eram responsáveis, por exemplo, pela pressão exercida por estes gases em um recipiente. Posteriormente, temos as experiências do Conde Rumford com seus canhões, que mostram a impossibilidade de o calor, enquanto substância, ser produzido indefinidamente. Passa também pelos estudos de Boyle sobre o comportamento dos gases ideais, chegando até Maxwell com o cálculo da distribuição das velocidades das moléculas de um gás em função da sua temperatura. A questão do calórico parecia estar definitivamente morta com as experiências de Joule em 1845. O conceito de energia finalmente havia se firmado como elemento de ligação entre a mecânica e a termodinâmica. Havia, já, na química uma tabela que classificava os elementos químicos periodicamente de acordo com suas massas atômicas (Tabela periódica dos elementos de Mendeleev).



Fonte: Wikipedeia

Figura 8 - Dmitri Ivanovich Mendeleev criador da tabela periódica dos elementos.

Em 1857 Clausius havia publicado o trabalho "*Ueber die Art der Bewegung welche wir Wärme nennen*" (Sobre a natureza do movimento

que chamamos calor) no qual faz a descrição e aplicação de um modelo cinético-molecular à matéria. Particularmente, descreve as condições que devem ser obedecidas para um gás “na sua condição molecular”.

A descrição mecânica do calor e do comportamento dos gases fazia parte de uma tendência científica de procurar explicações mecânicas para os fenômenos, tendo em vista o extraordinário sucesso deste ramo da física. A termodinâmica seria, até então, essencialmente descritiva e o que se procurava com uma teoria cinética dos gases era “deduzir o comportamento e as propriedades macroscópicas dos gases e fluidos a partir das leis fundamentais que regem os movimentos das partículas componentes.” (VOLCHAN; VIDEIRA, 2001 p.20).

Segundo Brush (1988) os fatores que levaram a teoria cinética do calor a ser tomada novamente em consideração foram: a descoberta do princípio da conservação da energia, na metade do século XIX; as evidências de que a pressão de um gás não era causada por forças repulsivas intermoleculares, idéia esta associada ao fluido calórico; e “a aceitação generalizada da teoria ondulatória da luz a qual – combinada com a visão de que calor e luz são qualitativamente o mesmo fenômeno – sugeria que o calor, como a luz, é uma forma de movimento em vez de uma substância”. (BRUSH, 1988, p.228)

Qual era então, o problema? O problema era que a *hipótese atômica*, que nos parece tão familiar e até natural nos dias de hoje não era aceita por um conjunto de eminentes cientistas como Ernest Mach, Pierre Duhem, Ostwald e até mesmo Max Planck⁴⁴. “O atomismo, na verdade, é até então apenas uma hipótese: a matéria como formada de um número muito grande de componentes microscópicos, discretos, cuja interação mútua e arranjo espacial resultam nas propriedades e características macroscópicas das diversas substâncias” (VOLCHAN;

⁴⁴ Digo “até mesmo Planck” pelo fato, também irônico, de ter sido ele posteriormente a propor uma idéia bem mais radical do que a natureza discreta da matéria: a natureza discreta da energia; o *quantum* de energia.

VIDEIRA, 2001, p.19). Os átomos e as moléculas não podiam ser observados. E assim sendo, estes cientistas usavam o argumento, digamos, epistemológico (positivista) de que o que não é observável nem mensurável não é real. Como não era possível ver um átomo, ele não passava de uma hipótese. Para os energetistas, toda a questão do átomo se resumia a uma questão metafísica e a metafísica, segundo eles, “não podia contaminar a ciência”.

Os energetistas eram assim chamados por defenderem a idéia de uma nova substância primordial da natureza: a energia, que seria responsável pelas interações entre a matéria. A ironia desta proposta reside exatamente em que um conceito que nasceu da superação de uma idéia substancialista se transformaria agora em mais uma substância⁴⁵. A energia seria uma “substância material que se transformaria em múltiplas aparências (térmica, mecânica, psíquica, elétrica e magnética) e quando “somadas” constituiriam a energia total que existe e é conservada no universo.” (MORENO, 2006, p.418). Segundo Moreno, os energetistas representavam um pensamento conservador frente à possibilidade de uma descrição da natureza puramente mecânica que tivesse como decorrência a inutilidade de um ser superior a reger os destinos do universo. Um argumento mais técnico, digamos assim, era o de que não havia necessidade de reduzir o calor a outras formas de energia, o calor já era uma forma de energia e não era necessário reduzi-lo a movimento.

Temos aí as bases de uma polêmica furiosa e apaixonada que, segundo alguns, foi a principal causa dos recorrentes estados depressivos de Boltzmann e do seu conseqüente suicídio. Vou, portanto, agora, traçar em linhas gerais os fatos mais significativos no desenvolvimento da teoria cinética dos gases, principalmente aqueles protagonizados pelas figuras

⁴⁵ Ver obstáculo epistemológico substancialista em Bachelard.

de Clausius, Maxwell e Boltzmann⁴⁶ e que me ajudam a traçar um percurso histórico através do conceito de entropia.



Fonte: Wikipedia

Figura 9 - Túmulo de Boltzmann em Viena.

A Teoria cinética dos gases apresentada por Clausius no trabalho de 1857 descreve as condições moleculares de um gás⁴⁷:

⁴⁶ O relato histórico feito aqui tem como fonte principal o livro "The kinetic Theory of Gases" de Stephen G. Brush (2003) que apresenta vasto material para uma consulta mais detalhada sobre o assunto. (ver referências)

⁴⁷ A versão moderna e didática da teoria cinética dos gases apresenta as seguintes hipóteses básicas: (1) toda matéria é composta de um número extremamente grande de moléculas idênticas. (2) O tamanho de uma molécula de gás é desprezível em relação à distância média entre estas moléculas. (3) As moléculas estão em movimento constante em todas as direções. (4) As forças de interação entre as moléculas são de curto alcance, atuando somente durante as colisões. (5) Tanto as colisões entre as moléculas como as colisões entre elas e as paredes do recipiente são perfeitamente elásticas.

De acordo com as leis de Mariotte e Gay-Lussac, como também com outras em conexão com estas, que devem ser estritamente observadas, o gás deve obedecer estritamente as seguintes condições com respeito a sua condição molecular:

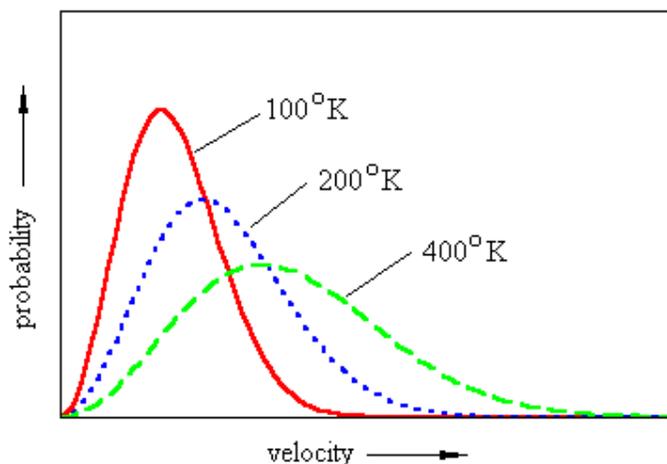
O espaço ocupado pelas moléculas deve ser infinitesimal em comparação com o espaço ocupado pelo próprio gás.

A duração de um impacto, ou seja, o tempo requerido para produzir a mudança no movimento de uma molécula quando se choca com outra molécula ou com uma superfície fixa, deve ser infinitesimal em comparação ao intervalo de tempo entre duas colisões sucessivas.

A influência das forças moleculares deve ser infinitesimal[...] (CLAUSIUS apud BRUSH, 2003, p.116)

Clausius atribuiu movimento de rotação às moléculas como forma de aproximar a teoria aos valores experimentais. Mostrou como se poderia estimar a parcela de energia de translação das moléculas da sua energia total usando dados de calor. Esta teoria apresentou resultados importantes como a descrição das propriedades dos gases em equilíbrio; a interpretação atômico-molecular da pressão; as equações de estado; a relação entre temperatura e energia cinética; uma expressão matemática para o calor específico; o teorema da equipartição da energia; e dava uma interpretação qualitativa às mudanças de estado. No final do artigo de 1857, Clausius estimou a velocidade das moléculas em temperatura ambiente entre 461 m/s e 492 m/s. Foi feita então uma objeção de que se as moléculas se movem tão rapidamente, a mistura de gases por difusão deveria ser mais rápida que o observado. Um gás lançado em uma pequena sala se espalharia quase que instantaneamente neste espaço. Neste sentido Clausius se viu obrigado a rever seu postulado sobre o tamanho "infinitesimal" das moléculas e estas passaram a ter um diâmetro grande o suficiente para que não pudessem ir muito longe sem colidir com outras. Ele assim define o *livre caminho médio*: a distância média que uma molécula pode percorrer antes de interagir com outras. Já temos aqui um elemento estatístico, uma indeterminação embutida na idéia de uma distância média. De fato o caminho livre médio é

inversamente proporcional à probabilidade de que uma molécula venha a colidir com outra quando se move através do gás. Segundo Dias (1994), um dos pressupostos de Clausius era a independência estatística das colisões: a probabilidade de uma colisão ao atravessar uma camada do gás é independente da molécula ter ou não colidido numa camada anterior. Os energetistas ainda poderiam objetar que a definição de livre caminho médio de Clausius poderia ser uma hipótese ad hoc para salvar a teoria, visto que nela havia parâmetros ainda a serem determinados de forma independente. Neste ponto J. C. Maxwell (1831-1879) entra em cena transformando a teoria de Clausius em um poderoso instrumento matemático de pesquisa. Segundo Brush (2003), Clausius usou conceitos de probabilidade nas suas derivações da fórmula do livre caminho médio, mas foi Maxwell quem converteu a teoria cinética em uma doutrina completamente estatística. Ele estendeu a aplicação da teoria cinética dos gases mostrando que ela poderia ser usada não apenas para explicar as propriedades dos gases em equilíbrio, mas também para estudar fenômenos de transporte dos gases como viscosidade, difusão e condução de calor. A adesão, por parte de Maxwell, às hipóteses de Clausius foi rápida e ajudou no desenvolvimento e na consolidação da teoria. Para Clausius, as moléculas em um gás homogêneo à mesma temperatura, tinham todas a mesma velocidade, mas Maxwell sugeria que as colisões entre as moléculas iriam produzir uma distribuição *estatística* destas velocidades. Ele toma emprestadas fórmulas das Ciências Sociais e faz uma aplicação não trivial da "lei de distribuição normal" de Gauss e Adrian em uma lei de velocidades moleculares. A velocidade média das moléculas é proporcional à temperatura do gás, tanto para Maxwell quanto para as teorias cinéticas anteriores, mas na formulação de Maxwell a velocidade média das moléculas obedece a um padrão de distribuição, de modo que moléculas com velocidades bem diferentes podem ser encontradas em um gás com temperatura constante. Obviamente que em um gás mais quente a proporção de moléculas com velocidades maiores será maior, e ocorrerá o oposto nos gases mais frios.



Fonte: <http://tannerm.com/images/maxboltz2.gif>

Figura 10 - Representação gráfica da distribuição estatística das velocidades moleculares de um gás em diferentes temperaturas.

Por volta de 1860, a hipótese atômica, apesar de plausível, era ainda uma hipótese. Mas, foi a teoria cinética, no nível ao qual foi elevada por Maxwell, que permitiu uma primeira estimativa confiável do tamanho do átomo. Depois de Maxwell,

O átomo não seria então mais considerado um mero conceito hipotético, mas uma entidade física real sujeita a medidas quantitativas, embora não pudesse ser visto. Esta foi uma das mais importantes contribuições da teoria cinética dos gases para a ciência do século XIX. (BRUSH, 2001)

Como dito anteriormente, Maxwell transformou a teoria cinética dos gases em uma teoria estatística. Isto parece levar à conclusão de que antes dele a tendência dos cientistas era acreditar que um gás fosse um sistema mecânico determinista nos moldes do paradigma newtoniano. O determinismo, neste caso, se configura na possibilidade de descrição detalhada do comportamento do sistema (o gás) tanto no futuro como no passado se soubermos suas posições e velocidades no presente, usando as leis reversíveis da mecânica. Em tese, se a pretensão dos cientistas da época era realizar esta descrição mecânica de um gás como forma de explicar suas propriedades macroscópicas, seria necessário saber todas as

posições, velocidades e tipos de movimento (rotação, vibração etc.) das moléculas individuais em um determinado instante. Só assim se poderia calcular suas posições e velocidades em qualquer outro tempo. Laplace (1749-1827) sugeria que apenas uma entidade dotada de "superinteligência" seria capaz de realizar tal tarefa. Mas pelo que sabemos hoje, nem o maior dos supercomputadores – versão atual da "superinteligência" imaginada por Laplace - é capaz de realizar tal tarefa. Não se trata "apenas" da dificuldade de computar todos os dados, mas de uma dificuldade intrínseca ao comportamento de um grande número de partículas. A questão que irá se desenvolver daí por diante na termodinâmica (e em outros ramos da física) diz respeito à aceitação ou não de um universo que se comporte obedecendo a probabilidades e não mais a certezas. É nesta direção que irá se desenvolver o estudo da termodinâmica mais adiante: na relação entre irreversibilidade, determinismo e probabilidades.

A conexão da irreversibilidade com a teoria cinética dos gases é, de certa forma, uma questão levantada contra o pensamento determinista, décadas antes do princípio da incerteza ter sido anunciado por Heisenberg.

Esta situação deve ser diferenciada de forma precisa, de acordo com o tratamento usual da história da física moderna, do postulado da aleatoriedade atômica ou indeterminismo o qual foi adotado apenas em 1920 em conexão com o desenvolvimento da mecânica quântica. Deste modo, parte da "revolução científica" que ocorreu no início do século 20 é considerada como sendo uma mudança descontínua do determinismo clássico para o indeterminismo quântico. (BRUSH, 2001)

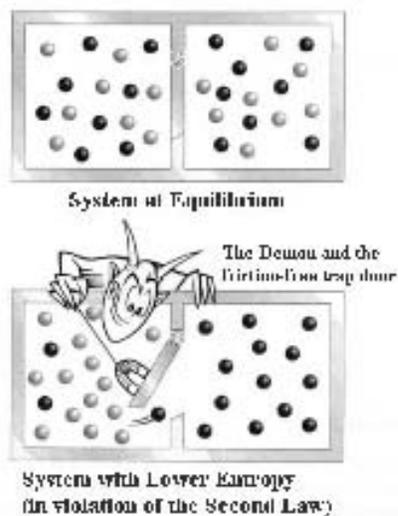


Figura 11 - O demônio de Maxwell selecionando moléculas de acordo com sua energia cinética.

Fonte: <http://universe-review.ca/I01-09-demon.jpg>

Uma imagem que se tornou famosa na história da física e que faz uma síntese desta passagem entre os dois mundos (determinista e probabilístico, macroscópico e microscópico) é a figura do *Demônio de Maxwell*. Esta figura surgiu quando P.G. Tait pediu a Maxwell uma colaboração nas explicações da termodinâmica para um livro didático que estava escrevendo. Maxwell, então, propôs o exemplo hipotético de violação da segunda lei da termodinâmica. Um pequeno demônio ficaria posicionado na porta que separa duas pequenas câmaras contendo um mesmo gás a diferentes temperaturas. Pela lei de distribuição das velocidades do próprio Maxwell, as velocidades das moléculas podem assumir vários valores diferentes: algumas moléculas do gás frio, por exemplo, podem ter velocidades maiores do que a média no gás quente, enquanto moléculas do gás quente podem ter velocidades menores do que a média do gás frio. O trabalho do demônio é selecionar estas moléculas especiais, que estão fora do padrão do seu grupo e deixa-las passar para o outro lado fechando e abrindo a portinha. As moléculas mais lentas vão para o lado frio e as mais rápidas vão para o lado quente. O resultado disto seria tornar o gás quente ainda mais quente e esfriar mais ainda o gás frio.

Além de reverter o irreversível, o Demônio de Maxwell ofereceu um novo modelo para o processo irreversível fundamental: ele traduziu o fluxo de calor em termos de uma distribuição molecular. (BRUSH, 2001)

A seleção de moléculas especiais feitas pelo pequeno demônio está normalmente associada à idéia de ordem. E a mistura dos gases sem a existência do demônio leva à “desordem” das moléculas. No entanto, deve-se notar que não se trata de uma mera ordem ou desordem espaciais, como por exemplo, o fato delas estarem com uma distribuição geométrica regular ou não, mas uma desordem do ponto de vista de partículas em estados energéticos diferentes. O caráter estatístico da segunda lei da termodinâmica está relacionado ao fato de que não é possível prever o comportamento futuro das moléculas em suas interações, do ponto de vista macroscópico. O demônio de Maxwell pode fazer isto apenas de forma individual e mesmo assim precisa prever a velocidade da molécula que está vindo. Dias (1994) cita as conclusões de Maxwell a respeito do caráter estatístico da segunda lei: para a autora, Maxwell faz a distinção entre leis dinâmicas e leis estatísticas. Um exemplo desta distinção é a segunda lei da termodinâmica que, por ter um forte caráter estatístico, *não pode ser demonstrada por nenhum argumento puramente mecânico. A peculiaridade do movimento chamado calor é que ele é perfeitamente irregular.* (DIAS 1994, p.) era assim que Maxwell se referia ao fato de o movimento futuro de uma molécula não poder ser expresso como dependente da posição presente e do tempo.

A conclusão de Maxwell foi que a validade da segunda lei não é absoluta, mas depende da não existência de um demônio que consiga separar as moléculas; deste modo se trata de uma lei estatística apropriada apenas para fenômenos macroscópicos. Chamar a segunda lei de uma “lei estatística” não implica logicamente que ela esteja baseada em eventos aleatórios – ao contrário. Se o demônio de Maxwell não puder prever o comportamento futuro das moléculas quando elas se aproximam da porta, ele não poderá realizar seu trabalho eficientemente. (BRUSH, 2001)

Clausius propôs o conceito de entropia no intuito de poder explicar o comportamento assimétrico da natureza quando se trata da irreversibilidade dos fenômenos. A sua equação para a entropia não nos oferece uma verdadeira explicação para o conceito. Na verdade, muitos concordam que é um conceito bastante obscuro, na forma em que foi construído.

Estava ainda para ser realizada a tarefa de encontrar uma “explicação mecânica” para a segunda lei e conseqüentemente para a entropia, agora com um ingrediente a mais na mistura: o caráter estatístico da segunda lei que apontava no horizonte da pesquisa, devido aos trabalhos de Maxwell. Mas Ludwig Boltzmann, “na ingenuidade dos seus 22 anos” (na expressão usada por Dias (1994)) se propôs a realizar tal tarefa: explicar a irreversibilidade expressa na segunda lei através de um modelo mecânico molecular.

O objetivo do presente artigo é estabelecer uma prova puramente analítica e geral da segunda lei da termodinâmica, bem como descobrir o teorema da *mecânica* que a ela corresponde. (BOLTZMANN apud DAHMEN, 2006)

Segundo Pereira Jr. (1994) este seria um programa de orientação reducionista no qual as leis da termodinâmica, enquanto leis fenomenológicas, deveriam ser explicadas por uma teoria mais fundamental: as leis da mecânica. A partir deste ponto, na pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho, notei que, contrariamente à impetuosidade do jovem Boltzmann, os especialistas consultados empregam um discurso muito mais cuidadoso, dada a natureza ainda controversa das questões apresentadas. As questões e refutações levantadas são variadas e abrangem desde questões de natureza teórica da física a questões de epistemologia da ciência ou puramente filosóficas. Duas correntes principais, como já afirmei, se empenharam passionalmente em defender seus pontos de vista: energetistas e

atomistas. Podemos apenas imaginar como teria sido a natureza desta polêmica em seu tempo⁴⁸.

O fato é que Boltzmann propôs, em 1866, o que Bassalo (2009) explica como *um modelo mecânico no qual considerou que as moléculas de um gás se moviam em órbitas periódicas e com isto deduziu uma expressão analítica para a entropia que dependia do período das partículas em suas órbitas e que aumentava com o tempo*. Esta formulação ficou conhecida como o teorema **H** que, segundo Volchan e Videira (2001, p.22), *parece fornecer uma justificação mecânica para a segunda lei da termodinâmica na forma de $dS(t)/dt \geq 0$* . Para Dias (2001) *o teorema parecia dizer que existe uma integral **H** de uma certa função da posição e da velocidade de uma molécula que decresce com o tempo*. Para um gás em equilíbrio o **H** é definido como menos a entropia, do modo que foi definida por Clausius em 1865. Enquanto a entropia na termodinâmica é definida apenas para estados de equilíbrio, Boltzmann sugere que a função **H** poderia ser considerada como uma entropia generalizada, tendo um valor para qualquer estado. Então o teorema **H** é equivalente à afirmação de que a entropia sempre aumenta ou permanece constante e isto é um enunciado da segunda lei da termodinâmica. Até este ponto a explicação tentada por Boltzmann é ainda basicamente determinista, no sentido de que, a partir de um modelo mecânico microscópico e apesar do caráter estatístico da distribuição das velocidades e posições das partículas, a sua função seria capaz de prever o comportamento de um sistema. Como sua aplicação era restrita a sistemas estritamente periódicos, Boltzmann passou a usar elementos estatísticos da função de distribuição de Maxwell.

As leis da mecânica não se alteram sequer minimamente se trocarmos, sem mais nem menos, o sinal do tempo. Assim, processos puramente mecânicos podem ocorrer num sentido como no seu oposto, *i.e.* no sentido de tempo crescente como no de tempo decrescente. Notamos, porém no nosso dia-a-dia

⁴⁸ Sobre esta polêmica e suas bases epistemológicas, ver Videira (1994).

que futuro e passado não coincidem tão perfeitamente quanto esquerda e direita, mas que ambos são completamente diferentes. Isto é mais precisamente colocado através da chamada segunda lei da Termodinâmica. Ela nos diz que, quando um sistema arbitrário de corpos que não interage com outro sistema é deixado por si só, é sempre possível dizer em que direção uma mudança de estado se dará. Pode-se na verdade definir uma função da totalidade dos corpos, a entropia, com a propriedade que toda mudança de estado só pode ocorrer se ela implicar um aumento desta função, ou seja, com o aumento do tempo a função sempre aumenta. Tal lei só pode ser obtida através de abstração, como o princípio de Galileu, uma vez que é impossível isolar completamente um corpo da influência de outros corpos. Como esta lei, junto a outras, sempre levou a resultados corretos até o momento, aceita-mo-la como correta, do mesmo modo que aceitamos o princípio de Galileu. (BOLTZMANN, 2006, p.264)

Boltzmann teria que retornar várias vezes a seu teorema para reformulá-lo tendo em vista as objeções e críticas que recebeu. Uma das principais objeções foi proposta por Josef Loschmidt em 1876 e ficou conhecida como o "paradoxo da reversibilidade". Este argumentava que de acordo com as leis de Newton seria possível voltar a qualquer estado inicial simplesmente invertendo as velocidades das moléculas. Isto parecia ser uma contradição fundamental entre a reversibilidade das leis de Newton e a irreversibilidade que encontramos na natureza: como é possível, através de leis reversíveis, derivar equações que expliquem comportamentos irreversíveis? A resposta de Boltzmann foi que a entropia é realmente uma medida de probabilidade de um estado, definido macroscopicamente. Enquanto cada estado microscópico (especificado dando-se todas as posições e velocidades moleculares) pode ser considerado como tendo igual probabilidade de ocorrer, estados macroscópicos correspondentes ao equilíbrio térmico são, na verdade, conjuntos de um grande número de estados microscópicos e, portanto, têm alta probabilidade. Por outro lado, estados macroscópicos que desviam significativamente do equilíbrio consistem de apenas alguns estados microscópicos e têm probabilidade muito baixa. Em um processo irreversível típico o sistema passa de um estado pouco provável (entropia baixa) para um estado mais provável (entropia mais alta). É desta

explicação estatística que deriva a famosa equação que $S = K \ln W$, que se encontra gravada na tumba de Boltzmann em um cemitério em Viena. A distinção entre macro e microestados é crucial na teoria de Boltzmann. Como o demônio de Maxwell, um observador que pudesse lidar diretamente com microestados não perceberia a irreversibilidade como uma propriedade dos fenômenos naturais. É apenas quando decidimos agrupar certo número de microestados e designá-los coletivamente como macroestados “desordenados” ou “em equilíbrio”, que podemos falar sobre ir de estados menos prováveis para mais prováveis. Posso colocar aqui algumas consequências da concepção estatística da entropia: primeiramente esta interpretação estatística permite determinar um valor da entropia também em estados de não equilíbrio e admite que sendo a entropia uma grandeza probabilística ela admite flutuações de valor. Eventualmente a entropia poderia diminuir. Por que então, em nível macroscópico, mesmo sendo possível esta diminuição em um sistema fechado, ela não é observada em nenhum único caso?

A segunda objeção importante diz respeito a um teorema desenvolvido pelo matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) em 1890. Basicamente, Poincaré afirma que, sob certas condições, um sistema de partículas como um gás, eventualmente retornará tão perto quanto se queira de qualquer conjunto inicial de posições e velocidades moleculares. E se a entropia é determinada por estas variáveis, ela deve também retornar ao seu valor original. Assim, se ela cresce durante certo período de tempo, deve decrescer durante outro. Esta objeção se tornou conhecida como “paradoxo da recorrência”. Ele foi usado pelo matemático Ernst Zermelo em 1896 para atacar o ponto de vista mecanicista do mundo. Ele alegava que a Segunda lei é uma verdade absoluta, de modo que qualquer teoria que leve a previsões inconsistentes com ela deve ser falsa. Esta refutação não se aplicaria apenas à teoria cinética dos gases, mas a qualquer outra teoria baseada na afirmação de que a matéria é composta por partículas se movendo de acordo com as leis da mecânica.

Boltzmann tinha inicialmente negado a possibilidade de tais recorrências e poderia ter continuado a negar a certeza do determinismo postulado no argumento Poincaré-Zermelo. Em vez disso, ele admitiu muito francamente que as recorrências eram completamente consistentes com o ponto de vista estatístico: elas são flutuações, as quais certamente ocorrem se você esperar um tempo suficiente. Deste modo, o determinismo leva à mesma consequência qualitativa que seria esperada de uma sequência aleatória de estados. Em qualquer dos casos, o tempo de recorrência é tão inconcebivelmente grande que a nossa impossibilidade de observá-lo não pode servir de uma objeção à teoria. O conceito de entropia, na sua proposição estatística, vem estabelecer que embora qualquer processo natural possa ser reversível, aqueles notoriamente irreversíveis são os que apresentam uma probabilidade mínima de ocorrência. São, na prática, impossíveis, visto que o tempo necessário para que ocorram é maior que a idade do universo. Este seria o significado físico da palavra impossível. Zermelo ainda refuta mais uma vez a afirmação de Boltzmann dizendo que o tempo pode ser grande, mas não existem razões para supor que todo sistema físico tenha como estado inicial um estado com tempo de recorrência tão grande. Nada impediria que encontrássemos sistemas com tempo de recorrência mais curto.

A questão da descrição mecânica e probabilística da segunda lei parece ainda uma questão em aberto, embora a visão probabilística tenha se tornado hegemônica. Segundo Hamburger (1989), a demonstração da mecânica estatística, embora correta, precisa de uma hipótese adicional *“não contida na mecânica nem na teoria das probabilidades e que não costuma ser explicitada”*. A hipótese por si mesma já traria embutida a irreversibilidade e a segunda lei da termodinâmica⁴⁹. E ele lança um argumento de ordem geral para justificar o seu:

⁴⁹ A hipótese em questão é a hipótese do “caos molecular” lançada por S.H. Burbury, em 1894, de que as colisões entre as moléculas não são correlacionadas.

Tomando duas teorias que não distinguem passado e futuro – a mecânica e a teoria das probabilidades – e juntando-as, não se obterá uma teoria que preveja a irreversibilidade sem juntar um elemento adicional que já tenha esta característica. Juntando-se duas teorias reversíveis, obter-se-á apenas outra teoria reversível. (HAMBURGER, 1989, P. 40)

Para Pereira Jr. (1994), por exemplo, a interpretação estatística expressa por $S=k \ln W$ não possui um significado físico primário nem necessariamente expressa propriedades do estado em que se encontra um determinado sistema. Ela não nos permite nenhuma inferência com base física a respeito da evolução temporal da entropia.

O caso do uso de hipóteses na física foi um dos aspectos principais do debate entre energetistas e atomistas, do ponto de vista epistemológico. Não raramente, Boltzmann teve que lançar mão da filosofia e epistemologia como elementos adicionais de convencimento dos seus pares. Aliás, posso me referir com segurança a um Boltzmann epistemólogo da ciência que dedicou grande parte do seu tempo a difundir idéias contra o que ele acreditava ser a tendência dogmática do pensamento científico, representada muito fortemente pelos defensores do energetismo. Para Boltzmann, um cientista que trabalha com teorias deve, em primeiro lugar, saber o que elas são. A teoria para ele é uma imagem ou representação subjetiva do real. É uma imagem puramente mental daquilo que ocorre na natureza e toda representação começa com uma idealização do fenômeno em questão. A princípio, para Boltzmann, não faz sentido a discussão de qualquer argumento relativo à realidade objetiva dos átomos. O que está em discussão é a capacidade do atomismo de construir imagens do mundo externo. Para ele, o átomo é uma criação do cientista e em um primeiro momento sua realidade é teórica. Uma teoria não deve apenas descrever o fenômeno, mas também prever ou criar outros ainda desconhecidos. A teoria ultrapassa o nível do fenômeno⁵⁰. Na epistemologia de Boltzmann,

⁵⁰ Encontro aqui uma similaridade com o conceito de fenomenotécnica desenvolvido por

A tarefa do cientista não pode ser a de encontrar uma teoria absolutamente correta, mas somente encontrar uma imagem que represente, o melhor possível os fatos. A afirmação de que uma teoria é a única correta, nada mais é do que pressão de uma crença pessoal. (BOLTZMANN apud VIDEIRA, 1994, p.464).

Uma teoria é sempre aproximada, deve ter a capacidade de ser aperfeiçoada. E para que exista progresso científico, os cientistas devem estar em condições de confrontar várias teorias diferentes, todas capazes de representar o mundo exterior. Este pluralismo teórico proposto por Boltzmann seria o remédio contra o dogmatismo que segundo ele poderia causar danos irreparáveis ao pensamento científico.

Este terceiro momento histórico e epistemológico da termodinâmica se caracteriza, portanto por uma *passagem* entre duas representações do mundo físico. Inicialmente a idéia prevalecente é aplicar o modelo mecânico determinístico à teoria do calor. Esta tarefa se faz relativamente simples no caso da primeira lei da termodinâmica, a partir dos postulados da teoria cinética dos gases e vai sendo gradualmente modificada até identificarmos uma nascente teoria do caos nos escritos de Maxwell⁵¹. Optei por caracterizar este MHE não pela oposição das visões macro/micro, mas pela ruptura com a visão determinista do conhecimento científico. O papel deste MHE no percurso didático para a entropia é discutir como se deu esta passagem, quais suas premissas e dificuldades. A discussão sobre a natureza do calor - que vem servindo como um dos pontos de referência deste percurso - sofre mais uma vez uma ruptura no sentido de que o calor deixa de ser uma forma de energia para ser fisicamente reduzido à energia mecânica das moléculas. A entropia, por

Bachelard. As idéias de Boltzmann a respeito do conhecimento científico apresentam pontos comuns com a explicação de Bachelard para o período pós-científico ou o "novo espírito científico" que ele caracteriza com a relatividade e a física quântica.

⁵¹ Brush (2003) considera que em certos momentos Maxwell tem posições menos deterministas que o próprio Boltzmann. Ele identifica um artigo em que Maxwell sugere que mudanças mínimas nas características das colisões entre moléculas poderiam acarretar o comportamento irreversível de uma massa de gás. Enquanto isso, Boltzmann referenda a hipótese do caos molecular, ou desordem molecular, como forma de manter a coerência determinista do teorema H.

sua vez, ganha sua versão estatística como uma medida de probabilidade de ocorrência de um determinado estado termodinâmico, no caso de estados de equilíbrio e é posteriormente generalizada para estados fora do equilíbrio. É importante ressaltar, dentro de um ponto de vista didático, que a irreversibilidade observada na natureza se impõe como a principal noção a ser tratada cientificamente. A segunda lei da termodinâmica, como expressão formal das irreversibilidades, passa por uma evolução sutil. Parte de uma afirmação geral – até certo ponto derivada do senso comum - de que o calor sempre passa de um corpo mais quente para um corpo mais frio, para servir de parâmetro de delimitação entre o que é um mundo macroscópico onde a segunda lei é absoluta, e um mundo microscópico onde esta assume um caráter estatístico e depende da não existência de um demônio.

Termino, assim, a caracterização dos três momentos históricos e epistemológicos que subsidiam a análise epistemológica que vem a seguir. Esta análise buscará primordialmente encontrar, nos três momentos, as categorias descritas por Bachelard na sua caracterização do desenvolvimento do espírito científico. Tais categorias permitem agregar elementos a uma psicanálise do conhecimento objetivo no que se refere à termodinâmica e ao conceito de entropia.

3

Uma visão Epistemológica da Termodinâmica Básica

3.1 O calórico como obstáculo epistemológico

O desenvolvimento da termodinâmica, até Carnot, está fundado na descrição das propriedades do calor enquanto produtor de força motriz. A idéia do calórico como substância do calor não é, até então, propriamente o objeto de estudo de maior interesse. A atenção maior está no objeto tecnológico da época, a máquina a vapor, que tem uma importância social e econômica sem precedentes. O interesse sobre a real natureza do calor vai se tornando importante na medida em que cresce, posteriormente, a necessidade de contabilizar, de forma cada vez mais precisa, a produção das máquinas (BRUSH, 1988). Mesmo estando em disputa com a concepção mecânica do calor que apresentava argumentos igualmente fortes, a noção do calórico prevalece. A natureza do calor parece ser tratada inicialmente como uma questão apenas de caráter filosófico que interfere de forma periférica no processo de construção de máquinas e seu funcionamento.

Já me referi também à influência da superioridade científica francesa, especialmente à influência dos químicos franceses tendo Lavoisier como nome mais expressivo, na prevalência da teoria do calórico no final do século XVIII. Neste momento irei pensar esta prevalência em termos da noção de obstáculos epistemológicos. Em que medida podemos considerar que um conceito se estabelece com base nas formas próprias do pensamento. Formas estas propostas por Bachelard como obstáculos inerentes à produção do conhecimento científico em si. Primeiramente farei uma síntese das principais características do calórico como *a substância do calor* e posteriormente mostrarei sob quais aspectos

considero esta teoria como fundada na noção de obstáculo epistemológico substancialista.

O calórico foi definido por Lavoisier (1743-1794) como:

Substância real e material, ou fluido muito sutil, que se insinuando entre as partículas dos corpos, separa-os uns dos outros; e mesmo admitindo a existência desse fluido hipotética, devemos ver na sequência que ela explica os fenômenos da natureza de forma muito satisfatória” (LAVOISIER, 1864)

Portanto, o calórico está caracterizado como substância material da mesma natureza que as demais substâncias químicas que constam na lista criada por Lavoisier.

Esta substância, *o que quer que ela seja*, sendo a causa do calor (heat), ou, em outras palavras, a sensação a qual chamamos *calor (warmth⁵²)*, sendo causada pela acumulação dessa substância, não podemos, estritamente falando, distingui-la pelo termo calor, porque o mesmo nome, muito impropriamente, expressaria causa e efeito... por este motivo designamos a causa do calor, ou aquele fluido perfeitamente elástico que o produz, pelo termo calórico. (LAVOISIER, 1864, p.19)

A ressalva feita por Lavoisier sobre a substância, “o que quer que ela seja”, denota ambiguidade quanto à sua natureza, visto que anteriormente havia descrito como uma substância material e real, dando a entender uma natureza química para ela. Aurani (1986) cita a obra “*The existence of fire*” de G. Gregory, para acrescentar outras denominações e qualidades do calórico: “o elemento do fogo, fluido sutil e evasivo, *maravilhoso*, assume tantas formas que sua própria existência tem sido questionada por alguns filósofos”. Este autor, ao longo do texto, utiliza indiscriminadamente termos como matéria do fogo, elemento do fogo, fogo e naturalmente calórico.

⁵² A palavra “warmth” se refere a sensação de quente sendo melhor traduzida como “quentura”.

Esta substância tem propriedades interessantes como fortemente atraído pela matéria e auto-repulsivo, podendo penetrar todos os corpos. Por outro lado, o calórico apresentado por Carnot tem uma diferença essencial daquela descrita por Lavoisier: se o calórico, na sua descrição original, é a substância produtora do calor e dos seus efeitos, decorre que, quanto maior quantidade dessa substância um corpo adquire, maior o seu efeito sobre este corpo, ou seja, maior a sua temperatura. Da mesma forma, quando retiramos calórico de um corpo, sua temperatura diminui. Na concepção de Carnot, o calórico se conserva. Entretanto, uma mesma quantidade da substância pode produzir temperaturas diferentes. Na descrição de sua máquina térmica, Carnot levanta uma questão que é central na sua argumentação: se a quantidade de trabalho ou potência motriz produzida por uma queda do calórico de 100 graus para 50 seria a mesma produzida por uma queda do mesmo calórico de 50 graus para zero. Se levarmos em consideração a definição de Lavoisier, existe uma incoerência entre as duas definições: a quantidade de calórico para produzir 100 graus seria diferente daquela necessária para produzir 50 em uma mesma substância⁵³. O que representa "a queda" do calórico de uma temperatura mais alta para uma temperatura mais baixa na explicação de Carnot? Certamente não é uma perda da substância, visto que Carnot partilha a aceitação do princípio de conservação do calórico.

Não é objetivo desta tese discutir as questões apresentadas acima. Entretanto, podemos olhá-las sob o ponto de vista geral em que a idéia do calórico reflete um procedimento cognitivo frequente que é *substancializar* um objeto de estudo. Atribuir qualidades específicas a esta substância e dar explicações abrangentes com base nas características previamente escolhidas para esta substância.

Se olharmos estas questões sob o ponto de vista dos obstáculos epistemológicos, identificamos o obstáculo substancialista na teoria do

⁵³ Neste sentido, Aurani se refere à discussão entre T. S. Kuhn e La Mer sobre a natureza do calórico em Carnot.

calórico. De fato não interessa o que a substância realmente seja. A uma substância qualquer são atribuídas qualidades especiais para que cumpra as funções que desejamos. O caráter substancialista não se refere meramente ao aspecto material do objeto de estudo, mas à substancialização deste objeto. A principal característica do obstáculo substancialista é assumir a substância como fundamento da realidade mesma. Este obstáculo, como diz o próprio Bachelard, é essencialmente polimorfo, vago e imensamente tolerante. A substancialização não explica como realmente age o calor. A simples presença da substância é suficiente para que o fenômeno aconteça. A substância exerce uma função que se auto-justifica. Não há necessidade de maiores explicações, pois, por definição, a substância do calor tem a função de aquecer. Todo o processo é explicado pelas qualidades inerentes à substância. *O obstáculo substancialista atribui qualidades diversas, tanto à qualidade superficial quanto a à qualidade profunda.* (BACHELARD, 2005, p.121)

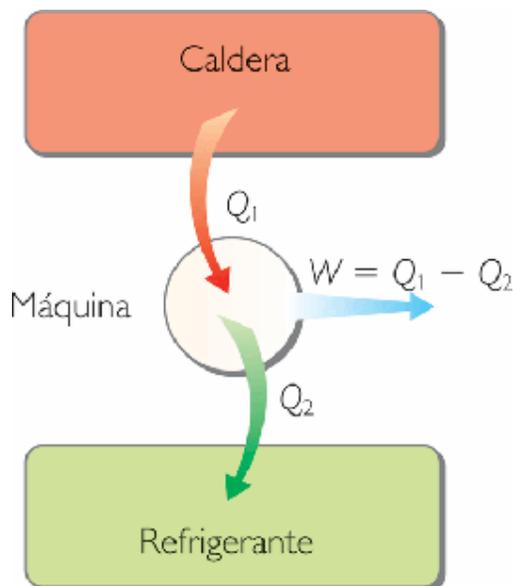
O calórico tem a capacidade de se unir fortemente às partículas da matéria ao passo que é altamente auto-repulsivo. É infinitamente elástico para que seja possível explicar a transferência de calor do Sol para a Terra. A idéia substancialista explica tanto a qualidade manifesta (aumento de temperatura) quanto a qualidade oculta (auto-repulsão e atração à matéria). As qualidades substanciais encontram-se acima da organização estrutural. A explicação não parte de uma estrutura conceitual que, por sua vez, implique na existência da substância e sim o oposto: usa-se a substância como base para compor uma estrutura conceitual. *A idéia substancialista é quase sempre ilustrada por uma simples continência. É preciso que algo contenha; que a qualidade profunda esteja contida.* (BACHELARD, 2005, p.123). Especialmente para o calor, esta idéia de continência é exemplarmente verificada. Um corpo quente seria aquele que contém mais calor ou aquele que recebeu mais calor. O conceito de capacidade térmica, ainda hoje apresenta dificuldades de entendimento tanto por questões lingüísticas implícitas no termo

capacidade, como nas consequências epistemológicas de uma idéia substancialista do calor como algo que o corpo recebe ao se aquecer. A capacidade térmica de um corpo exprime a relação entre o calor transferido a este corpo específico e a conseqüente variação de sua temperatura. Corpos de uma determinada substância e de diferentes massas precisam de diferentes quantidades de calor para um dado aumento de temperatura. Corpos de diferentes substâncias e de mesma massa podem sofrer o mesmo aumento de temperatura com diferentes quantidades de calor. O termo *capacidade térmica* remete esta diferença à condição do corpo de armazenar maior ou menor quantidade de calórico.

Nos textos atuais de física, embora não seja apresentado o termo “capacidade de armazenamento de calórico”, a concepção substancialista está presente na idéia de que um corpo *recebe calor* (quem recebe, recebe algo). Mesmo numa tentativa de adequação da linguagem, vemos casos em que o texto é escrito da seguinte forma: *um corpo recebe energia térmica em forma de calor...* Em um exemplo sobre as trocas de calor entre corpos num calorímetro, temos como regra que o “calor cedido é igual ao calor recebido”. Ora, se substituirmos, nos dois exemplos, o termo calor ou “energia térmica em forma de calor” por *calórico* não alteramos de nenhuma forma o raciocínio envolvido visto que a essência desse pensamento ainda é substancialista.

Convivemos diariamente na física com expressões indicando que calor e energia podem ser armazenados em um corpo. A energia pode estar armazenada numa substância para ser liberada durante uma reação química. Portanto, neste nível de entendimento teórico da termodinâmica, mesmo que expressemos verbalmente a idéia do calor de uma forma mais coerente possível como a noção de energia, paira sobre as nossas cabeças a mesma concepção utilizada por Carnot quando fazia a analogia da máquina térmica com a máquina hidráulica: uma substância que entra, se transforma e sai. Mesmo o desenho esquemático de uma máquina térmica, usado em todas as explicações didáticas, nos remete a um fluxo

“material” com uma entrada de calor na fonte quente e duas saídas: uma na forma de trabalho e outra dissipada na fonte fria.



Fonte: <http://pe.kalipedia.com>

Figura 12 - Representação esquemática de uma máquina térmica.

O obstáculo substancialista pode ser identificado nos textos didáticos ao longo de todo o conteúdo da termodinâmica do ensino médio e universitário básico. Mesmo que haja um esforço por parte dos autores e professores no sentido de identificar o calor como processo de transferência de energia, invariavelmente estes textos voltam a usar uma terminologia que remete ao calor como substância.

A maioria dos livros usa a definição de calor mais próxima da aceita atualmente; um processo de transferência de energia associada com a diferença de temperatura entre o sistema estudado e suas vizinhanças. Apesar da definição correta inicial, muitos autores (Resnick, 1993; Giancoli, 1994; Serway, 1993; Hewitt, 1995) finalmente sucumbem ao “calor como forma de energia”. Esta expressão aparece normalmente quando a unidade de calor é introduzida. (COTIGNOLA et al, 2002)

A afirmação feita pelos autores da citação anterior quanto à dificuldade encontrada pelos autores dos livros didáticos em manter uma coerência entre modelos explicativos é característica da definição dada por Bachelard ao obstáculo epistemológico: uma tendência de pensamento resistente, uma forma de tentar sempre reduzir o pensamento abstrato à experiência imediata, ao conhecimento comum.

Ao tratarmos com o conceito de energia, estamos em outro patamar racional, qual seja, o entendimento da equivalência das transformações. A energia não é “algo” que se transfere materialmente ou “sutilmente” de um corpo para outro, mas uma medida de equivalência entre transformações que ocorrem em um determinado sistema. A energia é medida indiretamente a partir dos efeitos térmicos, mecânicos, elétricos, químicos etc. que se produzem nas transformações. Por isso não se pode construir um aparelho único que meça diretamente a energia envolvida em processos diferentes. O obstáculo epistemológico substancialista se revela também na resistência oferecida por aqueles cientistas que negavam a existência do átomo. Estes passam a defender uma nova substância como elemento fundamental do universo que permearia todas as transformações: a energia.

3.2 Um perfil epistemológico do calor

Podemos abordar ainda a idéia de uma psicanálise do conhecimento objetivo a partir da noção de perfil epistemológico. Ao traçar um perfil epistemológico do calor, busco meios de alcançar um dos primeiros objetivos deste trabalho que é a gênese do conceito de entropia. Neste caso começarei pelo conceito de calor e analisarei posteriormente a possibilidade e necessidade de uma mesma construção para o caso da entropia.

O calor, na sua concepção realista primitiva, está indissociavelmente ligado ao fenômeno do fogo. A denominação "máquina de fogo" dada às primeiras máquinas térmicas demonstra bem esta característica. Tem em si as características de uma substância viva, interna aos corpos e inerente à natureza das coisas, que pode liberar todo o seu poder quando fustigado. É reconhecido como agente de todas as mudanças. É imprevisível e difícil de ser controlado, à semelhança de um deus mitológico. Pode ser sutil como na evaporação dos mares e lagos, ou pode ser violento como nas erupções vulcânicas e nos terremotos. É fonte da vida e da morte.

Em uma segunda fase do seu desenvolvimento - o empirismo, o calor sofre uma primeira quantificação ao ser associado a variações de temperatura dos objetos (capacidade térmica). Passa a ser quantificado quanto a sua capacidade de mudar o estado físico de outros corpos (calor latente). Usa-se um procedimento comparável à conduta da balança descrita por Bachelard (1977) ao se fazer comparações da quantidade de combustível (carvão, madeira) necessária para determinada quantidade de ação do calor (elevação de temperatura, evaporação de água, fusão de gelo e/ou metais etc.). Através da máquina a vapor, passa a ser

comparado à quantidade de trabalho que esta pode realizar. É uma conduta puramente quantitativa que ainda sustenta uma noção substancialista do calor.

A etapa do racionalismo clássico torna o calor um tanto mais sutil. Este agora é colocado em um patamar de convertibilidade com outros fenômenos naturais e/ou artificiais. O calor como uma, dentre as várias manifestações da natureza em transformação. É, então, entendido comparativamente a estas transformações, por uma grandeza que o transcende e transcende a todos os outros fenômenos naturais: a energia. Perde então seu caráter de substância para ser considerado como associado ao movimento das partículas da matéria. Ele agora é *uma forma de energia*; quantitativamente bem determinado através dos experimentos que buscaram encontrar os "equivalentes mecânicos" de várias transformações e qualitativamente associado à "*vis viva*" das partículas constituintes da matéria e pela possibilidade da conversão de uma forma de energia em outra. O calor como uma forma de energia é parcialmente convertido em trabalho através das máquinas térmicas e, por isso, *não se conserva* enquanto calor.

A definição que encontramos hoje de calor "como processo de transferência de energia" só vai ficar clara na formulação matemática da primeira lei quando não for possível integrar o trabalho e o calor na equação. Fica, então, claro que calor e trabalho são maneiras de variar o conteúdo de energia de um sistema em estudo, ou seja, variar sua energia interna.

Em sua fase de racionalismo completo o calor está unificado à teoria eletromagnética, agora sob a forma de radiação. Tem características semelhantes às da luz e pode ser convertido nesta e vice-versa. A dualidade da natureza ondulatória e corpuscular se manifesta também no calor (radiação térmica) no momento da explicação da radiação emitida por um corpo quente (radiação do corpo negro).

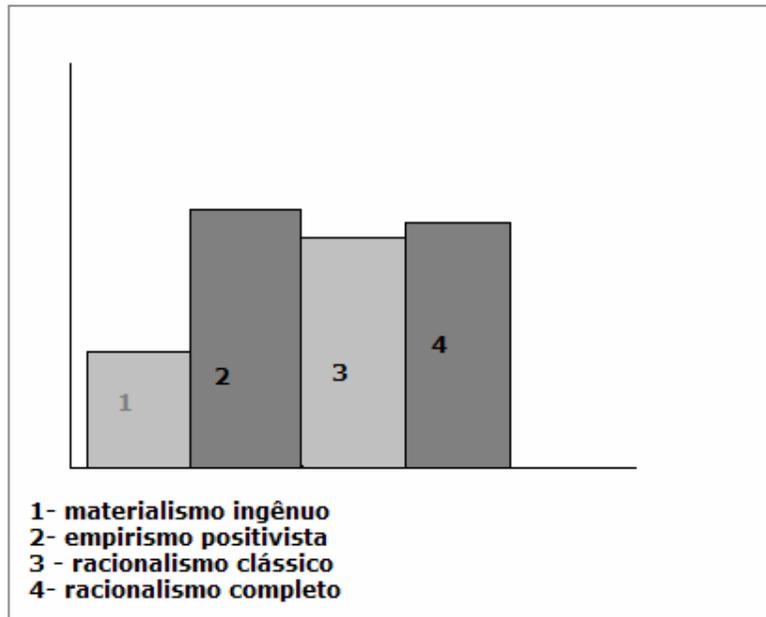


Figura 13 - Diagrama do perfil epistemológico do calor

Partindo do pressuposto de que um perfil epistemológico tem um caráter subjetivo, farei uma análise do perfil apresentado acima dentro de uma perspectiva pedagógica, de como se dá o desenvolvimento deste conceito nos manuais de ciência. O calor talvez seja o conceito físico que mais apresenta características pré-científicas em seu discurso. A visão realista do fogo, usualmente ignorada dos manuais, é uma ausência que tem muito a dizer. Uma discussão apropriada sobre a natureza do fogo e sua relação com o calor seria bastante elucidativa no início de um curso de termodinâmica. A persistência da idéia de calor como substância (2) na linguagem da física é surpreendente. Um pequeno exercício de trocar as expressões como *energia térmica*, *calor*, *energia em forma de calor*, entre outras, pela palavra "*calórico*" – nos livros didáticos - nos levaria a uma situação em que o entendimento de alguns tópicos não seriam afetados. As medidas de quantidade de calor, calor específico, calor latente e calor de combustão não são alteradas para qualquer das naturezas do calor: substância ou movimento. Grande parte de um curso de termodinâmica

básica pode ser feita dentro deste enfoque e é isto o que comumente acontece.

Uma descontinuidade acontece no momento em que o racionalismo clássico introduz a noção de energia. Esta descontinuidade necessita de pensamento mais elaborado à medida que o calor passa a ser entendido como uma forma de energia e, posteriormente, como processo ou uma forma pela qual acontece transferência de energia. No perfil epistemológico, esta posição racionalista tem um grau de importância menor mesmo que o empirismo. Isso se deve ao fato de esta noção de calor como processo não ter sido bem assimilada pela cultura escolar. A filosofia racionalista só se mostra mais presente quando do estudo da primeira lei da termodinâmica que exprime exatamente este salto no entendimento do calor, ou seja, a aplicação das leis da mecânica ao fenômeno térmico. No entanto, a concepção do calor como radiação é mais bem assimilada na cultura atual das comunicações e do predomínio dos objetos construídos a partir de uma tecnologia baseada na interpretação eletromagnética da energia.

A concepção do calor como “algo” que é capaz de ser transferido, transportado, armazenado, de fluir etc. que é corrente na literatura e na linguagem comum se constitui naquilo que deve ser “psicanalisado”, segundo Bachelard. Se considerarmos que este é o principal, mas não o único obstáculo epistemológico a ser superado, devemos buscar estratégias que nos levem à superação desta forma de pensamento, principalmente na história da ciência.

O primeiro MHE é caracterizado fundamentalmente por seu caráter substancialista o que indicaria um estágio pré-científico da termodinâmica. Poder-se-ia então objetar que a teoria do calórico guarda uma coerência interna com a ciência desenvolvida na época e é partilhada por grande parte da comunidade científica. Desta forma, não poderia ser aqui caracterizada como um obstáculo epistemológico substancialista. O fato

de uma teoria, nos moldes da teoria do calórico, conter explicações coerentes e aceitas não invalida o fato de ter em sua explicação elementos caracterizados como fazendo parte dos obstáculos epistemológicos descritos por Bachelard. A concepção de obstáculo epistemológico está estritamente relacionada ao procedimento da retificação histórica no processo de construção do conhecimento. Só podemos falar em obstáculo epistemológico substancialista para nos referirmos à teoria do calórico de forma retrospectiva, enquanto uma busca psicanalítica dos erros passados. Além disso, a retificação histórica proposta por Bachelard não implica necessariamente que todos os conceitos e formas de pensamento passados devem ser ceifados da ciência atual. Senão, vejamos o que ele diz:

Deve-se, pois compreender a importância de uma dialética histórica *própria do conhecimento científico*. Em resumo, é necessário constantemente formar e reformar a dialética da história ultrapassada e da história sancionada pela ciência atualmente ativa. [...]

Ao contrário da hipótese do *flogístico*, outros trabalhos como os de Black sobre o calórico, ainda que contenham partes a criticar, abordam as experiências positivas da determinação dos calores específicos. Ora, a noção de calor específico – podemos afirmá-lo tranquilamente – é uma noção que é *para sempre* uma noção científica. Os trabalhos de Black podem, pois ser descritos na qualidade de elementos da história sancionada. (BACHELARD, 2006, p.206)

Esta seria uma forma didática interessante para o ensino do calor. Não haveria, no meu ponto de vista, nenhum problema técnico em iniciar o curso de forma abertamente substancialista no primeiro momento e ir posteriormente *retificando* os conceitos nos momentos (MHE) seguintes.

3.3 Epistemologia da irreversibilidade

A física, enquanto corpo de conhecimento sistematizado sobre os fenômenos naturais, tem como sua principal característica a busca por regularidades. Como nos diz Menezes (2005), a física procura “determinar a identidade na diversidade; perceber a permanência e achar continuidade no fluxo”. Mesmo quando, na observação e na reprodução da maioria dos fenômenos, estejam presentes comportamentos caóticos, irreversíveis ou dissipativos procuram-se formas de aproximar esses comportamentos “indesejáveis” a modelos teóricos reversíveis e conservativos que mostrem alguma forma de regularidade, permanência ou conservação no dado fenômeno.

Ainda que atuando com procedimentos concretos e almejando consequências práticas, a busca abstrata é determinar invariantes e leis de conservação de caráter geral (MENEZES, 2005, p.17)

Ainda que, estritamente falando, não exista conservação da energia mecânica, existe o modelo teórico em que a energia mecânica se conserva. Este é um princípio que torna possível a descrição e previsão de inúmeros fenômenos naturais. Os cientistas, ao longo dos séculos, muito certamente se deram conta das irregularidades do mundo físico e, no caso específico da conservação da energia mecânica, das perdas ocorridas durante o movimento dos corpos. Entretanto, meu ponto de vista é que na mecânica clássica os fenômenos dissipativos eram, de certa maneira, entendidos como imperfeições que deveriam ser evitadas. A referência fundamental da mecânica clássica era o movimento “eterno e perfeito” dos astros. Foi pela observação dos astros que a física começou e a perfeição atribuída ao movimento dos astros no céu deveria ser representada como tal, até porque esta seria a forma mais pura da

manifestação de Deus ao homem. Esta era uma forma de pensar bastante comum entre os séculos XVI e XVII. A visão mecanicista de Descartes e, posteriormente, a de Newton pressupunham a perfeição do universo. O universo era causal, reversível e determinista. A dissipação da energia mecânica não foi levada em conta nem mesmo quando Thomas Young (1773 – 1829) definiu energia cinética e potencial e fez a relação entre elas⁵⁴. Os processos de dissipação que geram as irreversibilidades na mecânica são de certa maneira negligenciados em nome de uma busca por regularidades. Não podemos dizer que os comportamentos irregulares tenham sido ignorados na mecânica clássica, mas eles certamente não se constituíam no objeto de estudo central da maioria dos cientistas da época. A busca pelas invariâncias reflete um realismo latente nos princípios de conservação: a valorização da perenidade versus a fugacidade, do eterno versus o mortal, é um julgamento humano (e até mesmo de cunho religioso) transferido para o mundo natural. Este realismo se apresenta como decorrência de uma psicologia da substância: as substâncias, os éteres, pontos de vista tão comuns na antiguidade são indestrutíveis e eternos.

A idéia de perenidade na mecânica e a ausência de uma explicação conclusiva para os processos dissipativos podem ser exemplificadas pela persistente idéia, que vem desde a idade média, de construir máquinas que possam funcionar de forma contínua a partir de um incremento inicial na sua energia. São os *perpetuum mobile* ou *motos perpétuos* que só vieram a ser negados de forma cabal com a formulação da primeira lei da termodinâmica⁵⁵.

Esta forma de pensamento metafísico que identificamos nas formulações do princípio de conservação da energia é encontrada no artigo de Thomas Kuhn, "Energy conservation as a simultaneous

⁵⁴ Magie (1935) traz um fragmento de texto onde Young define energia cinética e potencial. Faz a relação entre a velocidade de um corpo e a altura da qual teria caído sem se referir a qualquer tipo de força dissipativa no processo.

⁵⁵ Mesmo com a demonstração clara da impossibilidade de construção de tais máquinas, uma rápida pesquisa na internet pode revelar tentativas modernas e sofisticadas de construção de tais aparatos.

Discovery” no qual ele relata um “sentimento desconfortável” que emerge da leitura dos artigos dos pioneiros da conservação da energia.

Este sentimento não existiria se todos os pioneiros tivessem como Carnot e Joule, começado com um problema técnico e procedido por estágios até chegar ao conceito de conservação da energia. Mas em casos como o de Colding, Helmholtz, Mayer, Mohr e Séguin, a noção de uma força metafísica imperecível subjacente parece anterior à pesquisa e quase que não relacionada a esta. Falando claro, estes pioneiros pareciam carregar a idéia capaz de se converter na conservação da energia, algum tempo antes de encontrarem evidências para isto. (KUHN, 1959, p.336)

Ele acrescenta ainda que este pensamento metafísico teria se originado num movimento filosófico alemão chamado Naturphilosophie que pregava, entre outras coisas, uma unificação de todos os fenômenos naturais em torno de uma força única e imperecível⁵⁶. Podemos identificar reflexos do pensamento dos Naturphilosophen no argumento dos energetistas algum tempo depois.

No caso do estudo do calor, embora sejam evidentes os processos de dissipação (esfriamento) e a dificuldade cotidiana de manter uma chama acesa, a tendência geral do pensamento comum e também do pensamento científico foi predominantemente pela conservação do fogo e pela conservação do calórico enquanto fluido. Carnot interpreta a transferência de calor de um corpo mais quente para um mais frio como uma tendência ao “re-equilíbrio” do calórico e não como uma dissipação da substância. A máquina térmica produz trabalho a partir da passagem de calórico de alta temperatura para calórico de baixa temperatura sem que este seja efetivamente consumido; ele apenas busca seu equilíbrio. Mesmo havendo uma relação entre a quantidade de trabalho produzido e a quantidade de calórico fornecido, não há a possibilidade de que o calórico esteja sendo consumido para a realização deste trabalho.

⁵⁶ O artigo de Kuhn detalha aspectos dos trabalhos dos pioneiros da conservação da energia que evidenciariam lacunas entre as evidências e as formulações do princípio de conservação.

Embora a irreversibilidade das trocas de calor seja incontestável e faça parte até mesmo do conhecimento comum é a analogia feita por Carnot entre a máquina térmica e a roda d'água o que efetivamente introduz o problema da irreversibilidade na teoria do calor. O uso desta analogia inaugura uma relação teórica entre fenômenos térmicos e fenômenos mecânicos no que se refere à irreversibilidade. Os construtores das máquinas hidráulicas, que conheciam muito bem o sentido da frase "águas passadas não movem moinhos", tinham uma preocupação especial em evitar atrito entre as partes da máquina e os choques inelásticos da água com as pás. A eliminação destes dois elementos era considerada crucial na tentativa de construir uma máquina ideal, ou seja, que não desperdiçasse energia no "caminho" entre a queda da água e a operação final; esta máquina seria capaz de repor a mesma quantidade de água na altura original usando o trabalho por ela produzido. Uma máquina reversível. A reversibilidade nas máquinas hidráulicas aparenta ter mais um caráter técnico do que teórico: os processos irreversíveis estão mais próximos de um aborrecimento técnico do que de uma questão concernente ao modelo teórico da mecânica newtoneana.

Carnot conserva da mecânica a idéia de reversibilidade como condição para o funcionamento de sua máquina térmica ideal; isto supõe que nenhum equilíbrio de calórico se dá, exceto com o gás usado como substância de trabalho. Carnot usa a expressão "perda real" para se referir às trocas indesejáveis de calor⁵⁷. Apesar da aparência de recomendação técnica, a condição de reversibilidade é um elemento teórico importante, na medida em que é idealizado: o gás deve ser sempre mantido em equilíbrio térmico com as fontes. É esta estabilidade, idealizada por um processo conhecido como quase-estático que dá a condição de reversibilidade à máquina de Carnot. Este seria um momento empirista da irreversibilidade e, conseqüentemente, do conceito de entropia ainda a ser formulado. A entropia como conceito associado à

⁵⁷ Fica implícita nesta expressão a irreversibilidade das trocas de calor. Entretanto, o fato está ainda no nível do aborrecimento técnico e reflete uma constatação do conhecimento comum.

irreversibilidade não pode ainda ser diretamente quantificada, mas indiretamente temos um termo de comparação numérica entre um processo reversível e outro irreversível na forma de ciclos termodinâmicos. O ciclo de Carnot fornece um valor de referência para que se possa avaliar a eficiência de qualquer máquina térmica funcionando entre duas temperaturas específicas. Temos em Carnot um limiar entre o empirismo e o racionalismo clássico; ele não chega a definir a grandeza física entropia nem a formular a segunda lei termodinâmica, mas os elementos para estas formulações estão colocados no seu texto que se assemelha mais a um manual de engenharia do que a um tratado teórico de física.

A compreensão do calor como uma forma de energia leva a questão da irreversibilidade para o domínio dos conceitos. Até então se trata de reversibilidade ou irreversibilidade de processos reais. A partir da invenção do conceito de energia estamos tratando com uma grandeza física abstrata. O calor, enquanto energia, somente se transfere do corpo mais quente para o corpo mais frio. Em meio à variedade de transformações que se processam e que formam as bases do conceito de energia, o calor apresenta um comportamento atípico: é uma forma de energia que apresenta restrições quanto à sua transformação. Existe neste momento de interpretação da irreversibilidade um elemento de antropomorfismo associado, um obstáculo de caráter realista para o conceito de energia: o de uma qualidade da energia. A energia capaz de realizar trabalho tem um status superior ao daquela que está indisponível. Não podemos deixar de associar esta qualificação de uma grandeza física, senão a um psicologismo de caráter realista que não foi ainda devidamente dialetizado através de uma explicação com uma contrapartida no racionalismo. Aqui também são usados critérios de valor cultural para caracterizar uma grandeza física. Atribuir ao aumento da entropia uma "queda na qualidade da energia" é o mesmo que admitir que exista energia boa e energia ruim, em uma clara manifestação de um psicologismo do conhecimento comum. Vêm-me imediatamente à mente

os livros didáticos nos quais estudei ciências quando criança, onde havia a classificação das plantas e animais como “úteis” e “nocivos”. Vemos hoje esta classificação como inapropriada, dado o seu caráter estritamente antropocêntrico e ao conhecimento que temos do caráter sistêmico do mundo biológico. Será que não podemos dizer o mesmo da energia? Energia boa é como o cavalo ou a vaca que servem ao homem e energia ruim, como as moscas e as baratas que só causam problemas⁵⁸? O fato de fazer uma simples classificação da energia quanto a sua qualidade ou capacidade de realizar trabalho mecânico não exprime matematicamente uma grandeza associada. Não explica, não é capaz de criar problemas. A entropia não é a “medida da energia indisponível” como querem alguns autores. No seu artigo sobre “a tendência universal da natureza para a dissipação da energia”, Kelvin reafirma a condição de não aproveitamento total da energia térmica feita por Carnot em sua máquina e generaliza o argumento para outros processos físicos, químicos e biológicos.

Há um absoluto desperdício de energia mecânica disponível ao homem, quando ao calor é permitido passar de um corpo para outro a uma temperatura menor, por qualquer meio que não preencha seu [de Carnot] critério de uma “máquina termodinâmica perfeita”. (THOMSON, 2007)

A idéia de irreversibilidade das transformações de energia está claramente assentada na possibilidade, ou não de realização de trabalho⁵⁹. A tendência universal para a dissipação também não oferece a possibilidade de um *porquê* para a irreversibilidade: por que o calor não passa do mais frio para o mais quente? Neste sentido, as afirmações de que a entropia está associada a uma tendência universal para a dissipação, a uma degradação da energia ou ao sentido em que ocorrem os processos naturais, estão ainda em um estágio observacional ou empirista da entropia e não no nível de explicação necessário a um

⁵⁸ De certa forma já existe a idéia de a energia térmica como vilã do aquecimento global sendo veiculada diariamente nos meios de comunicação

⁵⁹ Esta ênfase na idéia de uma energia “capaz” de realizar trabalho parece revelar um ponto de vista particular do momento histórico de desenvolvimento das máquinas a vapor.

conceito científico. Uma afirmação de que existe uma “tendência natural” para que determinado fenômeno [natural] ocorra deve sua importância, talvez mais precisamente, ao inusitado que esta afirmação poderia causar no pensamento da época. Se este não fosse o caso, seria cientificamente relevante afirmar que existe uma tendência natural para a queda dos corpos pesados.

Como já mostramos no terceiro momento histórico epistemológico é com Clausius que se formaliza um conceito com características de uma racionalidade teórica para o problema da irreversibilidade. O conceito de entropia derivado do ciclo de Carnot retoma com Clausius a chance de matematizar a irreversibilidade. Ele procura uma equivalência entre transformações que, embora realizadas em condições de diferentes quantidades de energia, apresentem o mesmo caráter de reversibilidade ou de irreversibilidade. A entropia seria uma grandeza que se conserva nos processos reversíveis, tanto quanto a energia, mas que tende a crescer nos processos irreversíveis. Neste momento, o conceito muda seu status de “noção” relacionada simplesmente à dissipação e desperdício e ganha o status de uma grandeza que relaciona quantitativamente as transformações de um modo geral⁶⁰. Aqui o conceito ganha um componente racional e se matematiza. A matematização lhe garante objetividade enquanto conceito científico:

Pelo matematismo a Física entra na engrenagem dos porquês, adquire possibilidades de dedução, ao passo que cantonada na observação ela só teria possibilidades de inferência. (BACHELARD, 1977, p. 207)

A entropia, embora tendo ainda um significado enigmático, “já pode criar problemas”, pois como diz Bachelard, onde não há problema não há conhecimento científico. Já é possível ter um valor numérico que caracterize um tipo de transformação reversível e torne possível sua comparação com outra transformação do mesmo tipo. E este fato a coloca

⁶⁰ Neste ponto, a variação de entropia definida em termos de Q/T está restrita aos processos térmicos.

no plano de um conhecimento científico. Ela já nasce como conhecimento científico. Não tem ainda paralelos na realidade imediata que possam servir de obstáculo epistemológico relacionados à experiência primeira, por exemplo, ou qualquer propriedade de substância que trate de aproximar o conceito de uma imagem familiar.

O conceito expressa uma diferenciação entre dois tipos de processo que, sendo essencialmente teórica, o torna difícil de definir em linguagem usual, mas que matematicamente se revela simples: para uma variação positiva da grandeza temos processos irreversíveis e para uma variação nula temos processos reversíveis. É na interpretação deste conceito que irão surgir os fatores limitantes: os obstáculos epistemológicos. Embora existam neste momento dificuldades na explicitação do significado do novo conceito, ele cumpre o seu papel, qual seja: exprimir a diferença entre processos reversíveis e irreversíveis em termos numéricos.

A entropia, enquanto conceito, não tem um referente imediato no mundo sensível como podemos encontrar para a massa ou mesmo para a energia como no fogo e na eletricidade natural⁶¹. É sob este ponto de vista que reside a dificuldade pedagógica em criar uma analogia macroscópica para o conceito. As analogias são ferramentas úteis e muito frequentemente usadas no ensino de física para explicar conceitos difíceis, mas neste caso simplesmente não se encontra uma que se adeque satisfatoriamente a uma grandeza algébrica que exprima "equivalência das transformações" ou indisponibilidade de energia⁶². É, portanto, neste ponto que identifico o "salto epistemológico" a que tenho me referido desde sempre neste trabalho com relação às explicações dadas pela maioria dos manuais: Na falta de uma boa analogia para a entropia macroscópica, salta-se quase que "naturalmente" para a imagem estatística da "desordem".

⁶¹ Este referente da entropia no mundo sensível será procurado na futura interpretação estatística da entropia.

⁶² Dizer que a entropia 'mede' a quantidade de energia não disponível, além de impreciso é conceitualmente incorreto. E, no entanto, é possível encontrar esta afirmação em livros didáticos.

Parece-me então que, do ponto de vista do ensino, deve-se concentrar mais atenção na discussão sobre a irreversibilidade dos processos físicos e na evolução de suas explicações do que propriamente na busca de imagens ou definições conclusivas para o conceito de entropia, tanto do ponto de vista macroscópico como microscópico. A formulação de definições envolve aspectos lingüísticos que podem, segundo Bachelard, *ser tão falaciosos nas ciências físicas como nas ciências psicológicas, para os espíritos desprevenidos* (BACHELARD, 2006, p.200). E, neste sentido, poderíamos colecionar dezenas de definições recolhidas dos manuais de física que vão desde dúbias e imprecisas até absolutamente equivocadas.

O aporte da teoria cinética dos gases à teoria do calor foi bastante frutífero e deu respostas satisfatórias para a questão da “mecanização” de grande parte dos fenômenos térmicos, embora houvesse problemas de incoerência entre valores experimentais e teóricos para o calor específico dos gases e dificuldades conceituais na interpretação da segunda lei. Nesta nova abordagem, o calor sofre uma redução epistemológica: ele era entendido, até então, de um ponto de vista macroscópico, como uma “forma de energia”; uma entre as demais formas de energia. Mas, mesmo esta conceituação do calor como forma de energia, digamos autônoma, se originava da interpretação de que calor era movimento. Joule já havia sugerido que a produção de calor seria proveniente da “vis viva” das partículas da matéria. Existe já o elemento reducionista na própria idéia de calor como movimento. O calor como forma de energia, por outro lado, servia de suporte à sua equivalência com o trabalho mecânico: a equivalência mecânica das outras formas de energia induz a acreditar que o calor deva ser classificado como uma forma de energia autônoma. Que forma de energia é, então, o calor? Para que se possa garantir ao calor um status de energia “pura” e irreduzível tal qual uma energia potencial, há que se negar a natureza atômica da matéria. Seria necessário fazer como fizeram os energetistas: chegar ao ponto de uma negação da matéria e propor a energia como um componente fundamental do mundo

físico. A redução epistemológica que o calor sofre com a teoria cinética é a tentativa de encontrar uma explicação mecânica microscópica para o efeito mecânico macroscópico por ele produzido. Este efeito mecânico microscópico é um somatório das energias do movimento das partículas; a energia interna de um corpo. O calor é transformado em processo. Um corpo não mais possui calor; um corpo possui energia interna proveniente do movimento constante de suas moléculas, movimento este que depende de sua temperatura. Um dos argumentos dos energetistas era que esta redução não seria necessária nem cabível dada à falta de objetividade científica da idéia de átomo. Existe, portanto, uma ruptura importante do ponto de vista do entendimento do calor como "forma de energia" e como processo de transferência de energia interna que não é devidamente explicitada como elemento da psicanálise do conhecimento objetivo. Constantemente vemos estas duas formulações se alternarem indiscriminadamente. Do ponto de vista da entropia, estamos paralelamente no ponto de uma ruptura ainda maior: do conceito como parâmetro de indisponibilidade ou dissipação da energia para uma noção de multiplicidade de estados energéticos de caráter estatístico.

Mas a disputa sobre a natureza da matéria, referida anteriormente, vai ser travada desta vez tendo como cenário o problema da irreversibilidade. A redução feita na primeira lei, que resultou na formulação do conceito de energia interna foi bem sucedida e aparentemente não apresentava problemas de interpretação; entender a energia total de um gás como a soma das energias mecânicas das partículas não apresentava maiores problemas epistemológicos (desde, naturalmente, que se aceitasse a existência das moléculas). Até este ponto, sendo a conservação da energia uma lei "quantitativamente reversível", não há dificuldades em sua interpretação mecânica.

Maxwell insistia que a segunda lei, sendo estatística, não poderia ser demonstrada por nenhum argumento puramente mecânico. Este entendimento se baseava nas consequências de sua distribuição

estatística das velocidades e na idéia do demônio. A segunda lei seria, portanto, essencialmente macroscópica.

Ao mesmo tempo, Boltzmann propôs um modelo mecânico para a entropia. Como conciliar um modelo mecânico, nos moldes do modelo newtoneano, com uma abordagem estatística? Estamos afinal à procura de uma explicação mecânica para a irreversibilidade ou de sua descrição como fenômeno estatístico? Inicialmente o objetivo era conseguir a primeira alternativa, mas como a tarefa não se mostrou tão simples, Boltzmann foi gradativamente reformulando sua teoria determinista ao sabor das refutações e passando a assumir posições claramente probabilistas.

Para traçar um perfil epistemológico da entropia proponho uma formulação por grupo de noções, partindo de uma visão materialista da irreversibilidade. Esta estaria associada às imperfeições da natureza, ao envelhecimento e ao caráter mortal do ser humano. Neste sentido a tendência à dissipação não é atributo da natureza, mas da nossa incapacidade de atingir a perfeição de Deus.

Outro grupo de noções compreende termos como *perda*, *dissipação*, *degradação* e *indisponibilidade* que estão todos relacionados ao conceito de calor como forma de energia. Existe dissipação de energia mecânica em calor e existe dissipação ou perda de calor no esfriamento de um corpo quente no ambiente. Esta dissipação ou perda de energia pode ser quantificada, mas apenas explicada como "tendência natural" o que lhe coloca em uma condição empirista para o conhecimento. Esta é a fase mais comum no ensino da termodinâmica básica. Nela é possível quantificar a entropia em processos térmicos (Q/T), mas sua explicação enquanto grandeza física e o que é medido, ainda não são diretamente acessíveis.

O terceiro grupo de noções agrega as idéias de *dispersão* de energia, *desordem*, *multiplicidade* de estados energéticos e informação. Todas estas noções estão relacionadas a uma interpretação da entropia baseada no modelo molecular da matéria e no comportamento estatístico.

3.4 Imagens e metáforas no reino da entropia

A metáfora é uma figura de linguagem que consiste na alteração do sentido de uma palavra ou expressão, pelo acréscimo de um segundo significado, quando entre o sentido de base e o acrescentado há uma relação de semelhança, de intersecção, isto é, quando apresentam traços semânticos comuns. Conceito tradicional e essencial para a compreensão do processo de significação da linguagem humana, a *metáfora* pode ser definida como uma *transferência* de significado que tem como base uma analogia: dois conceitos são relacionados por apresentarem, na concepção do falante, algum ponto em comum.

<http://acd.ufrj.br/~pead/tema04/metafora.html>

Dizer categoricamente, como diz Feynman: “entropia mede desordem”, à primeira vista não parece ser uma afirmação do mesmo tipo que: “esta cidade está um inferno”, que é um exemplo clássico de metáfora. Entretanto as duas afirmações estão baseadas em analogias e a definição de metáfora dada acima contempla este aspecto comum às duas sentenças. A definição fala também em *transferência* de significado. Então, [no universo dos falantes] o que a entropia mede pode facilmente ser *extrapolado* para o que a entropia é. Esta é uma extrapolação que a rigor não pode ser feita, mas estamos aqui no terreno pantanoso das definições: se a entropia “mede” a desordem, qual a unidade desta grandeza, qual o critério exato para definir o que a desordem é, objetivamente? Se esta extrapolação não pode ser feita de forma direta, ela é feita, indiretamente, nas aulas de física e nos livros didáticos menos cuidadosos⁶³. O que a força é e o que a força *mede* não é também tão facilmente distinguível. A questão que coloco não discute especificamente

⁶³ Na infância, uma professora me deu uma definição de força como: “Uma força **é** um puxão ou um empurrão”. Eu não poderia ter notado uma diferença fundamental se ela tivesse dito: “a força **mede** o puxão ou o empurrão”.

detalhes de natureza teórica da física sobre se existe realmente uma ordem nos sistemas ou outras coisas do tipo. Meu interesse é primeiro lançar um olhar menos apressado sobre esta imagem e tentar estabelecer uma fronteira de viabilidade para o uso didático da metáfora com base na epistemologia de Bachelard. Quero observar, sob o ponto de vista deste epistemólogo, em quais situações esta metáfora ajuda no entendimento do conceito e em quais situações ela o prejudica. Lembremos que uma das questões primeiras deste trabalho é: porque se usa sempre uma explicação microscópica para um conceito que nasceu macroscópico? Foi nesta perspectiva que lancei inicialmente o olhar sobre o uso da metáfora da desordem.

Bachelard tem uma posição de certa forma contundente a respeito do uso das analogias, imagens ou metáforas como auxílio para a explicação de conceitos. Em seu livro "Racionalismo Aplicado" ele exemplifica o uso das analogias no caso do modelo atômico de Bohr trazido ao mundo sensível através do modelo anterior do átomo semelhante ao sistema planetário. Trata-se aqui do uso de imagens tidas como realistas para explicação de modelos teóricos não diretamente observáveis. Inicialmente ele não nega a importância do uso pedagógico da metáfora:

O modelo planetário do átomo desempenhou efetivamente um papel considerável no desenvolvimento da física contemporânea. Sem dúvida, atualmente o princípio de Heisenberg impede tal representação. Mas essa representação corresponde a um estágio pedagógico que seria de má pedagogia desfazer numa tomada de cultura. (BACHELARD, 1977, p.206)

Não irei também negar o valor da imagem da desordem no ensino da entropia, mas creio que devemos estar atentos aos limites que devem ser observados no uso destas analogias e imagens. O que Bachelard entende é que para que possamos ter acesso aos valores epistemológicos do modelo atômico de Bohr (ou de qualquer outro modelo teórico) é *preciso afastar a sobrecarga de imagens que a vulgarização lhe impôs*

(BACHELARD, 1977, p.206). Fazer uma correspondência com pretensões realistas entre os dois modelos é mutilar o modelo do átomo; nesta correspondência o aluno tende a substituir a força gravitacional pela força elétrica e isto já não é possível. Um elétron sujeito a uma força central do tipo gravitacional, emitiria radiação eletromagnética em seu movimento acelerado e não manteria a órbita. Nesta imagem não há um correspondente para quantização da energia das órbitas. Toda a explicação para o espectro de emissão do átomo fica prejudicada. A ruptura epistemológica entre a concepção do sistema planetário e o modelo atômico de Bohr não pode jamais ser observada apenas fazendo-se uma correspondência mecanicista entre eles. Além do que, salienta Bachelard, *o átomo planetário não deve ser uma imagem que se refira ao sistema planetário, visto que o próprio sistema planetário não adquire suas características senão da organização matemática* (BACHELARD, 1977, p.209). Ou seja, o modelo do sistema planetário é idealizado, matematizado e não um objeto real imutável que possa servir de modelo de realidade.

A imagem do átomo organizada como sistema planetário não pode se impor mediante aspectos realistas. Ele remete simplesmente a uma organização matemática. É preciso lê-lo de modo matemático não abandonando o sentido dominante das fórmulas matemáticas. (BACHELARD, 1977, p.207)

No caso da entropia, esta carga de imagens de que fala Bachelard se manifesta em um discurso fácil expresso nos exemplos clássicos da disposição aleatória dos livros sobre uma mesa ou de vários macaquinhos usando máquinas de escrever, explicando que desta ação dificilmente resultará uma obra prima de literatura. Essas imagens se apresentam aos alunos do mesmo modo que as experiências primeiras: são imagens que funcionam como um obstáculo que tende a limitar a busca do entendimento racional e matemático do conceito em função de uma imagem familiar.

A metáfora da desordem está, a meu ver, no âmbito de um mecanicismo do tipo que relaciona o modelo do átomo ao sistema planetário propondo uma identificação estrita entre um modelo e outro. O que fazem frequentemente os usuários da metáfora da desordem é procurar um fato estatístico acessível e marcante que substitua um raciocínio complexo. E a explicação se torna mecanicista: Como todos os processos naturais são irreversíveis e a entropia “mede” esta irreversibilidade, basta um exemplo de um processo irreversível e teríamos, portanto, uma boa explicação do que é a entropia.

A questão central do conceito de entropia é descrever matematicamente a irreversibilidade e explicar *porque* ela é possível. A imagem da desordem trata muito mais de mostrar o que é um processo irreversível. Não há explicação, há apenas uma constatação. A imagem da desordem, apresentada como mera distribuição espacial de objetos, não se refere a estados energéticos; nem a que diferença existe em termos energéticos entre uma situação de bolinhas numa lata e, posteriormente, as mesmas bolinhas derramadas no chão. Por que exatamente as bolinhas não podem voltar de novo para dentro da lata? A resposta não é somente porque não se vê isto acontecer na natureza ou porque é muito improvável. Sobre isto temos toda a discussão das objeções feitas a Boltzmann que são muito mais explicativas e significativas em um percurso cognitivo para a entropia do que o reforço das imagens imediatas.

Resumindo, os aspectos básicos pelos quais o conceito é fundamental para a termodinâmica ficam eclipsados por uma imagem forte, pretensamente “experimental” que pretende dar um caráter realista ao conceito. Quanto aos efeitos disto Bachelard não poderia ser mais claro: *toda referência a uma imagem da vida vulgar, toda referência a um mecanismo vicia essa explicação racional.* (BACHELARD, 1977, p.207). A imagem ocupa o lugar do conhecimento racional. É usada para compor um mecanismo explicativo e torna-se um elemento de sustentação da

explicação. E é neste sentido que entendo a afirmação de que toda imagem vicia uma explicação racional.

Outro exemplo apresentado por Bachelard diz respeito ao uso de uma palavra que funciona como “palavra-resposta”. Quando, para explicar o fenômeno ondulatório da luz, se diz simplesmente “a luz é uma vibração do éter”, não se está acrescentando nada à explicação racional do fenômeno. *A palavra vibração torna-se uma palavra-resposta, uma palavra para filósofo. Que vem a ser, no fundo, a luz? Indaga o filósofo. E responde a si mesmo: Uma vibração.* (BACHELARD, 1977, p.211)

A palavra desordem, na forma que é apresentada nos manuais de física, assume muito frequentemente esse papel: Que vem a ser a entropia? Indaga o professor. E qual é a primeira resposta que podemos prever? Entropia é desordem!⁶⁴ Pode ser. Mas não é só isso. A questão é que temos um longo caminho teórico antes (e depois) da desordem. Ela denota uma ruptura epistemológica profunda na própria maneira de explicar o mundo.

Com o desenvolvimento da teoria cinético-molecular da matéria, que dá fundamento à “medida da desordem”, a física salta de um universo determinístico e causal para outro não-causal e aleatório, como nos lembra Brush (1988). Dizer que entropia é desordem é dar uma resposta final que não explica e não questiona. A palavra “desordem” assume um caráter absoluto: apesar de não ter sido estabelecido nenhum critério para definição do termo supõe-se que todos partilhem o mesmo entendimento sobre ele. Que adolescente não argumenta sobre o caráter subjetivo da desordem do quarto?

A argumentação que fiz até aqui se baseia em uma crítica de Bachelard ao empirismo clássico que se confunde com o realismo, doutrina que supõe o conhecimento como derivado da experiência ou da

⁶⁴Styer (2000) faz algumas considerações sobre o uso da palavra desordem: a) é um termo vago, não há uma definição precisa de desordem. b) É uma palavra carregada emocionalmente (todos temos algum tipo de sentimento sobre a palavra desordem).

observação das coisas em si. A explicação realista precisa sempre trazer o conhecimento ao plano imediato das coisas, do raciocínio indutivo que o leva a procurar imagens familiares (realistas). Procura criar semelhanças entre eventos presumivelmente "reais" e os fenômenos complexos. Bachelard, como já vimos não partilha deste pensamento e defende que o seu racionalismo aplicado tem melhores condições de explicar como o conhecimento científico é produzido.

Do lado realista tudo é sobrecarga, hipótese, afirmação gratuita, crença. Do lado racionalista, tudo é construção, dedução, confirmação explícita, tudo é demonstração. É do lado racionalista que se colocam os problemas, e, portanto a ciência ativa. O realismo, o empirismo, o positivismo expõem-se aqui como respostas definitivas, verdadeiramente *finais*. O racionalismo, pelo contrário, está sempre pronto a reabrir o debate, sempre disposto a suscitar outras pesquisas. (BACHELARD, 1977, p.211)

Nesta perspectiva a busca de uma sentença explicativa definidora do conceito de entropia ou a busca de uma imagem familiar para este conceito não é suficiente para "reabrir o debate" nos moldes de uma legítima discussão científica que poderia ser instaurada no ambiente de ensino.

A questão do uso das metáforas foi abordada mais diretamente por Bachelard através da noção de obstáculo epistemológico. Este uso está caracterizado como um obstáculo de natureza verbal ou, como ele diz "hábitos de natureza verbal" que são trazidos à tona como obstáculos ao pensamento científico. Ele cita o exemplo da *esponja* que foi usada exaustivamente na explicação dos mais variados fenômenos, desde o acúmulo de carga elétrica em um corpo à absorção de umidade pelo ar atmosférico, a compressibilidade do ar e até a acumulação de calor por uma substância.

Nesse caso trata-se de uma explicação verbal com referência a um substantivo carregado de adjetivos, substituto de uma substância de ricos poderes.

A função da esponja é de uma evidência clara e distinta a tal

ponto que não se sente a necessidade de explicá-la. Ao explicar fenômenos por meio da palavra esponja, não se terá a impressão de cair num substancialismo obscuro; também não se terá a impressão de fazer teorias, já que se trata de uma função toda experimental. (BACHELARD, 2005, p.91)

A palavra desordem é também de uma clareza evidente e tem uma função experimental. Todos "*sabem*" o que ela significa, todos podem produzi-la. Não há necessidade de explicá-la. O estudante não tem muito que questionar quando o professor afirma que se a desordem aumenta, a entropia também aumenta, visto que a entropia já foi categoricamente definida como medida da desordem e a desordem está aí às vistas. A explicação torna-se evidente (e circular). Dificilmente o aluno vai questionar como esta desordem se aplica ao motor do automóvel ou o que têm a ver os macaquinhos da máquina de escrever com o rendimento máximo do motor de Carnot. É possível relacionar Q/T com a desordem? Se a entropia mede desordem, onde está a desordem em Q/T ?

O perigo das metáforas imediatas para a formação do espírito científico, segundo Bachelard, é que *nem sempre são imagens passageiras; levam a um pensamento autônomo; tendem a completar-se, a concluir-se no reino da imagem.* (BACHELARD, 2005, p.91) São imagens que foram criadas para ilustrar um conceito difícil, mas a ilustração - não temos dúvidas da sua importância na construção e comunicação do conhecimento científico - eventualmente se torna o elemento central da explicação e substitui a própria natureza racional do conceito original. Senão vejamos: desordem e irreversibilidade são complementares no quadro explicativo da entropia. É a irreversibilidade que tem formalmente o papel principal neste conceito; é a irreversibilidade o fato principal a ser estudado, mas é notória a prevalência da metáfora da desordem como imagem central do conceito.

No caso específico da entropia, e de um ponto de vista didático, creio que um caminho mais difícil, mais longo e tortuoso é o melhor. É maior a possibilidade de uma explicação legítima se tratamos de perseguir o caminho racional e complexo dos argumentos matemáticos ao invés de

nos limitarmos ao uso da metáfora. Há, afinal, uma contradição entre a afirmação inicial de Bachelard sobre a importância da imagem do átomo planetário e o que acabou de ser dito a respeito do uso de metáforas? O próprio Bachelard recomenda a aplicação de *uma dialética do psicologismo e não-psicologismo*, argumentando que não é possível ser completamente racional o tempo todo:

É preciso repor nas fórmulas um pouco de psicologia para que um não-psicologismo em ato se revele desfazendo o psicologismo. Introduzir o psicologismo para depois retirar, eis um procedimento que é indispensável para obter a consciência da racionalidade. (BACHELARD, 1977, p.21)

Somos sempre fustigados pelas estruturas de pensamento que compõem os obstáculos epistemológicos. A recomendação é, pois, manter a vigilância quanto ao caráter ilustrativo das imagens e metáforas, realçando inclusive o seu caráter provisório e que estas estão sendo usadas em uma "tomada de cultura", em uma lembrança de como o conceito já foi pensado um dia. O professor pode usar a metáfora com o propósito explícito de criar a polêmica, de reabrir o debate. O exemplo do modelo atômico vem a ser bastante ilustrativo de como uma imagem pode ser útil aplicando-se uma espécie de anti-imagem. Esta anti-imagem corresponde a uma explicitação de como não foi possível explicar determinados comportamentos do átomo planetário e de como estes problemas foram superados pelo modelo de Bohr.

No caso da entropia, pode ser colocado o questionamento básico sobre qual o sentido desta grandeza antes da formulação do modelo cinético da matéria. Vimos que os fundamentos da segunda lei foram lançados por Carnot. O conceito nasce com Clausius a partir da máquina de Carnot e só posteriormente ganha uma explicação estatística. O atalho feito neste percurso apaga toda a riqueza do debate sobre o problema da irreversibilidade, sobre a polêmica entre atomistas e energetistas e sobre a questão da validade das hipóteses na ciência. Este atalho é, no meu ponto de vista, reforçado pelo uso intensivo da metáfora da desordem. A

discussão poderia ser mais rica se levada em termos da necessidade da criação do conceito e da sua aplicabilidade em um primeiro momento *macroscópico*. Em seguida, depois de conhecida a teoria cinética, abrir-se-ia novamente o debate para toda a discussão sobre a interpretação mecânica da segunda lei e suas consequências. Associado aos conceitos essencialmente teóricos pode-se tratar temas teórico-filosóficos ou políticos como o que significa “dispersão de energia”, ordem e desordem, seta do tempo, morte térmica do universo, o ensino do criacionismo e as máquinas térmicas e a questão ambiental.

A interpretação microscópica da entropia reflete a opção de uma abordagem didática essencialmente estatística da termodinâmica nos moldes lançados pelo livro do PSSC nos anos 1960. A não ser que se esteja interessado em uma abordagem desse tipo, como faz o livro citado, acredito que uma abordagem histórica do conceito tem mais chances de sucesso no aprendizado que a “salada epistemológica de cada dia” que vemos na maioria dos livros didáticos.

Conclusão

Este trabalho tem em sua gênese um elemento primordialmente didático. Embora se trate de uma pesquisa cuja base empírica não tenha sido construída no lócus da sala de aula, está direcionada de forma a servir como elemento de orientação didática. Esta orientação se dá no sentido em que o trabalho visa delinear caminhos históricos e epistemológicos para o ensino da termodinâmica que agreguem elementos novos à prática do professor. Além dos elementos explícitos como o estudo histórico dos fatos científicos e a adoção de uma visão epistemológica da ciência, outros elementos de fundo norteiam a intenção global deste trabalho.

Em Angotti; Delizoicov; Pernambuco (2002) encontram-se as diretrizes de uma pedagogia dialógica para o ensino das ciências que tem no pensamento de Paulo Freire sua base teórica primeira, mas não única.

Como primeiro elemento os autores enfatizam a necessidade de uma base epistemológica que oriente os planos de ensino de ciências. Para eles esta base epistemológica deve ter *como referência teorias cuja premissa dispõe que o conhecimento ocorre na interação não neutra entre sujeito e objeto* (ANGOTTI; DELIZOICOV; PERNAMBUCO, 2002, p.183). Um epistemólogo que formula uma teoria do tipo citado é Gaston Bachelard. Podemos identificar sua epistemologia como uma das que podem ser tomadas como base para a compreensão das relações do professor e do aluno com o conhecimento científico. Neste sentido, busquei aproximações entre a proposta epistemológica (essencialmente filosófica) de Bachelard e a proposta de metodologia de ensino de ciências dos autores.

A proposta de um ensino de ciências significativo apresentada por esses autores parte da concepção de que o aluno é um sujeito ontológico e epistêmico. Ele traz para a escola um conjunto de experiências cognitivas, emocionais e sociais que devem ser levadas em consideração

na produção do conhecimento científico escolar. O aluno não deve, portanto, ser visto como um repositório de informações e experiências conclusivas, mas como um sujeito que tem o poder de modificar sua realidade e interferir sobre ela, tanto no plano material como no plano do pensamento. A respeito da relação professor/aluno e da aquisição do conhecimento científico pelo aluno, Bachelard diz que na maioria dos casos o professor pensa que “o espírito começa como uma lição”, que basta repetir detalhadamente uma explicação para que o aluno (neuro ou cognitivamente inerte) a entenda sob qualquer ponto de vista e de qualquer professor. Entretanto, o aluno tem uma cultura anterior à cultura escolar e o significado que ele dará aos conhecimentos que lhe são apresentados na escola deverá necessariamente se relacionar com seus conhecimentos prévios.

Uma visão dialógica do ensino pressupõe uma interação efetiva entre duas formas de conhecimento: o conhecimento comum que é predominantemente expresso pelos alunos e o conhecimento científico cujo porta-voz é prioritariamente o professor. É no encontro destas duas culturas que se desenvolve um processo semelhante ao que acontece na produção do conhecimento científico pelos cientistas. Uma ruptura entre a impressão primeira do real e o conhecimento construído racionalmente. Em Bachelard o processo de construção do conhecimento científico se dá através de rupturas epistemológicas, retificações de erros históricos e numa psicanálise do conhecimento que visa superar entraves próprios ao pensamento [os obstáculos epistemológicos].

A historicidade do conhecimento é um elemento importante que emerge da epistemologia de Bachelard e que é também observada numa abordagem dialógica e participativa como apresentada em Angotti; Delizoicov; Pernambuco (2002) como forma de produção significativa do conhecimento em ciências. As ciências, como produção humana, se desenvolvem a partir de uma realidade histórica que tem o homem como principal ator. E um processo histórico implica sempre dúvidas, erros,

retificações etc. Somos o resultado de nossas ilusões perdidas, diz Bachelard sobre os nossos erros históricos. O papel da história da ciência no ensino, no caso dessa tese, não diz respeito ao “uso” desta história como elemento externo à produção do conhecimento; não se trata apenas de um objeto motivador na sala de aula. A história da ciência está presente em uma etapa anterior de elaboração didática e responde por aspectos epistemológicos de identificação dos obstáculos, identificação das rupturas e na construção de perfis epistemológicos dos conceitos, com o objetivo claro de promover situações de impasse, ou de pequenas “*revoluções científicas*” que despertem no aluno a possibilidade de novas formas de pensamento. Esta abordagem da história da ciência traz a tona quase que naturalmente o caráter provisório dos modelos e das leis científicas. Foi feito neste trabalho um percurso de pensamento para o conceito de entropia através das concepções históricas do calor e do estudo do funcionamento das máquinas térmicas, concepções estas que foram historicamente modificadas no processo de desenvolvimento da teoria do calor.

As retificações históricas dos modelos e teorias e as rupturas epistemológicas ocorrem através da busca de reparação dos erros. O papel do erro em Bachelard tem por isso um caráter positivo. O erro é valorizado justamente porque permite avanços na racionalidade. O erro é parte constituinte do processo de descoberta científica assim como do aprendizado. Baseei minha análise histórica da termodinâmica no ponto de vista de que, através da **explicitação** destes erros históricos, poderia sugerir situações de sala de aula em que estes pudessem passar pelo processo de **retificação didática**, da mesma forma que passaram pelo processo de retificação histórica. Em uma abordagem dialógica do ensino como apresentada por Angotti; Delizoicov; Pernambuco (2002), o papel do erro assume uma característica semelhante: ele não é gratuito, faz parte de uma estrutura de pensamento, de um contexto social, de uma vivência experimental e não pode ser considerado apenas como advindo de uma deficiência cognitiva ou de formação do aluno. O aluno não quer

deliberadamente dar respostas erradas, ele responde com base numa síntese que faz entre as diversas experiências com as quais é confrontado e o seu repertório de conhecimentos pré-existentes. Uma proposta de ensino que procure torná-lo significativo deve, além de identificar estes erros, procurar promover situações de impasse cognitivo que causem rupturas entre conhecimento comum e conhecimento científico.

Além do papel importante desempenhado pela história da ciência nessa abordagem, destacam-se também os objetos tecnológicos e os fenômenos como promotores do diálogo entre conhecimento científico e conhecimento comum, em um processo de ensino e aprendizagem. O estudo dos objetos tecnológicos e das interpretações dos fatos naturais pode servir como elemento de explicitação das formas não neutras da relação entre sujeito e objeto do conhecimento. Tanto os objetos tecnológicos como os fenômenos, em uma abordagem dialógica, se configuram como elementos essenciais a uma estruturação temática dos conteúdos. É a partir da abordagem temática que o professor pode ter acesso quase simultâneo a aspectos sociais e cognitivos do conhecimento expresso na fala do aluno. É também através dos temas que se manifestam as relações entre ciência e história, e entre ciência e sociedade.

O percurso histórico e epistemológico para o conceito de entropia que me propus a construir tem suas raízes nas concepções de ensino e de produção do conhecimento científico que foram apresentados acima. Não se trata de apresentar necessariamente uma seqüência didática no sentido em que costumamos encontrar estas seqüências. Trata-se de tentar recompor um *percurso do pensamento* a respeito de um conceito científico sob a ótica de uma epistemologia histórica.

Este percurso histórico e epistemológico foi construído tendo como base três momentos históricos e epistemológicos da termodinâmica; o primeiro momento é caracterizado fundamentalmente por um pensamento empirista, ancorado na construção de máquinas em um contexto de constante desenvolvimento industrial. O segundo se caracteriza pela

expressão de um modelo positivista do pensamento científico e que tem no conceito de energia e no seu princípio de conservação os elementos de união entre a mecânica e a teoria do calor. O terceiro momento histórico e epistemológico se caracteriza pela tentativa de redução do fenômeno térmico a uma teoria mais fundamental que seria a mecânica de Newton.

O primeiro momento é essencialmente empirista. A ciência desenvolvida neste momento do estudo do calor está relacionada prioritariamente ao uso das máquinas a vapor e à produção de trabalho. O fato de o calor ser concebido como um fluido não impede o desenvolvimento destas máquinas, nem mesmo a detalhada síntese teórica de Carnot. As máquinas a vapor eram construídas e operadas por pessoas com pouca ou nenhuma educação científica formal. Como então poderemos justificar epistemologicamente a seqüência didática atual em que as máquinas são apresentadas como obedecendo a uma seqüência linear que nasce com a noção de temperatura e culmina com o objeto tecnológico complexo? A máquina a vapor foi o objeto tecnológico que fez nascer uma ciência do calor e temos hoje a possibilidade de usar uma máquina moderna para fazer nascer nos alunos o conhecimento da termodinâmica. Em Carnot se dá a síntese que inicia o tratamento teórico das máquinas térmicas. Os principais elementos que dão origem às leis da termodinâmica estão contidos nesta formulação teórica que encerra o primeiro momento histórico epistemológico. Na perspectiva de um roteiro didático, vejo que Carnot lança as questões fundamentais que darão seqüência à termodinâmica como ciência: define a máquina térmica de forma universal, levanta a questão da máxima potência a ser desenvolvida por estas máquinas, estabelece a independência da potência em relação à substância utilizada e estabelece a condição universal de rendimento máximo de uma máquina térmica. No ponto de vista que aponto neste trabalho, a explicitação das questões, tratadas por Carnot, a partir de uma perspectiva histórica e epistemológica e sua discussão minuciosa em sala de aula pode claramente preceder qualquer outra análise no planejamento de uma seqüência didática.

A passagem do primeiro para o segundo momento se dá a partir da evolução da discussão sobre a natureza do calor. Existem dificuldades relacionadas à teoria do calórico desde Rumford; as experiências de Joule e todos os processos de conversão que estão sendo realizados compõem o momento de ruptura com a noção substancialista do calor. O segundo momento encerra um dilema sobre a natureza do calor: uma forma de energia ou calor como movimento. Este é um problema que na prática não é sequer mencionado; o calor como movimento já traz no seu cerne uma teoria cinética da matéria e o calor como uma forma de energia ainda tem fortes ligações com o pensamento substancialista. Uma questão crucial lançada por Kelvin explicita a contradição entre a concepção da natureza do calor utilizada por Carnot e a nova teoria do calor como uma forma de "efeito mecânico". Neste momento nasce a idéia de uma "tendência universal para a dissipação" e esta se constitui em mais uma ruptura na visão de um universo causal e conservativo. Nasce a necessidade de uma explicação para o comportamento assimétrico das transformações de energia e das transferências de calor. Nesse contexto surge o conceito de entropia. Enfatizo, na análise feita ao longo do trabalho, que esta "germinação" do conceito de entropia se constitui em um elemento primordial numa elaboração de planejamento didático. As raízes dessa formulação estão em Carnot, na condição de reversibilidade de sua máquina. O conceito de entropia tem, portanto uma origem estritamente macroscópica que é frequentemente negligenciada nas elaborações didáticas. A possibilidade de quantificação do calor e sua equivalência com o trabalho produzido se constitui em mais um salto epistemológico que foi dado na construção da racionalidade dos processos térmicos.

O que mais caracteriza o segundo momento, do ponto de vista de uma corrente de pensamento, é a crença positivista na obtenção da verdade científica. Este pensamento permeia ainda nos dias de hoje uma concepção de produção do conhecimento científico e também a forma como as ciências são ensinadas. No pensamento positivista reside a base das seqüências didáticas lineares, impositivas e a-históricas que são

comuns nos livros didáticos, os quais, como diz Bachelard, “são pacientemente copiados uns dos outros”.

O terceiro momento histórico e epistemológico do percurso tem como foco central a redução do fenômeno térmico às leis da mecânica. A forma pela qual o paradigma newtoneano se impôs no pensamento ocidental e seu enorme sucesso em descrever o mundo físico lhe dá a autoridade necessária para servir de base teórica para a ciência do calor. Este era o pensamento secreto ou explícito dos cientistas do século XIX. A idéia central desde Joule e Clausius até Maxwell e Boltzmann era reproduzir o determinismo das leis da mecânica nos processos térmicos. Este programa de pesquisa apenas não se realizou em sua totalidade dadas as dificuldades inerentes à própria natureza do problema estudado. No ensino de física corrente, a passagem de uma visão de mundo macroscópica para microscópica se faz com numa mudança de canal na TV ou como na aplicação de uma ferramenta de zoom numa imagem de computador. No entanto, esta passagem tem razões científicas para acontecer e uma teoria cinética da matéria deve dar conta de explicar as manifestações macroscópicas da matéria, principalmente o comportamento dos gases e da natureza do calor. A questão central deste momento histórico/epistemológico é a explicação mecânica da irreversibilidade nos fenômenos naturais. Um percurso didático para a entropia deve considerar a questão da irreversibilidade como seu elemento norteador desde o início. A irreversibilidade como uma das manifestações básicas do conceito de energia da mesma forma que é a sua conservação. A questão não se restringe a simplesmente constatar que a irreversibilidade existe, mas tratar das tentativas de explicar *porque* ela existe. Neste momento, as diferenças entre uma interpretação microscópica e outra macroscópica da segunda lei crescem em significado, ganham uma dimensão muito mais abrangente do que a mera definição estatística da entropia. A idéia de que o demônio de Maxwell coloca as trocas de calor em termos de uma seleção de partículas faz a passagem entre um mundo e outro, abre as portas para que professor e aluno se

deparem com as questões fundamentais que envolvem o problema de uma formulação mecânica e estatística da irreversibilidade. A termodinâmica, neste ponto é a porta de entrada para a revolução científica que se avizinha e que vai envolver a discussão entre as visões probabilística e determinista do mundo natural.

O leitor pode notar que os três momentos têm três enfoques da termodinâmica que podem ser apresentados didaticamente em uma seqüência direta ou não. Sendo que em cada um, novos elementos são agregados à discussão aumentando o nível de complexidade. É importante enfatizar que a *explicitação* das rupturas que o pensamento científico proporciona em cada momento histórico/epistemológico, em relação ao pensamento comum, é parte fundamental de um planejamento didático que se pretenda dialógico e significativo. Se tomarmos os momentos separadamente, temos condições de traçar estratégias didáticas para os conceitos e fenômenos em diferentes níveis de ensino e aplicações didáticas. Por exemplo, não há necessidade de uma discussão sobre a interpretação cinética da segunda lei se nosso objetivo for um curso introdutório de termodinâmica para técnicos em mecânica de motores. Ao mesmo tempo, em um curso como este, teremos a possibilidade de transformar o objeto de trabalho do aluno em um *objeto científico* desenvolvido e situado historicamente.

Tentei identificar, através dos perfis epistemológicos, como os conceitos físicos se desenvolveram no interior de cada momento histórico/epistemológico e na passagem entre estes. Através de indicações de como identificar obstáculos epistemológicos em alguns conceitos podemos explicitar as situações em que o pensamento nos engana, e realizar uma tomada de consciência como parte do processo de psicanálise do conhecimento objetivo. Notamos por exemplo que o obstáculo substancialista é extremamente persistente no conceito de calor: ele nasce na concepção materialista do fogo, se desenvolve na noção pré-científica do calórico, permanece embutido na idéia racionalista

de calor como uma forma de energia e chega até à discussão entre atomistas e energetistas no final do século XIX.

Sobre a polêmica questão da relação entre entropia e desordem, procurei evitar a discussão sobre o que é desordem e se ela existe objetivamente enquanto noção na física. O tratamento que procurei dar a esta questão se resume ao uso da imagem da desordem na sua dimensão pedagógica. Considero que esta imagem deve ser usada com parcimônia e cercada dos cuidados técnicos que garantam o rigor científico do conceito. Não vejo como essencial, atrelar o conceito de entropia a uma imagem cotidiana. Trata-se de um conceito complexo, entretanto não é um “bicho de sete cabeças” e por isto deve ser tratado apenas como mais um conceito complexo da física. A questão não está concentrada na dificuldade do conceito em si, mas na forma como ele é comumente tratado nos manuais de física. Existe a tendência psicológica, exaustivamente demonstrada por Bachelard, de nos acomodarmos a pensamentos familiares, a imagens chamativas, a experiências fáceis encontradas na nossa vida diária. Entretanto, a tarefa do ensino científico tem em sua essência a construção da racionalidade, sem a qual não é possível a mudança efetiva da realidade.

Mudar a realidade não é apenas ser capaz de promover revoluções maiores ou menores. É principalmente realizar o trabalho cotidiano da busca pela autonomia. É o esforço formativo do espírito para superar obstáculos internos e externos no caminho da autodeterminação. É autônomo aquele que é capaz de pensar e modificar o objeto do seu trabalho, de reproduzir fenômenos conhecidos, e de criar novos. Foi na tarefa de aprender e ensinar ciências que empenhei parte do meu esforço formativo, tanto para mim próprio como no trabalho com os alunos. A expressão “desde os brinquedos às aulas de física” reflete a minha convicção de que o saber nasce e se desenvolve junto com o fazer. O processo de produção/construção do conhecimento visto na comunhão entre estes dois elementos - fazer e saber - possui outra e indispensável dimensão: o prazer de conhecer.

Referências

ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO, Antônio. **Física**. Vol. 2. São Paulo: Scipione, 2007.

ANGOTTI, José André; DELIZOICOV, Demétrio; PERNAMBUCO, Marta M. C. A. **Ensino de Ciências: Fundamentos e Métodos**. São Paulo: Cortez, 2002.

AURANI, Kátya Margareth. **Ensino de conceitos: estudo das origens da 2ª Lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII**. Instituto de Física, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, São Paulo, 1986.

AURÉLIO G. Filho; TOSCANO, Carlos. **Física Volume Único**. São Paulo: Scipione, 2007.

BACHELARD, Gaston. **O novo espírito científico**. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1968.

BACHELARD, Gaston. **O racionalismo aplicado**. Rio de Janeiro: Zahar, 1977.

BACHELARD, Gaston. **A Filosofia do Não**. Coleção Os Pensadores. São Paulo: Abril Cultural, 1978.

BACHELARD, Gaston. **A Formação do Espírito Científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2005.

BACHELARD, Gaston. **Epistemologia**. Lisboa: Edições 70, 2006.

BACHELARD, Gaston. **A Psicanálise do fogo**. São Paulo: Martins Fontes, 2008.

BAIERLEIN, Ralph. Entropy and the second Law: a pedagogical Alternative. **American Journal of Physics**. v.62, n.1, 15-26, 1994.

BARBOSA, E; BULCÃO, M. **Bachelard, pedagogia da razão, pedagogia da imaginação**. Petrópolis, Brasil: Vozes, 2004.

BASSALO, J. M. F. **Curiosidades da Física, Clausius, Kelvin, Maxwell, Loschmidt, Boltzmann e a Entropia**. http://www.bassalo.com.br/cf_folclore93.asp , acessado em 09/06/2009.

BERTOCHÉ, G. **A objetividade da ciência na filosofia de Bachelard**. <http://www.ebooksbrasil.org/adobeebook/objbachelard.pdf> acessado em 11/11/2008.

BOLTZMANN, L. Acerca da mecânica estatística. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. n.3, v.28, p. 259-266, 2006.

BRUSH, Stephen G. **The History of Modern Science**, A guide to the second revolution, 1800-1950. Ames, EUA: Iowa University Press, 1988.

BRUSH, Stephen G. **A history of Kinetic Theory**
<http://www.math.umd.edu/~lvrmr/History/index.shtml> Acessado em 06/05/09.

BRUSH, Stephen G. ;HALL, Nancy S. **The Kinetic Theory of Gases**, An anthology of classic papers with historical commentary. London: Imperial College, 2003.

<http://books.google.com.br/books?id=BXt-Ne7ytxYC&printsec=frontcover>

CARDWELL, D.S. **From Watt To Clausius**: The rise of Thermodynamics the early industrial age. New York: Cornell University, 1971.

CARNOT, Sadi. **Reflections on the Motive Power of Fire**, and other papers on the second law of thermodynamics by E. Clayperon and R. Clausius. 2ª Ed. Mineola, NY: Dover, 1988.

COTIGNOLA, M.; BORDOGNA, C.; PUNTE, G.; CAPPANNINI, O. Difficulties in learning thermodynamic concepts: Are they linked to the historical development of this field?. **Science & Education**, v.11, 279-291, Março, 2002.

CLAUSIUS, Rudolf, Emmanuel. Ueber die bewegendeKraft der Wärme. **Annalen der Physik und Chemie**. v. 79, p. 368;500. 1850.

CLAUSIUS, Rudolf Emmanuel, . Ueber verschiedene für die Anwnedung bqueme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. **Annalen der Physik und Chemie**. v. 125, p. 353. 1865.

DAHMEN, Sílvio R. A obra de Boltzmann em Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v.28, n.3, p. 281-295. 2006.

DELIZOCOIV, Demétrio. **Conhecimento, tensões e transições** Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, São Paulo, 1991.

DEBIER, J.; DELÉAGE, P.; HÉMERY, D. **Uma história da energia**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1993.

DIAS, P. M. C. A (Im)Pertinência da Historia ao Aprendizado da Física (um Estudo de Caso). **Revista Brasileira de Ensino de Física**. n. 2, v. 23, jun. 2001.

-
- DIAS, P. M. C. A hipótese estatística do teorema-H. **Química Nova**. n.6, v.17. 1994.
- DUGDALE, J. S. **Entropy and its Physical Meaning**. Londres: Taylor and Francis, 1998. ISBN: 0203211294
- FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert; SANDS, Matthew. **Lectures on Physics**. v.1. Massachusetts: Addison Wesley, 1977.
- FRISH, S.; TIMOREVA, A. **Curso de Física General**. Tomo I. Moscou: Mir, 1967.
- GASPAR, Alberto. **Física Volume Único**. São Paulo: Scipione, 2005.
- GRAF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. **Física Térmica e Óptica 2**. 4ª ed. São Paulo: EDUSP, 1998.
- HAMBURGER, Ernst W. **O que é física**. Coleção Primeiros Passos. São Paulo: Brasiliense, 1989.
- HELMHOLTZ, On the Conservation of force, 1863
. <http://www.fordham.edu/halsall/mod/1862helmholtz-conservation.html>
- HOBSBAWM, Eric J. **A era das revoluções: 1789-1848**. 22ª Ed. São Paulo: Paz e Terra, 2007a.
- HOBSBAWM, Eric J. **A Era do Capital: 1848 – 1875**. São Paulo: Paz e Terra, 2007b.
- JOULE, J. P. **On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power**. [in letters to the editor of Philosophical Magazine, series 3, vol. xxvii, p 205]. <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Joule-Heat-1845.html> Acessado em 18/12/2008.
- KARDEC, Allan. **Livro dos espíritos**. Rio de Janeiro: Federação Espírita Brasileira, 2007.
- KUHN, T. S. Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery. In **Critical Problems in the History of Science, proceedings of the institute of History of Science**. Wisconsin, EUA: University of Wisconsin, 1959.
- LAMBERT, Frank L. A modern View of entropy. **Chemistry**. n.1. v.15, p.13-21. 2006.
- LAMBERT, Frank L. Disorder – Cracked Crutch for Supporting Entropy Discussions. **Journal of Chemical Education**. n.2, v.49, p. 187-192, fev. 2002.

LAVOISIER, Antoine. **Traité Élémentaire de Chimie**. Paris: Imprimerie Impériale, 1864.

LOPES, A. R. C. Contribuições de Gaston Bachelard ao ensino de Ciências. **Enseñaza de las Ciências**. n. 3, v. 11, p. 324-330. 1993.

LOPES, A. R. C. Bachelard: O Filósofo da desilusão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. n. 3, v. 13, p. 248-273, dez. 1996.

MAGIE, F. W. **A source book in physics**. New York: McGraw-Hill, 1935.

MENEZES, Luis Carlos de. **A matéria, uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MORENO GONZÁLEZ, Antônio. ATOMISMO *versus* ENERGETISMO: Controversia científica a finales del siglo XIX. **Ensenansa de la Ciencias**, n.24 v.3, p.411- 428, 2006.

MULLER, Ingo. **A history of Thermodynamics: the doctrine of energy and entropy**. Berlin: Springer-Verlag, 2007.

NUSSENZVEIG, Moyses H. **Curso de Física Básica**. Vol. 2. São Paulo: Edgar Blücher, 1981.

OLIVEIRA, P. M. C.; DECHOUM, K. Facilitando a compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. n. 4, v. 25, p. 359-363, dez. 2003.

PENTEADO, Paulo César; TORRES, Carlos Magno. **Física, Ciência e Tecnologia**. Vol. 2. São Paulo: Moderna, 2005.

PEREIRA JR, Alfredo. **Tempo e irreversibilidade: uma crítica da tradição Boltzmanniana**. UNICAMP, Tese de doutorado, Campinas, SP, 1994.

PLANCK, Max. **Treatise on Thermodynamics**. New York: Dover, 1945.

PSSC – College Physics. Del Physical Science Study committee. Zaragoza, Espanha: Editorial Luis Vives, 1969.

ROSA, Luiz Pinguelli. **Tecnociências e Humanidades: novos paradigmas, velhas questões**. Vol 2. São Paulo: Paz e Terra, 2006.

SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA, Caio Sergio. **Universo da Física**. São Paulo: Atual, 2005.

STYER, Daniel F. Insight into Entropy. **American Journal of Physics**. n. 12, v. 68, dez. 2000. <http://ojps.org/ajp>

TARSITANI, Carlo; VICENTINI, Matilde. Scientific Mental Representations of thermodynamics. **Science & education**. n. 1, v. 5, p. 51-68, Jan. 1996.

THOMSON, W. Sobre a tendência universal da natureza para a dissipação da energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. n. 4, v. 29, p. 491-492. 2007. www.sbfisica.org.br

VOLCHAN, Sergio B.; VIDEIRA, Antônio A. P. Reversibilidade Microscópica versus Irreversibilidade Macroscópica na Mecânica Estatística Clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. n. 1, v. 23, Mar. 2001.

VIARD, Jèrôme. Using the history of Science to Teach Thermodynamics at the University level: The Case of the Concept of Entropy. **Eighth International history and Philosophy, sociology & Teaching Conference**. University of Leeds, 2005. www.Ihpst2005.leeds.ac.uk, Acessado em 30/07/2007.

VIDEIRA, Antônio Augusto Passos. Atomismo, energetismo e pluralismo teórico no pensamento epistemológico de Boltzmann. **Química Nova**. n. 3, v. 17, p. 461-464. 1994.

ZAMORANO, Raul O.; GIBBS, Horácio M.; Maio, Lucrecia E.; Viau, Javier E. Evaluación de um modelo didáctico analógico para el aprendizaje de energia interna e temperatura. **Revista Eureka sobre enseñanza e divulgación de las ciências**. 2006.