

CONCEITOS UNIFICADORES E A BUSCA DOS UNIVERSAIS: A TEMÁTICA DAS COMBUSTÕES

Milton A. Auth

Doutorando do PPGE - CCE/UFSC
Campus Trindade, Florianópolis, SC, 88040-900
e-mail:milton@ced.ufsc.br

José André P. Angotti

Departamento de Metodologia de Ensino e PPGE - CCE/UFSC
Florianópolis, SC - Fone: 048 331 9263, e.mail: ced1opm@ced.ufsc.br

Resumo

Exploramos diversas conceituações/debates sobre conservações ocorridos historicamente, desde o pensamento grego aos nossos dias. A idéia básica é que estas possam servir como critério epistemológico para questionar o ainda vigente sistema educacional com fortes traços característicos do "ensino tradicional", e apontar novas perspectivas didático-pedagógicas. Concepções como a de *flogisto*, *calórico*, *vis viva* e princípios de conservação como a da *massa*, da *energia* e *massa-energia* foram exploradas a partir do *exemplo* das *combustões*, desenvolvido com professores em formação inicial e em serviço, e estruturado sob a idéia de *temáticas* e *conceitos unificadores*, com o apoio em contribuições da *história da ciência* e das *concepções alternativas*. O desenvolvimento do trabalho com professores nos permite afirmar que a dinâmica de trabalho adotada, com estes critérios, aponta para avanços no ensino/aprendizagem em suas práticas pedagógicas.

Introdução

Se hoje podemos nos beneficiar de conceitos, estruturas e leis "universais", é porque historicamente o homem esteve preocupado com questões que os guiou em direção aqueles, obtidos a partir de grandes desafios, com avanços e alguns recuos, alcances e limites.

Para o alcance dos "universais" vinculados aos princípios de conservação da Física por exemplo, é consenso na filosofia da ciência que, desde a antigüidade, particularmente junto às grandes tendências do pensamento grego, a idéia explícita de que "algo" importante se mantém inalterado nos processos físicos, sejam de grande, médio ou pequeno porte, longos, rápidos ou remotos. Farrington lembra Demócrito, para quem "nada é criado do nada; todas as coisas necessariamente que foram, são e serão, foram predeterminadas"; uma das origens das doutrinas da conservação da matéria e do império das leis universais.¹ Para Weinberg: "uma das esperanças duradouras do homem tem sido a de encontrar leis gerais simples; teoria unificada; ...".² Bohm também se alinha com esta corrente de raiz distante na história: "Na verdade, o homem sempre esteve procurando totalidades, no plano mental, físico, social e individual."³

A busca e conquista do conhecimento parametrizado por conservações, unificações, totalizações ... é transferida *mutatis mutandi*, ao ensino/aprendizagem de Física/Ciências. Por exemplo, categorias unificadoras de natureza dual com grande aceitabilidade, neste século, no

¹. Terrazzan, 1985 p.88

². Angotti, 1991 p.69

³. Angotti, 1991 p.71

campo didático-pedagógico de Ciências Naturais (CN) como Transformações/Regularidades em geral e, em particular, o conceito de Energia, que incorpora tanto as mudanças entre suas formas, como a conservação destas nos sistemas, bem como a sua degradação, em favor do crescimento da Entropia.

Para a socialização dos conhecimentos científicos na educação escolar, é importante buscar e conquistar conexões entre os diversos conceitos relevantes, minimizando-se intencionalmente a excessiva fragmentação e o excessivo tratamento matemático pretensamente formal adotado no ensino médio.

Compreender as abordagens conceituais unificadoras deverá contribuir para uma prática pedagógica que pensamos ser pertinente ao ensino de Ciências Naturais na perspectiva cultural, da "ciência para não cientistas", ou melhor da "ciência para todos". Claro que, ao se ensinar bem um conjunto de conhecimentos, com aporte de conteúdos/métodos estimulantes e articulados não garante em si a aprendizagem desejável; as contribuições diversas vinculadas ao "construtivismo" são igualmente relevantes, embora não destacadas neste estudo.

De seu lado, a opção pela abordagem *temática* se constitui em alternativa que pode contribuir para rompermos com o fortalecimento da visão acumulativa dos conteúdos estratificados nos capítulos seriados dos livros didáticos e planos de ensino, dos pré-requisitos, de nossos cursos e aulas enfim. Neste sentido temos desenvolvido, desde o início desta década, com licenciandos de Física da UFSC e professores de Física/Ciências do estado de Santa Catarina e da Região de Ijuí no RS, tal alternativa. Para além do vínculo com os *conceitos unificadores*, as contribuições da *história da ciência* e das *concepções alternativas* estão presentes ao longo das atividades.

Evidências Experimentais

Uma balança elementar⁴ de dois pratos pode indicar boas evidências para se discutir o confronto entre duas `teorias de conservação', associadas a dois *conceitos unificadores* (Angotti, 1991) que muito contribuíram para sínteses teóricas do conhecimento em suas épocas : A) a do *flogístico*, nos séculos XVII e XVIII, que estabeleceu de forma pioneira o parentesco entre os conhecimentos dos iatroquímicos-médicos e alquimistas-químicos e, B) a da *massa*, de meados do século XVIII até o início do XX, ou mesmo até nossos dias.

A experiência, que pode ser realizada a título de demonstração, ou por grupos de alunos em qualquer sala de aula, consiste essencialmente em problematizar dois tipos distintos de combustão, a saber: 1) Material orgânico como papel, parafina...; 2) Metais, como o Ferro das esponjas de "palha de aço", tem seu procedimento descrito nos anexos.

Fogo: dos mitos aos modelos sobre combustões

Podemos dizer que o controle do fogo foi um dos marcos iniciais da evolução. Quando o homem aprendeu a fazer e a manter o fogo, aprendeu também a controlar uma transformação química radical: a combustão. Mas, apesar de já dominar esta prática há milênios e tentar compreender o que ocorria nessas transformações, conforme constam nos *pergaminhos chineses*, nos *papiros hindus* e nos escritos dos gregos, só o conseguiu mais recentemente.

⁴. Ver detalhes e figura em DELIZOICOV, D. e ANGOTTI, J.A.,1992 e/ou BELTRAN, N., 1991; e roteiro em AUTH, M., 1996.

As primeiras tentativas de explicar a natureza do fogo provém da Antigüidade. O grego Heráclito, por exemplo, considerava-o como *ar condensado*. Para Aristóteles, o fogo estava contido em todas as substâncias combustíveis, tais como a lenha, o carvão e o óleo. Ele se desprendia, em forma de chamas, toda vez que os combustíveis eram inflamados.

Tais preocupações tiveram um novo alento na modernidade, mais especificamente, com a teoria da calcinação no século XVI. As constatações do "aumento do peso" dos produtos de determinadas reações de combustão, além das inquietações, originaram novas explicações. Por exemplo, quando numa calcinação os resíduos tornavam-se mais pesados do que as substâncias que as originavam, admitia-se a hipótese de que os espíritos das substâncias não tinham peso ou então tinham uma "leveza positiva". Ou seja, a justificativa era de que tais substâncias perdiam sua parte volátil ou espiritual. Biringuccio, em 1540, afirmava que "a parte espiritual" dos corpos não tinha peso e, ainda por cima, que esta podia ter peso negativo, equivalente a uma "leveza positiva".

Outra concepção foi a do *termógeno*, considerado, por muitos cientistas do século XVII, como uma substância misteriosa e imponderável, que emanava do fogo. Eles acreditavam que, quando um corpo era aquecido, o *termógeno* entrava nesse corpo e, saía do mesmo na medida em que ele ia esfriando.

Observações como as realizadas por Boyle⁵, relativas ao aumento do peso de um metal em virtude do aquecimento, e as reflexões posteriores, resultaram na concepção: *matéria de fogo*. Para Boyle, o fogo, tal qual outras substâncias como a água e o sal, continha moléculas e, conseqüentemente, quando reagia com um metal, aumentava o peso do conjunto, fator que o induziu a considerá-lo uma substância. Sobre isto, em seu diário de laboratório, consta:

"De onde então pode surgir o aumento do peso dos metais observados por nós e que foram submetidos ao efeito da chama pura, se não é de algumas partículas ponderáveis da chama! O número destas partículas de fogo deveria ser muito grande para poder pesá-las na balança".⁶

Apesar de sua idéia ter sido mais convincente do que a do termógeno, muitos dos cientistas da época não a aceitaram. Continuou prevalecendo a indagação a respeito do que era o fogo e em que consistia o processo das combustões.

Um passo importante foi dado por Lomonósov ao repetir a experiência de Boyle. Ao não abrir o gargalo durante o aquecimento constatou que o peso do conjunto permanecia o mesmo, dada a formação de crosta dentro da retorta. Sua versão sobre esse resultado foi: "Com estes experimentos se tem estabelecido que a opinião do famoso Boyle era inexata porque sem haver deixado penetrar o ar exterior no recipiente o peso do metal queimado resultava o mesmo".⁷

⁵. Boyle esquentou um pedaço de chumbo que se encontrava no interior de uma retorta com o gargalo fechado. Esperou que a retorta "esfriasse" e, ao abri-la, se surpreendeu. Notou que o ar entrava na retorta de tal forma que chegava a assobiar. Ao pesar novamente o conjunto, percebeu que o peso após o aquecimento, era maior do que o anteriormente a este. Porém, pelo fato de naquela época não serem conhecidos os componentes do ar, Boyle não conseguiu dar uma explicação plausível com a concepção atual sobre combustões. Com suas reflexões sobre o acontecido no experimento, chegou à conclusão de que a "matéria do fogo" havia penetrado através das paredes da retorta e combinara-se com o metal. Desta combinação, resultou uma crosta depositada nas paredes internas da retorta.

⁶. Em Rozen, 1974 p.13

⁷. Em Rozen, 1974 p.14

Em que pesem esses avanços particulares, o autor russo também não possuía os elementos necessários para interpretar os resultados obtidos de sua experiência. Ele não tinha conhecimento do oxigênio, enquanto elemento, para melhor compreender a combinação deste com o metal. Faltava a descoberta dos componentes do ar, principalmente do comburente, para que se desse mais um passo em relação à solução do *mistério* sobre o fogo e as combustões.

Flogisto

Com o desenvolvimento dos trabalhos de aproximação entre Medicina e Química (Iatroquímicos e Alquimistas), ao final do século XVII, foi formulada a Teoria do Flogisto, para a qual, as substâncias químicas constituíam-se de três princípios: da inflamabilidade, atribuído ao enxofre; da fluidez e volatilidade, atribuído ao mercúrio; da fixidez e inércia, atribuído ao sal.⁸

Naquela época, Becher (1669) considerava as substâncias sólidas como sendo compostas por três elementos⁹. Entre eles os corpos comburentes - que se separavam das outras duas terras quando da combustão - eram formados pela terra pinguis (continha sulfura). Stahl, discípulo de Becher, tentou encontrar um agente comum a todas as combustões. Afirmou ter encontrado este agente, algo destituído de massa, na terra sulfurosa (pinguis) e passou a considerá-lo então, por esta característica, um princípio: o *Princípio do Fogo*. Porém, logo no início do século XVIII, Stahl denominou-o de *flogisto*. Este era o 'agente do aquecimento', o elemento catalisador do fogo (elemento ígneo).

Todos os corpos passíveis de combustão continham *flogisto*, liberado durante a combustão. Desta forma, os óleos, as gorduras, a madeira, o carvão vegetal e outros combustíveis eram essencialmente constituídos por este "fluido". Já os metais eram formados por uma combinação entre um óxido e o flogisto. Na combustão, o primeiro ficava como resíduo e o segundo era liberado com o aquecimento.

Uma das concepções sobre flogisto se assemelhou muito com a teoria da calcinação do século XVI, o que pode ser evidenciado na afirmação do então professor de medicina, Venel (1723-1775): "o flogisto não é atraído para o centro da Terra, mas tende a elevar-se: disso provém o aumento de peso na formação de óxidos metálicos e a diminuição do mesmo, em sua redução química" (Mason, 1962:243). Essa idéia era defendida também pelas sociedades científicas do Sul da França, ainda nas últimas décadas do século XVIII - quase um século depois da teoria da gravitação -, mesmo diante da grande aceitação, pelos físicos e também pelo "químico" inglês Cavendish, da 'opinião de Sir Isaac Newton', para quem o calor não era uma substância material, e sim, o resultado dos movimentos mecânicos das partículas que compunham os corpos materiais.

Para se ter uma idéia da aceitabilidade do flogisto neste período, apontamos a intenção de alguns cientistas como o próprio Cavendish, Black¹⁰ e Priestley¹¹ que, ao estudarem essa teoria mais a fundo para derrubá-la, acabaram convencendo-se do contrário, reforçando-a.

⁸. Mason, 1962 p.241

⁹. Terra lapida: elemento terroso estável: equivale ao princípio salino dos iatroquímicos; Terra pinguis: substância oleosa; Terra mercuris: elemento fluido.

¹⁰. Joseph Black era médico escocês.

¹¹. O inglês Joseph Priestley (1733-1804) foi um dos cientistas que contribuiu para a descoberta do Oxigênio.

Black (1754), por exemplo, provou que, com o aquecimento, os carbonatos desprendiam uma considerável quantidade de gás ponderável (*ar fixo ou estável*), ou seja, esses elementos não perdiam o imponderável (o místico flogisto) como pensavam os iatroquímicos, mas uma substância definida a qual podia ser separada e pesada (\Rightarrow um flogisto ponderável).

A *conservação* do flogisto pode assim ser representada:

1. Para materiais orgânicos como: papel, vela, ...:

1.1. Material Orgânico antes da queima \Rightarrow Material após a queima + Flogisto ou

1.2. Massa antes da queima \Rightarrow Massa (cinzas) + Massa do flogisto

2. Para os metais, como o ferro:

2.1. Metal antes da queima \Rightarrow Óxido de Metal após a queima + Flogisto ou

2.2. Massa metal \Rightarrow Massa óxido de metal + Massa do flogisto

Nas equações 2.1 e 2.2., observa-se que: para que a conservação seja possível, a massa do flogisto deve ter um valor negativo ou então ser considerada a "leveza positiva" acima mencionada. Ou ainda, serem considerados outros fatores, como o que, na época, outra corrente admitia: o óxido de metal seria mais puro do que o metal. Usando artifícios como este, os adeptos procuravam saídas para explicar os inconvenientes que surgiam nos resultados de suas experiências. Assim, em concordância com a concepção da sociedade científica do Sul da França mencionada, a equação ficaria melhor configurada da forma:

Massa metal puro + Massa flogisto \Rightarrow Massa do óxido

Para que se tenha uma melhor compreensão desta concepção sobre o flogisto, imagina-se que este estaria preso entre a estrutura molecular do óxido e, por não ser atraído para o centro da Terra, estaria, semelhante ao empuxo sobre um corpo que está na água, impulsionando o óxido no sentido contrário ao da força gravitacional ("para cima"). Dessa forma, quando da combustão, o flogisto seria liberado ficando o óxido com sua massa de forma mais pura e com maior peso.

Apesar dessas limitações (ou dificuldades), a teoria do Flogisto teve aceitação até quase o final do século XVIII, quando da revolução da química. Esse processo teve papel importante na aproximação das pesquisas da Química e da Medicina. Ou melhor, da utilização prática dos resultados obtidos pela evolução da ciência na medicina, como o oxigênio.

Conservação da Massa

Em 1770 já eram conhecidos diversos gases como o hidrogênio, o oxigênio, a amônia, entre outros. Sheele descobriu um gás que classificou de ar, com 2 elementos: 3/4 de 'ar ígneo' (oxigênio) e 1/4 de 'ar impuro' (azoto). Mason (1962:244-5), referindo-se aos escritos de Sheele, afirma que "A função do 'ar ígneo', ou oxigênio, segundo a sua concepção, era a de captar o flogisto produzido pelas substâncias em combustão. A quantidade que assim podia ser absorvida era limitada, de sorte que, quando o oxigênio em um espaço confinado ficava saturado com o flogisto, não podia alimentar a combustão por muito tempo"

Neste mesmo período, Lavoisier (1743-1794), não concordando com as explicações diversas sobre os resultados das experiências com combustões, resolveu repetir as mesmas de maneira mais precisa e curiosa. Verificou que o chumbo, quando aquecido, absorvia o "ar

fixo”, mas este ar absorvido não servia para alimentar a combustão. Para ele, combustões tais como as que envolviam fósforo e metais como o estanho, quando realizadas na presença de ar, resultavam num produto mais pesado. Isso ocorria devido à absorção de ar na combinação.

Porém, em 1774, ao anunciar os resultados obtidos da extração do ar a partir do composto óxido vermelho de mercúrio¹², Priestley deu um novo impulso às pesquisas de Lavoisier. Este já sabia que:

- um metal dissolvia-se num ácido, formando um sal e liberando hidrogênio, que hoje pode ser escrito: $(\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 \Rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2 \uparrow)$;

- um óxido de metal dissolvia-se num ácido, formando o mesmo sal sem, no entanto, liberar nenhum gás, hoje: $(\text{FeO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \Rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{O})$

Diante dos resultados de Priestley - liberação rápida de um *ar*; obtenção de um volume cerca de três vezes maior que os materiais empregados; não dissolução desse *ar* na água; queima de uma vela envolvida no mesmo (com chama notavelmente brilhante), Lavoisier, ao refazer a experiência de Cavendish¹³, sabendo que a água era composta de oxigênio e hidrogênio -, chegou a seguinte conclusão:

- O metal, ao se dissolver em ácido diluído, absorvia o oxigênio da água formando um óxido e liberando o hidrogênio; o óxido se unia ao ácido formando o sal.

Esta descoberta foi importante para perturbar irreversivelmente, não só a teoria do flogisto, mas também o modelo grego original¹⁴. Lavoisier conseguiu comprovar que o ar era uma composição de elementos, entre eles o oxigênio, o qual, além de conter massa, participava das combustões.

A utilização de campânulas envolvendo os recipientes em que ocorriam as reações químicas, com a finalidade de reter os gases resultantes destas, permitiu verificar a 'invariância' do peso (e/ou da massa) antes e após a combustão, o que possibilitou a Lavoisier enunciar a Lei da Conservação da Massa.

As equações químicas, anteriormente vistas, puderam ser assim representadas:

1. **M**assa de papel + **M**assa do oxigênio \Rightarrow **M**assa papel queimado + **M**assa dos gases ou
2. **M**assa de ferro + **M**assa do oxigênio \Rightarrow ...**M**assa do óxido de ferro

A massa como invariante alcançou ampla generalização em relação às transformações químicas, teve aceitação de praticamente toda a comunidade científica e foi essencial para que

¹². Quando o óxido de mercúrio é aquecido a uma temperatura superior a 400⁰ C, seus componentes: o mercúrio (metal) e o oxigênio (gás) se separam.

¹³. Há autores que defendem que a experiência realizada por Cavendish em 1781 foi fundamental para Lavoisier. Ao explodir uma mistura de hidrogênio e oxigênio, Cavendish percebeu a formação de orvalho e o desaparecimento desses dois gases. Após repetidas experiências, afirmou que a água era composta de 1,0 elemento de oxigênio e 2,02 elementos de Hidrogênio. Mas essa sua afirmação não lhe pareceu muito convincente. Continuou acreditando que a água era formada por um só elemento e que o oxigênio era uma espécie de água privada do elemento flogisto, ou seja, o hidrogênio era o próprio flogisto.

¹⁴. As novas descobertas indicavam que os *quatro elementos* da teoria grega já não eram substâncias únicas, mas cada uma delas constituía-se de outros elementos: *água* (de oxigênio e hidrogênio); *terra* (de vários tipos e composições); *fogo* (continha o calor, a luz e a fumaça); o *ar* (composto por oxigênio e azoto).

a Química fosse considerada uma ciência. A novidade acabou por derrubar, pelo menos entre os cientistas, a presença e o recurso de idéias mágicas e animistas.

“Lavoisier mostrou que todos os fenômenos químicos, anteriormente tão caóticos, podiam ser ordenados numa lei de combinação de elementos velhos e novos. Transformou a química numa teoria geral com a qual era possível não só identificar os fenômenos conhecidos, mas também prever novos fenômenos de maneira quantitativa”. (Bernal, 1969:638-9)

Em 1789, com a publicação dos *Elementos de Química*, o autor relacionou 23 substâncias consideradas *autênticas*. É particularmente instigante a categorização do calor como uma espécie de matéria imponderável, denominada "calórico", incluída neste conjunto.

O Calórico

Muitas das questões conflitantes das Ciências Naturais até meados do século XIX foram sobre o calor¹⁵. Na antiguidade, este era identificado como proveniente do fogo. Para Aristóteles, ele era produzido pelo movimento, pelo éter¹⁶ excitado, pelo Sol e pelas estrelas. Já para Bacon, Kepler, Boyle e outros, o calor era resultado de um movimento. Galileu admitia-o como sendo um fluido enquanto Gassendi se referia a duas espécies de matéria térmica: uma responsável pela produção do calor e outra pela produção do frio. Por fim, Newton, em suas indagações, pensava ser o calor proveniente das vibrações do éter.

Somente no início do séc. XVIII, com a evolução dos termômetros, o calor passou a ser estudado mais cientificamente, com menor aporte a suposições filosóficas¹⁷.

Lavoisier, por acreditar que o calor gerado nas reações químicas constituía-se num fluido imponderável, à semelhança da eletricidade e da luz, atribuiu-lhe o título: “Nós [...] designámos a causa do calor, o fluido eminentemente elástico que o produz, pelo nome de calórico”.¹⁸ Ele admitia a existência de uma espécie de matéria do calor (idéia corpuscular) que era responsável para, de acordo com sua quantidade, manter um corpo no estado sólido, líquido ou gasoso.

Alguns cientistas defendiam que os fenômenos caloríficos podiam ser explicados por intermédio de um fluido capaz de penetrar em todo o espaço e atravessar algumas substâncias. No princípio desta teoria, a expansão térmica dos corpos era devido a simples adição desse fluido (calórico) e a contração pela retirada (subtração) do mesmo. Outros, como Bernoulli, pensavam que o calor era resultado dos movimentos insensíveis das moléculas da matéria. Outra corrente admitia que as duas hipóteses se verificavam nos aquecimentos: o químico Berthollet distinguia o calórico radiante do calórico produto de combinação. Daí a possibilidade de identificar a substância da luz à do calórico (radiante).

A teoria do Calórico teve boa aceitabilidade pela comunidade científica por diversos motivos, entre eles: admitia a existência de forças intermoleculares; ter previsto/confirmado

¹⁵. Rosmorduc (1989:121).

¹⁶. Aristóteles considerava-o a quinta essência, do qual os planetas e as estrelas eram formados.

¹⁷. Nesse período, diversos cientistas, como o físico alemão Wolf, os defensores do flogisto, admitiam que o calor era ponderável e formado por átomos, isto é, concebido como uma substância material. Daí o nome de "matéria de calor", dado por Joseph Black, o qual chegou a esta concepção através de análises médico-físicas.

¹⁸. Em Rosmorduc, 1983 p.122

experimentalmente, fenômenos como o coeficiente de expansão térmica dos gases; o fato de Lavoisier, com reconhecimento de seu êxito, ter sido favorável ao modelo.

A Teoria Cinética do Calor e as bases do Princípio da Conservação da Energia

Ao final do século XVIII (1798), contrapondo a idéia do calórico, o engenheiro americano Rumford introduziu a idéia cinética do calor, influenciado também pelas observações tidas das experiências realizadas com a "broca de fogo e a forja", desenvolvidas durante séculos, as quais apontavam que o calor não seria um fluido.

Rumford era responsável pela perfuração de canos de canhão, o que lhe possibilitou observar enorme aquecimento, tanto do material da broca quanto da água que envolvia o cano do canhão, toda vez que estes eram perfurados. As indagações a cerca do calor, relacionadas com o que observara, levaram-no a pensar que não podia-se tratar simplesmente de um fluido.

“... Não podemos nos esquecer de considerar o fato de que a fonte de calor gerado pelo atrito, nessas experiências, se apresenta evidentemente inexaurível. É praticamente desnecessário acrescentar que qualquer coisa, que qualquer corpo, ou sistema de corpos, isolado, possa continuar a fornecer calor ilimitadamente não pode ser uma substância material: e me parece ser extremamente difícil, se não impossível, formar qualquer idéia distinta de qualquer coisa de ser excitada e comunicada, pela qual o calor foi excitado e comunicado nestas experiências, que não seja movimento.”¹⁹

Com essas idéias em oposição ao modelo hegemônico, além das relações entre calor e trabalho (possibilidade de transformar o calor em movimento), a primeira metade do século XIX foi um período de conflito sobre o conceito de calor. O fluido (calórico) perdeu terreno e acabou suplantado em 1840. Os modelos de calor e de "força", antes diferenciados e conflitantes foram de vital importância para a formulação da Conservação da Energia de maneira mais plena.

Anteriormente, a *vis viva* do século XVII proposta por Leibniz e Bernoulli, mesmo sendo considerada uma "força metafísica", acabou sendo expressa em formulação dinâmica. Tanto é que estava diretamente relacionada ao que atualmente denominamos energia cinética e definida como o produto da massa pelo quadrado da velocidade (mv^2). Mas, mais tarde, com a introdução do conceito de trabalho, no início do século XIX, foi redefinida para $1/2mv^2$.

A conservação da *vis viva* era também consensual, e pode ser evidenciada na expressão de Hass: “A *vis [viva]* nunca desaparece; certo é que pode dar a impressão de ter-se perdido, porém se alguém sabe buscá-la pode descobri-la sempre de novo por seus efeitos.”²⁰

Kuhn (1987) afirma que cientistas brilhantes, em raros momentos até a metade do século XIX, aplicaram a conservação da *vis viva* à teoria do calor como movimento, mas não reconheceram a síntese, a "totalidade": calor, trabalho e reciprocidade nas conversões.

Em outros autores (Martins,1984), podemos ver diversas evidências acerca da confusão força/energia (e da relação entre calor e trabalho).

¹⁹. Em Mattos, 1992 p.40

²⁰. Em Kuhn, 1987 p.120

Mayer²¹ destacou duas *propriedades* essenciais de todas as causas:

- 1ª: "Forças são causas, e por isso aplica-se totalmente a elas o princípio: *causa aequat effectum*. Se a causa c tem o efeito e , então $c = e$; se e é novamente a causa de um outro efeito f , então $e = f$, e assim por diante: $c = e = f = \dots = c$ ". Trata-se de algo que se mantém constante, isto é, se conserva ao longo dessas sucessões.
- 2ª: "A capacidade de assumir diferentes formas".

Para Mayer, quando associadas as propriedades de causas e efeitos, "causas são objetos (quantitativamente) indestrutíveis e (qualitativamente) mutáveis. Há na natureza duas espécies de causas, entre as quais não ocorrem interconversões, (...). Uma classe é constituída pelas causas que possuem propriedades de ponderabilidade (peso) e impenetrabilidade, que comumente designamos de matéria. A outra é constituída pelas causas às quais faltam essas últimas propriedades, são as forças, também chamadas de imponderáveis devido à propriedade negativa indicada. As forças são, portanto, entidades indestrutíveis, transformáveis e imponderáveis"

Outras passagens, como as a seguir, evidenciam as concepções de alguns cientistas acerca da idéia de conservação (relacionada com a expressão força):

- Mohr, um dos editores dos *Annalen der Pharmacie*, publicou, em 1837, um longo trabalho no qual afirmava: "Excetuando o conhecimento dos 54 elementos, há na natureza das coisas apenas um outro agente, e este é chamado de força; ele pode aparecer sob várias circunstâncias como movimento, afinidade química, coesão, eletricidade, luz, calor e magnetismo, e de qualquer um destes fenômenos todos os outros podem ser derivados".²²
- O dinamarquês Ludwig Colding, em seu trabalho apresentado em 1843 à Academia Dinamarquesa de Ciências: "Todas as vezes que uma força parece se aniquilar realizando um trabalho mecânico, químico ou de qualquer outra natureza, ela apenas se transforma, e reaparece sob uma nova forma, onde ela conserva toda a sua grandeza primitiva"²³.
- Sadi Carnot, engenheiro francês, em sua obra publicada em 1824: *Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo e sobre as Máquinas Capazes de Desenvolver Esta Potência*, ao usar o termo "Potência Motriz" (ao invés de força). Isso fica mais evidente nas suas diversas notas manuscritas, publicadas, pós sua morte, pela Academia de Ciências de Paris em 1878.

"Podemos [pois] estabelecer como tese geral que a potência motriz existe em quantidade invariável na natureza, que ela nunca é, propriamente falando, nem produzida nem destruída. Na verdade ela muda de forma, isto é, ela produz umas vezes um tipo de movimento outras vezes um tipo diferente, mas nunca é destruída. Este princípio deduz-se, por si só, digamos assim, da teoria mecânica,..."²⁴

- Em Bernal (1969) entendemos que as tentativas de elevar o rendimento das máquinas a vapor, isto é, a utilização da energia em processos de expansão para obrigar o calor a produzir cada vez mais trabalho útil, levou a formulação de novos conhecimentos, os quais tiveram importante contribuição para a formulação das leis de conservação e da transformação da energia. Por exemplo, Carnot aplicou princípios físico-matemáticos ao

²¹. Em Martins, 1984 p.86

²². Em Higa, 1988 p.85-86

²³. Em Martins, 1984 p.83

²⁴. Em Rosmorduc, 1983 p.158

estudo do funcionamento das máquinas a vapor, conseguindo elevar a eficiência destas. Ao estabelecer relação entre calor e trabalho, chegou a potência motriz necessária para se produzir determinada quantidade de calor: 3,62 J/cal.

- Mayer considerou que o calor produzido pelo atrito de dois corpos era proporcional ao trabalho mecânico utilizado pelos mesmos. Supôs, também, que nas máquinas a vapor há a transformação de calor em trabalho. Calculou o equivalente mecânico do calor através das propriedades dos gases, obtendo, em unidades atuais, o valor: 1 cal = 3,6 Joules.

Estas diversas idéias/debates foram vitais para a formulação/aceitação do princípio da conservação da energia, como um dos fundamentos da Física. A partir daí as similaridades equivalentes à concepção de energia que eram atribuídas à nomenclatura "força", principalmente na primeira metade do século XIX, foram possíveis de serem identificadas.

O conceito *energia* enquanto função de estado, como atualmente concebido, data de pouco mais de um século. Ele adquiriu significado preciso a partir do estabelecimento da relação calor-trabalho, mais especificamente, nos destaques dados, por Clausius, às "leis" da Termodinâmica, por volta de 1850.

Massa e Energia: invariantes? Conversíveis? ...

Até o início do século XX, face às evidências macroscópicas, os princípios da conservação da Massa e da Energia eram aceitos separadamente. Mas, o que acontece, a nível microscópico, numa reação de "combustão", melhor dizendo, fissão e/ou fusão nuclear? De onde resulta a energia nesse tipo de reação? Há transformação de massa em energia? Ou, a massa e a energia continuam a se conservar de forma independentes uma da outra?

Podemos problematizar um pouco mais esta questão com a reação nuclear da fusão do Hidrogênio em Hélio. $H_1^2 + H_1^2 \rightarrow He_2^3 + n_0^1 + \text{energia}$, com massa inicial ($m_i = 4,028200$ u.m.a.), maior do que a final ($m_f = 4,024695$ u.m.a.). A diferença entre as massas (0,003505 u.m.a.) não é prevista/explicada pela teoria clássica; a energia liberada na reação é de 3,3 MEV. Os cálculos podem ser realizados com a equação $E = m \cdot c^2$, onde E é a energia liberada, m a variação de massa e c a velocidade da luz.

O que ocorre afinal? "Conversão de massa em Energia"? "Equivalência entre as grandezas uma vez que a constante c é universal"? Conservação da massa-energia ou conservação das duas grandezas independentemente? Existe bastante discussão e polêmica sobre as interpretações.

Uma das interpretações assume que energia e massa têm sido conservadas cada uma separadamente ou seja, massa e energia não são interconvertíveis. Por exemplo, numa reação, a variação de massa indicada é apenas aparente, porque as partículas (fótons) liberadas na reação carregam massa correspondente à sua energia (os 3,3 MEV no exemplo acima). De seu lado, a energia liberada (cinética dos fótons) é obtida às custas de um rearranjo de posição das partículas nucleares, com redução da energia potencial interna dessas partículas nos núcleos produtos. Assim, temos para essa interpretação a conservação de massa e a conservação de energia independentes (Rogers, 1960; Warren, 1976; Bondi, 1987).

Outra interpretação é a da equivalência entre as duas grandezas (massa e energia), uma vez que a relação de igualdade é estabelecida pela velocidade da luz (constante universal c). Nesse sentido, a conservação passa a ser atribuída ao par de grandezas (Caldas, 1982). Com o

advento da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade, apontou-se para a questão da relação Massa-Energia, anunciada por Einstein em 1905, em sua teoria especial da relatividade, quando afirmou que toda massa, necessária e inevitavelmente tem energia. Isto tem sido aceito pelos físicos em geral e testado em inúmeros experimentos de alta precisão. Desde Einstein é aceito um só princípio mais amplo: o da Conservação da Energia, que pressupõe inevitavelmente a conservação da massa.

Uma terceira, é a que atribui ao processo a conversão de massa em energia, sendo bastante utilizada em vários textos de segundo e terceiro graus tanto de Física como de Química (Hallyday & Resnick, 1992; Kaplan 1978; Russel, 1992).

Vários autores consideram essa última interpretação forçada ou mesmo errada (Warren, 1976; Bondi, 1987, Gil, 1991) - com forte convicção e com argumentos baseados nos originais de Einstein. Alertam para as incompreensões dos autores desses textos que acabam se generalizando entre os estudantes.

De qualquer maneira, é desejável uma discussão que indique claramente a não invariância da massa concebida nos moldes clássicos da teoria de Lavoisier, bem como o comprometimento entre essa grandeza unificadora da ciência clássica e a energia, que foi conquistada em tempos mais recentes (por volta de 1850), mais unificadora para a ciência contemporânea, originalmente concebida como função de estado (posição, velocidade) e conservativa no somatório das suas múltiplas formas (mecânica, térmica, elétrica, nuclear...).

Claro que questionar a conservação da energia é uma alternativa aceita, embora pouco encampada. Há exemplos de cientistas que já o tentaram, no passado e mesmo atualmente, mas até o momento, pelo menos, não obtiveram sucesso.

Questões, Comentários e Desafios Pedagógicos

A questão que permanece é se realmente algo vem sendo unificado na Física e Ciências Naturais em geral dos currículos escolares. A riqueza que se constitui o desenvolvimento dos conhecimentos (leis, princípios e idéias de conservação), historicamente, nas Ciências Naturais, como as atenções voltadas a algo que se conserva, normalmente não faz parte dos estudos/planejamentos dos professores. Por exemplo, passalhes despercebido que os alunos em geral *ignoram que, nas interações, enquanto um “ganha”, outro deverá “perder” energia equivalente*. Raramente o estudante era (ou ainda é) levado a uma reflexão mais profunda sobre a origem da explicação que lhe havia sido dada sobre a evolução teórica que a precedeu e sobre as deficiências que continuavam a apresentar, mesmo após o ensino do tópico em questão.

Nos encontros com docentes, temos privilegiado experiências de combustões de vários materiais, com auxílio de uma balança aberta de pratos construída pelos mesmos (Delizoicov e Angotti, 1991 e Angotti, 1993). Depois da indução obtida pelo desequilíbrio verificado após a queima dos combustíveis de compostos de carbono, contrapõe-se o resultado inesperado da combustão metálica (da "leveza positiva"). O clima que convivemos nestes encontros não é dos mais confortáveis, face ao desequilíbrio e ao dissenso.

Estudos sobre a história da ciência poderiam lhes contribuir nos aspectos problemáticos acima apontados. No entanto, apenas apontam, em certos tópicos, a biografia dos cientistas responsáveis pelas invenções e/ou conceituações. Continuam a tratar os

conhecimentos científicos muito mais como produtos, ignorando/sonegando aos alunos a ciência como processo-produto, permeada de debates, conflitos. Não com satisfação afirmamos que a lógica da *simplicidade* e *previsibilidade* da Física Clássica domina suas concepções sobre Ciências Naturais. É muito forte o apego a um modelo em dificuldades com experiências que não a corroboram.

A História da Ciência fornece diversos outros exemplos, que podem contribuir para que no campo do ensino de Ciências, o mito da vinculação das teorias com as experiências, principalmente as cruciais, seja bastante questionado. Sabemos como é difícil a mudança de referenciais teóricos por muitos integrantes da comunidade científica em todas as épocas.

Com estas atividades queremos afirmar da importância dos modelos, das experiências que confirmam ou não os modelos, da necessidade de se trabalhar em Ciências Naturais com Princípios de Conservação e da capacidade de síntese de alguns conceitos chaves, que na investigação científica adquirem o status de intra e interdisciplinares. Eles aproximam campos de estudo que antes do seu aparecimento e amadurecimento eram separados e após a sua explicitação e clareza, passam a ser um único. De todos os conceitos unificadores aqui discutidos, o da energia é mais atual e potente. Antes dele, a Física contemplava de forma muito distinta, o calor, a luz e a eletricidade como áreas muito distantes, depois, sabemos, tais campos foram unificados (Kuhn, 1969).

Além disso, esse trabalho teve (e tem) como uma de suas metas indicar uma alternativa para que seja minimizada a fragmentação dos conhecimentos escolares de Ciências em geral, de Física e Química em particular. Por isso tem sido desenvolvido com professores, o que nos permite, entre outras, afirmar que a dinâmica de trabalho adotada, a estruturação de atividades nas quais se estabelecem relações entre os vários conceitos, aponta para avanços no ensino/aprendizagem em suas práticas pedagógicas.

A nosso ver, uma das evidências da validade do trabalho junto aos professores está em se perceber que o desenvolvimento de atividades como estas se constituiu, para eles, como um problema a ser resolvido. Tanto é que reconheceram a necessidade de continuar os encontros para que possam reorganizar a forma de ministrar suas aulas: admitiram a necessidade de trabalhar os conceitos físicos via *temas*, o que possibilitaria aos seus alunos uma visão mais ampla (mais geral) da abordagem conceitual e, com o apoio da história da ciência, particularmente aquela que evidencia os conflitos na transição e superação de modelos.

As afirmações abaixo, colhidas dentre os docentes, são indicativas do valor que atribuem aos encontros de formação (Pró-ciências em SC - 1997, 98 e 99 e Projeto em Ijuí, desde 1995):

- “Os encontros são muito bons, positivos e proveitosos, além de nos dar uma visão mais ampla e atual dos conceitos e práticas, proporcionam-nos um intercâmbio de conhecimentos e experiências”.
- “Estou gostando muito do enfoque teórico e histórico dado aos temas. É uma proposta diferente das que temos aqui”;
- “Gostaria muito de formar um grupo de estudo conjunto para aprofundar mais estes temas e este enfoque, na tentativa de desenvolvê-lo na sala de aula, já neste ano”.
- "Nunca imaginei ser possível realizar uma experiência cujo resultado seja justamente o menos previsto (queima de metal), em sala".
- "É muito difícil mostrar aos alunos uma limitação do raciocínio indutivo; a combustão dos metais é exemplo acessível".

As perspectivas de continuação dos trabalhos indicam que os professores de Física e de Química, ao perceberem a oportunidade/conveniência dos assuntos complementares à temática principal das Combustões, podem contribuir decisivamente para o estudo regular das teorias contemporâneas da Física, de ampla repercussão no escopo da Química avançada. Contribuirão também para fortalecer a sua universalidade, sem deixar de apontar as suas limitações, assim como é/pode ser feito na discussão dos problemas ambientais e de comportamento indivíduo/grupo frente às aplicações tecnológicas.

Além do mais, estudos recentes da Biologia, como a interação dos seres vivos com a biosfera e com a radiação, podem se constituir em excelentes exemplos a serem desenvolvidos na linha semelhante à aqui apresentada; a respiração enquanto “combustão” bem como a própria fotossíntese podem ser também tratadas pelo duplo eixo temático e conceitual unificador.

Uma possibilidade efetiva em favor de estudos multidisciplinares através de *temas* como o aqui proposto é a realização de seminários envolvendo alunos e docentes das disciplinas afins; outra é a coincidência de horários - fora da grade normal ou com a destinação de uma aula comum, dentre outras duas específicas, para as disciplinas de Ciências no ensino médio - de modo a ser viabilizado um espaço plural, pautado pelas diferenças e semelhanças entre a Física, a Química e a Biologia, não só para estudos/planejamentos coletivos dos professores, mas também para debates/discussões e avanços com e entre os alunos.

Referências Bibliográficas

ANGOTTI, J.A.P et alii, “Teaching Relativity with a Different Philosophy”. In: American Journal Physics”.

ANGOTTI, J.A.P. (1991). *Fragmentos e Totalidades no Conhecimento Científico e no Ensino de Ciências*. Tese de Doutorado. São Paulo, FEUSP.

AUTH, M.A. (1996). *Buscando Superar a Fragmentação no Ensino de Física: Uma Experiência Com Professores*. Dissertação de Mestrado. PPGE/UFSM, Santa Maria/RS.

BELTRAN, N. (1991). *Química*. São Paulo, Cortez.

BERNAL, J. (1969). *Ciência na História: movimento*. 3º vol. Ed. Novo Horizonte, Lisboa.

BONDI, H. et alii. (1987). *Energy has mass*. In: Physics Bulletin, n.38, pp. 62/63.

CALDAS, I.L. et alii. (1982). *A velocidade Limite - Guia 3*. In: Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. SP, Harbra.

DECKER, J.A. et alii. (1986). *Pre-University Physics Presented in a Thematic and Systematic Way*. In: European Journal of Science Education , 8 (2), pp. 145/53.

DELIZOICOV, D. e ANGOTTI, J. (1991). *Metodologia do Ensino de Ciências*. Cortez, SP.

EJKELHOR, H.M.C. & Kotland, K. (1989). *Broadening the Aims of Physics Education*. Pub. of PLON Project. Un. of Utrecht, The Netherlands.

FREIRE, Paulo (1987). *Pedagogia do Oprimido*. Ed. Paz e Terra, Rio de Janeiro/RJ.

HALLYDAY, D. e Resnick R. (1992). *Fundamentos da Física*. Rio, LTC.

HIGA, Terezinha T. (1988). *Conservação de Energia: Estudo Histórico e Levantamento Conceitual dos Alunos*. Dissertação de Mestrado apresentado à FEUSP/IFUSP, SP.

KAPLAN, I (1978). *Física Nuclear*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois.

KUHN, T. S. (1959) "Energy conservation as an Example of Simultaneous Discovery. In: Clagett, M. (ed.) *Critical Problems in the Hist. of Science*, The Un. of Wisconsin Press, Madison, pp.321/356.

---- (1987). *La Tension Esencial: Estudios Selectos sobre La Tradicion y el Cambio en el Ambito de La Ciencia*. Editora Fondo de Cultura Economica, México.

LIJNSE, P.L. (1990). *A thematic Physics Curriculum: A Balance between Contradictory Curriculum Forces*. In: *Science Education*, London, 74 (1), pp. 95/103.

MARTINS, R. (1984). *Mayer e a Conservação da Energia*. Cad.Hist.Fil.Ciência N°6UNICAMP/SP.

MASON, S.F. (1962), *História da Ciência: As Principais Correntes do Pensamento Científico*. 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre/RS.

MATTOS, C. R. (1992). *Entrando na Era do Ensino de Entropia*, Cadernos Sobre Ensino de Conceitos em Física, Vol.4, SP.

MUJIN, K. (1988). *Física Nuclear Recreativa*. Editorial Mir, URSS.

OKUNO, Emico, e outros (1982). *Física Para Ciências Biológicas e Biomédicas*. Harbra, SP.

RONAM, C.A. (1987). *História Ilustrada da Ciência*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar, (4 vols.).

ROSMORDUC, J. (1983). *De Tales a Einstein: História da Física e da Química*. Edição 10/83, Editorial Caminho, Lisboa.

ROZEN, B.(1974). *En El Reino Del Hada Buena*. Editorial Mir, Moscou/URSS.

RUSSEL, J.B. (1992). *Química Geral*. São Paulo, McGraw-Hill.

TERRAZZAN, Eduardo A. (1985). *A Conceituação Não-Convencional de Energia no Pensamento dos Estudantes*. IFUSP/FEUSP, São Paulo.

WEISSKOPF, V.F. (1975) *Indagação e Conhecimento*. São Paulo, Edart/ Funbec.