

CONCEPÇÕES SOBRE A NATUREZA DO CALOR EM DIFERENTES CONTEXTOS HISTÓRICOS⁺*

Ana Paula Bispo Silva

Departamento de Física
Universidade Estadual da Paraíba
Campina Grande – PB

Thaís Cyrino de Mello Forato

Departamento de Ciências Exatas e da Terra
Universidade Federal de São Paulo
Diadema – SP

José Leandro de A. M. Costa Gomes

Departamento Acadêmico
Instituto Federal de Alagoas
Arapiraca – AL
Mestrando em Ensino de Ciências e Matemática
Universidade Estadual da Paraíba
Campina Grande – PB

Resumo

As diversas interpretações que o conceito de calor apresentou ao longo da história ilustram exemplos de mudanças que ocorrem na ciência, e, estabelecem modos particulares de se observar e se interpretar os fenômenos, vinculados ao contexto histórico de cada sociedade. Compreender tais mudanças, em seus respectivos arcabouços teóricos, pode fornecer exemplos explícitos, para o ensino de ciências, de que a ciência não progride linearmente, bem como criticar a existência de verdades finais. Além disso, pode-se co-

⁺ The nature of heat in different historic contexts

^{*} *Recebido: abril de 2013.
Aceito: agosto de 2013.*

nehcer inúmeros fatores que interferem na construção da ciência, mostrando que as observações são influenciadas teoricamente e estão sujeitas ao contexto social de cada época. Com tais objetivos, este trabalho pretende explorar alguns episódios delimitados da história do calor desde a Antiguidade até o século XVIII. Foram escolhidos alguns eventos que apresentam distintas teorias contemporâneas, enfatizando duas ou mais interpretações para o mesmo fenômeno, e como elas influenciam a adoção de diferentes explicações para a natureza do calor. Discute-se como não é possível optar por uma explicação sobre o calor sem admitir concepções teóricas para o funcionamento da natureza. Esta narrativa histórica é voltada para professores e constitui parte de uma pesquisa que desenvolveu uma metodologia para inserção da história da termodinâmica na escola básica.

Palavras-chave: *Calor. História das ciências. Natureza das ciências. Ensino de ciências.*

Abstract

The multiple meanings that a concept can have throughout history illustrate changes in science. Once the nature of something is defined, its consequences involve a change in the way of looking at and interpreting phenomena and vice versa. Attempts at understanding how a concept has changed requires knowing the context of the science and a given society, namely where and when the change is taking place. Such a complex requirement can be applied in the context of Science teaching as a way to explicitly demonstrate the nonlinear advance of science and the inexistence of final truths, among other issues related to the nature of science such as the importance of the social context and that observations are theory-laden. With these goals, this paper intends to explore the complex history of the concept of heat from antiquity until the 18th century. We chose to divide the history of heat into some historical moments which can show antagonistic theses. We focused on showing two or more interpretations of the same phenomenon and how these interpretations contributed to adopting a different theory of the nature of heat. This paper is part of a

study which intends to prepare historical material for teachers and High School students linking historiography of science and educational aspects.

Keywords: *Heat. History of science. Nature of science. Science Education.*

I. Introdução

O estudo das interpretações que um fenômeno, ou de um grupo de fenômenos, recebeu ao longo da história, abarca uma infinidade de perspectivas, o que requer a definição de recortes bem delimitados para o enfoque, tanto do ponto de vista temporal, quanto temático. Este trabalho faz uma opção pelo recorte temático – algumas diferentes interpretações que o conceito de calor apresentou ao longo da história –, ao invés do estudo de um único episódio histórico. Contudo, não é elementar enfrentar o desafio de se construir uma versão histórica que contemple um amplo período sem incorrer em equívocos historiográficos que ocasionam problemas epistemológicos (MARTINS, 2001). Tal escolha foi motivada pelos propósitos educacionais postos pela pesquisa para uma dissertação de mestrado, para a qual tal narrativa foi inicialmente construída. Essa versão aqui apresentada, de aspectos da história da termodinâmica, configura-se a síntese histórica que fundamenta a construção de uma proposta didático-metodológica para a escola básica¹. Além disso, pretende-se que esta narrativa possa ser útil a todo professor que tenha interesse em utilizar uma abordagem histórica sobre o calor, tanto na escola básica, quanto na formação inicial ou continuada de professores.

Buscou-se atender aos requisitos da nova historiografia da história das ciências (KRAGH, 1987; MARTINS, 2004), mas sempre tendo em vista o contexto educacional e os objetivos formativos estabelecidos pela pesquisa, bem como as recomendações para a transposição didática da História e Filosofia das Ciências (HFC) para a sala de aula (FORATO, 2009). Desse modo, atendendo aos nossos principais objetivos educacionais, esta abordagem histórica busca favorecer o aprendizado de conceitos das ciências, tanto quanto a compreensão de aspectos da natureza das ciências.

¹ Tal proposta busca atender as solicitações da literatura especializada, por exemplo, explicitada por André Martins (2007), exemplificando ações concretas para a sala de aula, e será objeto de outra publicação.

Como objetivos epistemológicos pretende-se oferecer exemplos históricos que permitam problematizar algumas das concepções deformadas sobre as ciências, presentes no ambiente educacional, apontadas por Gil-Pérez e colaboradores (2001), basicamente concepções empírico-indutivistas ingênuas e a-teóricas, a-históricas, dogmáticas, elitistas, exclusivamente analíticas, acumulativas e lineares dos processos históricos, protagonizados por *insights* individuais de grandes gênios.

Conciliar as exigências da metodologia histórica com as necessidades da didática das ciências requereu enfrentar obstáculos, além de se fazerem escolhas que significaram, necessariamente, a assunção de alguns riscos (FORATO *et al.*, 2011). Fizemos algumas opções visando abordar certos aspectos contextuais e buscamos, na medida do possível, evitar reducionismos e simplificações, ao mesmo tempo em que pretendemos apresentar uma história complexa, que transcende uma divisão analítica da ciência e é rica quanto à influência que teve e proporcionou à ciência e à técnica. O principal referencial teórico que utilizamos para selecionar conteúdos e seus enfoques, visando a coerência com os objetivos pedagógicos e epistemológicos estabelecidos, são os parâmetros para a transposição didática da HFC para a sala de aula propostos por Forato (2009). Um dos desafios apontados pelos parâmetros é a mediação entre omissão, simplificação e ênfase. Os riscos envolvem, por exemplo, negligenciar e omitir aspectos conceituais de inúmeras teorias contemporâneas diferentes, sugerir indevidamente uma evolução linear da ciência, ou ainda, omitir aspectos pessoais, sociais e políticos, apresentando uma ciência objetiva. Por outro lado, uma crítica exagerada ao empirismo ingênuo, pode fomentar o relativismo. Buscamos minimizar tal problema, tanto no enfoque narrativo, quanto indicando algumas referências ao longo do texto, nas quais o leitor poderá aprofundar-se nos aspectos omitidos.

Assim, apresentamos inicialmente as interpretações de fenômenos quanto à *natureza* do calor, dentro das concepções de alguns filósofos da Antiguidade clássica e que são reinterpretados, de certa forma, no arcabouço alquímico de alguns pensadores. Posteriormente, exploramos alguns pontos das discordâncias quanto à *natureza* substancial do calor ou relativa ao movimento, detalhando certos aspectos dos estudos do século XVIII, quando surge uma compreensão do calor como energia, claro, diferente do que consideramos hoje.

II. O calor na Antiguidade

Um estudo sobre as explicações para calor na Antiguidade nos leva, invariavelmente, à compreensão que se tinha na época sobre o Universo. Isto porque,

na Antiguidade, havia um grande enfoque voltado para questões cosmogônicas na construção de explicações sobre o mundo natural, ainda que existissem também a preocupação com questões práticas.

Dentro da interpretação cosmogônica, calor está relacionado ao elemento Fogo para vários pensadores, e este último assumiu vários significados. Por exemplo, Empédocles de Agrigento (493-433 a.C), filósofo pré-socrático, propunha que o Fogo correspondia a um dos elementos primordiais, assim como a Terra, Água e Ar, que se unem em diferentes proporções para formar todas as coisas. Haveria ciclos no Universo em que estas coisas estariam sujeitas a união, pela força do *amor*; ou à separação, pelo *ódio*. Assim, se formaram a Terra, o Sol, a Lua, etc., tudo aquilo que existe no mundo (MARTINS, 2012, p. 46). Empédocles não estava preocupado com questões como a temperatura dos corpos, funcionamento de instrumentos, ou qualquer *causa* de outros fenômenos em que o Fogo estivesse envolvido. Sua preocupação era explicar do que o Universo era constituído, ou seja, estava preocupado com a natureza dos seres e de tudo aquilo que formava o Universo, assim como vários outros filósofos do mesmo período².

Possivelmente influenciado por Empédocles, Aristóteles (384-322 a. C.) adotou a ideia dos quatro elementos e associou-lhes propriedades como umidade e secura, quentura e frieza, além de adicionar um quinto elemento para explicar o mundo natural, o éter (a quinta essência), elemento constituinte dos corpos celestes, ao qual não é associada qualquer propriedade desse tipo (MARTINS, 2012, p. 91). Aristóteles acrescentava à constituição do Universo, a necessidade de explicar a *causa* daquilo que existia, o que ampliava o conhecimento da natureza. Segundo ele, seria possível atribuir a constituição e propriedades de qualquer corpo existente, em função da proporção de elementos primordiais que ele continha. Assim, à fumaça, por exemplo, que era constituída de Fogo e Ar, poderia ser atribuída as propriedades características destes elementos, como quentura e secura. Aristóteles ainda associava movimentos naturais aos elementos primordiais. Para ele, Fogo e Ar possuem o movimento natural reto para cima, enquanto Terra e Água possuem movimento natural reto para baixo. Ou seja, a fumaça irá possuir movimento natural para cima, tendendo a “subir”, assim como a chama de uma vela, que queima para cima, ainda que a vela seja colocada de cabeça para baixo. A associação feita por Aristóteles, em relação a Empédocles, já mostrava outra tendência do pensamento filosófico, que não se restringia a explicar a criação do Universo, mas tam-

² Outra concepção de fogo aparece em Heráclito, de Éfeso, que considerava o *Fogo* a matéria básica do Universo (<<http://plato.stanford.edu/entries/heraclitus/>>).

bém pretendia explicar os fenômenos da natureza (ARISTÓTELES in COHEN e DRABKIN, 1958, p. 201).

No mesmo período de Aristóteles, Epicuro (341-270 a.C.) defendia o atomismo de Demócrito (~460 a.C.), em que o Universo e tudo que nele existia seria constituído por minúsculas partículas de diferentes formatos, denominadas átomos, que se enganchavam uns nos outros formando toda a matéria existente e cujas diferentes combinações e formatos explicavam todos os fenômenos naturais. Segundo os atomistas, o calor seria produzido por átomos esféricos que se movimentariam livremente no espaço vazio entre os demais átomos³.

Apesar de não apresentar uma explicação mais aprofundada sobre o calor, o atomismo de Epicuro estava, assim como Aristóteles, voltado para explicar as *causas* dos fenômenos. A escola atomista buscava explicar o mundo em termos de matéria e movimento, ao acaso, sem intervenção de seres sobrenaturais. Epicuro, particularmente, enfatizava sua utilidade para livrar o homem do temor de algum castigo eterno e da necessidade de atribuir o desconhecido aos deuses (MARTINS, 2012, p. 49). Aristóteles foi um crítico do atomismo, principalmente quanto à existência do espaço vazio entre os átomos, mas não se pode afirmar nada quanto à sua crítica sobre a concepção de fogo, já que isso não está claro nem mesmo entre os atomistas (BARNETT, 1946a). A tradição aristotélica pressupunha que não existia o vazio (ou vácuo⁴) absoluto. Tal fato levava, conseqüentemente, aos estudos de pneumática no período, que buscavam entender se em um aparente vazio haveria uma combinação de ar com algum outro elemento.

É buscando mostrar a inexistência do vácuo absoluto, e que o vácuo contínuo só pode ser obtido artificialmente, que Heron de Alexandria (130 a.C.) propõe a *aeolípia*, que às vezes é anacronicamente considerada como um primeiro modelo de máquina térmica.

Alguns argumentam que não há vácuo absoluto; outros que, enquanto nenhum vácuo contínuo é exibido na natureza, [este] será encontrado distribuído em pequenas porções através do ar, água, fogo, e todas as outras

³ É importante não comparar a ideia de átomo e espaços vazios dos atomistas da Antiguidade com modelos atômicos posteriores. Cada época interpreta tais princípios mediante diferentes critérios. Sobre o atomismo de Demócrito, veja mais em <<http://plato.stanford.edu/entries/democritus/>>.

⁴ Na fonte traduzida para o inglês que utilizamos, a palavra usada por Aristóteles é *void*, o que pode significar vácuo ou vazio; enquanto que vácuo é expresso por *vacuum*.

substâncias: e esta última opinião, que demonstraremos aqui ser verdadeira para os fenômenos sensíveis, é a que adotamos (HERON DE ALEXANDRIA in COHEN e DRABKIN, 1958, p. 249)⁵.

A *aeolípia* consiste de um globo oco que gira em torno de um suporte de madeira, quando dois tubos presos em sua superfície são preenchidos com o vapor de água que sai de uma caldeira. A intenção seria mostrar que a **combinação de elementos** pode gerar o movimento e há sempre pequenas quantidades destes em qualquer espaço onde parece haver vácuo total (HERON DE ALEXANDRIA in COHEN e DRABKIN, 1958, p. 255; BUSTOS e SOTELO, 2008). Heron chegou a utilizar o princípio de funcionamento da *aeolípia* (movimento gerado pelo aquecimento do ar) para **propor** um método de abrir porta, conhecido como o famoso experimento dos “Portões de Alexandria” (HERON DE ALEXANDRIA in COHEN e DRABKIN, p. 329-330). Entretanto, não havia nenhuma conjectura sobre a transformação de calor em trabalho mecânico nas suas hipóteses, apenas considerações pneumáticas. Costuma-se considerar a *aeolípia* de Heron como a primeira máquina térmica, mas os conceitos de energia e de conversão entre modalidades de energia desenvolvem-se nos séculos XVIII e XIX⁶. Tais conceitos constituem-se a fundamentação teórica para explicar o funcionamento do que hoje denominamos máquina térmica. Se admitimos que o vocabulário próprio da ciência e da técnica pressupõe ideias, concepções de mundo e de conceitos intrínsecos a cada época, usá-los inadequadamente provoca inconsistências teóricas. Interpretar o passado mediante conceitos aceitos na ciência de outras épocas fomenta visões deformadas sobre a natureza da ciência (GIL-PÉREZ *et al.*, 2001; MARTINS, 2001; 2006).

Independente da natureza atribuída ao calor, porém, sob influência do pensamento aristotélico, outros instrumentos foram construídos baseados em fenômenos em que havia aquecimento e resfriamento, como os primeiros termoscópios. Em alguns deles, observa-se a referência aos elementos de Aristóteles, como a que Philo de Bizâncio (~200 a. C.) faz ao descrever o funcionamento do seu termoscópio: “Fogo, também, por sua natureza está muito relacionado com ar, e por esta razão, ar passa por ele” (PHILO in COHEN e DRABKIN, 1958, p. 255;

⁵ As traduções de extratos de fontes primárias ao longo do texto são de nossa responsabilidade.

⁶ Veja sobre a formulação do primeiro princípio da termodinâmica em Martins (1984). Mayer e Joule adotavam uma ideia de força para se referir ao que poderíamos considerar hoje como energia. Somente no século XIX é que as concepções de energia e trabalho começam a se definir, de modo como ainda as adotamos.

BARNETT, 1956). O termoscópio de Philo consistia em dois recipientes ligados por um tubo. Num dos recipientes colocava-se água, e deixava-se o outro, no formato de uma esfera, vazio. A esfera era colocada na presença do Sol, e quando aquecida gerava bolhas na água, pois o Fogo seria transportado entre os recipientes através do ar que havia no tubo. Quando a esfera esfriava, a água subia pelo tubo. Com este instrumento, Philo conseguia mostrar a interação entre os quatro elementos e a transformação de um no outro, como pressupunha o pensamento aristotélico.

O mesmo princípio de combinação dos quatro elementos e suas propriedades foi utilizado por Galeno (129-199) na construção de termoscópios. Os primeiros termoscópios, que indicavam “graus” de calor ao estado do paciente, associavam o aumento do “quente” às propriedades de substâncias especiais, como o ar, a água, etc., pois já se conheciam fenômenos que denominamos dilatação e expansão térmicas (BARNETT, 1956). Apesar da profusão de tipos de termoscópios ou mesmo outros instrumentos baseados nos estados de quente e frio que surgiram durante o período medieval, havia mais um interesse prático do que a relação entre o fenômeno e a tentativa de compreender a natureza do calor (BARNETT, 1956).

Explicações sobre a natureza do calor fundamentadas nessas duas concepções distintas sobre a natureza da matéria, o atomismo ou os quatro elementos, costumam ser as mais conhecidas do período compreendido entre o século VI a.C. e o século II. Por um lado, a escola atomista defende o mundo formado pela combinação de diferentes átomos, movimentando-se no vazio, cujas diferenças explicam as características de cada substância. Já pensadores como Empédocles, Aristóteles, Heron, Philo e Galeno, naturalmente com distintas especificidades em suas ideias, relacionavam os fenômenos do calor ao elemento Fogo, e não aceitavam a existência de vazio na natureza, a não ser aquele artificialmente produzido.

A concepção cosmogônica desses filósofos permeava suas observações dos fenômenos naturais, por exemplo, admitindo ou não a existência do vazio, na aceitação ou rejeição de teorias. Independente da época ou dos métodos aceitos como válidos para o que se considera como ciência em cada cultura, essas observações não são neutras, mas são influenciadas pela visão de mundo de cada pensador. Em uma mesma época, encontramos explicações diferentes e bem fundamentadas para um mesmo fenômeno natural. Tais ideias devem ser entendidas e interpretadas mediante seu contexto histórico, e não avaliadas anacronicamente como “primitivas” ou “ridículas”, ou embriões de teorias atuais. Em geral, esse tipo de anacronismo fomenta a visão linear e acumulativa de uma ciência que evoluiria em

direção a verdades absolutas, cujo único empecilho seria a limitação tecnológica de cada época⁷.

III. A interpretação da alquimia

Em diferentes culturas da Antiguidade, desenvolveu-se também outro modo de interpretar o mundo, a alquimia. Fala-se, pelo menos, em alquimia persa, egípcia, chinesa, grega e árabe, como origem dos diferentes saberes e fazeres que teriam servido para seu desenvolvimento, mas não há uma gênese “exata” para a alquimia, que seja consenso entre especialistas. Ela é, em geral, vinculada ao trabalho prático da metalurgia, quando a arte da transformação dos metais adquiria conotações de uma arte sagrada. Seria uma tentativa de compreender os segredos mais íntimos da matéria, de encontrar a cura de todos os males, do aprimoramento do espírito, da busca pela eternidade, da fabricação de ouro. A compreensão do homem através da interpretação dos céus estava também entre suas práticas e metas (ALFONSO-GOLDFARB, 2001). Quando os processos envolvendo o calor surgem vinculados ao ideário alquímico, por exemplo, em materiais didáticos, costumam estar associados à ideia de Fogo, purificação, *alcahest*. Discutiremos, brevemente, tais interpretações a seguir.

Documentos do século XV mostram uma forma de compreensão da natureza e explicação das causas dos fenômenos naturais envolvendo princípios alquímicos vinculados à transformação da matéria (transmutação). Mencionam a transformação de um metal em outro e a busca pela pedra filosofal. Diversos filósofos naturais do período, entre eles alguns alquimistas, buscavam a causa dos fenômenos e associavam os questionamentos de pensadores e filósofos da Antiguidade à prática experimental. Tais trabalhos, que vinham desde, pelo menos, o século X, parecem constituir uma tentativa de formalização de receitas medicinais e de tratados diversos e suas compilações, que descreviam métodos para se encontrar novos elementos na natureza a partir da manipulação de substâncias (BELTRAN, 2006).

O ambiente do Renascimento, em que estes estudiosos viviam, favorecia e estimulava novas experiências: a Europa estava redescobrendo os antigos textos médicos e os filósofos gregos; com as expedições marítimas, novas plantas e animais eram encontrados nas Índias oriental e ocidental e novas doenças tinham aparecido como a sífilis e o escorbuto (PORTO, 2002). É neste contexto que al-

⁷ Veja sobre distorções causadas pela pseudo-história em Allchin, 2004; Gil-Pérez *et al.*, 2001; Martins, 2001 e 2006.

guns fenômenos (que poderíamos entender como explicitando alguma concepção sobre o calor) são explicados pela presença de um *elemento novo*, semelhante a uma *substância purificadora*, que recebeu diferentes nomenclaturas e explicações. Em alguns casos, esta substância poderia ser empregada na transmutação da matéria ou para fins medicinais.

Segundo alguns historiadores, foi Paracelsus (1493-1541) quem trouxe à tona o termo *alcahest* para tal substância, tratando-o como um remédio a ser manipulado para tratamento do fígado, mas sem explicitar exatamente qual a sua composição, nem mesmo se era uma substância composta (PORTO, 2002; ALFONSO-GOLDFARB; FERRAZ; WAISSE, 2009). Os seguidores de Paracelsus foram, em suas compilações e reinterpretações, modificando o significado do *alcahest* e uma associação com o elemento Fogo aparece com Jan Baptist Van Helmont (1579-1644), médico belga, que se entusiasmou com as ideias de Paracelsus em oposição à medicina tradicional ensinada nas universidades. Com Van Helmont, o *alcahest* passa de um remédio para um “liquor” com propriedades de dissolução universal. Porém, essa dissolução não se refere ao processo comum de dissolver, e sim a um outro tipo de processo de purificação de uma substância que permitiria levá-la à sua matéria essencial, ou estado primordial.

De acordo com Van Helmont, o alcahest era um liquor capaz de dissolver qualquer substância material sem deixar resíduo. Nesse processo, ele não sofreria qualquer mudança seja na qualidade ou na quantidade, enquanto que a substância a ser dissolvida seria reduzida a seu estado primário – um estado em que possui apenas suas virtudes específicas (ou seja, suas propriedades medicinais – e livre de qualquer impureza) [...] (PORTO, 2002, p. 8).

O *alcahest* está para Van Helmont na mesma categoria dos quatro elementos de Aristóteles, ou seja, seria um quinto elemento, ou quinta essência, já que não se misturava à substância que dissolvia. A possível associação com o elemento Fogo⁸ aparece no sentido de purificação ou capacidade de tornar a substância pura e é apresentada no relato que Van Helmont faz de um sonho. A partir do sonho, ele

⁸ Note que existe uma diferença entre o elemento Fogo e o fenômeno fogo que provoca a queima de algumas substâncias naturais. A associação entre o Fogo elementar da Antiguidade com o fogo de uma fornalha não é nada elementar. O primeiro parece estar associado a um princípio intrínseco a matéria, que a faria demonstrar certas propriedades e comportamentos. O segundo seria um efeito produzido, por exemplo, quando um raio atinge uma árvore seca e provoca chamas.

conclui que, assim como fogo possui a virtude de limpar, o *alcahest* possui um Fogo interno que tem a propriedade de limpar o corpo das doenças: há similaridade nas ações do fogo e do *alcahest* (PORTO, 2002).

Os pensadores que adotavam as ideias de Paracelsus, por exemplo, Van Helmont na Bélgica e Herman Boerhaave (1668-1738) na Holanda, mantiveram o *alcahest* como medicinal, e não enfatizaram qualquer relação deste quinto elemento com a transformação de metais explícita em manuscritos considerados alquímicos, nem mesmo com as propriedades de quente e combustão que eram associadas ao calor. Boerhaave enfatizou ainda mais o caráter purificador do *alcahest* na descrição que faz em seu livro *Elements* (1735).

Liquor alcahest é fogo verdadeiro, mas não o fogo elementar, e sim o fogo celestial e central, incorruptível e inalterável [...] o fogo central natural que é encontrado em todas as coisas e que está abundantemente concentrado no liquor alcahest (BOERHAAVE apud ALFONSO-GOLDFARB; FERRAZ; WAISSE, 2009, p. 29).

Ainda que diversos pensadores tenham associado explicitamente o Fogo aos fenômenos do calor, Van Helmont e Boerhaave não manifestaram qualquer menção ou intenção de analisar ou explicar fenômenos vinculados ao calor em suas obras analisadas por Porto (2002). Mas, havia, no mesmo período, alquimistas que alegavam que os quatro elementos de Aristóteles não eram suficientes para explicar as transformações que ocorriam nos metais e atribuíram à constituição da matéria os *princípios filosóficos* ou *propriedades filosóficas*, que seriam o *princípio mercúrio* e o *princípio enxofre*. O primeiro, responsável, entre outras, pela propriedade de maleabilidade dos metais; o segundo pela cor, afinidade, peso e combustibilidade (FORATO, 2006). Um terceiro princípio, *sal*, era o responsável pela união dos dois outros princípios e não se alterava no tratamento químico (BARNETT, 1946a). Vários destes alquimistas estavam mais preocupados com a transmutação de elementos e em encontrar a pedra filosofal.

Seguindo os pressupostos desses alquimistas, o alemão Johann Becher (1635-1682) vai denominar o *princípio* responsável pela combustibilidade de *terra pinguis* – um tipo de terra combustível, presente em todas as substâncias que pudessem queimar. Assim, segundo Becher, quando uma substância queimava, a parte correspondente à *terra pinguis* era expelida, e o que restava podia se transformar em outra substância, com proporções diferentes dos outros dois princípios (BECHER apud LEICESTER e KLINKSTEIN, 1952, p. 56; WISNIAK, 2004).

Tanto o *alcahest* como a *terra pinguis* pareciam incertos quanto à sua preparação ou obtenção; muitos duvidavam de sua existência, mas, ainda assim,

foram objeto de estudo de várias pessoas durante os séculos XVII e XVIII. Não havia uma única maneira de entender e explicar a natureza entre os alquimistas de um mesmo período e de uma mesma civilização. Existiam concepções e práticas em comum, o que permitia serem entendidos como alquimistas, mas nem todas as ideias e propostas eram consensuais⁹. Havia ainda quem não concordava com nenhuma das formas de constituição da matéria baseada nos elementos aristotélicos, ou nos três elementos e princípios, na linha do que pensava Becher – como era o caso de Robert Boyle (1627-1691). Este adotava uma posição corpuscularista, inspirado pelas reinterpretações de teorias atomistas que remontavam à Antiguidade, porém possuía diferenças principalmente quanto à existência do vácuo. Boyle seguia a vertente de pensadores como Francis Bacon (1561-1626) e René Descartes (1596-1650), que, se por um lado pressupunham a existência corpúsculos (ou partículas) como os atomistas, também negavam a existência do vácuo absoluto, acreditando que uma espécie de matéria sutil (éter para alguns) permeava toda a matéria e os espaços aparentemente vazios em seus interstícios¹⁰. Tanto Bacon como Descartes consideravam o movimento ao tratar de calor, mas de forma diferente. Bacon considerava o calor como o movimento de pequenas partículas do corpo sob a ação do fogo. Descartes considerava que a sensação de calor estava ligada ao movimento entre as partículas, que era comunicado aos nervos (BARNETT, 1946a).

Ainda assim, qualquer uma dessas interpretações dadas para *calor* no contexto da alquimia são muito distintas do que adotamos agora. Mesmo a posição de Boyle, e também as de Bacon e Descartes que faziam menção a movimento, não podem ser comparadas com o que se pensa atualmente. Enquanto a compreensão do *calor* como algum tipo de substância, seja ela primordial ou não, permitiu o desenvolvimento dos estudos de calorimetria; aquela que manteve uma interpretação mais corpuscular contribuiu para o estudo dos gases. Nenhuma das duas apresentou evidências suficientes para ser totalmente descartada durante os séculos XVII e XVIII. Pelo contrário, ambas se reforçaram com o estudo de outros fenômenos, como os fluidos elétricos, que adotavam uma visão mais contínua da maté-

⁹ Isaac Newton (1642-1727) fazia parte de um grupo de alquimistas que a entendiam como caminho para o aprimoramento do espírito e a compreensão da ação de Deus no mundo natural, além, é claro, das supostas influências que seu ideário e experimentos exerceram na sua filosofia natural. Veja em Dobbs (1984) e Forato (2006).

¹⁰ Boyle envolveu-se profundamente com a alquimia, tendo liderado, inclusive, comissões na Royal Society para estudos e realização das artes alquímicas. Não abriremos mais esse tema neste texto, mas para maiores referências, consulte Alfonso-Goldfarb (2003).

ria; enquanto que os estudos da luz como corpúsculo reforçavam a visão mais discreta da matéria.

IV. Os conceitos de flogístico e calórico

O século XVIII foi um período de várias mudanças em relação à forma que se fazia a ciência anteriormente. O “século da razão” estabeleceu prioridades quanto à necessidade de sistematização das observações e a comunicação das ideias. Além disso, havia uma mudança na forma de se estudar os fenômenos naturais, proveniente, principalmente, das necessidades que haviam sido criadas com a Revolução Industrial.

Um dos principais problemas gerados com a Revolução Industrial foi a crescente demanda por “combustível” para alimentar as fábricas e impulsionar, principalmente, a metalurgia. Além de buscar um combustível que não trouxesse os efeitos prejudiciais, como a fumaça e a poluição que vinham das fábricas, como ocorria com o carvão mineral, e não levasse à destruição das florestas, como ocorria com o carvão vegetal; era importante manter a qualidade do metal processado (ferro), evitando o acréscimo de impurezas que o tornavam impróprio para a fundição (OLIOSI, 2004, p. 11).

Para melhorar as técnicas de aproveitamento do combustível e dos metais eram necessários artesãos e filósofos naturais, principalmente os que lidavam com questões ligadas à constituição da matéria. Com isso, a experimentação, que se aproximava mais da resposta necessária para a técnica, passou a ter grande destaque entre os filósofos naturais, não só para adquirir conhecimento, mas também para realizar modificações, fazendo um corpo agir sobre o outro: “a experiência como um dos instrumentos principais da meditação teórica; pois o objeto a que aspira é o conhecimento verdadeiro do mundo material que nos rodeia e que o pensamento quer penetrar” (METZGER, 1974 *apud* ALFONSO-GOLDFARB e FERRAZ, 2006, p. 11- 12).

Estes filósofos naturais estavam ligados às Sociedades, financiadas por reis ou grupos locais com posses, em que eram apresentados experimentos e levantadas discussões a respeito de vários temas. São exemplos de sociedades fundadas nesse período: a *Royal Society*, na Inglaterra, criada por estudiosos; a *Académie de Sciences*, em Paris, criada por um ministro de Luís XIV; a Academia de Ciências de Berlim, na Prússia, criada e mantida pelo rei da Prússia; e a Sociedade Lunar, em Birmingham, fundada por industriais e homens da ciência como Joseph Priestley e James Watt, na década de 1760. Nestas sociedades desenvolvia-se uma nova forma de fazer ciência, com a discussão e reconhecimento entre pares, a experi-

mentação e a observação durante reuniões, funcionando como meio de aprofundamento do conhecimento e sua divulgação (OLIOSI, 2004, p. 15).

É nesse contexto que podemos destacar duas interpretações diferentes para o calor que foram objeto de estudo de vários químicos e físicos: o flogístico (flogisto) e o calórico.

Ainda sob influência do pensamento alquímico, o médico alemão George Ernst Stahl (1669-1734)¹¹, que deu continuidade às ideias de Becher, atribuiu ao princípio inflamável que os corpos possuíam o nome de *flogístico* (ou *flogisto*). Stahl concentrou-se em tentar entender o que ocorria nos fenômenos como combustão e calcinação. Os dois fenômenos envolviam algum tipo de relação com o calor. Segundo ele, o processo de combustão, seria baseado na presença de substâncias combustíveis como o carbono e o enxofre, que quando aquecidas por uma chama, produziam grande quantidade de calor. Enquanto na calcinação, o aquecimento levava à transformação da substância, que se tornaria *cal*. Tanto a combustão quanto a calcinação seriam devidas à presença de um princípio inflamável (flogístico), presente no fenômeno: quanto mais combustível o material, mais flogístico ele possui. Na calcinação, quem possui o flogístico é o metal inicial, enquanto que a *cal*, derivada no processo, não. Portanto, na calcinação, o produto do metal fundido seria *cal* mais flogístico, sendo que o segundo elemento é liberado no ar. Já as substâncias como enxofre e carbono possuíam muito flogisto, que liberado na atmosfera após a queima, ficaria no seu estado livre (WISNIAK, 2004).

Stahl considera que o flogístico não pode ser criado nem destruído e se constitui naquilo que cria o fogo. Portanto, quando é liberado na calcinação ou na combustão, processos que só ocorrem na presença do ar, ele passa para a atmosfera e assume diferentes formas, como chamas, nuvens, raios, voltando à sua forma terrestre como parte do ar. Ou seja, o flogístico é um elemento eterno na natureza, que passa de um ente para o outro, em qualquer um dos reinos, num ciclo eterno e também por meio de reações químicas. Isto respondia questões como a impossibilidade de ocorrer combustão de materiais no vácuo, onde não haveria ar para a transformação do flogístico.

É importante observar que apesar de Stahl fazer considerações sobre o flogístico, que parecem as mesmas associadas ao *princípio filosófico enxofre* por alguns alquimistas, suas preocupações são diferentes, voltadas a entender a calcinação e combustão, e há uma tentativa de associar o flogístico a formas que já

¹¹ As obras de Stahl que tratam do flogístico foram publicadas entre 1703 e 1731, em latim e alemão (WISNIAK, 2004).

existem na natureza; enquanto que o *princípio*, como o próprio nome já diz, tem uma conotação mais filosófica, mais próxima da ideia dos elementos primordiais constituintes da matéria.

Entretanto, havia alguns fenômenos que a concepção de flogístico não explicava. Se ele era o princípio da combustibilidade, então toda vez que uma substância arde, ela perde flogístico, e como este tem massa, a substância resultante deveria ter uma massa menor, o que não ocorre. Por exemplo, o carvão seria riquíssimo em flogístico, pois queima facilmente, deixando pouco resíduo. Carvão aquecido adicionado à cal, que resultou do metal na calcinação, regenera o metal, cedendo flogístico para a cal, já que o metal seria o composto de cal e flogístico. O resíduo da queima do carvão tem um peso menor do que ele. Mas, a cal tem um peso maior que o metal que a originou, perdendo flogístico – se perdeu flogístico, que tem massa, porque a massa da cal é maior? Mesmo que naquela época os conceitos de peso, massa e densidade não fossem consensuais entre esses filósofos naturais, era uma situação difícil de explicar.

O desenvolvimento de novos instrumentos possibilitava uma precisão maior nas medidas de massa e também nos experimentos envolvendo “ares” (gases, posteriormente), o que tornava cada vez mais difícil explicar a existência de algo com “peso negativo” ou imponderável como o flogístico. Para os adeptos do flogístico, como Joseph Priestley (1733-1804) e Willian Watson (1715-1787), isso parecia não ser problema, já que ele poderia ser colocado na mesma categoria dos fluidos elétricos e magnéticos, como argumenta Watson, em 1781:

Certamente os senhores não esperam que a química seja capaz de apresentar-lhes um punhado de flogisto separado de um corpo inflamável; isto seria tão razoável como pedir um punhado de magnetismo, eletricidade ou gravidade extraído de um corpo magnético, elétrico ou pesado; existem poderes na natureza que não podem absolutamente tornar-se objetos dos sentidos, a não ser pelos efeitos que eles produzem, e o flogisto é deste tipo (WATSON, 1781, apud FILGUEIRAS, 1995).

Entretanto, o flogístico e outros fluidos ou entes imponderáveis, como o éter e o calórico (do qual trataremos mais adiante), eram controversos no período do iluminismo, quando a mensuração era fundamental para a ciência, e tais entes eram inobserváveis. Havia um forte desejo de banir a metafísica da ciência, e, na época da apologia a racionalidade e ao empirismo, a necessidade de recorrer aos entes imponderáveis era, no mínimo, controversa. Desse modo, para tentar compreender como se dava a ação ou combinação dos fluidos na matéria, os filósofos naturais colocavam nos experimentos e observações uma ferramenta fundamental

para fugir das especulações, ou seja, tentando avaliar os efeitos que produziam, como argumentou Watson¹².

Para alguns filósofos naturais, tais entes inobserváveis estavam vinculados às suas concepções religiosas, por exemplo, justificando a ação de Deus no mundo natural, o que poderia comprometer a visão de um suposto método experimental, que construiria teorias a partir de observações neutras, apenas matematizando elementos detectáveis e mensuráveis. Para eles, o laboratório era, não raramente, o meio utilizado para entender as Leis Divinas e “conferir” suas manifestações, numa mistura de religião e ciência, envoltas na racionalidade suposta do método experimental (OLIOSI, 2010, p. 93).

Havia também elementos sociais do período permeando tais estudos, como necessidades tecnológicas voltadas à produção de combustível. É da superposição de racionalidade, metafísica e necessidades sociais que o flogístico fica em evidência, tanto nos estudos de pneumática (às vezes pneumática química) quanto nos de constituição da matéria.

Adepto declarado do flogístico, o teólogo e educador inglês Joseph Priestley (1733-1804) envolveu-se com o estudo dos ares (gases) por volta de 1767, e construiu um equipamento que permitia adicionar diferentes ares tanto na água quanto em mercúrio para estudar seus comportamentos. Os trabalhos de Priestley foram marcadamente experimentais. Para ele

O objetivo da filosofia experimental é o conhecimento sobre a natureza em geral, ou mais estritamente, das propriedades das substâncias naturais e das mudanças das propriedades em diferentes circunstâncias. Este conhecimento somente pode ser atingido pelo experimento e observação, da mesma forma que a argila é capaz de se tornar dura através do fogo, sendo assim feitos os tijolos (Priestley, 1772 apud Oliosí, 2010, p. 63).

Este pensamento representa a união de duas características pessoais de Priestley que acabaram definindo toda sua metodologia de trabalho. Uma delas é quanto à enorme relevância que ele dá aos experimentos, às observações que levam aos fatos, pois os fatos permitiriam encontrar resposta para o funcionamento do sistema da natureza, regido por leis que afetam todos e tudo aquilo que o integra.

Como nós próprios somos parte do grande sistema da natureza; tanto que as leis em que a natureza está compreendida, e continuamente nos afetam, e

¹² Vale destacar que diversos filósofos naturais permaneceram envolvidos em questões metafísicas, como Priestley, por exemplo.

tudo o que fazemos é reduzido em situações, em que as leis da natureza determinam o resultado; [...], o maior conhecimento que temos das leis da natureza, o grande poder que devemos ter sobre ela, e a nossa situação mais cômoda que devemos ser capazes de construir no mundo, enquanto ela permanece constituída como está. E que estamos atualmente no início a respeito do nosso conhecimento da natureza, [...] (PRIESTLEY 1779, apud Oliosi, 2004, p. 46).

A segunda característica é a associação entre o sistema da natureza e seu conhecimento teológico. Em que a teologia e os fatos do sistema da natureza possuem relação? Estão principalmente na descrição que Priestley faz do homem: um ser que possui faculdades para interagir nesse sistema, como falar, sentir, cheirar, etc. Faculdades estas que o auxiliam na observação dos fatos e depois na explicação da natureza, conduzindo-os ao Cristianismo como religião baseada nos fatos e evidências. Ele acreditava que as verdades religiosas e as leis morais poderiam ser provadas pelos mesmos métodos da ciência (Martins, 2009, p. 191).

[...] pessoas que pretendem caracterizar-se de filósofos, seriam assim por tudo, e carregar o mesmo espírito no estudo da história, e da natureza humana, que fazem em seus laboratórios; primeiro assegurando-lhes, a respeito dos fatos, e então explicando aqueles fatos por reduzi-los a princípios gerais (o qual, da uniformidade da natureza, deve ser universalmente verdade) e então eu não devo ter dúvida de que eles se tornaram crentes tão firmes no cristianismo como eu mesmo (PRIESTLEY, 1772 apud Oliosi, 2004, p. 48).

O reconhecimento da importância de seus experimentos e a precisão de detalhes que fornecia, tornou-o conhecido em toda a Europa e nas Sociedades científicas de Paris, Boston, São Petersburgo etc. Priestley também desenvolveu vários instrumentos novos para seus experimentos, no que contava com o fornecimento de materiais pela Sociedade Lunar¹³, da qual faziam parte oleiros, como Josiah Wedgwood (1730-1795).

Seus principais questionamentos quanto aos ares eram em relação à combustão, aparência, odor e capacidade de manutenção de um ser vivo, e, estavam mais voltados para os aspectos físicos (pneumáticos) do que propriamente quanto à

¹³ Segundo Hobsbawm (2010, p. 46-48), a Sociedade Lunar teve um papel importante no período, principalmente por ter como membros os responsáveis pelos avanços econômicos, pessoas que vinham do povo e não da realeza.

sua composição (SCHOFIELD, 2008). Os trabalhos de Priestley envolvendo o estudo dos ares foram publicados entre 1772 e 1790 e detalham seu comportamento obtido a partir de estudos com diferentes substâncias. A partir da combustão e conhecimentos sobre pneumática, dois “ares” já haviam sido anteriormente identificados como distintos: o “ar inflamável”, responsável pela queima; e o “ar fixo”, que podia causar a morte de seres vivos que o respiravam¹⁴. No entendimento de Priestley:

Ar fixo é aquele que é expelido por calor da cal, e outras substâncias calcárias, que quando desprovidas dele, tornam-se cal-viva. Também está contido nos sais alcalinos, e é gerado em grandes quantidades a partir de vegetais fermentados; e sendo unido à água, dá as principais propriedades da água Pyramont¹⁵. Este tipo de ar é também bem conhecido como sendo fatal aos animais; e Dr. Macbride demonstrou que ele controla ou previne a putrefação (PRIESTLEY, 1772, p. 148).

Quanto ao ar inflamável, Priestley fornece exemplos em que se pode identificar algumas de suas ideias, sem, no entanto, fornecer uma definição exata.

Não há, acredito, qualquer substância vegetal, mineral ou animal, que seja inflamável, e que produziria grande quantidade de ar inflamável, quando tratada desta maneira [queimada lentamente], e submetida a um forte calor; entretanto, para se obter mais ar [inflamável], o calor deve ser aplicado tão rapidamente e violentamente quanto possível (PRIESTLEY, 1772, p. 171).

As definições dadas por Priestley para os dois tipos de ares mostram uma tendência: a de considerar cada “ar” como elemento simples, sem possibilidade de decomposição, que poderia ter diferentes propriedades dependentes da sua *origem*, e não *constituição*. Nesse caso, o flogístico corresponderia a um *princípio combustível* presente ou não em algum tipo de ar.

¹⁴ Outros filósofos naturais já haviam estudado os ares. Por exemplo, Joseph Black contribuiu para a identificação do “ar fixo”, que hoje denominamos dióxido de carbono. O “ar inflamável” (hidrogênio) foi assim denominado por Cavendish, mas já havia sido observado e estudado por Robert Boyle. Este conhecimento não foi obra de apenas um filósofo natural, mas uma construção coletiva.

¹⁵ Tipo de água com gás.

Há, eu acredito, poucas máximas em filosofia que mantenho firmes em minha mente, entre as quais aquela que afirma que o ar atmosférico (livre de matérias estranhas, que sempre são supostas como dissolvíveis misturadas nele) é uma substância elementar simples, indestrutível, e inalterável, no mínimo, tanto quanto supõem-se que a água seja (PRIESTLEY, 1790, p. 104).

Porém, um novo fato fez com que Priestley mudasse de opinião. Durante seus estudos posteriores, ele observou que a chama de uma vela aumentava de intensidade quando o ambiente (câmara pneumática) estava preenchido pelo “ar” obtido na queima de uma cal de mercúrio com uma lente¹⁶. Priestley supôs que o tal “ar” não possuía princípio combustível, pois correspondia a um “ar” diferente do comum e que podia suportar a queima por mais tempo do que o ar comum, que já se encontrava saturado de flogístico. Tal “ar” nem parecia ter as mesmas propriedades que o “ar fixo” ou o “ar inflamável”. A tal “ar”, ele deu o nome de “ar deflogisticado” (PRIESTLEY, 1790, p. 102-119)¹⁷.

Em 1781, o filósofo natural britânico Henri Cavendish (1731-1810), ao realizar experimentos com os ares provocando a explosão do ar inflamável misturado ao ar comum, observou a formação de gotículas de água sobre a superfície do equipamento, o que hoje chamamos de síntese da água. Mas, tinha incertezas quanto ao resultado dos experimentos, pois não conseguia explicar a diminuição no peso do ar.

Quando se faz explodir uma mistura de ar inflamável e ar comum nas proporções adequadas, quase todo o ar inflamável e quase um quinto do ar comum, perdem sua elasticidade e se condensam na forma de orvalho. E por este experimento parece que este orvalho é água e, conseqüentemente que quase todo ar inflamável aproximadamente um quinto do ar comum são convertidos em água (CAVENDISH, 1781 apud TOSI, 1989, p. 43).

A constatação da água como uma substância composta, e não mais uma substância elementar, levava a questionamentos também sobre a composição dos “ares”: seria o “ar inflamável” um elemento ou um ar composto de outros elemen-

¹⁶ Utilizando uma lente para queimar, Priestley garantiria que o combustível seria apenas o flogístico presente no metal.

¹⁷ Esta referência corresponde à coletânea dos trabalhos publicados por Priestley no período de 1772 a 1790. Veja também sobre os trabalhos de Priestley envolvendo flogístico e seus experimentos com ares em Martins (2009) e Oliosi (2004).

tos, como por exemplo, flogístico e ar deflogisticado? Enquanto Priestley tentava seus experimentos baseado nas propriedades físicas, outros seguiam por caminhos diferentes, como calorimetria e, posteriormente, decomposição.

Reflexo do modo como se fazia a ciência no século XVIII, as experiências de Priestley, Cavendish e de outros filósofos naturais envolvidos com o estudo dos gases eram repetidas inúmeras vezes, tanto na Inglaterra quanto em outros países da Europa, na busca por encontrar resultados semelhantes ou diferenças. As ideias sobre calor estavam fortemente associadas para muitos desses filósofos ao inobservável flogístico. Os instrumentos eram aprimorados e novos olhares sobre os mesmos experimentos poderiam trazer outros resultados. Além das demandas tecnológicas postas pela sociedade, permeavam tais experimentos a visão religiosa de muitos deles, em geral conflitante com aqueles que desejavam banir qualquer metafísica da ciência. Os entes inobserváveis eram tanto problemáticos para o racionalismo empirista, quanto desempenhavam importante papel explicativo nas teorias da época. Além disso, um filósofo natural estudava a natureza sob uma ampla perspectiva, associando estudos que agora poderiam ser divididos entre física, química, biologia, etc., que ainda podiam ser relacionados às concepções religiosas. Esta abrangência é muito clara nos estudos de Priestley e outros filósofos naturais do mesmo período.

IV.1 Estudos de calorimetria

No final do século XVIII vários filósofos naturais já haviam se envolvido com as medições de temperatura e desenvolvido diversos termômetros diferentes¹⁸. Com o aumento da precisão dos termômetros e a adoção de escalas padrão, os estudos de variação de temperatura de substâncias puras e de misturas, em diferentes estados de aquecimento e resfriamento, acabaram trazendo valiosas contribuições para tentar entender a natureza do calor e explicar os fenômenos. É o caso dos estudos realizados por Joseph Black (1728-1799) sobre calor específico e calor latente (MAGIE, 1935; CASTIGNANI, 1999). Na leitura de suas obras (*Lectures on the elements of chemistry*) sobre a medida do calor específico e latente, fica evidente a ideia do calor como uma *quantidade* de algo.

Eu comentei formalmente que, mesmo sem a ajuda de um termômetro, podemos perceber a tendência do calor se difundir de um corpo mais quente

¹⁸ Veja em Barnet (1956), sobre o desenvolvimento da termometria, especialmente focalizando aspectos conceituais. Para uma abordagem contextual, veja Beretta *et al.*, 2009.

para o próximo mais frio, até que ele seja distribuído entre eles, de tal maneira que nenhum deles tome mais calor do que os demais. O calor é, então, levado a um estado de equilíbrio (BLACK, 1803 in MAGIE, 1935, p. 134).

Sobre a relação entre a quantidade de massa de um corpo e a quantidade de calor transferida, Black trata da proporcionalidade¹⁹. Em certos casos:

Já se supunha anteriormente que a quantidade de calor necessária para aumentar o calor de diferentes corpos pelo número de graus, era diretamente proporcional à quantidade de matéria em cada um deles; e portanto, quando os corpos eram de tamanhos iguais, as quantidades de calor eram proporcionais a sua densidade. Mas logo depois que comecei a pensar sobre esse assunto (1760), percebi que esta opinião era um erro, e que as quantidades de calor que diferentes tipos de matéria devem receber, para reduzi-las a um equilíbrio entre si, ou para aumentar sua temperatura por um número igual de graus, não está em proporção com a quantidade de matéria em cada um, mas em proporções muito diferentes disso, e para a qual nenhum princípio ou razão geral pôde ser atribuído (BLACK, 1803, in MAGIE, 1935, p. 135).

Após explicar os experimentos que realizou com misturas de água e mercúrio, em diferentes proporções e temperaturas, Black conclui sobre a *capacidade* para a *matéria do calor* e sobre sua distribuição:

O mercúrio, assim, tem menor capacidade para a matéria do calor (se me for permissível usar esta expressão) do que a água possui; é requerida uma menor quantidade deste [calor] para elevar sua temperatura do mesmo número de graus (BLACK, 1803, in MAGIE, 1935, p. 137, grifo no original).

Devemos, assim, concluir que diferentes corpos, apesar de possuírem o mesmo tamanho, ou inclusive, o mesmo peso, quando são reduzidos à mesma temperatura ou grau de calor, qualquer que seja, podem conter quantidades da matéria do calor muito diferentes; cujas diferentes quantidades são necessárias para trazê-los a este nível, ou equilíbrio, um com o outro (BLACK, 1803, in MAGIE, 1935, p. 139).

¹⁹ Observe que, nesta época, o termo “calor” era utilizado para expressar ideias que hoje diferenciamos como calor e temperatura, embora o termo temperatura também fosse utilizado.

A mesma ideia acerca da *matéria do calor* aparece quando Black trata do que hoje entendemos como calor sensível (aquele que se percebe pelas mudanças no termômetro) e o calor latente. Nesse caso, o calor seria o responsável pela fluidez da mudança de fase, tanto no gelo que derrete quanto na água se transformando em vapor (BLACK, 1803, in MAGIE, 1935, p. 140-141; CASTIGNANI, 1999, p. 18). Black não denomina, explicitamente, se tal *matéria do calor* corresponde ao flogístico, mas está claro que se trata de um fluido distinto, com capacidade de penetrar a matéria.

IV.2 Os novos “ares” e a decomposição da água

A hipótese do flogístico demorou a chegar à França. Em 1736, a Academia Real das Ciências de Paris anunciou um prêmio para aquele que apresentasse a melhor memória discutindo a “Natureza do fogo e sua propagação”. Os trabalhos enviados apresentavam tanto a visão do elemento primordial, assemelhando-se a de Aristóteles como também uma visão mais próxima do calor como um movimento entre a matéria sutil, em que os conceitos da mecânica de Newton eram aplicados (FILGUEIRAS, 1996; EULER, 1752). É neste contexto que vive Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794).

Guillaume-François Rouelle (1703-1770), um dos divulgadores da obra de Stahl na França, foi um dos professores de Lavoisier na universidade e provavelmente deve tê-lo apresentado à ideia de flogístico. Lavoisier possuía conhecimento do que vinha sendo desenvolvido na Inglaterra, principalmente pelas traduções feitas por sua esposa, Marie-Anne Pierrette Paulze (1758-1836), e em outros países. Era um aristocrata francês ocupando lugar de destaque tanto na Academia de Ciências de Paris, desde os 24 anos, quanto em cargos do governo, causas diretas de seu enforcamento em 1794 (BERETTA, 2008; TOSI, 1989)²⁰.

Black havia desenvolvido um calorímetro quando fazia seus estudos sobre as misturas. Lavoisier realizou aperfeiçoamentos neste instrumento e dedicou-se aos estudos de ares (gases) e decomposição de substâncias. Para estudar os ares desprendido e absorvido, Lavoisier se propôs a realizar uma série de experimentos envolvendo a calcinação e combustão com diferentes substâncias, conseguindo afirmar, com certeza, que o fósforo e o enxofre aumentavam de peso ao queimar. Ao realizar experiências com o mínio (Pb_3O_4 - Tetróxido triplúmbico) e carvão aquecidos, Lavoisier observou que quando estes materiais eram aquecidos separa-

²⁰ Em Beretta (2008) é possível encontrar vários outros assuntos relacionados à Lavoisier, como filmes, imagens, etc.

damente não desprendiam nenhum tipo de ar identificável, ou fluido elástico, como ele e alguns contemporâneos denominavam “a matéria do fogo e da luz”. Porém, quando misturados produziam um certo fluido no seu aquecimento. Esta observação levou-o a questionar a teoria do flogístico de Stahl, pois eliminava a característica do flogístico como fazendo parte da substância.

Esses fenômenos se explicam de maneira muito feliz com a teoria de Stahl, mas é preciso supor que existe a matéria do fogo, o flogisto, nos metais, no enxofre e em todos os corpos combustíveis. Mas se pode-se provar a existência do flogisto nessas substâncias para os partidários da teoria, eles caem num círculo vicioso: dizem que os corpos combustíveis contêm a matéria do fogo porque queimam e queimam porque contêm a matéria do fogo. Isso é explicar a combustão pela combustão. A existência da substância do fogo, do flogisto nos metais, enxofre, etc., é então atualmente nada mais que uma hipótese, uma suposição na qual, uma vez admitida, explica, é verdade, alguns dos fenômenos da calcinação e combustão; mas se eu for capaz de mostrar que esses fenômenos talvez sejam explicados de uma maneira natural oposta a essa hipótese, a qual é sem a suposição de que a matéria do fogo, ou flogisto, existe em materiais combustíveis, então o sistema de Stahl será abalado.

Indubitavelmente não será descabido perguntar primeiro qual o significado da matéria do fogo. Alinho-me com Franklin, Boerhaave, e alguns outros filósofos da antiguidade de que a matéria do fogo ou da luz é muito sutil, fluido muito elástico o qual envolve todas as partes do planeta que habitamos, o qual [o fluido do fogo] penetra os corpos compostos com maior ou menor facilidade, e que quando livre tende ao equilíbrio com todas as coisas (LAVOISIER, 1789, in LEICESTER & KLICKSTEIN, 1968, p. 170).

Lavoisier questionava a hipótese do flogístico quanto à reduzida massa dos resíduos dos metais após a calcinação. A explicação atribuída a uma capacidade de levitação ou peso negativo do flogístico não satisfazia algumas de suas demais propriedades. Uma substância que tende a levitar procura separar-se do corpo que a contem. Dessa forma, como essa substância poderia compor os corpos, associada a eles e imprimindo-lhe características? Além disso, uma substância que tende a levitar parece infringir o princípio gravitacional pelo qual um corpo atrai outro, pois busca apartar-se dos corpos. Assim sendo, como pode permanecer tal substância unida aos corpos? Ainda, se esta substância não obedece ao princípio de atração entre os corpos, então não pode ter afinidade por corpo algum. Portanto, nem os corpos ditos combustíveis poderiam conter e reter o flogístico.

Interessante notar que Lavoisier – de quem se costuma enfatizar apenas as bases experimentais e racionais na quantificação cuidadosa de todas as substâncias, aspecto que teria sido fundamental para a ruptura entre química e alquimia –, adota e cita explicitamente as ideias de Stahl e Boerhaave, amalgamadas pelo ideário alquímico, conforme discutimos anteriormente.

Lavoisier reproduziu várias experiências de Priestley, Cavendish e outros, até chegar às suas conclusões quanto aos fenômenos da calcinação e combustão. Realizando a combustão de metal dentro de um recipiente devidamente fechado, e considerando que a quantidade de matéria dentro dele deve se manter a mesma antes e depois do processo de calcinação, não haveria nem entrada e nem saída de flogístico do sistema considerado²¹. Lavoisier observou tal fato. Pesando o sistema recipiente + material (que sofre a combustão) + ar (que deveria conter flogístico), antes e depois da calcinação, ele não observou alteração de peso. No entanto, quando pesou apenas o metal antes e depois da calcinação ele verificou o aumento de peso desse metal. Num raciocínio direto, como o sistema estava isolado do ambiente, Lavoisier atribuiu o ganho de peso do metal à quantidade de ar que este absorveria durante a calcinação, diferente da combustão de materiais como a madeira, os resíduos e cinzas, que são mais leves que a madeira original. Procedendo analogamente ao raciocínio em relação à calcinação dos metais, a redução de peso era explicada a partir do ar liberado pela madeira durante sua combustão. Confinando-se a madeira e ar dentro de recipiente, o peso desse sistema medido antes e depois da combustão também não se alterava (LAVOISIER, 1789, in LEICESTER & KLICKSTEIN, 1968, p. 171).

As ideias em oposição ao flogístico estão discutidas em três Memórias apresentadas à Academia, no período entre 1777 e 1785. Nelas, Lavoisier indica os principais fatos que o colocariam em xeque, quando relacionado aos fenômenos de combustão e calcinação. O primeiro deles é que toda combustão libera fogo e luz e toda calcinação produz a *matéria do fogo*. O segundo é que tanto a combustão quanto a calcinação só se realizam na presença de “ar puro”. O terceiro está diretamente relacionado à mudança de massa após a combustão ou calcinação. Nesse caso, haveria aumento de peso no corpo queimado na combustão devido à destruição ou decomposição do “ar puro”. Já na calcinação, a composição com o ar puro formaria a cal metálica. Lavoisier critica o argumento para os que defendem o

²¹ Lavoisier adota o princípio da conservação das quantidades, que já era defendido por diversos filósofos da Antiguidade (MARTINS e MARTINS, 1993). É interessante notar o papel que a balança tinha nas experiências de Lavoisier, fundamental para obtenção da conservação das massas.

flogístico de Stahl, e afirma que se puder demonstrar uma hipótese oposta, a teoria de Stahl seria abalada em seus fundamentos (LAVOISIER, 1775, in LEICESTER & KLICKSTEIN, 1968, p. 170).

No entanto, se Lavoisier estava reproduzindo os experimentos de Priestley e outros que explicavam esses fenômenos utilizando o conceito de flogístico, como poderia oferecer outra explicação? Diferentemente de Priestley, Lavoisier não atentava apenas para os aspectos físicos dos ares, e considerava a possibilidade de pensar o ar como composto por outros elementos. Assim, as experiências levaram Lavoisier a concluir que a combustão era uma reação química que se dava não pela presença de uma substância na matéria submetida à queima, mas na “atmosfera” em que o fenômeno ocorria, ou seja, seria um elemento presente no ar, elemento que ele denominou *calórico*. Portanto, a matéria do fogo está no ar ambiente em que se realiza a combustão ou calcinação, e não na substância queimada, como era o caso do flogístico. Isso explicava o aumento do peso de alguns materiais, já que ocorre uma combinação com o ar puro.

O ar está composto da matéria do fogo como dissolvente combinado com uma substância que lhe serve de base. Todas as vezes que essa base está na presença de uma substância com a qual tem mais afinidade, ela abandona seu dissolvente e a matéria do fogo aparece como calor, chama e luz. O ar puro [...] é então o verdadeiro corpo combustível, e, possivelmente, o único da natureza. Então, para explicar os fenômenos da combustão não é necessário supor que exista uma quantidade imensa de fogo fixada em todos os corpos que chamamos combustíveis e, pelo contrário, é provável que exista pouca nos metais. Compreende-se também porque não pode haver combustão nem no vácuo..., enfim, não estamos obrigados a admitir, como o faz Stahl, que os corpos que aumentam de peso percam uma parte de sua substância (LAVOISIER apud TOSI, 1989, p. 42).

O ar puro que Lavoisier menciona se refere ao *principe oxygen*, ou oxigênio, “ar” que ele havia proposto como resultado de um dos seus experimentos em 1775. Este é um dos pontos de discordância com Priestley, que em 1774 havia discutido com Lavoisier, e outros, os resultados que havia encontrado no experimento da chama da vela. Como Priestley partia do princípio do ar como substância elementar, considerou ter encontrado um “ar deflogisticado”, a substância elementar “ar” sem o princípio do flogístico; enquanto Lavoisier entendeu haver um elemento presente no ar, ou seja, o ar não seria uma substância elementar, e sim uma mistura. Para Priestley, as interpretações dadas por Lavoisier pareciam especulações; enquanto que Lavoisier não se importava em atribuir a Priestley a primazia

pela experiência, mas a requeria nas consequências, já que a ideia de um novo elemento era muito mais satisfatória do que o ar deflogisticado (TOSI, 1989).

Entre 1783 e 1785 a decomposição da água foi objeto de controvérsias entre vários estudiosos da época, como Cavendish, Priestley, Watt e Lavoisier e trouxe novas perspectivas para a ideia do calórico. Assim, no caso da interpretação dos resultados obtidos na decomposição, Lavoisier foi o que apresentou mais argumentos em defesa da sua hipótese. Por não considerar a existência do flogístico, era mais coerente para Lavoisier pensar na água como composta de dois gases que seriam consumidos quando aquecidos (ar puro e ar inflamável), ocasionando a redução da massa do produto final, do que pensar numa água “deflogisticada”. A ideia de uma água deflogisticada tinha implícita a concepção da água como “elemento primordial”, substância elementar, eterna e imutável, em que o flogístico ocupava o papel de princípio combustível que havia sido retirado.

O sucesso de Lavoisier na explicação sobre a formação da água e experimentos posteriores (LAVOISIER, [1783], 1862, p. 334) e na explicação de vários fenômenos (principalmente combustão e calcinação) em que o aquecimento estava presente tornaram sua teoria do calórico reconhecida e, paulatinamente, os defensores do flogístico passaram a lhe dar crédito. Um dos principais estudiosos a abandonar o flogístico e adotar o calórico foi Black, que em 1791 escreveu uma carta a Lavoisier reconhecendo a superioridade do calórico na explicação dos fenômenos (TOSI, 1989).

Passsei trinta anos crendo na teoria do flogisto e ensinando-a [...] experimentei durante muito tempo um grande afastamento do novo sistema, que apresentava como um erro o que eu considerava uma doutrina sã; contudo, esse afastamento, que não provinha senão da força do costume, tem diminuído gradualmente, vencido pela clareza e a solidez do vosso método (BLACK apud TOSI, 1989, p. 47).

Porém, o calórico de Lavoisier ainda apresentava problemas, pois o oxigênio era a mistura do *princípio oxigênio* e do calórico, sendo este último o elemento do fogo e do calor. Dito desta forma, o calórico de Lavoisier também seria imponderável, assim como o flogístico. Porém, o restante da teoria de Lavoisier apresentava consistência suficiente para que este argumento fosse relevado. Apesar de não poder medir a massa do calórico, ele era mensurável nas transformações químicas, uma vez que já se considerava como pressuposto, desde a Antiguidade, a suposição da conservação da matéria nas transformações (FILGUEIRAS, 1995; MARTINS e MARTINS, 1993).

Priestley continuou adepto do flogístico até sua morte em 1804, mas chegou a conjecturar que o calórico de Lavoisier poderia ser mais plausível.

*Há poucos assuntos, talvez nenhum, que tenham ocasionado mais perplexidade aos químicos que o **flogisto**, ou, como é chamado algumas vezes, o **princípio da inflamabilidade**. Foi uma grande descoberta de Stahl que este princípio, o que quer que seja, é transferível de uma substância para outra, ainda que tenham propriedades diferentes como o enxofre, a madeira e todos os metais, mas é a mesma coisa em todas elas. Mas o que tem dado um ar de mistério a este assunto, tem sido que ele foi imaginado, seja como princípio, ou substância, que não poderia ser exibido exceto em combinação com outras substâncias, e não poderia assumir separadamente uma forma fluida ou sólida. Foi também dito por alguns, que o flogisto estava tão longe de adicionar peso aos corpos, que a adição dele aos corpos tornava-os mais leves do que antes, o que o levaria a ser chamado de **princípio da leveza**. Esta opinião teve grandes adeptos.*

Por último, tem sido a opinião de muitos químicos celebrados, Mr. Lavoisier entre eles, que toda a doutrina do flogisto foi fundada em um erro, e que todos os casos em que foi pensado que os corpos se dividirão com o princípio do flogisto, de fato eles não perderam nada, mas pelo contrário, adquiriram alguma coisa; e em muitos casos uma adição de algum tipo de ar; que um metal, por exemplo, não era a combinação de duas coisas viz, uma terra e flogisto, mas era provavelmente uma substância simples em seu estado metálico; e que a cal é produzida não pela perda de flogisto, ou qualquer outra coisa, mas pela aquisição do ar.

Os argumentos a favor desta opinião, especialmente aqueles obtidos a partir dos experimentos de Mr. Lavoisier feitos com mercúrio, são tão especiais, que eu próprio estava me inclinando a adotá-los. Meu amigo Mr. Kirwan, entretanto, sempre acreditou que o flogisto era a mesma coisa que o ar inflamável; e ele tinha provado suficientemente isto a partir de muitos experimentos e observações, tanto as minhas como as de outros. [...]. (PRIESTLEY, 1783, p. 399).

Pelas palavras de Priestley pode-se observar que se trata, como já conjecturado aqui, muito mais de um receio em aceitar a existência de substâncias compostas do que uma crença arraigada na *existência* do flogístico.

Diferentes teorias buscavam explicar a natureza do calor, tanto o entendendo como substância, ou relacionado ao movimento da matéria. À primeira visão eram adeptos, dentre outros, alguns dos filósofos naturais já discutidos, por

exemplo, Becher, Stahl, Priestley, Black e Lavoisier. Exemplos de pensadores alinhados com a segunda visão são Francis Bacon (1551-1626), Robert Boyle (1627-1691), Robert Hooke (1635-1703), Daniel Bernoulli (1700-1782), Benjamin Thompson ou Conde Rumford (1753-1814) e Humphry Davy (1778-1829). Nossa análise para essa perspectiva volta-se para aspectos da contribuição de Benjamin Thompson.

V. O dilema do século XVIII

Não é apenas entre flogístico e calórico que se encontram os dilemas quanto à natureza do calor no século XVIII. Havia ainda outras hipóteses defendidas por físicos e químicos, por exemplo, que associavam a natureza do calor à natureza da luz para explicar fenômenos como o calor radiante (BARNET, 1946a). Dentre as várias hipóteses que havia, destaca-se aquela que associava calor a movimento, como Lavoisier e Laplace relatam nas “Memórias sobre o calor” (*Memoire sur La Chaleur*, 1780). Nesta obra, os autores apresentam vários experimentos envolvendo calor e discutem duas das interpretações dadas na época, calor como movimento ou como substância, e qual a consequência para os fenômenos a serem estudados. Aqueles que defendiam o calor como movimento, em geral, adotavam uma visão corpuscular da matéria, sendo todos os corpos constituídos por partículas com interstícios vazios entre elas, o que as permitiam certo movimento vibratório. A luz seria também constituída de minúsculas partículas, que emanavam do Sol e de outros corpos luminosos, e assim explicavam fenômenos térmicos, além dos visuais.

Os físicos estão em desacordo sobre a natureza do calor. Alguns o consideram como um fluido expandido por toda a natureza, o qual se encontra em todos os corpos por haver penetrado mais ou menos neles, à razão de sua temperatura e de sua disposição particular em retê-lo; pode combinar-se com eles e, nesse caso, deixa de atuar sobre o termômetro e de se comunicar de um corpo a outro, em um estado de liberdade que permite manter o equilíbrio entre os corpos, e que forma o que chamamos de calor livre. Outros físicos pensam que o calor não é senão o resultado de um movimento insensível das moléculas da matéria. Sabemos que todos os corpos, mesmo os mais densos, estão cheios de um grande número de poros, de pequenos vazios. Esses espaços vazios deixam às suas partes insensíveis a liberdade de oscilar em todo sentido; é natural pensar, então, que essas partes estão em contínua agitação e que, se esta aumenta até um certo ponto, pode che-

gar a desuni-las e a decompor os corpos. É esse movimento interno o que, segundo os físicos que mencionamos, constitui o calor (LAVOISIER e LAPLACE, 1780, p. 285).

Como poderia esta segunda hipótese (calor como movimento interno das partes insensíveis da matéria) explicar os fenômenos conhecidos? Os autores explicam como esta hipótese pode fornecer uma resposta para o equilíbrio da temperatura de misturas, aquecimento pela exposição à radiação e outros, baseando-se no princípio de conservação da força viva, grandeza dada pela somatória das massas multiplicadas pelo quadrado das velocidades (representada por $\sum m_i v_i^2$).

*Para desenvolver esta hipótese, devemos observar que, dentro de todos os movimentos nos quais não há ponto de mudança brusca, existe uma lei geral que os geômetras designam sob o nome de **princípio de conservação das forças vivas**; esta lei consiste em que, num sistema de corpos que atuam uns sobre os outros de uma maneira qualquer, a força viva, quer dizer, a soma dos produtos de cada massa pelo quadrado de sua velocidade, é constante. Se os corpos são animados por forças aceleradoras, a força viva é igual àquela que estava na origem do movimento mais a soma das massas multiplicadas pelo quadrado das velocidades devidas à ação das forças aceleradoras. Dentro da hipótese que nós examinamos, o calor é a força viva que resulta dos movimentos insensíveis das moléculas de um corpo; ela é a soma dos produtos da massa de cada molécula pelo quadrado da velocidade (LAVOISIER; LAPLACE, 1780, p. 285).*

O estabelecimento da temperatura de equilíbrio em uma mistura de corpos, que estavam a temperaturas iniciais diferentes, ocorreria pela transferência da quantidade de movimento (consideradas como o produto “m.v” naquela época), mediante a conservação da força viva total do sistema. Note que, neste caso, os corpos estabeleciam um contato físico.

Se dois corpos, com temperaturas diferentes, são colocados em contato, as quantidades de movimento que eles comunicarão [entre si] reciprocamente serão então desiguais; a força viva do mais frio aumentará na mesma quantidade que a força viva do outro diminuirá, e este aumento terá lugar até que as quantidades de movimento comunicadas de uma parte a outra sejam iguais; neste estado a temperatura dos corpos atingirá a uniformidade (LAVOISIER; LAPLACE, 1780, p. 286).

Os autores explicam que, para alguns casos, a primeira hipótese (fluidos) é a melhor; enquanto em outros, e em número superior, a segunda hipótese (movimento) é a melhor, principalmente no caso do calor produzido pela fricção dos corpos. Os autores declaram, explicitamente, que não escolherão qualquer uma das hipóteses mostradas (nesta obra), mas que independentes disso, alguns princípios podem ser adotados como comuns para o caso do calor como movimento ou fluido. Um destes princípios é *a quantidade de calor livre é sempre a mesma na mistura simples de corpos*. Seja o calor um fluido ou o movimento da parte sutil da matéria, o calor livre será conservado na mistura de corpos em que não há modificação química, fluindo de um corpo para o outro (fluido) ou fazendo variar a força viva dos corpos (movimento) (LAVOISIER; LAPLACE, 1780, p. 287).

Outro princípio diz respeito ao calor sensível e calor latente: *todas as variações de calor, sejam reais, sejam aparentes, que ocorre num sistema de corpos levando a uma mudança de estado, se repete na ordem inversa, fazendo com que o sistema de corpos volte ao estado inicial*. Para o caso do calor como movimento, o calor latente corresponderia à variação da quantidade de movimento de toda a matéria sutil, até que houvesse a mudança de estado (LAVOISIER; LAPLACE, 1780, p. 288). Nesse caso, não haveria o aumento da temperatura porque a força viva necessária para iniciar esta mudança (calor sensível) já teria sido transferida, ocorrendo apenas a variação da quantidade de movimento. Para o calor como fluido, haveria a penetração do fluido por toda a matéria, afastando ou aproximando as moléculas, até que isso ocorresse por todo corpo, modificando seu estado (BROWN, 1951).

Sem optar por nenhuma das hipóteses, Lavoisier e Laplace (1780) determinam experimentalmente o calor específico de várias substâncias e apresentam experimentos envolvendo capacidade calorífica. Ou seja, para o caso de experimentos de calorimetria, não havia diferença se a natureza do calor seria movimento ou fluida, apesar dos autores não explicitarem, neste trabalho, como ocorreria no caso do calórico.

No entanto, em 1789, na obra *Traité élémentaire de chimie*, Lavoisier irá se declarar um adepto da hipótese fluida, adotando o calórico como responsável pelas mudanças físicas e químicas.

Quando aquecemos um corpo sólido até um certo grau e causamos assim a separação de suas partículas umas das outras, se permitirmos ao corpo esfriar, suas partículas novamente aproximam-se umas das outras na mesma proporção na qual foram separadas pela temperatura aumentada [...]

[...] Assim as partículas de todos os corpos podem ser consideradas como sujeitas à ação de dois poderes opostos, um repulsivo, o outro atrativo, entre os quais elas permanecem in equilíbrio.

Enquanto a força atrativa permanece mais forte, o corpo continua em um estado de solidez; mas se, pelo contrário, o calor removeu cada uma destas partículas para além da esfera de atração, elas perdem a adesão que possuíam antes umas às outras, e o corpo cessa de ser sólido.

[...] O mesmo pode ser afirmado sobre todos os corpos da natureza: eles são ou sólido ou líquidos, ou no estado de vapor elástico aeriforme, de acordo com a proporção que tem lugar entre a força atrativa inerente de suas partículas, e o poder repulsivo do calor agindo sobre estas; ou, o que resulta no mesmo, na proporção do grau de calor ao qual elas estão expostas. É difícil compreender estes fenômenos, sem admiti-los como os efeitos de uma substância real e material, ou um fluido muito sutil, o qual, insinuando-se entre as partículas dos corpos, separa-as uma das outras; e, mesmo assumindo a existência deste fluido como hipotética, podemos pelos resultados ver que explica os fenômenos da natureza de uma maneira muito satisfatória.

Esta substância, o que quer que seja, sendo a causa do calor, ou, em outras, a sensação que chamamos quentura causada pela acumulação desta substância, não pode, em estrita linguagem, ser distinguida pelo termo calor; porque o mesmo nome muito impropriamente expressaria tanto causa quanto efeito.

[...] nós distinguimos a causa do calor, ou aquele estranho fluido que o produz, através do termo calórico (LAVOISIER, 1789, p. 1-5).

Desta forma, o calórico, até então superior ao flogístico ao explicar as reações químicas que ocorriam na combustão e calcinação, também explicava alguns fenômenos físicos como a dilatação dos corpos quando sujeitos a uma fonte de calor, as mudanças de estado, o calor específico entre outros (BROWN, 1951)²². O calórico também foi a hipótese considerada por Sadi Carnot no estudo das máquinas térmicas e sua eficiência na obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance*, de 1824 (CASTIGNANI, 1999).

²² Brown (1951) apresenta em detalhes quais eram os argumentos para o calórico na explicação de vários fenômenos em estudo na época.

Porém, se o calórico parecia uma hipótese tão completa e permaneceu aceita por tanto tempo, quais eram os argumentos dos “físicos” citados por Lavoisier e Laplace para a hipótese do calor como movimento durante o século XVIII?

Um dos defensores da ideia de calor como movimento, que tentou apresentar argumentos convincentes para esta hipótese, foi Benjamin Thompson (1753-1814), também conhecido como Conde Rumford, título que recebeu em 1793, durante sua atuação na Alemanha. Thompson era britânico de carreira militar e seus estudos estiveram sempre ligados às questões práticas, como as armas de fogo, canhões e o desenvolvimento de novos aparelhos (BROWN, 2008).

As primeiras hipóteses de Thompson sobre o calor como movimento ocorreram por volta de 1778, enquanto ele estudava a pólvora e as armas de fogo (WATANABE, 1959). Thompson observou que a temperatura das balas, logo após deixarem as armas, era muito alta, e parece ter suposto que seria mais alta do que a temperatura causada apenas pela explosão.

[...] balas provenientes de mosquetes são sempre encontradas mais quentes [proporcionalmente], em relação à dureza do corpo contra o qual são atiradas. Se uma bala de mosquete for atirada em direção a um corpo macio, como (por exemplo) em direção à água, ela não será sensivelmente aquecida; mas se for atirada contra uma grossa placa de ferro, ou qualquer outro corpo que ela não pode penetrar, a bala será destruída pela explosão, e os pedaços dela que são dispersos com isso serão encontrados em um estado muito próximo da fusão, como tenho frequentemente encontrado pela experiência. Não é pela chama [da pólvora aquecida] que as balas são aquecidas, mas pelo trajeto [percorrido pela bala dentro do cano da arma] (THOMPSON, 1778 apud WATANABE, 1959).

Com isso, Thompson concluiu que o atrito da bala no cano de disparo contribuía para a geração do calor que a levava a ter uma temperatura maior do que poderia ter sido causada apenas pela explosão. Para fortalecer sua conclusão, Thompson forneceu outros exemplos em que o atrito levava à produção de calor, como no caso de colisões; e que eram proporcionais à dureza, à vibração e também à violência com que era feito o movimento de fricção (WATANABE, 1959).

Thompson continuou com vários experimentos tentando mostrar incoerências na hipótese do calórico, como por exemplo, sua propagação através do vácuo, apresentado em 1785. Como o calórico se propagaria no corpo devido à grande atração entre ele e a matéria, no vácuo, onde não há matéria, não poderia haver a propagação dele. Os adeptos do calórico argumentaram que a propagação do fluido pelo vácuo era explicada pela propriedade de autorrepulsão do calórico,

uma vez que este fluido ocupa todo espaço, independente da existência de ar (BROWN, 1949 e 1951; WATANABE, 1962).

Os experimentos de Thompson continuaram e, em 1798, ele pensou ter encontrado uma “prova definitiva” de que o calor estava relacionado ao movimento, e não seria um fluido. O experimento, realizado enquanto ele se encontrava supervisionando uma fábrica de canhões, pretendia responder à questão da produção infinita de calor prevista na hipótese do calórico para o fenômeno observado.

Argumentei que se a existência do calórico era um fato, deve ser absolutamente impossível para um corpo, ou para muitos corpos individualmente que juntos formam apenas um, comunicar esta substância continuamente para vários outros corpos que os rodeiam, sem que esta substância seja gradualmente totalmente exaurida.

Uma esponja cheia com água, e apertada no meio por um fio no meio de uma sala cheia de ar seco, comunicará sua umidade ao ar, é verdade; mas breve a água se evaporará e a esponja não poderá mais fornecer umidade. Pelo contrário, um sino soa sem interrupções quando é tocado, e fornece seu som tão frequente quanto queremos, sem a menor percepção de perda. Umidade é substância; som não é.

É bem conhecido que dois corpos duros, quando atritados entre si, produzem muito calor. Eles podem continuar a produzi-lo sem finalmente se tornarem exauridos? Vamos deixar o resultado do experimento decidir esta questão (THOMSON, 1798, apud WATANABE, 1962).

Para decidir a questão, Thompson realizou cinco experimentos em que analisava a quantidade de calor gerada quando canhões eram perfurados²³. Nesta atividade, tanto o canhão perfurado, quanto o metal em torno dele e as faíscas produzidas, eram aquecidos pelo atrito.

Este cilindro foi projetado para a proposta específica de geração de calor por atrito ao ter uma broca cega forçada contra seu fundo sólido ao mesmo tempo em que ele era girado em torno de seu eixo pela força de cavalos. Para que o calor acumulado no cilindro pudesse ser medido de tempos em tempos, um pequeno buraco foi feito nele, com a finalidade de introduzir um pequeno termômetro mercurial cilíndrico [...] (THOMPSON, 1798, p. 83).

²³ Observe o papel que o experimento desempenhava no período, refletindo os ideais da racionalidade iluminista. Embora hipóteses fossem conjecturadas anteriormente, o experimento era entendido como uma análise neutra da natureza, a autoridade final para decidir entre visões de mundo distintas.

No primeiro experimento, Thompson colocou a parte onde estava ocorrendo a perfuração dentro de uma caixa retangular de madeira que foi preenchida por completo com água, à temperatura de 60 °F (aproximadamente, 15,6 °C). Assim, caso fosse gerado calor na ação da broca com o cilindro do canhão a água aqueceria.

O fato de a água ter esquentando também levou Thompson a concluir que o calor não tinha origem em algo contido na água, pois, se assim fosse, a água não poderia ao mesmo tempo fornecer calor ao canhão e à broca e esquentar a si mesma. Afinal, se algo na água fosse responsável pelo calor e esse algo fosse transferido para o canhão e para a broca, então a água estaria perdendo calor e deveria esfriar; o que não foi observado.

Durante a perfuração foram produzidos lascas de metal e pó metálico. Entretanto, Thompson observou que este resíduo não representava mais que um milésimo da massa inicial do canhão. Thompson colocou as lascas e o pó quentes em contato com gelo, verificando que o calor desse material residual do canhão, imediatamente após a perfuração, fora suficiente para derreter aproximadamente três quilogramas de gelo. Assim, concluiu que não era possível que tão pequena massa metálica pudesse conter uma quantidade tal de calórico para ser a responsável pela origem de tamanho calor.

Em um segundo momento, Thompson encerrou a parte que estava sendo perfurada em uma caixa cuidadosamente fechada para isolar o experimento do ar do ambiente. Os mesmos resultados foram verificados, o que impossibilitava a conjectura do calor vir de algo que estivesse contido no ar.

Em um terceiro experimento, Thompson chegou a resultados mais conclusivos de acordo com sua hipótese.

O resultado deste belo experimento [experimento nº 3] foi muito impressionante, e o prazer que me deu compensou amplamente todo o trabalho que eu tive em planejar e organizar o complicado maquinário necessário para fazê-lo.

O cilindro, girando a uma taxa de 32 vezes por minuto, estava ainda em movimento por pouco tempo quando percebi, colocando minha mão na água e tocando o lado externo do cilindro, que havia sido gerado calor. E não demorou muito para que a água que envolvia o cilindro ficasse sensivelmente quente (THOMPSON, 1798, p. 91).

Dando continuidade ao experimento em ação, Thompson verificou que:

[...] 1 hora e 30 minutos após a máquina ter sido posto em movimento, o calor da água na caixa foi de 142° [medição na escala Fahrenheit].

Ao fim de 2 horas, contando a partir do início da experiência, a temperatura encontrada para a água aumentou para 178° [medição na escala Fahrenheit].

Às 2 horas e 20 minutos, foi de 200° [medição na escala Fahrenheit] e após 2 horas e 30 minutos ela [a água] DE FATO FERVEU! (Thompson, 1798, p. 92).

Apesar de esperar tal resultado, Thompson não escondeu sua surpresa em relação à quantidade de calor gerada nesse processo. Tentando compreender as informações, baseado em seus estudos anteriores e em trabalhos de outros pesquisadores, escreve sobre suas impressões.

[...] O que é Calor? – Existe algo como um fluido ígneo? – Existe algo que possa, com propriedade, ser chamado calórico? (THOMPSON, 1798, p. 98).

Analisando os cinco experimentos, Thompson conclui:

Vimos que uma quantidade considerável de calor pode ser provocada na fricção de duas superfícies metálicas, e fora dado em uma corrente constante ou fluxo, em todas as direções, sem interrupção ou intervalo, e sem quaisquer sinais de diminuição ou exaustão.

De onde veio o calor que estava continuamente fornecido dessa maneira, nas experiências anteriores? É devido às pequenas partículas de metal, desligadas das massas sólidas maiores, ao serem friccionadas juntas? Isso, como já vimos, não poderia ter sido o caso.

Foi fornecido pelo ar? Isto não teria sido o caso, pois, em três dos experimentos, a máquina ao ser imersa em água, o acesso do ar da atmosfera foi completamente impedido.

Foi fornecido pela água que permeava a máquina? Que este não pode ter sido o caso é evidente: em primeiro lugar, porque esta água foi continuamente recebendo calor do equipamento, e não podia, ao mesmo tempo, fornecer e receber calor a partir do mesmo corpo, e em segundo lugar, porque não houve decomposição química de qualquer parte desta água. Tivesse ocorrido qualquer decomposição, (que na verdade não poderia ter sido razoavelmente esperada) um dos seus componentes fluidos elásticos (provavelmente ar inflamável) deveria, ao mesmo tempo, ter sido liberado, e ao fazer a sua fuga para a atmosfera, teria sido detectado, mas embora eu frequen-

temente examinasse a água para ver se as bolhas de ar levantavam-se através dela, e tivesse até feito os preparativos para capturá-las, a fim de examiná-las, se fosse o caso de aparecerem, eu não pude perceber nenhuma, nem havia qualquer sinal de decomposição de nenhuma espécie, ou outro processo químico, acontecendo na água.

É possível que o calor possa ter sido fornecido pela barra de ferro até o fim do qual a broca cortante de aço foi fixada? ou pelo gargalo pequeno da arma de metal pela qual o cilindro oco foi unido ao canhão? Estas suposições parecem mais improváveis ainda que qualquer das acima citadas para o calor fluir continuamente, ou para fora das máquinas, por estas duas passagens, durante o tempo todo que a experiência durou.

Refletindo sobre isso, não devemos esquecer de considerar aquele relevante fato, que o calor gerado por atrito, nestes experimentos, pareceu evidentemente ser inesgotável.

Não é necessário adicionar que qualquer coisa que um corpo isolado, ou sistema de corpos, pode fornecer continuamente sem limitação, não pode de maneira alguma ser uma substância material: e parece-me ser extremamente difícil, senão impossível, formar qualquer conjectura diferente de qualquer coisa que seja capaz de ser excitada e comunicada, da maneira pela qual o calor foi excitado e comunicado nestes experimentos, a não ser que ela seja MOVIMENTO (THOMPSON, 1798, p. 98-99).

Mas, o experimento de Thompson não foi considerado conclusivo contra o calórico. Ele recebeu críticas dos defensores desta hipótese, que argumentavam em relação à modificação do volume, tanto do cilindro em perfuração quanto das lascas. Como a presença do calórico estava relacionada com a distância entre as partículas, a alteração de volume tinha implicações diretas para a quantidade de calórico (WATANABE, 1962, p. 25). Porém, Thompson buscou novas formas de refutá-la, utilizando como argumento o “peso do calor” e baseando-se nos experimentos de evaporação e sublimação. Um dos argumentos dos defensores do calórico, na explicação de alguns fenômenos, era que havia uma forte atração entre o calórico e a matéria (BROWN, 1951). Para tentar medir essa força de atração, Thompson considerou que um corpo no estado de “calor sensível” deveria ter um peso diferente daquele no estado de “calor latente”.

Tendo providenciado três garrafas A, B, e C, tão semelhantes quanto possível.... na primeira, A, coloquei 4214.28 gramas de água...., na segunda garrafa, B, pus o mesmo peso de álcool...; e na garrafa C, pus igual peso de mercúrio.

Estas garrafas foram hermeticamente fechadas e colocadas numa sala grande.... onde o ar parecia estar completamente quieto, e, permanecendo nesta situação por mais que 24 horas, o calor na sala (61°) se manteve constante por quase todo o tempo, com poucas variações...Elas foram todas pesadas, e deixadas em equilíbrio entre si [com o mesmo peso] atando-se no gargalo das mais leves, pequenos fios de prata.

Feito isso, as garrafas foram removidas para uma sala em que o ar estava a 30°, onde permaneceram perfeitamente em repouso e sem perturbação, por 48 horas....No final das 48 horas....encontrei...que as garrafas A e B permaneciam no mais perfeito equilíbrio.

Removi a garrafa B da balança, e pus a garrafa C no lugar, e verifiquei que ela também se encontrava com o mesmo peso aparente do início do experimento, estando em perfeito equilíbrio com a garrafa A como no início.

Então removi o aparato todo para uma sala aquecida, fazendo o gelo em A derreter, e mantendo as três garrafas lá até que seus conteúdos tivessem adquirido a exata temperatura do ar,....comparando-as entre si e encontrei que seus pesos permaneceram inalterados.

É certo que a quantidade de calor perdido pela água deve ter sido consideravelmente maior que aquele perdido pelo mercúrio, as quantidades específicas de calor na água e no mercúrio sendo determinadas entre si como 1000 para 33; mas esta diferença na quantidade de calor produzida não causou diferença sensível nos pesos dos fluidos em questão (THOMPSON [1799], 1873, p. 1-9)

Thompson repetiu o mesmo experimento várias vezes, alterou os conteúdos das garrafas, conferiu problemas na balança, etc., chegando à conclusão que “toda tentativa de descobrir qualquer efeito do calor sobre os pesos aparentes dos corpos será infrutífera” (THOMPSON [1799], 1873, p. 16).

Outros experimentos foram realizados por ele, por exemplo, analisando o fenômeno da sublimação, na tentativa de refutar “definitivamente” os argumentos que defendiam a hipótese fluida do calor. Entretanto, ao longo do século XVIII, tanto a hipótese do calórico, quanto a do movimento, explicavam vários aspectos dos fenômenos envolvendo o calor. Do mesmo modo, havia bons argumentos que as refutavam. Diferente do que costuma ser apresentado, não foi um experimento com canhões que permitiu ao Conde Rumford derrubar a crença no calórico, pois o pequeno recorte aqui apresentado já nos permite perceber que a história é bem mais complexa.

VI. Afinal, o que é calor?

As tentativas de refutar o calórico continuaram no início do século XIX. Exemplos disso são os trabalhos de Humphry Davy (1778-1829), que realiza o experimento da fricção de dois cubos de gelo²⁴ em 1799 e depois considerou uma teoria que seria uma junção do “fluido” com “movimento”. Enquanto Davy retomava uma visão mais “química” do calor, Thomas Young (1773-1829) seguia pela analogia entre os fenômenos luminosos (ondas) e os fenômenos envolvendo o calor (WATANABE, 1962).

Nesse período, a técnica encontrava-se em destaque, e a ciência voltada para o progresso levava a uma busca por entender os processos das máquinas para melhorá-los. É nesse contexto que o trabalho de Sadi Carnot de 1824 está inserido, buscando entender as máquinas térmicas (CASTIGNANI, 1999). Apesar de serem baseadas na hipótese do calórico, as interpretações posteriores dos resultados de Carnot se aproximaram mais da hipótese de movimento (MACH, 1894).

Uma hipótese diferente surgiu com os trabalhos de Julius Robert Mayer (1814-1878) e James Prescott Joule (1818-1889) na primeira metade do século XIX, associando o calor a um tipo de *trabalho* realizado (MARTINS, 1984). Para Mayer, o trabalho estava diretamente ligado ao *esforço*, e a equivalência entre esse esforço e o calor produzido era considerada constante, tanto por aspectos físicos quanto filosóficos²⁵. Por outro lado, Joule buscava a relação entre o calor e a eletricidade, realizando vários experimentos. Controvérsia à parte sobre a primazia de Joule ou Mayer na fundamentação do princípio que hoje chamamos de conservação da energia, Joule encontrou o equivalente mecânico do calor partindo tanto de experimentos de eletricidade quanto de queda de pesos que movimentam pás imersas na água, obtendo seu reconhecimento com o experimento de 1850, em que a queda de dois pesos proporciona diferença de temperatura mensurável numa certa quantidade de água (HEERING, 1992).

Os estudos de Mayer, Joule e outros do mesmo período, como Colding e Helmholtz, estavam direcionados para a concepção de equivalência entre *forças*. A força do movimento produzia calor, assim como forças elétricas e magnéticas. A equivalência entre forças levou à formulação de um princípio geral por Helmholtz,

²⁴ Há controvérsias se o experimento dos blocos de gelo poderia mesmo ser realizado.

²⁵ Mayer era ligado à *Naturphilosophy*, uma corrente filosófica em que as ideias de conservação não poderiam ser violadas. Para um aprofundamento nos trabalhos de Mayer e Joule, veja Martins (1984).

que assumia que a soma das forças vivas (Helmholtz considerava a força viva como metade de $\Sigma m_i v_i^2$) e das forças de tensão era uma constante. Como a força viva estava associada a movimento, que produzia calor, Helmholtz concluiu que o calor também seria um tipo de movimento (COELHO, 2009 e 2012).

Outras áreas que estavam relacionadas com os estudos envolvendo calor também passaram por modificações, como, por exemplo, a parte de interação da radiação com a matéria; o estudo dos gases, os estudos de eletricidade, magnetismo e óptica, etc., que acabaram influenciando na maneira de observar os fenômenos, passando a destacar uma analogia mecânica. Parecia haver, em todas as áreas, a conservação de “algo” para o qual a analogia mecânica (movimento) apresentava bons resultados. Havia uma relação entre o aumento de temperatura causado pela eletricidade e aquele causado pela incidência de raios solares? Quais eram as modificações comuns aos dois tipos de fenômenos?

O termo energia foi introduzido no mesmo período em que se estabelecia a ideia de conservação de forças. Em 1851, Thomson introduziu o conceito de energia mecânica de um corpo. Assumindo que a energia de um corpo está associada à sua atividade, e analogamente, supondo que calor era concebido como movimento, paulatinamente passou-se a adotar calor como energia. A concepção de energia de Thomson tinha argumentos não físicos, mas nos anos posteriores foi alterando seu significado, assumindo características *existenciais*, como se ocupasse um certo *espaço* no corpo ou entre as partes do corpo. Assim como as concepções anteriores que assumiam “calor” como uma substância, a ideia de energia ocupando espaço também recebeu críticas (COELHO, 2009 e 2012).

Em uma reinterpretação muito próxima das “conservações” previstas pela filosofia, a conservação da energia e o *calor como energia em trânsito* pareciam responder às perguntas. Mas, qual a natureza da *energia*? A resposta a essa pergunta também é complexa e tem diferentes hipóteses.

A aplicação do princípio geral da conservação da energia leva à conclusão indubitável que a energia térmica gerada é o equivalente do trabalho mecânico usado na fricção, mas traz pouca ou quase nenhuma luz sobre os passos do processo, e não dá informação sobre a atual natureza da energia produzida na forma de calor (CALLENDAR, 1912).

Em concordância com Callendar, autor da frase anterior, é necessário recordar que nenhuma das hipóteses foi isenta de críticas bem fundamentadas. Assim, ainda que a hipótese da energia e do movimento (teoria cinética) ocupassem a cena no final do século XIX e início do século XX, não podem ser consideradas um resultado final. Uma mostra disso é considerarmos que *energia se transforma*

ou se conserva. De certa forma esta ideia de conservação tem implícita a concepção da existência da energia como *algo*, muito semelhante às afirmações que eram feitas sobre o calórico durante o século XVIII.

VII. Algumas considerações

Entre a Antiguidade e o século XVIII, várias interpretações foram dadas para a natureza do calor. A visão de mundo de cada época e cultura influenciava não apenas a forma como os fenômenos eram observados, em seus aspectos metodológicos, mas também guiavam a sua interpretação, influenciando as concepções sobre calor e causas da variação da temperatura.

É muito provável que várias outras concepções ou hipóteses sobre a natureza do calor tenham “convivido” ao mesmo tempo em que aquelas apresentadas aqui. Porém, os séculos XVIII e XIX são muitos ricos quanto ao desenvolvimento da termodinâmica e torna-se impossível abarcá-los por completo. Apresentamos breve síntese de alguns episódios históricos envolvendo o calor, buscando ressaltar a complexidade e coletividade da construção da ciência, bem como seu caráter sócio-histórico.

Agradecimento

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro para algumas etapas dessa pesquisa.

Referências

ALFONSO-GOLDFARB, A. M. **Da alquimia à química**. São Paulo: Landy, 2001.

_____. Uma suposta contradição na ciência inglesa do século XVII: divulgação x sigilo. **Discurso**, v. 31, p. 347-63, 2000.

ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; FERRAZ, M. H. R.; WAISSE, S. Chemical remedies in the 18th century: Mercury and alkahest. **Circumscribere**, v. 7, p. 19-30, 2009.

ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; FERRAZ, M. H. M. “Experiências” e “experimentos” alquímicos e a experimentação de Hermann Boerhaave. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R. (Orgs.). **O saber fazer e seus muitos**

saberes: experimentos, experiências e experimentações. São Paulo: Editora Livraria da Física; EDUC; Fapesp, 2006. 400p.

ALLCHIN, D. Pseudohistory and Pseudoscience. **Science & Education**, v. 13, n. 3, p. 179-195, 2004.

AMORIN DA COSTA, A. M. A procura e a descoberta da ordem e da desordem no universo. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R. (Orgs.). **O saber fazer e seus muitos saberes: experimentos, experiências e experimentações.** São Paulo: Editora Livraria da Física; EDUC; Fapesp, 2006. 400p. p. 253-283.

BARNETT, M. K. The development of the concept of heat I. **The Scientific Monthly**, New York, v. 62, n. 2, p. 165-172, 1946a.

_____. The development of the concept of heat II. **The Scientific Monthly**, New York, v. 62, n. 3, p. 245-257, 1946b.

_____. The development of thermometry and the temperature concept. **Osiris**, New York, v. 12, p. 269-341, 1956.

BELTRAN, M. H. R. Receitas, experimentos e segredos. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R. (Orgs.). **O saber fazer e seus muitos saberes: experimentos, experiências e experimentações.** São Paulo: Editora Livraria da Física; EDUC; Fapesp, 2006. p. 65-91.

BERETTA, M. **Lavoisier, Antoine-Laurent. Complete Dictionary of Scientific Biography.** Disponível em:
<<http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830905846.html>>. Acesso em: 07 mar. 2013.

BERETTA, M.; CLERICUZIO, A. PRINCIPE, L. M.(Eds.). **The Accademia del Cimento and its European Context.** Sagamore Beach: Science History Publications, 2009.

BROWN, S. Count Rumford and the caloric theory of heat. **Proceedings of the American Philosophical Society**, Philadelphia, v. 93, n. 4, p. 316-325, 1949.

_____. The caloric theory of heat. **American Journal of Physics**, College Park, v. 19, p. 367-373, 1951.

_____. **Thompson, Benjamin (Count Rumford). Complete Dictionary of Scientific Biography.** Disponível em: <<http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830904297.html>>. Acesso em: 09 mar. 2013.

BUSTOS, F. J. C.; SOTELO, S. J. R. Una revisión histórica del concepto de calor: algunas implicaciones para su aprendizaje. **Tecné, Episteme y Didaxis**, n. 23, p. 67-77, 2008.

CALENDAR, H. L. The nature of heat. **Science**, New York, v. 36, n. 924, p. 321-336, 1912.

CASTIGNANI, A. **Sadi Carnot e o desenvolvimento inicial da termodinâmica clássica.** 1999. 172 f. Dissertação (mestrado em História da Ciência) - PUC, São Paulo.

COELHO, R. L. On the concept of energy: how understanding its history can improve physics teaching. **Science & Education**, v. 18, p. 961-983, 2009.

COELHO, R. L. On the concept of energy: conservation and transformation versus equivalence. **Review of Science, Mathematics and ICT Education**, v. 6, n. 1, p. 7-19, 2012.

COHEN, M. R.; DRABKIN, I. E. **A source book in Greek science.** Cambridge: Harvard University Press, 1958.

DOBBS, B. J. T. **The Foundations of Newton's Alchemy or "The Hunting of the Greene Lyon"**. 2. ed. Cambridge; London: Cambridge University Press, 1975. Reprinted: 1984.

EULER, L. Dissertatio de igne, in qua ejus natura et proprietates explicantur. **Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie royale des sciences**, Paris, v. 4, p. 3-19, 1752.

FILGUEIRAS, C. A. L. A revolução química de Lavoisier: uma verdadeira revolução? **Química Nova**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 219-224, 1995.

_____. Voltaire e a natureza do fogo: uma controvérsia do século XVIII. **Química Nova**, São Paulo, v. 19, n. 5, 1996.

FORATO, T. C. M. **A Natureza da Ciência como Saber Escolar: um estudo de caso a partir da história da luz**. 2009. 442 f. Tese (Doutorado em Educação) – USP, São Paulo.

FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e Natureza da Ciência na Sala de Aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.

_____. Os “poderes ocultos” da matéria e a gravitação universal. **Scientific American Brasil. História: Os grandes erros da ciência**, São Paulo. v. 6, p. 38-43, 2006.

GIL-PÉREZ, D. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

HEERING, P. On J. P. Joule’s determination of the history of the mechanical equivalent of heat. **Proceedings of the Second International Conference on the History and Philosophy of Science and Science Teaching**. Kingston, v. 1, p. 495-505, 1992.

HOBBSAWM, E. J. **A Era das Revoluções**. Tradução: Maria Tereza Teixeira e Marcos Penchel. 25. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2010.

HOLTON, G. **Introduction to concepts and theories in Physical Science**. Cambridge: Addison-Wesley, 1952.

KRAGH, H. **An introduction to the historiography of science**. Cambridge: Cambridge U.P., 1987.

LAVOISIER, A. L. **Traité élémentaire de chimie**. Paris: Académie des Sciences e de la Société Royale de Médecine, 1789.

_____. **Oeuvres**. Tomo II. Paris: Imprimerie Impériale, 1862.

LAVOISIER, A. L.; LAPLACE, P. S. Memoire sur la chaleur. **Memoires de l’Academié des sciences**, Paris, p. 283-333, 1780.

LEICESTER, H. M.; KLICKSTEIN, H. S. **A source book in chemistry 1400-1900**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Book, 1952.

MACH, E. On the principle of the conservation of energy. **The Monist**, Chicago, v. 5, n. 1, p. 22-54, 1894.

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

MARTINS, A. F. P. História e Filosofia da Ciência no Ensino: Há Muitas Pedras Nesse Caminho. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 112-131, 2007.

MARTINS, R. A. Os estudos de Joseph Priestley sobre os diversos tipos de “ares” e os seres vivos. **Filosofia e História da Biologia**, São Paulo, v. 4, p. 167-208, 2009.

_____. **O Universo: teorias sobre sua origem e evolução**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

_____. Mayer e a conservação da energia, **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, v. 6, p. 63-95, 1984.

_____. Como não escrever sobre história da física: um manifesto historiográfico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 113-129, 2001.

_____. A História das Ciências e seus Usos na Educação. In: SILVA, C. C. **Estudos de História e Filosofia das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006, introdução, p. xvii – xxx.

MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. P. Lavoisier e a conservação da massa. **Química Nova**. São Paulo, v. 16, n. 3, p. 245-256, 1993.

_____. Ciência versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BEL-TRAN, M. H. R. **Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. p. 115-145

OLIOSI, E. C. **Joseph Priestley (1733-1804): uma seleção dos experimentos que revelam a presença do flogístico**. 2004. 85 f. Dissertação (mestrado em História da Ciência) - PUC, São Paulo.

_____. **Os estudos de Joseph Priestley (1733-1804) sobre a teoria da eletricidade**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em História da Ciência) - PUC, São Paulo.

PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. Do termoscópio ao termômetro digital: quatro séculos de termometria. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 6, p. 1393-1400, 2006.

PORTO, P. A. “Summus atque felicissimus salium”: the medical relevance of the liquor alkahest. **Bulletin of the history of Medicine**, Baltimore, v. 76, n. 1, p. 1-29, 2002.

PRIESTLEY, J. **Experiments and observations on different kinds of air, and other branches of Natural Philosophy, connected with the subject**. Birmingham: Thomas Pearson, 1790. v. 2.

_____. Experiments relating to phlogiston, and the seeming conversion of water into air. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Londres, v. 73, p. 398-434, 1783.

_____. Experiments and observations on different kinds of air, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Londres, v. 72, 1772.

READ, J. **From alchemy to chemistry**. New York: Dover [1961], 1995.

SCHOFIELD, R. E. **Priestley, Joseph. Complete Dictionary of Scientific Biography** Disponível em:
<<http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830903515.html>>. Acesso em: 06 mar. 2013.

THOMPSON, B. An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Londres, v. 88, p. 80-102, 1798.

_____. **The complete works of Count Rumford**. Boston: American Academy of Arts and Sciences, 1873.

TOSI, L. Lavoisier: uma revolução na química. **Química Nova**, São Paulo, v. 12, n.1, p. 33-56, 1989.

WATANABE, M. Count Rumford’s first exposition of the dynamic aspect of heat. **Isis**, Chicago, v. 50, n. 2, p. 141-144, 1959.

_____.The development of the dynamic theory of heat in early nineteenth century England. **Annals Of The Japan Association For Philosophy of Science**. Tóquio, v. 2, n. 2, p. 70-89, 1962.

WISNIAK, J. Phlogiston: the rise and fall of a theory. **Indian Journal of Chemical Technology**, New Delhi, v. 11, n. 5, p. 732-743, set. 2004.

ZEMANSKY, M. W. The use and misuse of the word “heat” in physics teaching. **The physics Teacher**, College Park, v. 8, p. 295-300, 1970.