

APLICANDO MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA NAS AULAS DE FÍSICA

Veit, E. A. – Instituto de Física da UFRGS – eav@if.ufrgs.br
Brandão, R. V. – Colégio de Aplicação da UFRGS – rafael.brandao@ufrgs.br
Araujo, I. S. – Instituto de Física da UFRGS – ives@if.ufrgs.br

RESUMO

Modelagem didático-científica é uma estratégia de sala de aula concebida para favorecer a aprendizagem de conceitos e competências associados à natureza, construção, validação, exploração e revisão de versões didáticas de modelos científicos. Esses, por sua vez, podem ser entendidos como representações simplificadas de sistemas, processos e fenômenos de interesse de algum campo da Ciência, incluindo suas representações matemáticas e computacionais. Neste trabalho mostraremos como essa estratégia pode ser levada para as aulas de Física tanto do ensino médio quanto do universitário com o objetivo de que os estudantes reflitam sobre a importância de decidir qual(is): problema enfrentar; representação utilizar; sistema delimitar; idealizações e/ou aproximações assumir; variáveis e parâmetros considerar; domínios de validade identificar; expansões e generalizações estabelecer. Por fim, discutimos algumas das implicações dessa estratégia para o ensino de Física.

Palavras-chave: Estratégia didática reflexiva; Modelagem científica; Ensino de Física.

1 INTRODUÇÃO

Os problemas enfrentados no ensino de Ciências e Matemática não só em nível médio como também em nível superior são por demais conhecidos e debatidos. As aulas costumam ser descontextualizadas; os estudantes não conseguem atribuir significado ao que lhes é apresentado; não conseguem captar a relevância do que estudam, sua conexão com o mundo em que vivem, sua utilidade. Como consequência, os estudantes não apresentam engajamento nem cognitivo nem emocional e, sem isso, não têm as menores condições de aprender de modo significativo. Ou seja, o estudante entra em um círculo vicioso no qual não aprende porque não se empenha em seu aprendizado e não se empenha porque não vê o menor sentido para tanto. Como romper com esse círculo vicioso? A resposta não é simples e tampouco única. Várias ações em diferentes esferas são necessárias. Uma delas diz respeito à renovação das práticas de sala de aula, levando em conta resultados de pesquisa nessa área.

Nossa proposta está baseada na estratégia da modelagem científica como meio de propiciar aos estudantes melhores condições para uma aprendizagem significativa em Física. No entanto, essa estratégia pode ser facilmente adaptada para outras áreas do conhecimento científico e tecnológico. Consideramos, como apregoam os Parâmetros Curriculares Nacionais, além de ser uma tendência mundial, que aprender Física requer trabalhar não somente com seus conceitos, princípios, leis, modelos e teorias mas também com procedimentos e instrumentos do fazer científico.

Apesar de que o fazer ciência, desde os tempos de Galileu, esteja apoiado no uso de modelos científicos, o papel dos modelos e da modelagem científica costuma passar despercebido para a maior parte dos estudantes e de muitos professores, especialmente, no nível médio. Nossa intenção com esse texto é justamente levar o leitor a refletir sobre a necessidade de resgatar o importante papel dos modelos na construção do conhecimento científico e, por consequência, no seu ensino.

Nosso foco será explicitar o caráter representacional do conhecimento científico, a partir da noção de modelo, e discutir a modelagem científica como um procedimento usual na busca por respostas a problemas científicos e tecnológicos. Para tanto, começamos apresentando noções sobre modelo e modelagem científica no contexto da Física. Na sequência, passamos a ilustrar essas noções com exemplos apropriados para o ensino médio e também superior e finalizamos discutindo algumas das implicações da introdução desses tópicos nas aulas de Física.

2 MODELOS E MODELAGEM CIENTÍFICA EM FÍSICA E NO ENSINO DE FÍSICA

Quando nos referimos à modelagem científica estamos pensando no processo de criação de modelos científicos com a finalidade de apreender a realidade pelo pensamento. Em outros termos, estamos pensando no processo de reconstrução conceitual da realidade por meio de representações que podem ser tão elaboradas quanto possíveis.

Segundo Bunge (1974), dentro do contexto das ciências teóricas fatuais, o termo 'modelo' assume dois sentidos principais, a saber: "o modelo enquanto representação esquemática de um objeto concreto e o modelo enquanto teoria relativa a esta idealização" (p. 30). O autor reserva ao primeiro sentido o termo 'modelo conceitual' e ao segundo sentido o termo 'modelo teórico' (ou teoria específica).

Por 'representação esquemática' deve-se entender que os modelos científicos não são, e jamais serão, uma descrição especular (exata) da natureza. Isso ocorre pelo simples fato de que o homem é limitado para descrever a realidade em sua totalidade. Embora a modelagem seja uma ferramenta essencial para dar sentido ao mundo em que vivemos, somos incapazes de abordar a realidade de maneira holística, com toda sua riqueza e complexidade. Mas não devemos desesperar. "A conquista conceitual da realidade começa, o que pode parecer paradoxal, por idealizações" (*Ibid.*, p. 13).

No processo de modelagem o cientista é 'livre' para decidir o que considera ser essencial e ignorar o que lhe parece irrelevante na descrição dos fatos. Esse processo em nada difere da atividade de um artista plástico que pretende esculpir uma estátua ou de um pintor que deseja representar os traços marcantes de uma criatura. Entretanto, a criação de modelos científicos pressupõe a existência de objetivos realísticos. Com isso não se quer dizer que o modelo em si não possa carecer de fundamento na realidade. Vejamos o modelo geocêntrico de Ptolomeu para o movimento dos planetas que perdurou por mais de treze séculos.

Com o passar dos anos as observações astronômicas tornaram-se cada vez mais precisas. Ptolomeu, a fim de não abandonar sua hipótese inicial de que os planetas moviam-se em circunferências, precisou aperfeiçoar (complicar) seu modelo para adequá-lo aos dados observacionais. A 'versão' mais completa e eficiente do modelo geocêntrico era capaz de prever razoavelmente bem a posição dos planetas através de uma intrincada combinação de círculos (epiclos e deferentes) que foram sendo incorporados ao movimento de cada um dos planetas (OLIVEIRA; SARAIVA, 1997). Hoje sabemos que o modelo geocêntrico estava alicerçado em hipóteses não condizentes com a realidade, embora tivesse sucesso na predição dos fatos.

Em Física, ainda que não representem exatamente a realidade, modelos científicos consistem de proposições semânticas, de representações externas (como gráficos, tabelas, diagramas, etc.) e de modelos matemáticos e/ou computacionais que são formulados com o intuito de descrever e prever o comportamento de sistemas, processos e fenômenos da natureza. Um modelo matemático é um tipo de representação simbólica que faz uso de entes matemáticos como matrizes, funções, operadores, etc. Já um modelo computacional pode ser entendido como um modelo matemático implementado em computador. Em Ciências da Natureza, de grande interesse são os modelos matemáticos que representam sistemas dinâmicos. Um modelo de sistema dinâmico pode ser entendido como um conjunto de relações matemáticas entre as grandezas que descrevem o sistema e o tempo, considerado como variável independente.

Como exemplo, considere uma quantidade de determinada espécie de bactérias. Imagine que estejamos interessados em determinar o tempo em que esta população de bactérias duplica. O modelo de Malthus (1766 – 1834), que descreve o comportamento de uma população de indivíduos distribuídos uniformemente numa dada região do espaço, relacionando a variação no tempo do número de indivíduos num certo instante t com as taxas de nascimento e morte, fornece uma resposta ‘aproximada’ para a dinâmica desse sistema. Entretanto, a descrição e a predição do comportamento de sistemas existentes na natureza são apenas duas razões pelas quais construímos modelos de sistemas dinâmicos.

Monteiro (2006) nos chama a atenção para a criação de modelos que simulam sistemas dinâmicos que ainda não existem na realidade. Pode ser que a construção de tais sistemas demande tempo e exija alto investimento. Pode ser ainda perigoso, ou mesmo inviável, estudar determinados sistemas. Vejamos dois exemplos que justificam a construção de modelos científicos.

Considere o lançamento de um ônibus espacial. Diferentemente de um motor convencional, que realiza combustão com oxigênio da atmosfera, o ônibus espacial carrega seu próprio combustível (hidrogênio e oxigênio). Quando em órbita de baixa altitude (entre 300 e 530 km acima da superfície terrestre), o ônibus precisa corrigir constantemente sua trajetória devido às deformações do campo gravitacional da Terra, gastando combustível. Se o nosso planeta fosse uma esfera rígida e homogênea, qualquer objeto colocado em órbita poderia permanecer indefinidamente em movimento circular uniforme sem gastar energia. Tal não é o caso do ônibus espacial. Com isso, torna-se importante elaborar um modelo que prediga a quantidade de combustível a ser consumida pelo ônibus, levando-se em conta fatores como as imperfeições do campo gravitacional terrestre, tempo de viagem, altitude da órbita, ponto de lançamento, etc.

Como segundo exemplo, considere o sistema cardiovascular humano. A construção de modelos hemodinâmicos tem ajudado na busca por respostas à dinâmica do escoamento sanguíneo em um sistema arterial personalizado, isto é, modelos matemáticos que fornecem detalhes como vórtices e refluxos em seções arteriais com desvios patológicos do sistema cardiovascular de um indivíduo em particular. Estes dois exemplos demonstram a amplitude e a importância do processo de modelagem na busca por soluções de forte impacto na sociedade.

Mas quão bem um modelo científico descreve e/ou prediz o comportamento de determinado sistema físico? A adequação aos fatos depende fundamentalmente das hipóteses em que o modelo se baseia, das perguntas que com ele se pretende responder e da precisão de suas predições. A modelagem científica é, antes de tudo, um processo de busca por respostas. Assim, os cientistas produzem conhecimento científico formulando questões claras e imaginando modelos conceituais das coisas. Para isso, elaboram hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento do sistema dentro de uma perspectiva teórica. A proposição destas hipóteses não é trivial. Ela depende, por exemplo, da quantidade de informações disponíveis sobre os fatos reais ou supostos como tais. Vejamos dois exemplos sobre a formulação de hipóteses.

Imagine que desejemos modelar o comportamento de um computador digital. Mais especificamente, que estejamos interessados nos instantes em que sua memória pode ser lida. Nesse caso, o modelo poderá ser construído de forma que o tempo evolua discretamente. Porém, se estivermos interessados em determinar o fluxo de calor ao longo de uma barra metálica, possivelmente faremos o tempo evoluir continuamente. Embora saibamos que o tempo evolui continuamente, muitas vezes somos levados a considerá-lo como discreto. Este é um tipo de idealização que incorporamos aos modelos.

Para frutificar, um modelo conceitual precisa constituir-se em um modelo teórico (ou teoria específica) capaz de fazer previsões e ser confrontado com os fatos. Tomemos o exemplo da Teoria Cinética dos Gases (TCG). Esta teoria específica resulta do acolhimento de uma representação esquemática (modelo conceitual de gás ideal) por uma teoria geral (Mecânica Estatística Clássica). Assim é possível deduzir uma série de resultados, entre eles: a equação de estado e as distribuições de velocidades das moléculas que constituem um gás ideal. Além disso, a TCG pode estimar valores para os calores específicos de alguns gases reais, o que a torna passível de contrastação empírica.

Por tudo o que foi dito, no contexto da Física convém distinguir: o **sistema físico**, que faz parte da natureza, com toda sua riqueza e complexidade; o **sistema idealizado**, resultante da representação esquemática do sistema físico; e o **modelo teórico** que traduz e descreve o sistema idealizado, preferencialmente, em linguagem matemática.

Na medida em que todo modelo teórico é, em certo grau, uma invenção, sua falseabilidade deve estar constantemente sendo avaliada. A confiabilidade dos modelos deve ser guiada criticamente por testes empíricos, racionais e de consistência teórica. Para tanto, os cientistas estariam habilitados a abandonar provisoriamente a realidade com toda sua riqueza e complexidade e dedicar-se a “atividade típica da pesquisa científica contemporânea: a construção de modelos teóricos e sua comprovação” (*Ibid.*, p. 30). Essa comprovação não é apenas empírica, pois também envolve questões de natureza epistemológica, metodológica e filosófica; e tampouco definitiva, pois todo o conhecimento construído no processo de modelagem científica é por definição provisório, sempre passível de revisão.

Por fim, dizer que não existe um único método científico, ou seja, que não existe ‘o’ método científico, implica também assumir que não existe uma visão única e restrita sobre o que é modelagem científica. Como ponto de partida, adotamos a visão epistemológica de Mario Bunge (1974), e estabelecemos uma Estrutura Conceitual de Referência (ECR) para a modelagem científica no contexto da Física, apresentada na Figura 1, com vistas à sua transposição didática para estudantes, professores e futuros professores do ensino médio.

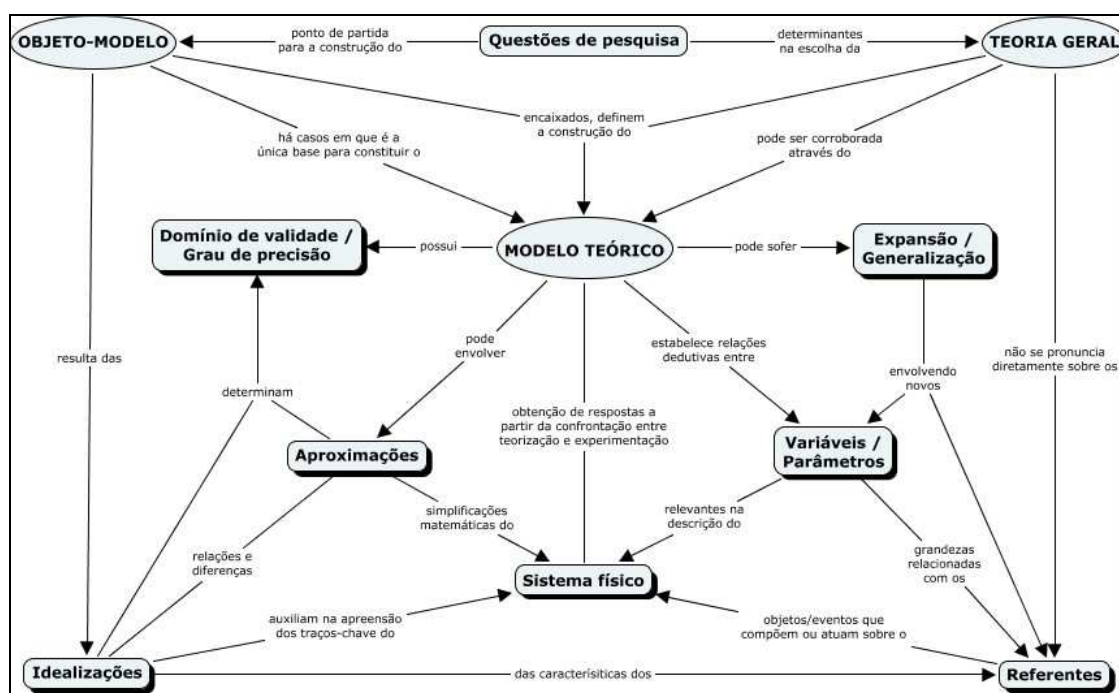


Figura 1. Estrutura Conceitual de Referência que adotamos para o processo de modelagem científica no contexto da Física.

De acordo com a Figura 1, para compreender o que é modelagem e como se modela em Física, é fundamental que os estudantes sejam confrontados com situações e problemas que requerem, por sua vez, o domínio de conceitos e competências inseparáveis, respectivamente, da noção de modelo científico e do processo de modelagem científica em Física, como se verá a seguir.

O Quadro 1 apresenta exemplos de habilidades específicas a serem desenvolvidas por aquele que modela em Física, no sentido de saber aplicar os conceitos da Figura 1. Na medida em que o estudante age de modo consciente e desenvolve essas habilidades específicas, adquire a competência maior que é a da modelagem em Física.

Quadro 1. Conceitos e habilidades específicas a serem desenvolvidas para modelar em Física.

Conceito	Habilidades específicas
Modelo e modelagem científica	Formular questões de interesse em Física que possam ser respondidas com a construção e/ou exploração de um modelo científico.
	Decidir que tipo de representação construir para responder às questões formuladas.
	Representar a situação física de modo esquemático e à luz de alguma perspectiva teórica da Física.
	Analisar a razoabilidade dos resultados obtidos com o modelo científico construído e/ou explorado por meio da busca de suportes empíricos e/ou racionais.
Referente	Delimitar objetos e eventos reais, ou supostos como tais, que compõem o sistema físico e sua vizinhança e que serão alvo de representação.
Idealização	Dado um sistema físico, decidir quais dos seus traços-chave apreender.
Aproximação	Dado um sistema físico previamente idealizado, decidir quais simplificações matemáticas serão assumidas.
Variável e Parâmetro	Identificar quais variáveis e parâmetros serão necessários para representar matematicamente o sistema físico.
Domínio de validade	Identificar um modelo científico como sendo o caso limite de outro.
Grau de precisão	Dada uma idealização, avaliar qualitativa e quantitativamente o erro por ela introduzido no modelo científico.
Expansão	Incluir novos referentes, variáveis, parâmetros, relações e conceitos físicos, a fim de obter resultados mais precisos e/ou melhor interpretáveis com o modelo científico.
Generalização	Dado um modelo científico, verificar se ele pode ser útil para representar outros sistemas físicos distintos daquele para o qual foi concebido.

Vejamos um exemplo de atividade de modelagem que pode ser levada para a sala de aula do ensino médio e que ilustra o que foi apresentado no Quadro 1. Imagine um caminhão com 20,0 m de comprimento que atravessa uma ponte com 80,0 m de extensão com velocidade constante de 72,0 km/h (20,0 m/s), conforme a Figura 2.

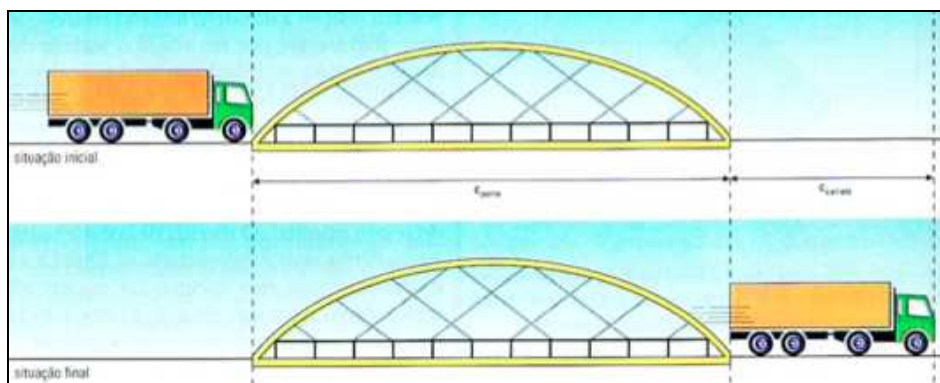


Figura 2. Na parte superior, o instante em que o caminhão entra na ponte. Na parte inferior, o instante em que o caminhão cruza completamente a ponte.

O fenômeno físico de interesse refere-se ao movimento de um corpo extenso. Seu enunciado contextualiza esse fenômeno ao descrever a situação de um caminhão atravessando uma ponte. A partir dessa contextualização é possível formular algumas questões. Qual o peso máximo do caminhão que a ponte pode suportar? Qual o valor do coeficiente de atrito cinético entre os pneus do caminhão e a ponte? Qual deve ser a velocidade do caminhão para atravessar a ponte em um certo intervalo de tempo? Qual o intervalo de tempo gasto pelo caminhão para atravessar a ponte com certa velocidade? As duas primeiras questões pressupõem o estudo das forças envolvidas no caminhão. As duas últimas questões sugerem uma descrição cinemática do comportamento observável do caminhão ao atravessar a ponte. Ou seja, enquanto as duas primeiras questões devem ser abordadas pela Dinâmica, as duas últimas podem ser abordadas pela Cinemática.

Nesse sentido, a situação descrita acima pode ser objeto de estudo tanto de uma quanto de outra perspectiva teórica. Contudo, em ambas: (i) delimitamos o sistema a ser estudado, selecionando os objetos relevantes que serão alvos de nossa representação, isto é, os referentes do modelo científico; (ii) fazemos idealizações de modo a simplificar o tratamento do problema em função das variáveis e dos parâmetros associados aos referentes; (iii) estimamos os erros introduzidos pelas idealizações e aproximações a fim de alcançarmos um grau de precisão aceitável; e (iv) discutimos a validação da solução encontrada. Em suma, construímos um modelo teórico capaz de gerar resultados que possam ser confrontados com os dados empíricos e analisamos a razoabilidade dos mesmos.

Do ponto de vista da Cinemática, os referentes envolvidos nesta situação são dois: o caminhão e a ponte. Se estivéssemos abordando o problema sob o ponto de vista da Dinâmica teríamos que incluir a Terra e, ao considerar a resistência do meio, o ar como referentes também. Consideremos o problema sob o ponto de vista da Cinemática, como proposto por Gaspar (2000), formulando as seguintes questões. Qual o intervalo de tempo que o caminhão leva para atravessar completamente a ponte? Supondo que a ponte tenha 2000 m de extensão, qual deve ser o intervalo de tempo gasto pelo caminhão para atravessar a mesma? Em qual das situações o caminhão pode ser considerado um ponto material?

A fim de tratar a situação de forma simplificada, faremos as seguintes idealizações: (i) desprezaremos todo o tipo de desnível ao longo da ponte, considerando-a perfeitamente plana; (ii) consideraremos o movimento do caminhão uniforme, como o próprio enunciado já coloca; e (iii) desprezaremos todo o tipo de sinuosidade durante o movimento, ou seja, o caminhão atravessará a ponte ao longo da direção que coincide com o comprimento da mesma.

Com base nessas idealizações, obtemos uma representação esquemática da situação, na qual o caminhão descreve um movimento retilíneo e uniforme. Para determinar o intervalo de tempo gasto pelo caminhão ao atravessar a ponte de 80 m de extensão, basta fazer uso do conceito de velocidade média, lembrando que o deslocamento do caminhão equivale à soma da extensão da ponte mais o seu próprio comprimento, de modo que

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta t = \frac{\Delta x}{\bar{v}} = \frac{80m + 20m}{20 \frac{m}{s}} = 5s$$

onde \bar{v} é a velocidade média do caminhão, Δx é o seu deslocamento e Δt é o intervalo de tempo gasto pelo caminhão para atravessar a ponte. De forma análoga, para determinar o intervalo de tempo gasto pelo caminhão para atravessar a ponte de 2000 m, temos que

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\bar{v}} = \frac{2000m + 20m}{20 \frac{m}{s}} = 101s$$

Os intervalos de tempo acima foram determinados considerando-se as dimensões do caminhão, isto é, tratando-o como um corpo extenso. Por fim, o problema sugere a possibilidade de se considerar o caminhão como um ponto material. A fim de avaliarmos essa possibilidade, calcularemos o erro percentual introduzido por esta simplificação, ou seja, o erro devido à idealização que ignora as dimensões do caminhão, nos dois casos. Para a ponte de 80 m, o intervalo de tempo seria

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{80m}{20 \frac{m}{s}} = 4s$$

Conseqüentemente, o erro percentual associado ao primeiro caso pode ser calculado da seguinte forma

$$\alpha(\%) = \frac{5s - 4s}{5s} \times 100\% = 0,2 \times 100\% = 20\%,$$

onde $\alpha(\%)$ é o erro percentual introduzido pela idealização no primeiro caso. De modo semelhante, o intervalo de tempo gasto pelo ponto material para atravessar a ponte de 2000 m seria

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{2000m}{20 \frac{m}{s}} = 100s$$

Em consequência, o erro percentual introduzido pela idealização, nesse caso, seria

$$\alpha(\%) = \frac{101s - 100s}{101s} \times 100\% \cong 0,01 \times 100\% = 1\%.$$

Assim, a resposta à terceira pergunta do problema, com base na análise do erro percentual devido à redução das dimensões do caminhão a um ponto material, poderia ser: embora a simplificação resulte, em ambos os casos, em uma diferença de 1 s entre os intervalos de tempo considerando o caminhão ora como corpo extenso, ora como ponto material, a representação de ponto material alcança um grau de precisão aceitável somente no caso em que a ponte possui extensão de 2000 m.

Outro aspecto importante é a análise da razoabilidade das soluções encontradas. Mesmo um erro de 1%, 1 s, poderia ser relevante na situação hipotética em que a ponte estivesse na iminência de cair. Frequentemente, esta análise acaba servindo como ponto de partida para a formulação de outras questões inicialmente não consideradas, como, por exemplo: e se considerássemos a possibilidade da ponte desmoronar? Nesse caso, parece razoável considerar o comprimento do caminhão como sendo a distância entre os seus eixos dianteiro e traseiro para fins de determinação do intervalo de tempo necessário para o caminhão atravessar efetivamente a ponte, antes que a mesma se rompa. Este tipo de questionamento pode contribuir para a conexão entre teoria e realidade, para a conceitualização das grandezas envolvidas e, provavelmente, para uma maior motivação do estudante. A seguir apresentaremos três atividades de modelagem voltadas para professores e futuros professores de Física, com vistas à sua transposição didática para os seus estudantes.

Aguiar e Rubini (2004) estudaram as forças aerodinâmicas exercidas sobre uma bola de futebol. Para tanto, digitalizaram o vídeo de uma jogada de Pelé na Copa de 1970 e com um programa de computador desenvolvido para análise de imagens obtiveram a trajetória da bola na jogada que ficou conhecida como 'o gol que Pelé não fez'. Posteriormente, os autores utilizaram a linguagem de programação *Logo* para simular com um segundo programa de computador a trajetória da bola em diversas condições. O artigo intitulado *A aerodinâmica da bola de futebol* disponibiliza uma série de dados sobre a trajetória da bola, que pode ser utilizada para simular o chute do Pelé em outros programas. A seguir discutir-se-á como essa atividade de modelagem no programa *Modellus 4.01* pode favorecer a reflexão de conceitos da ECR por parte dos professores.

Na modelagem científica duas ideias são fundamentais: (i) não se deve pensar em termos de modelo teórico (ou computacional) certo ou errado, mas sim na sua adequação aos fatos; e (ii) a adequação de um modelo aos fatos depende das questões que se pretende responder, do grau de precisão desejado e das idealizações e aproximações assumidas na sua construção.

Tais ideias podem vir à tona quando os professores são estimulados a construir diferentes modelos computacionais para a mesma situação-problema. Durante o processo de modelagem, eles poderão avaliar o grau de precisão e o poder explicativo de cada modelo implementado no computador.

Pensando em termos da construção de sucessivos modelos, do mais simples ao mais complexo, a Figura 3 apresenta quatro modelos computacionais que simulam a trajetória da bola chutada por Pelé, baseados em diferentes idealizações e aproximações: (i) modelo que despreza os efeitos de resistência do ar (Bola laranja); (ii) modelo em que a resistência do ar é proporcional à velocidade da bola (Bola verde); (iii) modelo em que a resistência do ar é proporcional ao quadrado da velocidade da bola, considerando o fenômeno da crise do arrasto (Bola ciano); e (iv) modelo em que a resistência do ar é proporcional ao quadrado da velocidade da bola, considerando o fenômeno da crise do arrasto e o Efeito Magnus (Bola vermelha).



Figura 3. As quatro trajetórias descritas pela bola chutada por Pelé, em vista das diferentes idealizações e aproximações assumidas em cada caso na simulação com o *Modellus 4.01*.

Medina, Velazco e Salinas (2002) propuseram uma atividade de laboratório voltada para aqueles que já possuem conhecimentos teóricos sobre oscilações mecânicas. Entre os objetivos da atividade estão: (i) a construção de um pêndulo (objeto real) que se comporte como pêndulo simples (modelo teórico); (ii) a análise quantitativa do erro introduzido por cada uma das idealizações e aproximações assumidas pelo modelo; e (iii) a comparação entre os resultados obtidos por meio da teoria e da experiência para o período de oscilação do pêndulo real. A seguir discutir-se-á como essa atividade de modelagem pode ser utilizada para favorecer a reflexão por parte dos professores acerca da modelagem científica, em particular, da confrontação entre resultados teóricos e dados empíricos, bem como do papel mediador dos modelos nesse processo.

A principal ideia a ser explorada nessa atividade diz respeito ao fato de que as teorias gerais não se pronunciam diretamente sobre a realidade. Além disso, as teorias gerais e abstratas são incapazes de descrever a realidade com toda a sua riqueza e complexidade, por mais simples que possa parecer o sistema físico de interesse. Conseqüentemente, não podem ser confrontadas diretamente com os fatos e, por isso, não podem ser comprovadas. Quanto mais gerais forem as teorias científicas, menos aptidões terão para resolver problemas particulares. Contudo, as teorias científicas possuem objetivos realísticos e procuram fornecer a base para explicações e predições de aspectos da realidade, se possível, testáveis. A verificabilidade de uma teoria geral depende, pois, da construção de modelos conceituais que ao serem acolhidos por ela possam se constituir em modelos teóricos capazes de serem confrontados com os fatos e propiciarem explicações e predições para o comportamento de um sistema, processos e fenômenos físicos. Assim, se quisermos analisar o movimento de um pêndulo real, teremos de especificar que forças estão sendo exercidas sobre esse sistema, sua massa, as condições iniciais e de contorno. Ou seja, dever-se-á enriquecer a Mecânica

Clássica com um modelo conceitual do sistema físico. Em suma, teorias gerais podem ser corroboradas empiricamente a partir de modelos teóricos.

Uma vez construído o modelo teórico capaz de gerar explicações e fazer previsões, será preciso analisar a razoabilidade dos resultados obtidos e confrontá-los com os dados empíricos oriundos da observação e experiência com o sistema ou fenômeno físico em questão. Esse processo de análise e confrontação de resultados envolve uma série de testes, tanto de natureza empírica quanto racional, que acabam por evidenciar o grau de concordância entre teoria e experiência edesses com o grosso do conhecimento científico.

Dito da maneira acima, a confrontação entre resultados teóricos e dados empíricos parece demasiado simples. A fim de aprofundar essa discussão, pode-se formular a seguinte questão aos professores: por que os cientistas comparam os resultados obtidos pelos modelos teóricos com os dados empíricos, se ambos possuem erros? A resposta a essa pergunta não é trivial. Na medida em que os modelos partem de situações idealizadas, simplificadas, é de se esperar que falhem ao representar sistemas reais em certas circunstâncias. Por outro lado, as proposições de observações e a obtenção de resultados experimentais estão baseados em considerações teóricas que fornecem os fundamentos para a construção dos aparatos experimentais, para o registro de medidas e para a transformação das medidas em dados empíricos. Como exemplo, pense no conhecimento teórico empregado na construção de aceleradores para observar o comportamento de partículas inicialmente previstas por teorias científicas. Além disso, no próprio processo de observação e experimentação estão envolvidos erros intrínsecos aos instrumentos de medidas.

No artigo intitulado *Control Experimental del Modelo de Péndulo Matemático* os autores propõem que seja avaliado o erro introduzido pela idealização que: (i) despreza o atrito entre o fio e o eixo de oscilação do pêndulo; (ii) despreza a resistência entre o pêndulo e o meio no qual oscila; (iii) considera o fio inextensível e sem massa; e (iv) considera a massa pontual; e pela aproximação para pequenos ângulos de oscilação.

Ao se comparar os resultados teóricos e empíricos para o período de oscilação do pêndulo, através de gráficos, tabelas e equações, é fácil constatar a discrepância entre os mesmos. Nesse caso, já se sabe de antemão quem é o culpado: o modelo teórico e não os dados empíricos, pelo simples fato de que o modelo despreza os efeitos de atrito, de resistência do ar, além de outros, que estão presentes na prática. Porém, em geral, modelos teóricos são concebidos a partir do acolhimento de modelos conceituais por teorias gerais. Assim, o processo de apontar os culpados pode tornar-se demasiado complicado. Pode ser que o modelo conceitual seja inadequado para descrever o sistema físico. Ou, pode ser que a teoria geral não forneça uma base confiável para abordar o fenômeno de interesse. Ou ainda, que os dados empíricos contenham erros. No caso acima, parece razoável apontar o modelo conceitual como o responsável pela discrepância entre os resultados teóricos e empíricos, na medida em que assume uma série de idealizações e aproximações que, como se sabe, limitam o seu domínio de validade. Inclusive, pelo fato de que setais efeitos forem levados em consideração, mantendo-se a Mecânica Clássica como teoria geral, os resultados teóricos ajustar-se-ão com boa precisão aos dados obtidos experimentalmente.

Nesse sentido, os autores apontam que os pressupostos teóricos assumidos pelo pêndulo simples (modelo) podem ser facilmente cumpridos pelo pêndulo (objeto real), com um grau de precisão aceitável, quando esses efeitos puderem ser minimizados. Adicionalmente, sugerem que expressões como 'pequenas amplitudes', 'fio inextensível e sem massa' e 'massa pontual' podem adquirir significados inteiramente distintos daqueles que os estudantes poderiam atribuir-lhes com base meramente em suas definições.

Entretanto, para situações mais complexas, em que os cientistas não possuem certezas, os responsáveis pelos erros podem ainda ser outros que não o modelo conceitual ou a teoria geral em serviço, a saber: as teorias subjacentes ao planejamento e à execução do processo de observação e de experimentação. Mas isso já é outra discussão, que também pode ser trazida à tona.

Dorneles (2010) investigou a integração entre atividades computacionais e experimentais como recurso instrucional no ensino de eletromagnetismo em física geral. A seguir apresentar-se-á uma atividade desse estudo que combina a montagem experimental e a simulação computacional de um circuito elétrico simples e que dá margem para a discussão de conceitos-chave do processo de modelagem científica, tais como idealização, grau de precisão e domínio de validade.

O circuito elétrico envolve a associação de resistores em paralelo, como o representado esquematicamente na Figura 4. Inicialmente os professores devem predizer o que ocorrerá com as intensidades de corrente elétrica I_t , I_1 , I_2 e I_3 quando a chave A-B é fechada. Logo após, a seguinte situação-problema pode ser colocada: em que circunstâncias esse diagrama conceitual pode representar o correspondente circuito elétrico real?

Essa colocação propicia a reflexão de dois conceitos fundamentais em modelagem científica, que estão intimamente relacionados: grau de precisão e domínio de validade de modelos teóricos (ou computacionais). O domínio de validade dos modelos está relacionado com as situações físicas para as quais faz sentido empregá-los para descrever e/ou prever o comportamento de um ou mais sistemas físicos. Porém, dentro do contexto de validade do modelo é possível alcançar distintos graus de precisão para os valores associados às grandezas físicas envolvidas. Em suma, pode-se ter diferentes graus de precisão dentro de um mesmo domínio de validade.

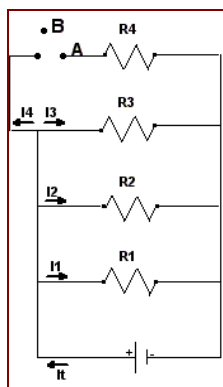


Figura 4. Diagrama de um circuito elétrico simples com resistores associados em paralelo.

Posteriormente os estudantes devem explorar o modelo computacional da Figura 5 para que percebam que I_1 , I_2 e I_3 permanecem constantes ao ser inserida ou retirada a quarta lâmpada do circuito, correspondente à resistência R_4 . Tal fato ocorre pois nesse modelo computacional a resistência elétrica dos fios e da fonte é desprezível e os resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são considerados ôhmicos, o que na prática não se verifica, ou seja, são idealizações assumidas pelo modelo teórico subjacente ao modelo computacional.

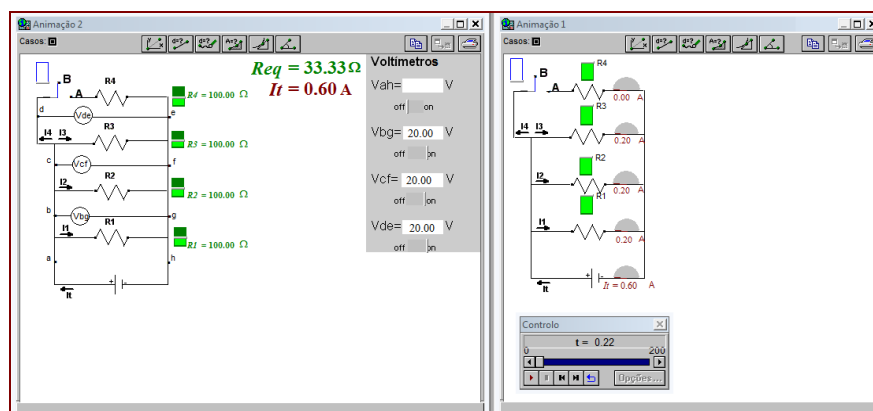


Figura 5. Janelas Animação 1 e 2 do Modélus 2.5 de uma simulação computacional sobre um circuito com fonte ideal e lâmpadas associadas em paralelo.

Na sequência os professores montam um circuito elétrico real com duas lâmpadas associadas em paralelo e procuram explicar o fato de que ao ser inserida uma terceira lâmpada em paralelo a intensidade de corrente elétrica em todas as lâmpadas é alterada, como mostra a Figura 6.

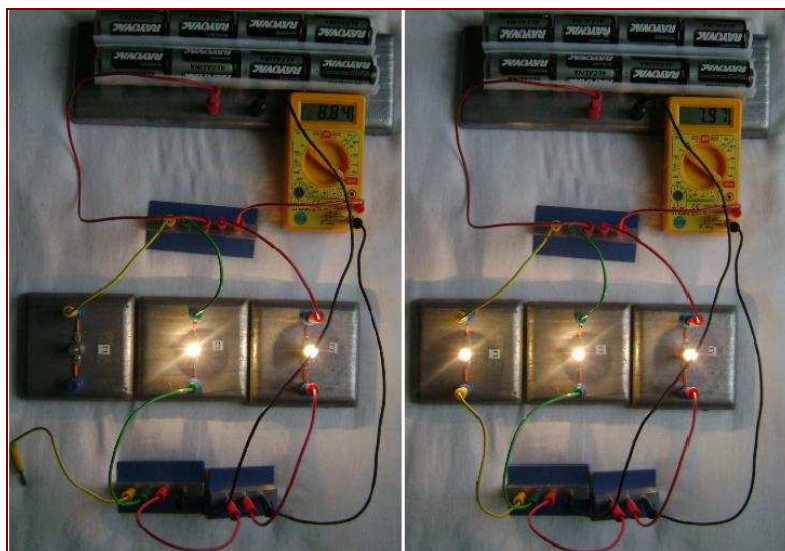


Figura 6. Circuito elétrico real com lâmpadas associadas em paralelo. O multíteste mede a diferença de potencial em cada lâmpada. À esquerda, a d.d.p é igual a 8,84 V. À direita a d.d.p é igual a 7,97 V.

Para auxiliar os professores a explicar a discrepância entre o que ocorre no modelo computacional e na experiência, um segundo modelo computacional em que a fonte possui uma resistência interna não desprezível pode ser apresentado, como mostra a Figura 7. À medida que interagem com essa simulação, os professores têm a oportunidade de perceber que quando a fonte do circuito é 'real', ao ser inserido mais um resistor em paralelo, a d.d.p. em cada resistor se altera. Essa alteração é maior, quanto maior for a intensidade de corrente elétrica no circuito, pois maior é a queda na d.d.p. devido à resistência interna da fonte. Finalmente, os professores podem compreender que se a resistência interna da fonte for muito menor que a resistência equivalente, a influência daquela será mínima e o modelo computacional com a fonte ideal representará com um grau de precisão maior o circuito real.

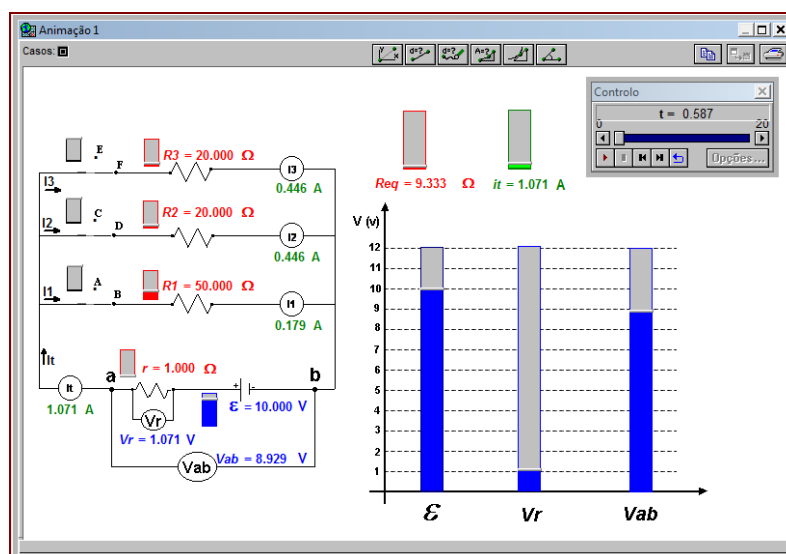


Figura 7. Janela animação de uma simulação computacional sobre um circuito com fonte 'real'.

3 IMPLICAÇÕES DA MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA PARA O ENSINO DE FÍSICA

A principal implicação da estratégia da modelagem didático-científica para o Ensino de Física diz respeito à questão das situações que costumam ser trabalhadas em sala de aula. Segundo Vergnaud (1993), “os processos cognitivos e as respostas do sujeito são função das situações com que ele se confronta” (p. 12). Ou seja, os esquemas de raciocínio que os estudantes evocam em sala de aula dependem fortemente das situações e do modo como os professores costumam abordá-las.

Situações que envolvem o enunciado de problemas altamente idealizados, cuja abordagem costuma ser excessivamente formal, exigem certos raciocínios por parte dos estudantes que permanecem restrito ao contexto escolar. Esse fato tem resultado em um distanciamento entre o Ensino de Física e a realidade experienciada pelos estudantes, chegando a gerar posturas disparatadas, como a apontada por Mazur (1997, p. 4), ao reproduzir as palavras de um estudante: “Professor Mazur, como eu devo responder essas questões? De acordo com o que você nos ensinou, ou da forma como eu penso sobre essas coisas?” Essa passagem evidencia um obstáculo a ser superado no Ensino de Física: a ruptura entre duas visões de mundo que costumam coabitar a mente dos estudantes. Uma sendo formada por concepções científicas que parecem ter pouco a ver com a realidade e a outra que, embora constituída de concepções alternativas, fornece explicações para muitas situações do dia a dia.

O desafio que se impõe a nós educadores está em reduzir o papel desempenhado pelas concepções alternativas em favor das científicas. Para tanto, é preciso redirecionar o objetivo do Ensino de Física para a reconstrução conceitual da realidade, estabelecendo conexões entre o cotidiano e os construtos da Física, que permita aos estudantes adquirir intimidade com a realidade material em outro nível, definido como realidade física (PIETROCOLA, 1999).

Nos últimos anos, a modelagem emergiu como uma estratégia didática da Física capaz de inserir conteúdos de natureza epistemológica, imbricados com os conteúdos de campos específicos, para favorecer a aquisição de conceitos e competências associadas à natureza e à construção do conhecimento científico mais adequadas à atividade científica contemporânea, cuja essência está na criação e na validação de modelos científicos (BUNGE, 1974; PATY, 1995).

A maioria dos problemas que os estudantes estão acostumados a resolver em Física se limita à manipulação de expressões matemáticas relativas a um modelo teórico que, em geral, não são associadas às entidades físicas que correspondem. Consequentemente, ao serem confrontados com situações de modelagem em Física, para as quais é preciso das habilidades apresentadas no Quadro 1, os estudantes costumam enfrentar dificuldades.

No ‘ensino tradicional’ se costuma alertar o estudante de que a realidade é demasiada complexa. Em seguida, justifica-se por meio de argumentos didático-pedagógicos que o conteúdo será introduzido através de situações altamente idealizadas com o intuito de que, em um futuro próximo, muitas vezes jamais alcançado, o estudante será capaz de compreender as situações mais realísticas. Com isso, o estudante é alertado de que o assunto é complexo e de que ele só será capaz de compreender as situações mais simples naquele momento. Mas não é dito, e sequer mostrado, o quanto restrito é o domínio de validade do conhecimento que ele acaba de adquirir. Por isso, não raramente escuta-se, por parte dos estudantes, o seguinte tipo de questionamento: em que situações eu posso aplicar essa equação, professor?

A reflexão sobre o processo de modelagem científica subjacente ao tratamento das situações abordadas em sala de aula não costuma ocorrer. Portanto, o estudante não atribui a devida importância à funcionalidade dos conhecimentos envolvidos nesse processo e, por conseguinte, à aplicabilidade dos conteúdos de conhecimento que ele constrói relativos aos mais diversos campos da Física. Assim, o que se costuma observar entre os estudantes é que eles são capazes de exemplificar por meio de algumas poucas situações onde determinado conhecimento se aplica, mas não sabem efetivamente aplicá-lo. Nesse sentido, os estudantes tendem a se desenvolverem cognitivamente privilegiando a parte teórica do conhecimento em detrimento da sua forma operatória.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. E.; RUBINI, G. A aerodinâmica da bola de futebol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 297-306, dez. 2004.

BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Perspectiva, v. 72. 1974. 243 p. (Debates)

DORNELES, P. F. T. **Integração entre atividades computacionais e experimentais como recurso instrucional no ensino de eletromagnetismo em física geral**. 2010. 367f. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GASPAR, A. **Física**. São Paulo: Ática, 2000. v. 1.

MAZUR, E. **Peer instruction: a user's manual**. Upeer Saddle River: Prentice Hall, 1997. 253 p.

MEDINA, C.; VELAZCO, S.; SALINAS, J. Control experimental del modelo de péndulo matemático. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 254-258, jun. 2002.

MONTEIRO, L. H. A., **Sistemas dinâmicos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2a Edição, 2006. 625 p.

OLIVEIRA, K. S. F.; SARAIVA, M. F. O. **Fundamentos de Astronomia e Astrofísica**. Departamento de Astronomia do IF-UFRGS, 1997. 201 p.

PATY, M. **A matéria roubada: a apropriação crítica do objeto da física contemporânea**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1995. 328 p. Tradução: Mary Amazonas Leite de Barros. (Ponta, 8).

PIETROCOLA, M. Construção e Realidade: O Realismo Científico de Mario Bunge e o Ensino de Ciências através de Modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 4, n. 3, paginação eletrônica, Dez. 1999.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. In: Seminário Internacional de Educação Matemática, 1., 1993, Rio de Janeiro. **Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática**, Rio de Janeiro: NASSER, L., 1993. p. 1-26.