

CONHECIMENTO, REALIDADE E ENSINO DE FÍSICA: MODELIZAÇÃO EM UMA INSPIRAÇÃO BUNGEANA

Knowledge, reality and Physics teaching: modeling in a bungean inspiration

Juliana Machado¹
Sonia Maria Silva Corrêa de Souza Cruz²

Resumo: Neste trabalho procurou-se aprofundar uma reflexão epistemológica sobre a dinâmica da construção de modelos na produção do conhecimento científico, a partir de uma perspectiva epistemológica realista crítica e, a partir desta reflexão, propor uma forma de entender a modelização no ensino de Física, baseada nesta concepção. Pela profundidade da análise dos modelos que desenvolveu e, também, pela compatibilidade de suas concepções com o contexto da presente pesquisa, utilizaremos a teorização proposta por Mario Bunge como referencial para desenvolver estas reflexões. Buscando transpor as considerações deste autor para o contexto do ensino e, também, articulando-as com outras discussões consistentes sobre a construção de modelos no ensino de Física, apresenta-se um entendimento sobre a modelização em sala de aula a partir de uma inspiração bungeana. A modelização, nesta perspectiva, tem um enfoque na exploração do aspecto processual da Ciência, em particular, da relação entre as teorias científicas e a realidade.

Palavras-chave: Modelização. Ensino de Física. Realismo crítico.

Abstract: In this study we sought to deepen an epistemological reflection on the dynamics of model building in the production of scientific knowledge, from a critical realist epistemological perspective, and from this discussion, propose a way of understanding the modeling in physics teaching based in this conception. For the depth of analysis of the models developed and also the compatibility of his views with respect to this research, we use the theory proposed by Mario Bunge as a reference for developing these ideas. Attempting to transpose the author's considerations into the context of education and also linking them with other consistent discussions on the construction of models in physics teaching, an understanding of the modeling in the classroom from a Bungean perspective is presented. Modeling in this perspective has a focus on the exploration of the procedural aspects of science, in particular the relationship between scientific theories and reality.

Keywords: Modeling. Physics teaching. Critical realism.

¹ Licenciada em Física, mestre em Educação Científica e Tecnológica. Docente, Colégio de Aplicação, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, Brasil. <juliana.fsc@gmail.com>

² Licenciada em Física, doutora em Educação. Docente, Departamento de Física, UFSC. Florianópolis, SC, Brasil. <sonia@fsc.ufsc.br>

¹ Rua Professor Belarmino Correa, 170
Trindade - Florianópolis, SC
88.036-140

Introdução

Pietrocola (1999, p. 221), ao tecer críticas à perspectiva epistemológica construtivista, assevera que “o mundo e sua cognoscibilidade são os motivos preferenciais do fazer científico, assim como deveriam ser aqueles da educação científica”. Desse modo sugere a existência de um objetivo comum entre a educação científica escolar e a atividade da comunidade científica, que é o de “ampliar nosso conhecimento sobre a natureza gerando imagens adequadas do mundo” (PIETROCOLA, 1999, p. 8). Mas como se dá esta ampliação do nosso conhecimento sobre a natureza? Responder a este problema requer um entendimento da relação existente entre a realidade física e o conhecimento científico, e pode indicar elementos importantes do aspecto processual da construção do conhecimento que precisam estar presentes na educação científica a fim de favorecer uma imagem adequada do caráter deste conhecimento. É nesta direção que surgem as discussões sobre a Modelização no ensino de Ciências (MARTINAND, 1986; 1996).

Em uma perspectiva ampla, a Modelização se refere ao processo de elaboração de modelos ou à apropriação de modelos já construídos. É um termo, contudo, bastante polissêmico: no campo educacional, é possível encontrar compreensões bastante distintas sobre o significado na modelização no ensino de Ciências (KRAPAS et al., 1997). Não realizaremos aqui uma análise detalhada das divergências entre os diversos grupos que se debruçaram sobre este problema. Em lugar disso, procuraremos aprofundar uma reflexão epistemológica sobre a dinâmica da construção de modelos na construção do conhecimento científico, a partir de uma perspectiva epistemológica realista crítica, como já apontado por Pietrocola (1999), e, a partir desta reflexão, propor uma forma de entender a modelização no ensino de Física, baseada nesta concepção.

Pela profundidade da análise dos modelos que desenvolveu e, também, pela compatibilidade de suas concepções com o contexto da presente pesquisa, utilizaremos a teorização elaborada por Mario Bunge (1974; 1980; 1985; 1998) como referencial para desenvolver uma compreensão de modelização. A preocupação em valorizar o conhecimento científico como potencial gerador de explicações para o mundo, muito presente nas discussões contemporâneas sobre a construção de modelos no ensino, encontra também suporte na obra de Bunge, por meio de sua defesa do realismo crítico. Portanto, a compreensão deste autor, em nossa perspectiva, é, ao mesmo tempo, adequada para embasar possíveis transposições de considerações epistemológicas para o contexto da educação científica, e frutífera para avançar no entendimento de modelização para o ensino de Física.

Construção de modelos na ciência: a contribuição de Mario Bunge

Para Bunge (1985), nem toda investigação científica procura conhecimento objetivo. O conhecimento científico, o qual se caracteriza por ser racional³, sistemático e verificável

³ Bunge (1985) distingue sete conceitos de racionalidade: conceitual, lógica, metodológica, gnoseológica, ontológica, avaliativa e prática. A *racionalidade científica* corresponde à aceitação de todas as sete racionalidades, e é defendida pelo autor.

(por consequência, falível), é objetivo apenas no caso das ciências cujo objeto existe fora delas mesmas, isto é, as ciências que tratam de fatos. É o caso da Física, da Química, da Biologia, da Sociologia. São as *ciências factuais*. A Lógica e a Matemática Pura, por outro lado, criam, elas próprias, o seu objeto de estudo. Tratam de entes que não existem fora da mente humana, entes ideais. São chamadas, pelo autor, de *ciências formais*. Enquanto os enunciados das ciências formais são provados (demonstrados), os das ciências factuais precisam ser verificáveis pela experiência⁴. A prova ou demonstração é final e definitiva, a verificação é sempre provisória.

Em vista destas distinções, o autor alerta para a necessidade de uma análise dessas ciências que seja também distinta (BUNGE, 1998). Os referentes das ciências factuais são objetos reais ou concretos (o autor usa, frequentemente, o termo “*coisas*”⁵): estes objetos existem no sentido material, encontram-se em algum estado e são capazes de mudança. Os referentes das ciências formais, por outro lado, existem conceitualmente: estes objetos conceituais ou “*construtos*”⁶ são entendidos como uma criação mental (embora não sejam objetos psíquicos, como uma invenção ou uma lembrança) (BUNGE, 1980).

Para Bunge (1974), o esforço de teorização nos diversos campos de conhecimento é uma medida do progresso científico, mais do que a acumulação de dados, pois é através da construção de teorias que se torna possível a apreensão da realidade. Por si só, porém, as teorias não fornecem esta apreensão, por serem abstrações produzidas pela razão humana. No extremo oposto ao da instância teórica, encontra-se o domínio empírico que, sozinho, é igualmente incapaz de promover um avanço em nosso conhecimento do mundo. Desta aparente dicotomia origina-se o papel mediador do modelo, entidade que propicia a interação entre teoria e realidade e que, deste modo, provê um incremento ao conhecimento científico.

Na perspectiva bungeana, o sujeito cognoscente não apreende o objeto tal como ele é, mas tal como ele é modificado por suas próprias operações (BUNGE, 1998, p. 23). Consequentemente, uma teoria científica não se aplica diretamente ao objeto real ao qual se refere, mas a uma representação desse objeto real. Essa representação é chamada por Bunge (1974) de objeto-modelo. Nas palavras do autor,

A conquista conceitual da realidade começa, o que parece paradoxal, por idealizações. Extraem-se os traços comuns de indivíduos ostensivamente diferentes, agrupando-os em espécies (classes de equivalência). Fala-se assim do cobre e do homo sapiens. É o nascimento do objeto-modelo ou modelo conceitual de uma coisa ou de um fato. (BUNGE, 1974, p. 13)

⁴ “É importante advertir, com efeito, que a experimentação está longe de ser o único juiz das teorias factuais, ou sequer o último. As teorias se contrastam com fatos e com outras teorias [...] as teorias não se constituem do nada, mas sobre certas bases: estas a sustentam antes e depois da prova [empírica]; a prova, se tem êxito, provê os apoios restantes da teoria...” (BUNGE, 1998, p. 78, tradução nossa).

⁵ Termo original em espanhol: “*cosas*” (BUNGE, 1985, tradução nossa).

⁶ Existem quatro classes de construtos: as proposições, que são construtos que podem ser avaliados quanto ao seu grau de verdade; os conceitos, que são as unidades com que se constroem as proposições; contextos, que são conjuntos de proposições formadas por conceitos com referentes comuns e teorias; e os que são contextos fechados com respeito às operações lógicas (BUNGE, 1980).

O objeto-modelo representa apenas parcialmente o seu referente concreto e fatalmente ignora alguns dos seus aspectos. A escolha dos aspectos relevantes será determinada pelo objetivo do investigador. Em todo caso, o objeto-modelo é inevitavelmente parcial e aproximativo. Embora seja uma versão idealizada e abstraída do objeto real, concebida de forma a representar apenas parte dos traços do seu referente, a construção dos objetos-modelo envolve operações que não são arbitrárias, mas sim objetivas, isto é, com uma intenção realista.

Para compreender, por exemplo, o comportamento de um gás confinado em um recipiente, começa-se atribuindo determinadas características a este objeto que, embora não sejam satisfeitas em um gás real, procuram apreender os aspectos essenciais. Uma primeira aproximação consiste em abstrair as variações de energia durante as colisões entre moléculas e, também, a ação das forças eletromagnéticas entre as moléculas, além de idealizar que o volume de cada molécula é nulo. Essas considerações fazem parte do chamado “modelo do gás ideal”, o qual, em nossa terminologia, é na verdade um objeto-modelo.

Assim, embora a ciência factual busque compreender objetos concretos, ela o faz criando construtos que os representem. Tais objetos-modelo, porém, nada dizem a respeito do comportamento de seus referentes concretos. Grosso modo, são apenas um conjunto de características atribuídas a esses referentes⁷.

É possível propor objetos-modelo cada vez mais sofisticados, a fim de melhorar a aproximação com o referente real, mas não é possível testá-los a não ser que sejam incorporados em uma teoria geral⁸, dessa forma produzindo um modelo teórico.

O modelo teórico, às vezes também chamado pelo autor de “teoria específica”, é, portanto, a mediação entre teoria geral e objeto-modelo, resultando em um sistema hipotético-dedutivo. Em suma, é por meio do modelo teórico que podemos representar o comportamento e os mecanismos internos do objeto-modelo a partir da teoria geral.

Assim, se um planeta é modelado como uma massa pontual ou como uma bola, não se diz muita coisa. Somente pela assunção posterior segundo a qual um tal modelo satisfaz certas leis, em particular as leis do movimento, que conseguimos uma porção do conhecimento científico (BUNGE, 1974, p. 35).

Apesar de aparecer com frequência menor, a designação “teoria específica” é tida pelo autor como mais adequada, porque explícita que se trata de uma teorização referida a um particular objeto-modelo. Ele a utiliza ao expor mais uma conceituação desta entidade, ao afirmar que “toda teoria específica é, na verdade, um modelo matemático de um pedaço da realidade” (BUNGE, 1974, p. 10).

⁷ O “referente” é aquilo a que o construto se refere. Por exemplo, a temperatura é um construto que tem como referente os estados térmicos de algum sistema real.

⁸ As teorias gerais, como a Mecânica Clássica e a Teoria da Evolução, não se referem a coisas específicas, ao contrário, são potencialmente aplicáveis a qualquer parte da realidade a que se referem. Não podem ser, portanto, aplicadas diretamente aos objetos-modelo. Como consequência, as teorias gerais são incomprováveis, porque não é possível testá-las diretamente de forma empírica.

Por resultar do “encaixe” do objeto-modelo na teoria geral, o modelo teórico herdará deste o caráter parcial e aproximativo. Isso significa que esse modelo negligenciará alguns aspectos do seu referente real, empregando abstrações e idealizações. Mas, se o modelo em questão é demasiado simples para o problema que se tem, pode-se sempre complicá-lo, aproximando mais o objeto-modelo do seu referente real.

Assim, quando aplicamos a Mecânica Clássica ao movimento das moléculas de um gás ideal e calculamos a média desses movimentos sobre todas as moléculas (ou melhor, moléculas-modelo), obtemos um modelo teórico, que é a teoria cinética do gás ideal.

Este modelo teórico, confrontado com a experiência, fornece uma boa aproximação para o comportamento de um gás real em determinadas condições, mas não em outras. Nas que em que existe a necessidade de uma aproximação melhor, pode-se elaborar uma versão mais sofisticada do objeto-modelo, por exemplo, considerando o tamanho das moléculas e as influências das forças intermoleculares. Obtém-se, assim, o modelo teórico de van der Waals, o qual provê uma descrição um pouco mais próxima do comportamento real, ainda que bastante simplificada.

Embora possamos dizer que a teoria geral abrange um certo número de modelos teóricos, é incorreto afirmar, diz Bunge (1980), que os modelos teóricos estejam contidos na teoria geral. É, antes, o contrário: o modelo teórico implica a teoria geral, isto é, o genérico se deduz a partir do específico (BUNGE, 1980). Em outras palavras: o modelo teórico não é uma decorrência lógica da teoria geral, senão por outro motivo, pelo menos porque o objeto-modelo não está contido, como vimos, na teoria geral.

Além do sistema hipotético-dedutivo e, portanto, teórico, o termo “modelo” aparece também na obra de Bunge (1974) em referência a representações esquemáticas visuais de uma coisa: o autor utiliza para estes a expressão “modelos concretos”. Desenhos, animações, diagramas simbólicos, maquetes, análogos materiais são exemplos de modelos deste tipo.

Uma representação pictórica não substitui o objeto-modelo do tipo conceitual, exatamente porque não pode fazer parte de teorias. Enquanto a primeira é útil sobretudo por razões de natureza psicológica e didático-pedagógica, o segundo tem um poder de representação muito maior, por ser uma ideia teórica, uma “idéia que se pode enxertar em uma máquina teórica a fim de pô-la a funcionar e produzir outras idéias interessantes” (BUNGE, 1974, p. 26).

Existem muitas espécies de modelos teóricos, distribuídas de acordo com a profundidade exigida pelos objetivos da pesquisa. No extremo da superficialidade, temos as caixas pretas (BUNGE, 1974), providas apenas de entrada e saída, e com objetivo exclusivamente de descrição e previsão do comportamento, sem se preocupar com o mecanismo interno do objeto ou evento real ou suposto como tal. Alguns exemplos de teorias⁹ representantes dessa abordagem são: a cinemática, a termodinâmica, a óptica geométrica e a teoria da matriz do espalhamento.

⁹ Tanto as teorias gerais quanto os modelos teóricos podem ser interpretados pela noção de caixas. Bunge utiliza explicitamente ambos os termos (teoria e modelo) ao explicar e exemplificar as caixas. Isto se dá porque a ideia de caixas se refere a uma abordagem, e não a um particular objeto ou tema (BUNGE, 1974).

Na extremidade oposta do espectro, encontramos modelos teóricos aos quais interessa obter uma compreensão do mecanismo interno (hipotético) da coisa e, potencialmente, prever efeitos inauditos. Bunge (1974) denomina tais teorias específicas de caixas translúcidas¹⁰. A dinâmica, a mecânica estatística, a óptica física e a teoria quântica hamiltoniana são representantes dessa abordagem.

Entre esses extremos, encontramos modelos com níveis de profundidade intermediários, aos quais podemos nos referir como caixas semitranslúcidas¹¹. O critério comparativo do grau de “negritude” das teorias está sempre no aspecto específico que está sendo considerado, isto é, “ninguém poderia dizer que ‘x é mais fenomenológico que y’, mas, antes, ‘x é mais fenomenológico que y com respeito a z’” (BUNGE, 1974, p. 78).

Abordagens do tipo caixa-preta são, ao mesmo tempo, necessárias, porque são globais, simples e seguras, e limitadas, porque são sempre menos completas que suas correspondentes translúcidas, mais ricas, profundas e frutíferas.

Simbolicamente, a forma quantitativa de um modelo teórico que representa a interação do objeto ou sistema com seu ambiente pode ser representada como uma relação do tipo: $O = M.I$, na qual “I” se refere ao “estado inicial” do sistema (ou a entrada), “O” simboliza o “estado final” (saída), e M representa as propriedades do objeto ou sistema considerado (BUNGE, 1974).

Quanto mais “escurecida” for a caixa, tanto menos interessa o significado de M. Nas teorias de caixa-preta, M será tão-somente um símbolo, uma razão de ligação entre O e I. Por outro lado, nas teorias de caixa translúcida, M representa o mecanismo, isto é, a constituição e a estrutura do objeto (BUNGE, 1974). Podemos dizer que, nas teorias de caixa-preta, M representa uma variável interveniente, isto é, uma variável que medeia entre as variáveis independentes (O) e as variáveis dependentes (I). Nas abordagens do tipo caixa translúcida, por outro lado, M é um construto hipotético, e precisa ser imaginado mais que observado e medido.

A entropia, na termodinâmica, é uma grandeza que relaciona a quantidade de calor com a temperatura do sistema. Não há, nessa teoria, um referente concreto para a variável entropia. Tal referência é obtida com a Mecânica Estatística, teoria na qual a entropia é interpretada como uma medida da desordem microscópica de um sistema, um construto hipotético.

Na compreensão de Bunge (1974), o objetivo em longo prazo da teorização científica não é sintetizar a experiência, mas interpretar a realidade. Por isso, a constituição das caixas pretas é apenas um primeiro estágio na construção da teoria. Importa fazê-las evoluir para caixas translúcidas, do contrário, permanecem incompletas, porque a conquista teórica da realidade implica “uma explicação do inobservável e uma interpretação do observável em termos do inobservável” (BUNGE, 1974, p. 89). Um exemplo de ampliação em profundidade obtida pela invenção de mecanismos em termos de inobserváveis é a substituição das teorias de ação à distância por teorias de campos, como no caso gravitacional e no eletromagnético.

¹⁰ Teorias da caixa preta e caixa translúcida são também referidas por Bunge (1974) como fenomenológicas e representacionais, respectivamente.

¹¹ Bunge discute e justifica alguns exemplos de teorias do tipo caixa translúcida no livro “Teoria e Realidade”. O autor argumenta, por exemplo, que o eletromagnetismo clássico é uma teoria semifenomenológica, pois, apesar de ser uma teoria não-mecânica, lida com a estrutura de seus objetos e fornece uma interpretação dos processos eletromagnéticos (BUNGE, 1974).

Distintas representações de um mesmo objeto real podem ser vinculadas a diversos referenciais teóricos a fim de produzir modelos teóricos diferentes: os modelos são, por conseguinte, entidades que não podem ser reduzidas a resultados empíricos nem a derivações diretas de teorias, e cuja capacidade de fornecer conhecimento é, certamente, condicionada por esta característica. Ao contrário das teorias gerais e dos objetos-modelo, os modelos teóricos são suscetíveis de verificação experimental, proporcionando, assim, a interação entre os domínios teórico (no qual estão contidas as abstrações e idealizações produzidas pelos sujeitos) e empírico.

A relação entre teoria e realidade na educação científica: modelização em sala de aula

Ao lançarmos nosso olhar sobre a educação científica na prática escolar, podemos identificar claramente um distanciamento entre a maneira científica de colocar e enfrentar problemas e a maneira escolar de apresentar os conteúdos de conhecimento que se originam a partir daqueles problemas. Enquanto a primeira se mantém como o caminho mais bem-sucedido para a compreensão da realidade, os conteúdos de conhecimento escolares têm sofrido constantes derrotas frente às concepções de senso comum, no que se refere à sobrevivência pós-escolar média desses conhecimentos.

Ao introduzirmos a teorização de Mario Bunge (1974) acerca dos modelos científicos, um de nossos objetivos foi explicitar a relação de não-identidade entre os objetos da realidade e o conhecimento produzido pela Ciência. A nosso ver, essa relação fica bem estabelecida através do conceito bungeano de objeto-modelo. A interpretação dos objetos sobre os quais versam as teorias científicas como objetos-modelo parece deixar claro o papel fundamental do percurso de idealizações e abstrações que se desenvolve na obtenção dos conhecimentos científicos.

O ensino de Ciências, por outro lado, tem se mostrado inconciliável com essa compreensão, pois, em geral, apresenta unicamente o *produto* da investigação científica, já totalmente formalizado e abstraído. A questão que deu origem àquele conhecimento, quer esteja localizada em um objeto, quer em um evento da natureza, quando aparece, tem apenas o caráter de exemplo, ao qual será aplicado a resposta previamente exposta. Os resultados finais parecem ser tudo o que há para se aprender sobre a Ciência.

Matthews (1995) fornece um exemplo simples desta situação. Considera ele que, embora qualquer estudante aprenda, no decurso de sua vida escolar, a lei do isocronismo do pêndulo, provavelmente ninguém tem dúvidas de que um pêndulo qualquer, posto em movimento, eventualmente irá parar. Isto pode ser visto pelo estudante como uma evidência de que a teoria estudada não se relaciona com a realidade, pois o período da última oscilação não seria igual ao da primeira e, portanto, o pêndulo não seria isocrônico.

Como podemos conciliar a lei com a observação? Normalmente se diz: Esqueça o que vê e aprenda a lei. O que é uma forma mais sofisticada de se dizer: A ciência não lida com esses tipos de pêndulos que você usa, mas sim com pêndulos ideais para os quais não há atrito e pressão e onde o fio não possui peso, etc. (MATTHEWS, 1995, p.182)

O exemplo de Matthews (1995), entre incontáveis outros que poderiam ser citados, mostra como o distanciamento entre a maneira científica de colocar e resolver problemas e a maneira escolar de fazê-lo implica a desvinculação entre a realidade exterior e os conteúdos de conhecimento escolares. É no enfrentamento desse problema que surgem, atualmente, as discussões sobre a Modelização no ensino.

Como destacou Astolfi, "... os modelos científicos são em geral apresentados aos alunos **como a realidade diretamente interpretada** muito mais do que como representações construtivas, conscientemente reduzidas e calculáveis" (ASTOLFI, 1991, p. 105, grifo nosso). Inverter esse quadro requer o entendimento da modelização como um meio de reinserir a realidade na sala de aula, pois existiria, no processo de produção de modelos, a passagem progressiva do real-percebido (com origem no senso comum) ao real idealizado (PIETROCOLA, 1999).

Uma conclusão direta que se pode inferir a partir da teoria bungeana é a de que a modelização não se aplicaria a todos os conteúdos de conhecimento científico, pelo menos não pelo processo que foi descrito. Assim, uma lei básica de uma teoria geral como $\vec{F} = m\vec{a}$ não é modelizável por um processo desse tipo, justamente por ser geral e não se referir a um particular objeto-modelo. Nenhuma informação empírica, sozinha, pode levar a concluir uma teoria generalizante como esta. Ou seja, apenas os modelos teóricos podem ser o ponto de chegada de uma atividade de modelização. Apesar da aparente obviedade desta observação, é importante que este aspecto fique claro, pois se trata de uma limitação da proposta que teria consequências sobre possíveis planejamentos.

Isto posto, interessa verificar mais de perto as relações entre os processos de obtenção de modelos teóricos em situações de ensino. Sobre esse ponto discorre Pietrocola:

Para o contexto do ensino de Física, uma modelização matemática precisa incorporar de forma explícita o domínio empírico, ou seja, envolver atividades experimentais. Uma boa atividade modelizadora deveria necessariamente se preocupar na passagem dos dados brutos contidos numa observação, até uma representação conceitual de um fenômeno enfocado. (PIETROCOLA, 2002, p. 106)

Na perspectiva de Pietrocola (2002), portanto, a atividade experimental não é uma opção, mas uma exigência da modelização no ensino de Física. Por um lado, a consideração sobre a necessidade em contemplar o domínio empírico é coerente e, mais do que isto, decorre de argumentações que poderiam ser feitas com base no referencial teórico. Pois, ao ressaltar os processos de idealização e abstração como pilares da modelização, é forçoso admitir a presença obrigatória do objeto real, do contrário não teríamos o que idealizar ou abstrair.

Por outro lado, um aspecto importante que poderia ser examinado a respeito da asserção de Pietrocola (1999) e que, também, tivemos a oportunidade de perceber em numerosas passagens nas obras de Bunge, é a aparente equivalência atribuída às ideias de "domínio empírico" e "experimentação". Se a experimentação for entendida como uma atividade controlada, na qual o experimentador modifica deliberadamente as variáveis independentes e obtém valores para as variáveis dependentes, esta equivalência não pode ser sustentada do ponto de vista epistemológico, pois nem todos os dados empíricos com os quais a Ciência lida são

obtidos através deste tipo de procedimento. Como exemplos de áreas da Física nas quais este fato é mais evidente, podem ser citados: a Cosmologia, a Astrofísica e alguns ramos da Física-Matemática. No entanto, por nosso estudo do conjunto da obra destes dois autores, interpretamos as referências destes ao termo “experimentação” no sentido mais abrangente de domínio empírico, salvo indicação em contrário. De toda maneira, este é um importante ponto que precisa ficar claro na elaboração de alguma proposta, pois poderá gerar equívocos de interpretação em possíveis implementações.

Esta impossibilidade da alternativa puramente teórica para a modelização em Física é uma decorrência da diferença de estatuto epistemológico entre as ciências formais e as ciências factuais. Mesmo considerando que, na ciência Física, este procedimento – a obtenção de modelos pela via exclusivamente teórica – seja comum, sobretudo no caso de modelos cosmológicos, ainda assim isto não invalida a argumentação de Pietrocola (2002), desde que seja considerada a observação do parágrafo precedente. Pois, mesmo nestes casos, os modelos construídos visam representar um referente concreto, do contrário não seriam científicos, mas ficcionais. Levando em conta que é justamente esta pretensão (representar a realidade por meio de modelos teóricos) que constitui o cerne da modelização em Física, novamente se conclui pelo caráter imperativo do referente concreto.

Este aspecto demonstra que a modelização em Matemática e em Física não coincidem, pelo menos se considerada a perspectiva de Saglam (2004)¹². Os modelos matemáticos, cujos referentes são construídos, não requerem observações empíricas (muito embora possam se beneficiar com elas), do ponto de vista ontológico. Por exemplo, dada uma equação diferencial que é uma certa lei teórica, como $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$, basta fornecer a função (um ente matemático) que descreve \vec{F} e condições de contorno, na forma de valores, e se obtém o modelo matemático para um sistema específico. Do ponto de vista da obtenção deste modelo por meio de operações matemáticas, não é requerido que se atribuam significados factuais às variáveis; não é necessário que se postule a existência de forças, ou que sejam imaginados estados de movimento dos corpos.

Posto que a presença do domínio empírico é condição necessária, seríamos agora levados a questionar qual seria o papel das teorias gerais. Já vimos que elas não podem ser os pontos de chegada. Porém isto não significa que não estejam presentes de outra forma. Tampouco a asserção de Pietrocola (2002) implica a desconsideração das teorias gerais. Se o pressuposto epistemológico for o realismo crítico, então é evidente que não se estará assumindo que a representação conceitual deverá emergir somente do domínio empírico. A rejeição ao empirismo ingênuo já estaria contemplada, por uma parte, pela ênfase dada à elaboração do objeto-modelo, uma vez que este objeto não é observado, mas antes imaginado.

Nessa perspectiva, pode-se considerar o ato de modelizar como uma tentativa de apreender a realidade que compreende um processo criativo, tendo a racionalidade científica como instância mediadora. Nos termos de Bunge (1974), poderíamos pensar nesse processo como a transposição de um objeto da realidade em um objeto-modelo, através de um percurso

¹² Com isso quer-se dizer que as abordagens experimental e teórica, na modelização Física, não são mutuamente excludentes, e sim complementares, como se verá mais adiante. Saglam (2004), ao discutir a modelização matemática, apresenta as abordagens teórica e experimental como dois processos distintos.

explicitado de idealizações e abstrações, e na exploração deste objeto-modelo com vistas a produzir um modelo teórico que represente seu comportamento.

Uma proposição de modelização baseada na teoria bungeana teria, portanto, duas etapas distintas, porém não totalmente separadas. Uma delas é a elaboração do objeto-modelo a partir da idealização de um objeto real dado. Tal elaboração consistiria em uma tentativa de apreender os aspectos essenciais de um objeto real para formar uma imagem conceitual, que será o objeto-modelo.

É possível encontrar um exemplo simples de uma atividade de modelização na qual se desenvolve explicitamente a idealização de um objeto manipulado. Trata-se da atividade chamada “*Dominó*”, contida na proposta de Pinheiro (1996). O objetivo desta atividade é obter uma relação entre a altura de uma pilha de dominós e o número de peças empilhadas. Os alunos executam as medições, organizam uma tabela de dados e constroem um gráfico.

Nesta idealização, ou modelo construído, não é levado em conta as irregularidades originadas na fabricação das peças de dominó. [...] Com esse exemplo, aponta-se a vasta possibilidade de fatores que se encontram presentes em um evento e que a idealização não consegue dar conta de todos. A realidade é mais complexa do que o homem pode idealizar, por isso o modelo não necessita ser um espelho fiel da realidade. (PINHEIRO, 1996, p. 117)

O trabalho de Pinheiro (1996) fornece um exemplo da elaboração de um objeto-modelo em uma atividade de ensino. Este objeto não está na atividade experimental em si, mas nas questões que devem ser colocadas e nas discussões que devem ser provocadas na mediação feita pelo professor, conforme enfatiza a autora. Estas discussões devem contemplar explicitamente as idealizações e abstrações que são feitas.

Assim, ao se solicitar aos alunos que listem as grandezas que podem ser atribuídas ao dominó e, depois, que procurem quais delas podem depender entre si, introduz-se uma escolha dos parâmetros do objeto real que serão considerados. Na escolha e traçado da “melhor curva” no gráfico, tem-se a oportunidade de discutir o significado do “dominó-modelo”, o padrão que pode representar o comportamento geral dos dominós, embora provavelmente nenhum dominó real tenha exatamente a altura do dominó-modelo. Além disso, o dominó-modelo permite “imaginar quantidades de dominó que a atividade não oportuniza, como frações de um dominó ou milhares deles” (PINHEIRO, 1996, p. 117).

A outra etapa da modelização constituiria a obtenção do modelo teórico propriamente dito. Na atividade “*Dominó*”, o modelo matemático que se obtém é bastante simples, e permite uma interpretação relativamente fácil das variáveis dependente (a altura da pilha), independente (quantidade de peças) e da variável interveniente – neste caso, a espessura do dominó-modelo – que é obtida pelo cálculo da tangente.

Isto, porém, não se aplica à maioria das situações em Física. Para exemplificar, imagine-se a realização deste mesmo procedimento – atividade experimental, organização da tabela de dados e construção de um gráfico – para um evento físico, como a oscilação de um pêndulo. Medidas do período de oscilação de um pequeno objeto amarrado a um fio, em função do comprimento, produziriam a curva de uma função do tipo raiz quadrada: representando o

período por T e o comprimento do fio por ℓ , obter-se-ia uma equação do tipo $T = \zeta\sqrt{\ell}$, na qual ζ representa a variável interveniente. Em uma perspectiva exclusivamente matemática, a única dificuldade adicional é a possível não-familiaridade, por parte dos alunos, com a curva desta função. Embora seja conteúdo do Ensino Fundamental, é possível que a curva não seja reconhecida, ao menos de imediato, pelos alunos.

Se, por outro lado, se pretenda uma modelização física deste evento, uma nova dificuldade aparece. Pois, do ponto de vista do ensino de Física, não é apenas da equação acima que os alunos devem se apropriar. Um problema está em – que não pode ser interpretada *apenas* como uma variável interveniente.

O modelo obtido, expresso na forma daquela equação, corresponde a um modelo do tipo caixa-preta. Não se pode encontrar uma expressão fisicamente interpretada para a menos que se comece a perguntar sobre o que provoca esse movimento, isto é, uma interpretação da realidade percebida. Pois, enquanto a descrição e a previsão do comportamento do sistema são bem servidas por um modelo deste tipo, o mesmo não se pode dizer quanto à explanação. Uma compreensão adequada do ponto de vista da Física requer que se explique o significado de ζ , e, para Bunge,

Isto não é apenas um requisito psicológico, uma necessidade de satisfazer a exigência de entender o que foi acuradamente descrito. É um requisito científico: as teorias de caixa negra são **incompletas**, uma vez que deixam os conteúdos da caixa no escuro. (BUNGE, 1974, p. 74, grifo nosso)

Obter um modelo fisicamente adequado para este fenômeno implica recorrer às teorias gerais e realizar novas abstrações e idealizações. Como no exemplo da atividade “Domínó”, é fundamental que o encaminhamento didático dado pelo professor, na forma de perguntas a serem feitas e discussões a serem provocadas, oportunize a percepção das grandezas mais relevantes do pêndulo – a massa do objeto suspenso e o comprimento do fio. Com isso se elabora um objeto idealizado – o pêndulo simples, constituído por um fio inextensível ligado a uma massa pontual – que poderá então ser imaginado como obedecendo às leis gerais do movimento dos corpos, dadas pela mecânica de Newton. No decurso dessa *modelização teórica*, precisariam ainda ser discutidas as abstrações que são feitas, por exemplo, a consideração de que a gravidade é a única força que age sobre o pêndulo etc.

Assim, a teoria geral seria um elemento necessário para se obter a expressão completa¹³, que contém a mais uma variável “interna” (neste caso, considerada constante), que, por sua vez, dá a interpretação deste comportamento pela força gravitacional (um construto hipotético). Ela permitiria “diminuir a opacidade” da caixa, pois forneceria uma explicação do “mecanismo”. Além disso, ao permitir o cálculo da aceleração da gravidade utilizando explicitamente e ao mesmo tempo o modelo teórico e o empírico, oportunizaria uma discussão sobre a interação entre a teoria e a experimentação na produção de conhecimento.

¹³ No caso do pêndulo simples, $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$.

O aluno como modelizador, em uma proposta de inspiração bungeana, poderia ser então visto como um construtor de caixas-pretas que, pela mediação do professor com as teorias gerais, deveria ser instigado a aumentar a “quantidade de luz” que atravessa as caixas. A modelização experimental e a teórica não seriam duas alternativas separadas, mas faces da mesma moeda. Pois, a modelização no ensino de Física não se reduz à modelização Matemática, muito embora a última seja indispensável à primeira. Os modelos teóricos são sistemas dedutivos porque são equações matemáticas no que diz respeito à sua forma. Mas, são também hipotéticos, posto que se referem a objetos-modelo.

Levando-se em conta a concepção bungeana de modelos científicos, as reflexões de Pietrocola (1999) e os exemplares de Pinheiro (1996), além do exercício com o pêndulo simples, poderíamos vislumbrar o seguinte quadro para a modelização no ensino de Física.

Após as etapas de contextualização, problematização etc., a partir do momento em que se tenha um problema claramente formulado, promove-se uma discussão sobre possíveis estratégias para resolver o problema e as expectativas (ou hipóteses) em torno das possíveis soluções. O professor direciona a discussão à atividade de modelização que propõe. Os componentes básicos desse tipo de atividade são desenvolvidos detalhadamente em Pinheiro (1996). Em síntese, o objetivo é obter um modelo do tipo caixa-preta que descreva, na forma de uma equação, o comportamento do objeto ou evento real enfocado.

Ao mesmo tempo em que cria o problema da necessidade de uma explicação para a variável interveniente, a elaboração da caixa-preta pode promover uma certa familiarização com o objeto real, preparando o terreno para o momento da idealização. Assim, para a elaboração do objeto-modelo, é necessário que o professor direcione a atenção dos alunos para os aspectos-chave do objeto real. Isto pode ser feito, por exemplo, apontando diversos outros objetos que sejam diferentes daquele que está sendo modelizado, mas que tenham aspectos-chave comuns. Outra maneira é comparar as características do objeto entre si, por exemplo, observando que o diâmetro de um fio é muito pequeno se comparado ao comprimento. Também podem-se comparar as características do objeto em relação ao problema que se pretende responder. No caso da atividade dominó, por exemplo, notar que o comprimento de cada dominó não interfere na altura da pilha. Enfim, o tipo de argumentação que pode ser utilizada na elaboração do objeto-modelo é altamente dependente do particular objeto ou relação que se pretende modelizar. O importante é que as idealizações e abstrações feitas nesta etapa levem a um objeto-modelo que seja tratável por uma teoria geral.

A elaboração do objeto-modelo, de certa forma, se superpõe entre a modelização experimental e teórica. Porque, como este é um objeto mental, imaginado e não observado, obtido a partir de determinadas argumentações e considerações racionais, ele não é “deduzido” a partir da experiência. Por outro lado, o objeto real é o referente do objeto-modelo. O segundo é feito com a intenção de descrever o primeiro. É feito, neste sentido, a partir do objeto real, embora não “extraído” deste.

Mais especificamente, pode-se dizer que o papel da experimentação na elaboração do objeto-modelo é, sobretudo, heurístico. Este construto é, como se vem argumentando, inventado. Requer, portanto, que se abra espaço para a imaginação, pois é preciso reconhecer que “[...] nenhuma dupla coluna de dados de entrada e saída jamais aponta de maneira inambígua para o mecanismo simbolizado por ‘M’” (BUNGE, 1974, p. 73).

A inserção do objeto-modelo construído dentro da teoria geral correspondente visa proporcionar um modelo do tipo caixa translúcida, que forneça a interpretação da variável interveniente em função do “mecanismo interno” da caixa, ou, em outras palavras, de uma explicação para o porquê do comportamento observado. É neste sentido que Gurgel e Pietrocola (2005) se referem à “mecanicidade” dos modelos¹⁴. Normalmente essa explicação se dá em função de inobserváveis¹⁵, como o campo, o elétron, uma força etc., e reforça o caráter hipotético dos modelos. A obtenção do modelo teórico por esta via se aproxima do que Sagramam (2004), no contexto da matemática, denomina “processo teórico”. O modelo teórico assim obtido poderia ser comparado ao modelo caixa-preta, não apenas para se verificar a coerência e explicar o mecanismo interno, mas também para se discutir a possibilidade de obter um conhecimento novo, tal como no exemplo do cálculo da aceleração da gravidade.

Para Larcher (1996 apud PINHO-ALVES, 2002), a modelização no ensino pode ser usada tanto quando novos conhecimentos são apresentados, como quando os alunos já têm os conhecimentos necessários. No exemplo do pêndulo simples, como foi mencionado, algum conhecimento teórico prévio é requerido, já que se utiliza a segunda lei de Newton. Seja qual for o caso, é previsível que, em qualquer modelização teórica, sejam necessários conhecimentos adicionais. Pois, como já foi discutido, as teorias gerais não são modelizáveis por um processo do tipo que está sendo discutido aqui. Isto, porém, não nos parece uma restrição, visto o pequeno número de teorias gerais trabalhadas na Educação Básica. Durante todo o primeiro ano do Ensino Médio, por exemplo, trabalha-se com uma única teoria geral. Também não é verdadeira a ideia de que, ao se ensinar uma teoria geral, por definição, está se ensinando seus modelos correspondentes. A falsidade desta afirmação não se justifica apenas por questões de ordem didática (pois não seria razoável esperar que alunos iniciantes deduzissem modelos teóricos sozinhos), mas também, e sobretudo, de ordem epistemológica (como discutimos, os modelos não estão contidos nas teorias, mas são obtidos ao se inserir na teoria um terceiro elemento, a saber, o objeto-modelo).

Considerações finais

É bom enfatizar que as considerações precedentes não configuram, de forma alguma, um roteiro ou manual, nem mesmo uma metodologia fechada. São um modo de conceber a modelização. Nem todos os momentos de uma aula ou conjunto de aulas foram discutidos, porque não era este o objetivo. O momento de problematização, por exemplo, que é anterior à modelização, não foi objeto dessa discussão. Também não nos preocupamos com as possíveis formas de ensinar as teorias gerais. O recorte no qual se insere esta discussão inicia após a formulação de um problema e finda com a discussão sobre as relações entre o modelo empírico e teórico, voltada à passagem progressiva dos dados brutos aos conceitos idealizados.

¹⁴ No trabalho citado, estes autores verificaram que a mecanicidade é um dos fatores que contribuem para a aceitação de um modelo explicativo, a partir de uma pesquisa realizada com alunos do Ensino Médio.

¹⁵ Elementos que não são diretamente observáveis.

Também é necessário esclarecer que uma modelização deste tipo não é uma metodologia geral, pelo contrário. Apesar de não termos analisado uma grande quantidade de exemplos, é bastante previsível que haja dificuldades e até impossibilidades em trabalhar determinados conteúdos com este encaminhamento. Conteúdos modelizáveis seriam aqueles para os quais se poderia construir, em uma situação de sala de aula, um modelo empírico e um modelo teórico, o que nem sempre é possível, devido a uma série de fatores.

A modelização, na perspectiva que está sendo colocada, tem um enfoque muito específico, que é a exploração do aspecto processual da Ciência, em particular da relação entre as teorias científicas e a realidade. O pressuposto fundamental é que a passagem progressiva do real percebido ao real idealizado possa contribuir para minimizar distorções, como o exemplo de Matthews (1995). O esboço delineado aqui é uma “aproximação de ordem zero” a partir da teoria bungeana, mas ainda assim já delimita alguns aspectos necessários à modelização que o distinguem de outras propostas que podem ser encontradas na literatura.

Assim, não se procurou preencher todas as lacunas. Em lugar disso, propôs-se uma compreensão para o conceito de Modelo (um sistema hipotético-dedutivo), que respeita o referencial teórico adotado e, com isso, se distingue de outras interpretações de modelo, como aquelas relacionadas a simulacros, analogias e maquetes. Propôs-se, também, uma compreensão de aspectos essenciais de uma Modelização fundamentada neste conceito de modelo e articulada com considerações de outros autores, também inspirados neste referencial.

Para sintetizar, enfim, nosso entendimento de modelização, podemos destacar que o que se esperaria de tal atividade é que ela forneça condições de evidenciar que o conhecimento científico “não é apenas experiência, porém teoria mais experiência planejada, executada e entendida à luz de teorias” (BUNGE, 1974, p. 10).

Referências

- ASTOLFI, J. P.; DEVELAY, M. **A didática das ciências**. Campinas: Papirus, 1991.
- BUNGE, M. **Epistemologia**: curso de atualização. São Paulo: T. A. Queiroz; Edusp, 1980.
- _____. **La ciencia**: su método y su filosofía. 3. ed. Buenos Aires: Sudamericana, 1998.
- _____. **Racionalidad y realismo**. Madrid: Alianza, 1985.
- _____. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- GURGEL, I.; PIETROCOLA, M. O papel dos modelos no entendimento dos alunos. In: ENPEC - ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 5., 2005, Bauru. **Anais...** Florianópolis: Abrapec, 2005. 1 cd-rom.
- KRAPAS, S. et al. Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 185-205, 1997.
- LARCHER, C. La physique et la chimie, sciences de modèles : du monde réel aux connaissances scientifiques, en passant par la modélisation. In: TOUSSAINT, J. (Coord.). **Didactique appliquée de la physique-chimie**: éléments de formation pour l'enseignement. Paris: Nathan Pédagogie, 1996. p. 160-178.
- MARTINAND, J.-L. Introduction à la modélisation. In: SÉMINAIRE DE DIDACTIQUE DES DISCIPLINES TECHNOLOGIQUES, 1994-1995, Cachan. **Actes...** Cachan: ENS; INRP; IUFM, 1996. p. 126-138.
- _____. Enseñanza y aprendizaje de la modelización. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 4, n. 1, p. 45-50, 1986.
- MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.
- PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 213-227, 1999.
- PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 1, p. 93-114, 2002.
- PINHEIRO, T. F. **Aproximação entre a ciência do aluno na sala de aula da 1ª série do 2º grau e a ciência dos cientistas**: uma discussão. 156f. 1996. Dissertação (Mestrado em Educação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências da Educação, Florianópolis, 1996.

PINHO-ALVES, J. Atividade experimental: uma alternativa na concepção construtivista. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 8., 2002, Águas de Lindóia.

Atas... São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2002. 1 cd-rom.

SAGLAM, A. **Les équations différentielles en mathématiques et en physique**: étude des conditions de leur enseignement et caractérisation des rapports personnels des étudiants de première année d'université à cet objet de savoir. 264f. 2004. Thèse (Doctorat en Sciences de Technologies de l'Information) - Université Joseph Fourier, Grenoble, 2004.