

Experimentos mentais e suas potencialidades didáticas

(Thought experiments and its potentialities as didactic tools)

Neide Maria Michellan Kiouranis¹, Aguinaldo Robinson de Souza² e Ourides Santin Filho³

¹Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Educação para a Ciência,
Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’, Bauru, SP, Brasil

²Departamento de Química e Programa de Pós Graduação em Educação para a Ciência, Faculdade de Ciências,
Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’, Bauru, SP, Brasil

³Departamento de Química e, Programa de Pós Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática,
Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasil

Recebido em 5/4/2009; Revisado em 7/8/2009; Aceito em 12/8/2009; Publicado em 14/5/2010

A revisão de alguns artigos sobre experimentos mentais que apresentam alguma relação com o ensino sugere que o uso de alternativas didáticas que incluem essas experiências pode ser útil na aprendizagem de fenômenos difíceis de serem observados em condições de laboratório físico. Assim, neste artigo buscamos e analisamos algumas características destes experimentos que os potencializam como instrumentais para o ensino de física.

Palavras-chave: experimentos mentais, ensino de ciências.

A review of some articles on thought experiments shows that the use of these tools as resources seems to be very useful in understanding some phenomena that are very difficult to be observed in a real laboratory. In this paper we present an analysis and discussion about the very characteristics of thought experiments as a potential instrument for physics teaching.

Keywords: thought experiments, physics teaching, didactic resources.

1. Introdução

Ausentes como atividade prática rotineira dos filósofos clássicos, os experimentos físicos davam lugar, na Grécia Antiga, aos experimentos praticados apenas no intelecto. Tais “experimentos pensados” ou ainda “mentais” permitiram a Aristóteles fundar um edifício filosófico de explicação da natureza cujos alicerces e envergadura se mostrou tão robusto que persistiu até os trabalhos de Galileu e de alguns de seus contemporâneos e antecessores. Galileu, incomparável defensor das práticas experimentais, iniciou o desenvolvimento de alguns experimentos conduzidos no intelecto, ou seja, no laboratório da mente, logrando êxito em algumas destas situações. Mais recentemente encontramos também, na história da ciência, esta modalidade de busca da explicação da Natureza como, por exemplo, aqueles descritos no início do desenvolvimento da mecânica quântica e da teoria da relatividade.

Em que pese a importância histórica, epistemológica e metodológica da experimentação no trabalho de Galileu, não foi somente no mundo físico que o pensador italiano encontrou argumentos que o auxiliaram a defender as suas ideias sobre as de Aristóteles. No

mundo da mente ele encontrou um campo extraordinariamente fértil para a condução de alguns experimentos controlados e, em muitos deles, conclusivos. Montados e conduzidos apenas no laboratório da mente, estes “experimentos mentais” contribuíram fortemente para ressaltar os paradoxos de uma ciência física milenar e buscar novas fronteiras no entendimento do Universo.

Atualmente, os experimentos mentais têm merecido um número cada vez maior de estudos e publicações, mostrando que o processo de “experimentar em pensamento” cada vez mais ganha significado e constitui, essencialmente, uma estratégia que tem como um de seus principais efeitos a possibilidade de familiarização com o sentido histórico da ciência e seus métodos. Nessa perspectiva, os aspectos epistemológicos e práticos desempenham um papel estratégico nas conexões com as diferentes áreas do conhecimento.

Do ponto de vista metodológico e epistemológico todo experimento é um experimento mental, pela simples razão de que o cientista precisa planejar sua atividade, o que já exige uma intensa elaboração mental de natureza antecipatória. É preciso pensar na metodologia, no tempo disponível, na minimização dos erros,

²E-mail: arobinso@fc.unesp.br.

nos instrumentos necessários para a coleta de dados e na sua montagem e operação, na forma como serão coletados, na sua interpretação e na teoria que vai dar suporte a essa interpretação. Além desses aspectos, é fundamental lembrar que o cientista ainda “prevê” ou, pelo menos, já busca certo resultado experimental, pelo menos no sentido de “resolução de quebra-cabeças”, conceito apresentado inicialmente por Kuhn [1]. Tais estratégias se evidenciam fortemente no pesquisador, na medida em que planeja cuidadosamente os experimentos que pretende conduzir nos laboratórios, sejam os de pesquisa, sejam os de cunho didático.

O tema principal deste artigo busca o desenvolvimento de abordagens específicas no entendimento deste tipo de experimento, articulando algumas questões epistemológicas das experiências conduzidas em pensamento e a sua possível correlação com o ensino de física. Apoiamo-nos, sobretudo, em alguns autores que de maneira abrangente nos remetem às diferentes concepções e características dessas experiências. Assim, nosso intuito é o de ressaltar a importância da experimentação pensada para o ensino e, inevitavelmente apresentar, numa abordagem histórica, alguns destes experimentos.

2. Experimentos pensados, experimentos de pensamento, experimentos mentais

Em 1897, o físico Ernst Mach usou o termo *gedanken-experiment* (consolidada como *thought experiment* na língua inglesa) para denotar uma conduta imaginária de investigação científica análoga aos procedimentos que deveriam ser utilizados pelos seus estudantes para realizar um experimento físico num laboratório real. No século seguinte à sua descrição como método específico de questionamento, o termo *Gedankenexperiment* aparecia esporadicamente na literatura de língua inglesa em questões envolvendo a filosofia da ciência, notadamente na obra de Popper [2], sobre o uso das experiências imaginárias, especialmente no desenvolvimento da teoria quântica [3]. Passou-se, desde então, a serem denominados certos tipos de abordagens para a realização de experimentos como uma nova classe, de *experimentos pensados*, *experimentos de pensamento* ou ainda *experimentos mentais*, além de outros termos utilizados por diferentes autores.

A análise desses termos e dos experimentos que são conduzidos em ciências naturais pode, de certa maneira, conduzir a uma obviedade simplória: *todo e qualquer experimento é, a priori, um experimento pensado, pois ele é, no mínimo, antecipadamente planejado*. Não se trata, no entanto, desse tipo de experimento com que vamos nos preocupar neste artigo, mas sim, daquele que é, pelo menos em parte, conduzido na mente humana, às vezes por comodidade dos interlocutores, podendo

também fazer parte de um debate de ideias, ou simplesmente por uma impossibilidade de ser executado em laboratório físico.

Neste trabalho optou-se pela expressão “experimento(s) mental(ais)” – aqui referida como EM, por escapar das possíveis críticas de que todo experimento é, em tese, pensado.

Antes de investirmos na análise e caracterização dessa classe de experimentos, apresentaremos alguns exemplos de experimentos mentais com o intuito de elucidar a possibilidade, a necessidade ou mesmo a conveniência de se realizar este tipo de experimento para além das fronteiras do mundo físico.

Consideremos por exemplo uma balança analítica, com uma resolução da ordem de décimo de miligrama e suficiente, portanto, para se determinar a massa de um inseto, no caso uma mosca. Imaginemos agora que sobre o prato da balança haja um copo de vidro, com a boca para baixo e, no interior desse copo, a mosca repousa sobre o prato da balança. A massa do conjunto aparece registrada no visor da balança. Suponhamos agora que a mosca comece a voar no interior do copo. A pergunta a ser feita é: a massa registrada pela balança irá mudar nesta nova configuração do sistema descrito pelo prato da balança, o copo de vidro e a mosca?

O experimento acima pode ser facilmente executado no mundo físico, dependendo apenas da habilidade do seu executor em montar a configuração descrita anteriormente. Contudo, uma alternativa plausível, ao invés de executá-lo, é buscar uma solução pensada para o problema proposto, ou seja, realizar um experimento mental. A sua não execução física *obriga-nos* a pensar sobre todas as variáveis que podem interferir no resultado, inclusive colocando em xeque conhecimentos acerca das leis de Newton, da composição de forças, da escolha do sistema e de suas vizinhanças, podendo levar, inclusive a formulação de questões relevantes para a busca da solução como, por exemplo: o peso do ar, afeta ou não o valor registrado na balança? E quando a mosca está no ar? E se ela pousar no copo e não no prato?

Encontramo-nos então numa situação única em que buscamos a reflexão e o auxílio das leis da física para a solução do problema apresentado. Esta situação raramente ocorreria se o experimento fosse realizado primeiramente no laboratório físico, pois neste caso a ênfase encontra-se nos resultados previstos pela ciência e sua comprovação com os resultados obtidos no laboratório.

Em parte, é assim que buscamos o desenvolvimento dos experimentos propostos nas aulas práticas de laboratório. Quase todas as condições iniciais do experimento já estão estabelecidas *a priori*, tais como o equipamento que vai ser usado, a forma de detecção/observação dos eventos, a confecção dos gráficos, a descrição da lei natural que acompanha os resultados experimentais além de outras variáveis pertinentes.

Ao estudante cabe, desta maneira, buscar as variáveis que estão em operação, executar o experimento (o que em muitas vezes significa tão somente apertar alguns botões), registrar os resultados obtidos e posteriormente interpretá-los com o auxílio de uma teoria que já lhe foi apresentada anteriormente. No exemplo acima, a montagem do experimento e a simples observação do mostrador da balança com a mosca pousada ou em vôo já liquidaria de início o convite à reflexão acerca das diversas possibilidades físicas para o evento.

Existem, entretanto, experimentos mentais que não podem absolutamente serem realizados. Um caso clássico destes é o chamado *balde de Newton*. O experimento recebeu esse nome por aparecer explanado por Isaac Newton em seu clássico *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ou simplesmente *Principia*. Queria Newton demonstrar a existência do espaço absoluto e, para tanto, ele propõe a seguinte experiência: um balde contendo água está preso por uma corda. Estando o balde parado, a velocidade relativa entre este e a água é igual e a superfície desta é plana. Mantendo-se o balde preso, a corda é torcida até certo ponto e o balde é liberado, entrando em rotação. No início de seu movimento, a água ainda está parada e, portanto suas velocidades relativas são agora diferentes. Com o passar do tempo, a água também assume movimento rotacional e sua superfície se deforma, assumindo forma côncava. Após algum tempo a velocidade de rotação da água se iguala à do balde, isto é, suas velocidades relativas voltam a ser iguais. Tal condição é idêntica àquela dos corpos parados e, no entanto a forma da superfície da água é muito diferente. Como explicar esse paradoxo? A argumentação de Newton é que se a mudança de curvatura da água não está associada à velocidade desta com relação ao balde (velocidade relativa) ela deve estar associada à algo externo ao arranjo todo, no caso o espaço absoluto, havendo portanto, um movimento absoluto.

Os dois exemplos acima mostram que a realização física do experimento não é determinante para que se reflita sobre suas causas e conseqüências práticas e teóricas, exigindo-se nos dois casos um grau de reflexão que envolve às vezes todo o arcabouço de uma teoria. Podemos dizer que é nesta condição que reside o valor intrínseco da realização de um experimento mental: a necessidade de se pôr à prova o arcabouço de uma teoria e, possivelmente, ao depender do desenvolvimento do experimento e devido às suas sutilezas, colocar uma teoria em xeque e eventualmente conduzir à sua reformulação.

Em diversas publicações que têm como foco os experimentos mentais, vemos os autores destacarem exemplos a partir de pensadores que foram fundamentais na história do pensamento humano. Assim, dificilmente falamos nestes experimentos sem buscar os principais desdobramentos das ideias que lograram êxito em importantes momentos históricos e mesmo dentro

da filosofia da ciência. Essa modalidade de raciocínio sempre mostrou exercer um papel fundamental nos processos de transformação do pensamento científico e não são poucos os pesquisadores que destacam sua importância como ferramenta didática decisivamente válida nos processos de ensino e aprendizagem. Tais questões são particularmente significativas neste artigo, porque nosso interesse aqui destacado, é que as contribuições possam de alguma forma, serem problematizadas, na busca de explicações plausíveis acerca dos conhecimentos científicos no interior das instituições de ensino.

3. Experimentos mentais: algumas considerações

Durante um longo período, os experimentos mentais estiveram confinados aos campos da física e da filosofia. Por não se apoiarem necessariamente em base empírica, os trabalhos envolvendo EM são particularmente parecidos, podendo estar na interface entre filosofia e ciência. Somente após o ano de 1980, afirma Georgiou [3], o reconhecimento dos EM ultrapassa o campo da filosofia e da física se estendendo para outras áreas do conhecimento. Embora tenham permanecido por um longo período em campos específicos do conhecimento, nas três últimas décadas denota-se uma explosão de interesse sobre experimentação pensada que atinge várias disciplinas, inspiradas na publicação de diversos livros e artigos, alguns deles, destinados à educação. No entanto, cabe lembrar que diferentemente dos experimentos físicos, aos experimentos mentais não se aplica uma metodologia prescritiva, capaz de sistematizar nas disciplinas, o trabalho experimental pensado (Georgiou [3]; Gendler [4]; Brown [5]; Kuhn [6]; Mach [7]).

Thomas Kuhn afirma que experimentos mentais são importantes para a história da ciência, pois permitem que as anomalias chamem a atenção dos cientistas, fazendo-os refletir sobre os paradigmas inadequados e, assim, com a ajuda da ciência normal, entrar em fase revolucionária [1]. Vale destacar, todavia, que embora o autor não use a expressão ‘paradigma’ em seus ensaios sobre experiências mentais, o sentido é o mesmo. Em sua obra clássica e famosa *A Estrutura das Revoluções Científicas* [1], o autor descreve diversos momentos da ciência em que podemos localizar crises e revoluções, mas talvez um dos exemplos mais significativos seja a passagem do pensamento aristotélico para o pensamento galileano de mundo e de comportamento dos corpos em movimento.

Wilkes [8] enumera algumas dificuldades relacionadas ao desenvolvimento de experiências mentais filosóficas, dentre estas destacamos o fato de que se podemos imaginar algo, não significa que este algo seja possível, o que invalidaria os EM. O que uma pessoa considera intuitivamente certo, outra pode considerar obviamente errado; assim, as experiências men-

tais levam-nos muito longe do mundo real. Brown [5] questiona a base requerida por Wilkes, em várias experiências mentais, afirmando que esta interpretação não leva em conta o contexto no qual pensar. Em outras palavras, “uma experiência mental é legítima desde que não viole as leis da natureza”. Assim, Brown relativiza a preocupação de Wilkes, afirmando que não deva haver uma resposta definitiva para o questionamento, visto que se trata de uma questão que independe do grau de complexidade, mas sim da maneira como esses experimentos estão estruturados. Nesse sentido, muitas das reflexões que são feitas a respeito das experiências mentais filosóficas nos remetem a diferentes concepções e finalidades.

Snooks [9] se posiciona sobre as experiências mentais no contexto dos diferentes saberes, destacando a significativa disparidade entre a química e a física. No campo da química, diz o autor, parecem faltar exemplos de experiências mentais bem sucedidas enquanto que em forte contraste, na física e, em especial na biologia, com experiências que acompanharam as mudanças históricas, ainda hoje são lembradas. Essa assimetria não é um dado isolado, mas uma manifestação que leva em conta a distinção entre a física e a química. Tais distinções justificam-se pelo fato de que na química não podemos manifestar suas leis em termos de declarações universais e de que tampouco o seu avanço dependa de um raciocínio *a priori*.

Outros autores como Reiner e Burko [10], também discutem a importância dos experimentos mentais na perspectiva de suas limitações e conseqüências para a educação na área da física. Num experimento, ao aparecimento do erro, não devemos considerá-lo atribuindo um caráter da falta, ou um valor negativo, de deficiência, mas sim deve ser visto como uma oportunidade privilegiada e inerente a toda construção intelectual. Outro aspecto a salientar no trabalho desses autores é a presença de uma similaridade, em termos de nível metacognitivo, entre os profissionais que atuam na área da física e os estudantes, divergindo apenas nas especificidades da temática estudada. No artigo: *On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the Consequences for Physics Education*, os autores destacam, com o auxílio das análises de Reiner [11], cinco níveis para a realização de experimentos mentais. Resumidamente esses níveis podem ser assim descritos:

1. Questões gerais e suposições, tais como uma teoria física;
2. Características do mundo imaginado pelos físicos (a formulação do EM e a escolha do modelo físico a ser utilizado);
3. Deduções formais;
4. Resultados e;
5. Conclusões.

Discutindo os temas da evolução estelar e a relatividade geral, os autores buscaram outros experimentos e

outros exemplos, argumentando que os cinco níveis de reflexão sobre EM são passíveis de erros e, mais especificamente, nos dois primeiros níveis de elaboração do experimento mental.

De acordo com Brown [5], experiências mentais são aquelas realizadas no “laboratório da mente” e, portanto, envolvem manipulações mentais e são frequentemente impossíveis de serem desenvolvidos como experimentos físicos. Tais experimentos são utilizados de forma imaginária pela impossibilidade de serem conduzidos por processos empíricos ou pela limitação tecnológica momentânea, como foi o caso do experimento da dupla fenda com elétrons, ou ainda porque são, a princípio, impossíveis. Ainda de acordo com o autor, classificar experimentos mentais implica em saber quais são suas características e verificar se há propriedades ou regularidades que possam ser consideradas como fundamentais para sua taxonomia.

Nessa perspectiva, Brown [5] compila uma classificação que envolve algumas considerações filosóficas e de alguma forma privilegia as considerações operacionais, abordando os exemplos tradicionalmente tratados na literatura sobre EM, tais como o gato de Schrödinger, o experimento de Einstein, Podolski e Rosen (EPR), o balde de Newton, o estudo de Galileu sobre a queda de corpos e o demônio de Maxwell. Não nos deteremos aqui a detalhar estes e outros experimentos que serão citados, não sendo este o objetivo do presente trabalho, mas ao leitor mais interessado recomendamos a literatura aqui referenciada.

Em sua obra *The Laboratory of Mind: Thought Experiments in the Natural Science*, publicada em 1991, Brown [5] admite que existam alguns padrões definidos e propõe uma classificação, como primeira tarefa, para qualquer análise de experiências mentais. Segundo esse autor, existem dois tipos principais de experimentos mentais – um que se denomina “destrutivo” e o outro “construtivo” podendo este último ser dividido em diretos, conjecturais ou mediativos. Por sua vez, os destrutivos e os construtivos conjecturais podem se consolidar nos experimentos ditos platônicos.

Um aspecto a salientar quanto à construção de padrões de classificação é que não há esquema rígido a ser seguido. Vários autores de experiências mentais têm sugerido que se trabalhe de diversas formas, exatamente como fazem os verdadeiros experimentadores. Os exemplos acima citados estão detalhados na citada publicação, e procuram ilustrar e localizar situações que se enquadram na classificação de Brown de experimentos mentais, sem querer esgotar, evidentemente, a análise estrutural da linha de raciocínio de experimentos aqui já ilustrados. Independentemente das formas particulares, as experiências mentais devem ser trabalhadas de variadas formas, exatamente de como o fazemos na realização de experimentos físicos.

É preciso salientar que a identificação e correlação das propriedades das categorias descritas acima, acom-

panhadas de seus exemplos, constituem uma tarefa complexa, uma vez que estão envolvidos aspectos filosóficos e epistemológicos que estão além da motivação inicial e geradora deste artigo.

Norton [12] defende a idéia de que “qualquer conclusão alcançada por um experimento mental científico bem sucedido também será demonstrado por um argumento não experimental mental”. A idéia básica de Norton é que as experiências mentais podem ser definidas na qualidade de argumentos. Assim, experiências mentais são argumentos que postulam estados hipotéticos ou contra factuais de ocorrências e evocam particularidades irrelevantes para se buscar uma generalização e alcançar uma conclusão.

Gendler [13] afirma que experiências mentais contam com um tipo de participação construtiva e requerem um tipo de ação daquele que as experimentam. Levando em conta as considerações da autora, elaborar uma conclusão com base em um experimento mental é fazer um julgamento sobre o que aconteceria se o caso particular da situação descrita em algum cenário imaginário fosse, na verdade, obtido. No artigo intitulado *Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment* [13], a autora examina cuidadosamente o experimento mental de Galileu sobre a queda de corpos, desafiando a visão defendida por Norton [14] de que as experiências de pensamento podem ser demonstradas por argumentos explícitos que não fazem referência a particularidades imaginárias. Alguma coisa além do argumento, diz a autora, pode justificar o raciocínio sobre o experimento mental e buscar referências a algumas particularidades, fornecendo e garantindo apoio para a reorganização dos conceitos. Para Gendler [15], o argumento não nos dará acesso a um determinado conhecimento, uma vez que não o encontramos propositalmente disponível. Elaborado de forma apropriada, um EM pode levar a uma conexão vantajosa com o conhecimento e nos permitir fazer uso da informação sobre o mundo que estava de alguma forma, lá o tempo todo, se somente nós tivéssemos condições de sistematizá-lo em padrões para os quais somos capazes de dar sentido.

Para Cooper [16] experiências mentais são interessantes do ponto de vista epistêmico, já que podemos iniciar de uma posição de “ignorância” e adquirir novo conhecimento. A autora nos apresenta essa temática em dois campos do conhecimento, a saber, aqueles que restringem sua atenção aos experimentos pensados em ciências e aqueles que consideram experimentos pensados em ciências e filosofia caminhando juntos. De maneira geral, diz a autora, aqueles que consideram EM somente em ciências, não têm argumentado que esses experimentos são necessariamente diferentes de quaisquer outros EM. Suas restrições parecem resultar de uma estratégia de pura precaução, visto que vários autores não estão certos se EM estão posicionados similarmente na filosofia e nas ciências, portanto, só falam sobre áreas onde estão convencidos sobre a certeza de sua

justificativa de trabalho. Cooper [16] concorda ainda que não há necessidade de uma delimitação rígida entre tais áreas e apresenta duas razões pelas qual esta seja a melhor maneira de se proceder. Primeiro, sob o ponto de vista da simplicidade seria interessante uma justificativa unificada de experimentação mental e a única maneira de se descobrir se há uma justificativa unificada aceitável é tentando construir uma. Segundo, a idéia de que ciência e filosofia sejam áreas radicalmente distintas, a autora admite tratar-se apenas de ceticismo. Dessa forma, ela concorda que os EM possam ser empregados para responder diferentes tipos de questionamentos, no entanto, não concorda que estes correspondam a diferentes tipos de experiências. Não é plausível pensar que há processos mentais distintos, considerando como as coisas são ao descrevê-las e ao validá-las.

Vários autores rejeitam que os experimentos mentais possam ser classificados como argumentos dedutivos. Alguns destes como, por exemplo, Sidelle [17] considera que não são argumentos, mas trabalham através de conexões com argumentos. Os diferentes atributos acerca das experiências mentais podem fazer com que a reflexão sobre fenômenos mobilizem a imaginação admitindo a migração de conceitos e teorias entre diferentes campos dos saberes. Admite-se que muitas vezes a imaginação é solicitada, sem questionar a precariedade do conhecimento, que estaria inscrito no seu próprio caráter social e construído.

É importante salientar que não se trata aqui, neste artigo, de se buscar uma definição para os experimentos mentais como uma classe muito destacada de outros exercícios mentais antecipatórios. Vários autores dentre os que consultamos discutem e problematizam as experiências mentais executadas no âmbito de diferentes campos do conhecimento. Há, portanto, um arcabouço teórico que reúne diferentes visões de EM, das quais podemos refletir sobre o que tem sido feito e o que existe em demanda, para compreender e fazer uso mais significativo dessas experiências.

4. Experimentos mentais e o ensino de ciências

Ao planejar, cuidadosamente, um experimento científico a ser executado por seus alunos, o educador está diante de uma elaboração mental que vai se traduzir em seu análogo no laboratório. Dito de outra forma, o experimento vai ser “real”, ou seja, “realizado” no laboratório e, se explorado corretamente, pode conduzir a um ganho de conhecimento por seus executores. Ao contrário dos experimentos físicos, as experiências mentais nunca tiveram uma metodologia prescritiva similar, que fosse sistematizada para as atividades ditas como especificamente didáticas.

A natureza dos EM e seus usos na educação têm sido pouco enfatizados como modalidade de ensino e

aprendizagem de fenômenos. Embora Mach [7] tenha sido um dos primeiros a defender a importância da filosofia e, em especial os EM, na educação em ciências, suas contribuições não alcançaram na época um significativo espaço no cenário educacional, mostrando-se quase que totalmente ignoradas no mundo de língua inglesa. Mach [7] argumenta que experimentos mentais são importantes não apenas para questionar mas também como atividade de desenvolvimento mental. Nesse sentido, essas experiências são importantes para o estudante, mas o ganho com este método é imensurável para o professor, pois o possibilita conhecer as ideias e os conceitos fundamentais que os estudantes trazem sobre os conhecimentos estudados.

Matthews [18], por sua vez, destaca a importância do valor didático dos EM quando se pede aos estudantes que antecipem mentalmente o resultado de um experimento. Trata-se de um processo que privilegia o uso da mente e revela o que o estudante pensa acerca dos conceitos relevantes que estão sendo investigados. Para alguns estudantes pode parecer óbvio, enquanto outros irão conjecturar resultados não usuais e até estranhos. Os processos pensados encorajam os estudantes envolvidos na criação de novos fatos, produzindo até novas explicações. A título de ilustração, lembramos alguns desses experimentos considerados clássicos, pelos seus significados na elaboração do pensamento científico que já foram e continuam a serem utilizados nas aulas de física: queda de corpos de Galileu; balde de Newton; demônio de Maxwell; microscópio de raios-gama de Heisenberg e o experimento da dupla fenda de Young.

As experiências mentais consolidaram-se como eventos importantes que podem se tornar excelentes oportunidades de aprendizagem, pelas possibilidades de articulação com outros saberes. Além disso, as fontes históricas e epistemológicas de tais experiências representam, atualmente, um grande volume de dados que podem ser pesquisados, na perspectiva de instrumentalizar professores e estudantes na busca de estratégias que melhorem a qualidade da educação. Nessa perspectiva, em termos de especificidades de áreas de conhecimento, destacamos variados aspectos que, inevitavelmente, se configuram fundamentais para a compreensão de experimentos mentais. Do ponto de vista teórico, julgamos que esses aspectos permitem interpretar algumas variáveis que efetivamente contribuem para a identificação e/ou a interpretação de conhecimentos essenciais da trajetória cognitiva dos estudantes e suas necessidades de aprendizagem.

Na literatura internacional, principalmente a de língua inglesa, encontramos diversos fatores que validam o papel dos EM no ensino das ciências e, embora sejam tomados de exemplos conhecidos e estudados há tempos, principalmente na área da física, alcançaram pouco êxito em relação ao ensinar e aprender ciências. Mais recentemente os EM foram utilizados como materiais educacionais ao vinculá-los com os conceitos e

princípios da física do século XX.

Exemplos relevantes de atividades que encorajam o exercício do pensamento podem ser encontrados em diferentes publicações, como em Lattery [19]. Inspirado pelo trabalho de Galileu, ele desafiou um grupo de estudantes a explorar a lei das cordas num laboratório durante o desenvolvimento de uma pesquisa. Neste experimento, os estudantes foram convidados a efetuar medidas, levantar hipóteses, testar suas previsões, comparar seus dados com os dados do modelo básico e a considerar os erros como fontes de reflexão e busca de soluções para o problema em questão. Como reflexão final, o autor destaca que os estudantes facilmente entediam a questão e rapidamente emitiam suas opiniões, pois durante a discussão dos casos extremos do problema, como ângulos muito grandes ou muito pequenos, hipóteses foram propostas e defendidas pelos estudantes. Atividades dessa natureza ocupam a mente e revelam quais as crenças dos estudantes sobre um determinado conceito que está sendo investigado. Para alguns estudantes, esta forma de experimento poderá se mostrar óbvia, enquanto que outros irão conjecturar os resultados de uma maneira não usual, por exemplo, fazendo associações.

Os EM mostram-se desafiadores e configuram-se como fontes importantes de ideias, quando envolvem problemas apropriados. Nessa perspectiva, de acordo com Valentzas [20], uma forma de motivação para familiarizar os estudantes poderia incluir atividades que enfatizam o entendimento da convenção conceitual, as estratégias de questionamento, as ferramentas usadas na comunicação dos resultados de tais questionamentos e o papel e mecanismos do trabalho colaborativo entre cientistas e, conseqüentemente, entre os estudantes. Tais procedimentos nos mostram que muitas atividades envolvendo conhecimentos de física clássica ou da mecânica quântica, se bem conduzidas, proporcionarão uma aprendizagem mais significativa. De acordo com Sanmarti e cols. [21], a exposição das ideias que explicam as hipóteses, bem como sua discussão, são processos interativos utilizados para interpretar fenômenos e são fundamentais, na medida em que se aplicam às novas experiências e a novos problemas.

O experimento mental sobre o demônio de Maxwell, tal como discutido por Leff [22], mostra que sua discussão em situação de aula pode ser fundamental para o ensino e, em particular, para a história do conceito de entropia, embora a relevância de tal estudo não se limite puramente ao seu aspecto pedagógico. Um dos pontos fundamentais de todo o exercício envolvendo este experimento é mostrar que a segunda lei da termodinâmica não seria violada. Em suas várias formulações, o experimento do demônio de Maxwell pode ser útil em situação de ensino-aprendizagem, quando o estudante identifica falhas nos argumentos apresentados para um fato estabelecido, ou de uma afirmação específica, ou envolvendo uma previsão futura, ou a apresentação de

uma explicação e, assim, se coloca diante de novas perspectivas, sobre antigas questões.

De acordo com Matthews [23], é fundamental reconhecer que o sentido das palavras e conceitos depende dos contextos intelectuais em que ocorrem, e que estes podem mudar no decorrer do tempo. Portanto, tratar o conceito é, sob vários aspectos, dar ao estudante oportunidade de um encontro com a história, diferente daquela contada pelo último colaborador de um livro texto.

Tendo em mente essas questões podemos, neste momento, visualizar os EM como uma das possibilidades de ordenar e oferecer capacidades cognitivas mais amplas e complexas, por meio de instâncias discursivas fecundas e dialógicas.

Em dois artigos bastante interessantes, Helm e Gilbert [24] e posteriormente Helm, Gilbert e Watts [25] ao discutirem a natureza dos EM, avaliam os critérios estabelecidos por Thomas Kuhn [6] para sua validade na educação em física, examinando inclusive a atitude de professores e alunos quanto ao seu uso. De acordo com Kuhn, o sucesso na condução de um EM reside inteiramente nas informações disponíveis à mão. Os experimentos mentais devem trazer alguma luz àqueles que os abordam, seja com relação à sua concepção sobre algum conceito, seja com relação acerca do mundo que o cerca. Duas são as características exigidas por Kuhn para a validade de um EM. Em primeiro lugar, ele deve permitir a abordagem de conceitos segundo os mesmos critérios com os quais eles já foram examinados anteriormente. Em segundo lugar, o conflito que põe em confronto os interlocutores deve ser tal que já os tenha confrontado anteriormente. Helm e Gilbert [24] se propuseram a submeter experimentos mentais propostos por Einstein a estes critérios kuhnianos e mostraram que alguns deles não atendem aos dois critérios simultaneamente. Ao examinar os experimentos em seus devidos detalhes, os autores apontam algumas características interessantes das elaborações einsteinianas acerca destes exercícios mentais, mostrando inicialmente que ele conhecia bem as potencialidades dos EM e sua forma de apresentação, como se depreende de um trecho de seu trabalho clássico de 1905: “Estabelecemos assim por meio de certas experiências físicas (idealizadas) o que se deve entender por sincronismo de relógios situados em repouso[...]” [26, p. 51].

Ao propor que se imagine um trem em movimento passando por uma plataforma, com um observador em ambos, Einstein apela para a experiência comum do leitor no momento de estabelecer as bases da descrição do movimento de um objeto em movimento uniforme observado a partir de diferentes referenciais. Outro cuidado especial tomado por Einstein foi o de estabelecer condições de idealização no sentido de remover possíveis interferentes na condução do experimento. Assim, ele especifica que “devemos imagi-

nar que o ar acima da plataforma tenha sido removido...” [26, p. 126].

No prefácio de seu livro, Einstein identifica seu público-alvo ao afirmar que a obra está direcionada àqueles que “[...] não são versados no formalismo matemático da física [...]” [26, p. 127] e que presumivelmente tenham tido uma “educação padrão, correspondente àquela de curso universitário [...]”, o que pressupõe o conhecimento mínimo de conceitos newtonianos como comprimento, tempo e velocidade.

Helm e Gilbert [23] apontam outros autores de EM cuja análise põe em evidência a questão da linguagem a ser dominada pelo público-alvo. Num experimento sobre relatividade, proposto por Bondi (1965) (*apud* Helm e Gilbert [24]) os autores apontam uma diferença de estratégia com relação à abordagem de Einstein. Enquanto que este usa os EM qualitativamente para preparar o leitor para deduções quantitativas de resultados relativísticos, Bondi parte de uma quantidade física simples, já estabelecida no experimento (o fator k , da relação de velocidade entre duas naves espaciais e feixes de luz trocados entre elas e a Terra), para deduzir os mesmos resultados. A obra de Bondi faz parte de uma série direcionada aos “jovens estudantes e leigos” (Bondi, *apud* Helm e Gilbert [24]), o que nos faz pressupor que seriam exigidos deles os mesmos conhecimentos que os foram na obra de Einstein.

A aplicação dos EM no estudo da mecânica quântica também é abordado no trabalho de Helm e Gilbert. [24] Em particular, Heisenberg concebeu o princípio da incerteza e rapidamente idealizou o experimento do microscópio de raios gama para checar sua validade. Com efeito, Helm e Gilbert comentam que o fato deste experimento poder ser analisado de modo relativamente simples usando ideias básicas acerca da dualidade onda-partícula permitiu que o mesmo estivesse ao alcance da compreensão dos não-especialistas.

Por outro lado, a famosa disputa entre Einstein e Bohr acerca dos alcances da teoria quântica foi conduzida por meio de experimentos pensados engenhosamente elaborados, em particular por Einstein, Podolski e Rosen (1935), (*apud* Helm e Gilbert [24]) e, embora sobre esse aspecto Feyerabend tenha concluído que “Bohr e Einstein argumentaram a partir de pontos de vista incomensuráveis” (Feyerabend, [27]), o experimento mostrou-se valioso para que o grupo de Copenhague compreendesse a natureza dessa incomensurabilidade [24].

Ao final de seu trabalho, Helm e Gilbert comentam que

Os experimentos mentais em mecânica quântica [...] dependem de uma ‘educação padrão’ que conduzem os aprendizes aos limites dessa teoria. Desse modo, ao lado de ‘velhas’ concepções, como posição e momento, que tiveram que ser modificadas no

contexto da nova teoria, novos conceitos tais como fóton e Ψ sublinham a estrutura e interpretação desses EM. A explícita introdução de Ψ e sua interpretação como amplitude de probabilidade na discussão de um experimento mental como, por exemplo, o problema da interferência de elétrons na dupla fenda pode ser preparado para explorar a compreensão de aprendiz em comportamento ondulatório em geral e sobreposição de ondas em particular. Além do mais, isso pode ser feito antes de o estudante tomar contato formal com a equação de Schrödinger. Nesse caso [...] a função dos EM é a de promover e ampliar a aceitação de uma nova teoria. [23, p. 130].

Helm e Gilbert concluem seu trabalho lembrando que muitos experimentos mentais que tiveram enorme relevância histórica, tais como o microscópio de raios gama de Heisenberg e o experimento de EPR, vêm sendo continuamente reelaborados em novas versões, o que sugere que entre os cientistas há um consenso explícito de que eles se constituem efetivamente em instrumentos didáticos bastante valiosos.

Os EM mostram-se desafiadores e configuram-se fontes importantes de ideias quando envolvem problemas apropriados. Nessa perspectiva, de acordo com Valentzas, Halkia e Skordoulis [20] uma forma de motivação para familiarizar os estudantes poderia incluir atividades que enfatizam:

- O entendimento da convenção conceitual;
- Estratégias de questionamento;
- Ferramentas usadas na comunicação dos resultados de tais questionamentos;
- O papel e mecanismos do trabalho colaborativo entre cientistas e, conseqüentemente, entre estudantes.

Tais procedimentos mostram que muitas atividades de conhecimentos de física clássica, se bem conduzidas, sem dúvida proporcionarão uma aprendizagem mais significativa. De fato, a exposição das ideias que explicam as hipóteses, bem como a discussão, são processos interativos utilizados para interpretar fenômenos e são fundamentais, à medida que se aplicam às novas experiências e a novos problemas, como afirmam Sanmarti e cols. [21].

De acordo com Matthews [23] é fundamental reconhecer que o sentido das palavras e conceitos depende dos contextos intelectuais em que ocorrem, e que mudam no decorrer do tempo. Portanto, tratar o conceito é, sob vários aspectos, dar ao estudante oportunidade de um encontro com a história que vai além dos saberes a ensinar presentes nos livros didáticos.

Mach [7] chama a atenção para a questão do erro como desafiador do próprio sentimento, atentando para

a diferença sobre o que é lógico fisicamente ou associativamente determinado e, por fim, um ensinamento para discriminar entre o que pode ser suposto e o que não pode. Nessa perspectiva, os EM são potencialmente didáticos, de um lado podem encorajar os estudantes do desenvolvimento da imaginação e da criatividade, e de outro, permitem que aqueles estudantes mais inseguros adquiram com a mediação do professor, confiança para prosseguirem na discussão, na busca de solução e compreensão do fenômeno.

5. Experimentos mentais e o livro didático

O livro didático desempenha papel fundamental nas instituições de qualquer nível de ensino, numa tentativa de organizar os conteúdos, orientar a prática do professor e, finalmente constituir-se numa fonte importante de estudos para o aluno. De modo geral, encontramos nos livros didáticos a adoção de abordagens semelhantes, onde é dada pouca ênfase para contextos de entidades não observáveis sobre as quais os estudantes deveriam ampliar suas explicações e poderiam também estabelecer relações específicas com conceitos conhecidos, utilizando novas ideias para explicar novos fatos, como discutem Sanmartí e cols. [21]. Embora a leitura exija certo grau de recriação, dentro de certos limites, o leitor atua simultaneamente num espaço de liberdade e num espaço de regularidades e restrições, portanto, a pouca ênfase da qual estamos nos referindo pode se constituir em obstáculos que impedem o aluno de conviver com o potencial didático e interpretativo do livro.

É relevante observar que, não obstante a necessidade de mudança no tratamento dos conceitos fundamentais que ilustram a evolução do conhecimento científico, poucos artigos têm dedicado espaço aos experimentos mentais, no sentido de discutir suas implicações nos campos dos saberes escolares, de viver eventos variados de interpretação, inclusive fora da escola.

Helm, Gilbert e Watts, [25] se propõem a avaliar o papel dos experimentos mentais do ponto de vista educacional, trazendo as seguintes questões: como são apresentados e usados os EM em livros texto? Por que e como os professores incluem os EM em suas explicações? O que compreendem os estudantes a partir dos EM? Na primeira etapa do texto os autores examinam alguns livros didáticos para então concluir que os EM são introduzidos de modo que os estudantes devem evocar concepções decorrentes de experiências prévias (mesmo que de senso comum). Tais concepções são elaboradas no sentido de causar um conflito cognitivo, obrigando a esmiuçar os fundamentos destas experiências.

A análise de livros destinados a estudantes mais avançados, em que a teoria de Einstein é abordada como EM na sua forma original, sugere que a chave para a

compreensão desta teoria reside na necessidade de os estudantes terem familiaridade, aceitação ou credibilidade nas situações apresentadas, capacidade de aplicar “conceitos antigos” numa variedade de situações e, por fim, predisposição a penetrar numa situação paradoxal estabelecida pelo próprio experimento mental. Afirmam Helm, Gilbert e Watts [25] que os experimentos sugeridos nos livros textos parecem atender adequadamente aos requisitos inerentes ao ensino, mostrando que as situações sugeridas são facilmente compreensíveis e aplicadas e o paradoxo gerado é intrigante. Neste trabalho, os autores abordam o experimento mental da dupla fenda com elétrons, tal como proposto, com algumas modificações, por Feynman. Ao leitor é apresentada uma situação em que os elétrons são detectados via uso de um alto-falante, antes dos resultados serem apresentados de modo mais formal. Nesse ponto, fica claro que a linguagem matemática adotada não é ainda a da mecânica quântica, mas em seguida o experimento é revisitado de modo que suas implicações são usadas para se introduzir a notação de Fermi e de Dirac. O paradoxo apresentado refere-se ao comportamento “não-usual” do elétron quando comparado às figuras de interferência, obtidas no caso da trajetória das partículas (projéteis) e de uma frente de ondas. Outra abordagem interessante adotada por alguns livros didáticos é a de apresentação e condução mental de experimentos reais que foram importantes no desenvolvimento da ciência.

Quanto ao uso dos EM, Helm, Gilbert e Watts [25] comentam que os professores de física o fazem de modo sistemático, provavelmente por sua característica de abordarem “diretamente” os fenômenos físicos, sem apresentarem os confusos obstáculos dos detalhes experimentais necessariamente presentes numa descrição mínima, mas razoavelmente completa dos experimentos reais. Com efeito, os EM parecem ser um atalho curto e rápido para a percepção de resultados teóricos importantes. Outros aspectos fazem dos EM exercícios interessantes. Quando abordados, os professores parecem, aos alunos, que estão “falando de física”, isto é, dando ênfase a conceitos e princípios físicos, sem aprofundamento matemático, o que é usualmente reforçado pela simplicidade dos “arranjos experimentais” propostos.

Os experimentos mentais parecem exercer papel fundamental dentro desse modelo. Eles têm capacidade de despertar insatisfação com respeito a conceitos existentes. Sua estruturação física é bastante econômica em termos de condições de contorno, conduzindo a resultados e conclusões de modo rápido e eficaz. Em alguns casos, relatam os autores, os estudantes são capazes eles mesmos de gerar novos EM a partir de outros propostos anteriormente.

Valentzas, Halkia e Skodoulis [20] investigaram o papel dos EM em atividades envolvendo estudantes na educação secundária. O foco de investigação desses autores estava centrado principalmente nos seguintes

tópicos: o princípio da incerteza (teoria quântica); o princípio da equivalência (teoria geral da relatividade) e conseqüências do princípio da constância da velocidade da luz sobre os conceitos de espaço e tempo (teoria especial da relatividade), nos livros didáticos popularmente utilizados na Grécia. A investigação foi realizada em duas fases descritas a seguir:

A – Detecção, seleção e estudo dos livros na língua grega, mais populares, enfatizando os experimentos mentais mais indicados para divulgação da ciência referentes aos três tópicos acima citados. Foram observados os seguintes tópicos: o trem de Einstein, o elevador de Einstein e o Microscópio de Heisenberg. Os resultados indicaram que 93% dos livros utilizados apresentam os EM como versão simplificada do original e o formalismo matemático é omitido ou mesmo bastante simplificado.

B - realização da base empírica com três (3) equipes de estudantes que não tiveram contato anterior com os temas propostos. Como aspecto positivo dessa fase, pode ser destacado o forte engajamento dos estudantes, possibilitando a busca da argumentação entre eles, ajudando significativamente na interação com os estudantes que apresentavam alguma dificuldade com os temas propostos, o enriquecimento do grau de compreensão de conceitos relevantes e a compreensão da terminologia adotada, até mesmo para aqueles estudantes que apresentaram maiores dificuldades com os conceitos apresentados.

Na perspectiva de ressaltar a importância dos EM, no ensino de ciências Gilbert e Reiner [28] discutem o potencial de tais experimentos na educação científica. No texto *Thought experiments in science education: potential and current realization*, os autores apresentam uma tipologia de EM, enriquecendo com exemplos retirados da história da física, discutindo a sua emergência no desenvolvimento de conceitos como complemento no desenvolvimento de trabalhos práticos convencionais. Foram analisados três livros didáticos de física empregados no ensino superior, adotados em três diferentes instituições de ensino. Os autores encontraram que os potenciais didáticos dos EM não são considerados em tais livros, e quando foram encontrados, estes potenciais estavam integrados a outros dispositivos pedagógicos e não exclusivamente ao desenvolvimento de atividades envolvendo EM.

Outra questão premente no estudo dos EM é se os experimentos mentais proporcionam uma ponte entre conhecimento existente e conhecimento a ser apreendido, e como podemos alcançar este objetivo?

Ao professor compete mediar o processo de leitura, percebendo os limites interpretativos postos, tanto pelo texto como pelo ato de ler. Nesse processo, os questionamentos, as reflexões e as contestações, os desacordos e os confrontos intelectuais são situações privilegiadas que possibilitam a construção de significados, como exigem os EM. Desse modo, não há como relegar as potencialidades didáticas de se explorar tal modalidade

de exercício mental, no sentido de um forte ganho de capacidade reflexiva e de aprendizado por eles proporcionado.

6. Considerações finais

Neste estudo buscamos algumas contribuições que envolvem habilidades criativas para serem executados no laboratório da mente. Os referenciais teóricos consultados, tanto aqueles favoráveis, quanto aqueles que ressaltam as limitações dos experimentos mentais nos possibilitam inferir que sob diferentes perspectivas, os estudos relacionados à EM podem ser potencialmente úteis na educação em ciências. É fundamental considerar também que há na literatura propostas explícitas de EM que abrem variadas possibilidades de providenciar um suporte positivo para a teoria, ao mesmo tempo em que podem desenvolver o senso de satisfação e entendimento nos estudantes. Finalmente, esperamos que os aspectos aqui pontuados possam contribuir para uma reflexão sobre a utilização de EM como ferramenta útil para o tratamento de problemas conceituais e teóricos, principalmente as interpretações que nos levam a inferir sobre os seus resultados no ensino de conceitos na física.

Como última consideração, destacamos que, no experimento da balança, caso a mosca comece a voar, a indicação do mostrador não se modificará, a menos momentaneamente, por conta do pequeno impulso que ela exerce sobre o prato para alcançar vôo. Deixamos ao leitor a tarefa de buscar ou raciocinar sobre o porquê do valor não mudar, convidando-o assim a participar do processo de construção e elaboração de seus conhecimentos através de um experimento mental.

Referências

- [1] T. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Perspectiva, São Paulo, 1964).
- [2] K.R. Popper, in *The Logic of Scientific Discovery* (Hutchinson, London, 1968), p. 442-456, 4a ed.
- [3] A. Georgiou, *Thought Experiments in Physics Problem Solving: On Intuition and Imagistic Simulation*. PhD Thesis in Education Research, University of Cambridge, Cambridge, 2005.
- [4] T.S. Gendler, in *Encyclopedia of Cognitive Science*, editado por L. Nadel (Nature Publishing Group, New York, 2003), p. 388-394.
- [5] J. Brown, *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences* (Routledge, London, 1991).
- [6] T. Kuhn, *A Tensão Essencial* (Edições 70, Lisboa, 1977).
- [7] E. Mach, *Knowledge and Error: Sketches on the Psychology of Enquiry* (D. Reidel Publishing Company, Boston, 1926), p. 134-147.
- [8] K.V. Wilkes, *Real People: Personal Identity without Thought Experiments* (Clarendon Press, Oxford, 1988).
- [9] R.J. Snooks, *Foundations of Chemistry* **8**, 255 (2006).
- [10] M. Reiner and L.M. Burko, *Science & Education* **12**, 365 (2003).
- [11] M. Reiner, *International Journal of Science Education* **20**, 1059 (1998).
- [12] J. Norton, in *Contemporary Debats in the Philosophy of Science*, edited by C. Hitchcock (Blackwell, Malden, 2002).
- [13] T.S. Gendler, *Science* **49**, 397 (1998).
- [14] J.D. Norton, *Canadian Journal of Philosophy* **26**, 333 (1996).
- [15] T.S. Gendler, *Thought Experiment. on the Powers and Limits of Imaginary Cases* (Garland Publishing, New York, 2000).
- [16] R. Cooper, *Thought Experiments. Metaphilosophy* **36**, 328 (2005).
- [17] A. Sidelle, *Noûs* **32**, 423 (1998).
- [18] M.R. Matthews, *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science* (Routledge, Education Research Library, New York and London, 1994), p. 95-105.
- [19] M.J. Lattery, *Science & Education* **10**, 485 (2001).
- [20] A. Valentzas, K. Halkia and C. Skordoulis, *Thought Experiments in the Theory of Relativity and in Quantum Mechanics: Their Presence in Textbooks and in Popular Science Books* (University of Athens, Athens, 2000).
- [21] N. Sanmartí, M. Izquierdo and P. Garcia, *Cuadernos de Pedagogía* **281**, **54** (2002).
- [22] H.S. Leff and A.F. Rex, *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing* (Adam Hilger and Princeton University Press, Princeton, 1990).
- [23] M.R. Matthews and Ernest Mach in *History, Philosophy and Science Teaching: Selected Readings* (OISE Press/Teacher's College Press, Toronto, 1991).
- [24] H. Helm and J. Gilbert, *Physics Education* **20**, 124 (1985).
- [25] H. Helm, J. Gilbert and M. Watts, *Physics Education* **20**, 211 (1985).
- [26] A. Einstein, in *Textos Fundamentais em Física Moderna: O Princípio da Relatividade* (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1958), 3ª edição.
- [27] P. Feyerabend, in *Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*, organizado por I. Lakatos e A. Musgrave (Cultrix/EDUSP, São Paulo, 1970).
- [28] M. Reiner and J. Gilbert, *International Journal of Science Education* **22**, 489 (2000).