
CICLOS DE MODELAGEM: UMA PROPOSTA PARA INTEGRAR ATIVIDADES BASEADAS EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE FÍSICA^{+,*}

Leonardo Albuquerque Heidemann

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

IF – UFRGS

Ives Solano Araujo

Eliane Angela Veit

Instituto de Física – UFRGS

Porto Alegre – RS

Resumo

Neste trabalho, defendemos o desenvolvimento de ciclos de modelagem, conduzidos a partir das ideias de David Hestenes, como uma alternativa para nortear propostas didáticas que integrem atividades experimentais e atividades baseadas em simulações computacionais. Através de uma estratégia que estimula os alunos a explorarem os domínios de validade dos modelos teóricos e a dominar diferentes tipos de ferramentas de representação, propomos que a metodologia aqui apresentada tem potencial para promover uma concepção de ciência mais coerente com visões epistemológicas contemporâneas, percebendo o fazer ciência como uma atividade tipicamente humana, através da qual os cientistas buscam construir representações dos fenômenos físicos, com grau de precisão variado e contexto limitado. Por fim, apresentamos possibi-

⁺ Modeling cycles: A framework to guide actions combining computer-based simulations and experimental activities in Physics Education

^{*} Recebido: janeiro de 2012.
Aceito: junho de 2012.

lidades de uso dos softwares Tracker e Modellus para explorar os limites do domínio de validade de um modelo teórico de pêndulo simples durante um ciclo de modelagem. Em uma aplicação com alunos de um Mestrado Profissional em Ensino de Física, tal ciclo se mostrou importante para explicitar aos alunos-professores as diferenças entre o modelo teórico estudado e fenômenos empíricos, na tentativa de contribuir para o aprofundamento da compreensão deles sobre o processo de modelagem científica. Alguns aspectos práticos dessa aplicação e de outra envolvendo a lei de resfriamento de Newton também são discutidos no presente artigo.

Palavras-chave: Ciclos de modelagem. Atividades experimentais. Simulações computacionais.

Abstract

In this paper we argue about the use of modeling cycles from David Hestenes' framework as an alternative to guide actions combining computer-based simulations and experimental activities. From a strategy that challenges students to explore the domain of validity of theoretical models and to control a diversity of representation tools, we suggest that the methodology presented here has potential to promote a more coherent conception of Science, in which students perceive its developing as something typically human in which scientists attempt to construct representations of physical phenomena, with varying degree of accuracy and limited context. Finally, we present some possibilities to use the softwares Modellus and Tracker to explore the boundaries of the validity domain of the theoretical model known as simple pendulum during a modeling cycle. Applying with Brazilian students from a professional Master's Degree in Physics Education, the cycles were important to highlight the differences between the theoretical model studied and the empirical phenomena, helping to improve their understanding of the process of scientific modeling. Some practical issues about this proposal implementation and another involving Newton's law of cooling are also discussed in this paper.

Keywords: *Modeling cycles. Experimental activities. Computer simulations.*

I. Introdução

Na medida em que a popularização dos computadores pessoais revolucionava o cotidiano das pessoas no final da década de 80, um novo campo de pesquisa surgia e se desenvolvia em passo acelerado: o das investigações relacionadas aos efeitos de Atividades baseadas em Simulações Computacionais¹ (ASC) na aprendizagem dos alunos. Ainda que apenas uma pequena parcela dessas investigações tenha passado por uma avaliação rigorosa, como destacam Araujo, Veit & Moreira (2008) e Moreira (2004), os trabalhos realizados com o intuito de avaliar o potencial das ASC no ensino de Física têm atribuído algumas vantagens ao seu uso, como a capacidade de proporcionar a interação do aluno com “experimentos virtuais”, substitutos de experimentos reais potencialmente perigosos, caros, ou que, por algum motivo, não são passíveis de reprodução em laboratório (MEDEIROS & MEDEIROS, 2002), e a possibilidade de munir o aluno de múltiplas representações simultâneas de determinado fenômeno físico (VEIT; TEODORO, 2002; HENNESSY; DEANEY; RUTHVEN, 2006), facilitando a aprendizagem dos conteúdos.

Apesar de passados mais de trinta anos desde os primeiros trabalhos envolvendo ASC e das diversas potencialidades que essas investigações atribuem ao uso de tal recurso no ensino de Física, ainda é possível detectar o desconhecimento sobre os melhores usos dessa ferramenta didática entre professores de Física de nível médio (HEIDEMANN, 2011). Diversos dos velhos equívocos relacionados ao desenvolvimento de atividades experimentais, destacados na literatura, têm se repetido nas ASC. Talvez o erro mais comum seja o emprego de roteiros fortemente dirigidos do tipo “receitas de bolo”, em que os alunos seguem os passos indicados rigorosamente, sem refletir sobre o conteúdo abordado (HODSON, 1994; BORGES, 2002). Além disso, ainda encontramos frequentemente professores que exploram ASC com o intuito de que seus alunos “provem” leis físicas (HEIDEMANN, 2011), o que é evidentemente um equívoco epistemológico (CARVALHO, 2010). Provavelmente, esse quadro contribuiu significativamente para que os

¹ Neste trabalho, a expressão “atividades baseadas em simulações computacionais” é empregada para atividades em que os alunos interagem com uma simulação computacional individualmente ou em pequenos grupos. Não abarcamos, nessa expressão, demonstrações feitas pelo professor com um projetor multimídia, por exemplo.

alunos apresentem uma concepção de ciência inadequada, como ressaltam Brandão, Araujo & Veit (2011).

Recentemente, pesquisas estão sendo desenvolvidas focando integrações de ASC e Atividades Experimentais² (AE). Apesar de algumas investigações sugerirem que apenas um desses recursos é suficiente para o ensino de Física (e.g. FINKELSTEIN *et al.*, 2005; TAREKEGN, 2009), os resultados obtidos pelas pesquisas que efetivamente têm comparado a aprendizagem de grupos que usam integrações de ASC e AE com grupos que usam tais recursos isoladamente são consensuais em um ponto: a combinação dessas ferramentas didáticas de maneira adequada pode ser mais eficaz na aprendizagem de Física do que seu uso individual (e.g. RONEN; ELIAHU, 2000; ZACHARIA, 2007; DORNELES, VEIT; ARAUJO, 2009). Isso ocorre principalmente pelo fato de que, com uma integração, é possível que o aluno usufrua das potencialidades de ambas atividades (JAAK-KOLA; NURMI, 2008; ZACHARIA; ANDERSON, 2003). Hennessy, Deaney & Ruthven (2006) destacam, ainda, que, com o uso combinado, é possível evidenciar as diferenças substanciais entre teoria e realidade. Devido a tal fato, integrações têm potencial para promover uma boa visão de ciência nos aprendizes, indo ao encontro do que diversos pesquisadores têm destacado como um dos aspectos centrais do ensino de Ciências (e.g. HODSON, 1994; ANDRÉS; PESA; MOREIRA, 2006).

Neste trabalho, partimos do princípio de que ASC e AE são recursos potencialmente complementares que podem contribuir para a aprendizagem de conteúdos de Física e promover uma melhor concepção de Ciência por parte dos estudantes. Nesse contexto, apresentamos os ciclos de modelagem de David Hestenes como uma alternativa para amparar metodologicamente atividades que integrem AE e ASC. Além disso, propomos o uso dos *softwares* Tracker e Modellus para explorar os limites do domínio de validade de um modelo de pêndulo simples durante um ciclo de modelagem. Alguns aspectos de dois ciclos conduzidos com alunos de um mestrado profissional em ensino de Física são destacados ao final.

II. Referencial de Trabalho

Nesta seção, destacamos alguns dos principais argumentos ressaltados na literatura com o intuito de enfatizar a importância que o processo de modelagem

² O termo “atividade experimental” será empregado para atividades em que os alunos manuseiem diretamente um experimento real em pequenos grupos. Não estamos abarcando, nessa expressão, demonstrações experimentais feitas pelo professor.

científica ostenta no contexto do ensino de Física. Em seguida, discutimos de que modo o computador pode assumir um papel importante no desenvolvimento da Física e no seu ensino, ressaltando a potencialidade de ASC integradas com AE para se enfatizar aos estudantes de Física o caráter aproximativo dos modelos teóricos. Por fim, apresentamos a proposta de David Hestenes para o desenvolvimento de ciclos de modelagem. As ideias de Hestenes ampararam a estrutura da proposta didática que será tratada na seção 3 deste artigo.

II.1 Modelagem científica e o Ensino de Física

Frequentemente expresso de maneira informal entre cientistas, o termo “modelo” tem sido utilizado com os mais diversos significados (KRAPAS et al., 1997; HESTENES, 2006). Apesar disso, podemos dizer que a essência do significado usado pela maioria dos pesquisadores é que modelos são representações simplificadas da realidade confeccionadas com o intuito de descrever, analisar ou explorar objetos ou fenômenos. Nesse sentido, a Física pode ser caracterizada como uma complexa rede de modelos interligados por um sistema de princípios teóricos (HESTENES, 1996) e, portanto, a “compreensão física” pode ser entendida como um conjunto complexo de habilidades de modelagem, isto é, de habilidades cognitivas para criação e uso de modelos. Para Hestenes, o principal objetivo do ensino da Física deve ser o de desenvolver as habilidades de modelagem dos estudantes para dar sentido à sua própria experiência física e para que ele possa avaliar informações relatadas por outros.

Existem razões epistemológicas para se enfatizar os modelos científicos à frente das teorias no ensino de Física. Dentre elas, Hestenes (1994) destaca que, ao contrário das teorias, os modelos teóricos são testáveis, ou seja, princípios teóricos são empiricamente validados somente através de suas implementações em modelos. Podemos dizer, então, que as teorias se relacionam com o mundo real somente através de modelos. Ademais, os modelos são unidades básicas de conhecimento científico coerente. A coerência e a completude de uma teoria só são evidentes em seus modelos.

Sob o enfoque cognitivo, também encontramos razões para defender a ênfase nos modelos no ensino de Física. A aprendizagem de Física perpassa pelo domínio de situações que forneçam sentido aos seus conceitos (MOREIRA, 2002; RICARDO, 2010; ANDRÉS; PESA; MOREIRA, 2006). Dessa forma, princípios teóricos são melhor aprendidos a partir de modelos, pois eles fornecem contexto para os princípios teóricos promovendo situações que dão sentido aos conceitos a serem aprendidos.

Por si só, a exposição de modelos teóricos não contextualiza o ensino de Física, pois a simples apresentação de relações ilustrativas com o cotidiano dos alunos ou de exemplos de aplicações da Física não é suficiente para isso. Ricardo (2010), por exemplo, destaca que “um ensino contextualizado é resultado das escolhas didáticas do professor, envolvendo conteúdos e metodologias, e com um projeto de ensino bem definido”. É por esse e por outros motivos que diversas são as propostas de atividades no ensino de Física focadas na modelagem, como é ressaltado por Brandão, Araujo & Veit (2011). Nessas propostas, o computador vem assumindo papel de destaque (TEODORO, 2003), e elas, enquanto metodologias centradas em evidenciar as relações entre os modelos e a realidade, possibilitam o desenvolvimento de um ensino de Física contextualizado. Nessa direção, Pietrocola (1999, p. 225-226) destaca esse papel da modelagem no ensino de Física:

Ao introduzirmos a modelização como objeto do ensino de Física estaremos instrumentalizando os alunos a representarem a realidade a partir das teorias gerais. A preocupação com o contexto de construção do conhecimento científico não deve ser deixado de lado, mas submetido ao objetivo maior da educação científica que é o de assegurar ao indivíduo uma melhor relação com o mundo em que vive. A explicitação e exemplificação das teorias Físicas como capazes de nos fornecer um quadro da realidade, mesmo que ele seja pintado em diversos estilos diferentes, gera competição (no aspecto positivo do termo) entre as concepções científicas e as concepções alternativas. A possibilidade de comparação e a tomada de decisões sobre qual forma representar a realidade tornará os alunos mais críticos e mais capazes de desfrutar dos insights que tem apaixonados cientistas ao longo dos tempos.

O Quadro 1 apresenta uma comparação proposta por Brewe (2008) entre o ensino centrado na modelagem e o ensino tradicional.

Entendida como linguagem estruturante do conhecimento físico (PIETROCOLA, 2002), a Matemática assume papel de destaque no processo de modelagem, pois ela se torna fundamental para uma sólida avaliação da adequação de modelos teóricos aos fenômenos físicos. Hestenes (1996) defende ainda que, assim como as ferramentas matemáticas, o ensino centrado na modelagem deve favorecer a aprendizagem de outras ferramentas de representação por parte dos alunos, como as verbais e gráficas. Para o autor, o discurso e a capacidade de argumentação dos estudantes evoluem na medida em que eles adquirem domínio sobre esses instrumentos.

Hoje já é possível introduzir muitos dos detalhes dos modelos teóricos em programas de computador. Desse modo, o computador pode emular o comporta-

mento de fenômenos físicos com rapidez e facilidade impressionantes, dentro de certo grau de precisão e limite de validade. Nessa direção, é natural que o computador surja como uma ferramenta de modelagem de duas formas diferentes (HES-TENES, 1994): para a construção e análise de modelos, e para a validação dos modelos. Na primeira modalidade, o computador facilita o uso de representações que seriam improváveis sem eles, como, por exemplo, a possibilidade de se alterar o ângulo de visão de simulações em três dimensões. Já na segunda, o computador é utilizado para comparar as previsões dos modelos teóricos com dados empíricos.

Quadro 1 – Comparação entre o ensino focado na modelagem e os cursos tradicionais (BREWE, 2008).

Ensino centrado na Modelagem	Cursos Tradicionais
Modelos são construídos baseados em leis físicas e em condições de contorno.	Leis são apresentadas na forma de equações e são usadas na resolução de problemas.
Modelos são construídos com o auxílio de ferramentas de representação e, então, são usados para resolver problemas.	A resolução de problemas é predominantemente uma atividade de manipulação de equações.
Modelos são temporários e podem ser validados, refinados e expandidos.	O conteúdo é permanente; a validação já foi realizada.
Modelos são aplicados em situações físicas específicas.	Leis são aplicadas em situações físicas específicas.
A modelagem é um processo que é aprendido pelo acúmulo de experiência.	A resolução de problemas é um jogo que requer truques e é aprendida pela resolução de um grande número de problemas.
Modelos são distintos dos fenômenos que representam e podem incluir elementos causais, descritivos e preditivos.	O conteúdo é indistinguível do fenômeno físico.

II.2 A modelagem científica e as combinações entre atividades computacionais e atividades experimentais

Atualmente, pouco se faz em ciência sem recursos computacionais. Em um de seus relatórios de 1989, o National Research Council (NRC) (apud VEIT; TEODORO, 2002) afirma que a “computação científica pode ser considerada uma terceira metodologia fundamental das Ciências, paralela aos paradigmas experimental e teórico das ciências, mais bem estabelecidos”. Por isso, os modelos, que

já foram os mediadores entre teorias e realidade, hoje podem ser concebidos como os mediadores entre as teorias, a realidade e as simulações computacionais: o tripé metodológico que sustenta o desenvolvimento científico. A Figura 1 ilustra esse processo de mediação entre experiência, simulação computacional e teoria.

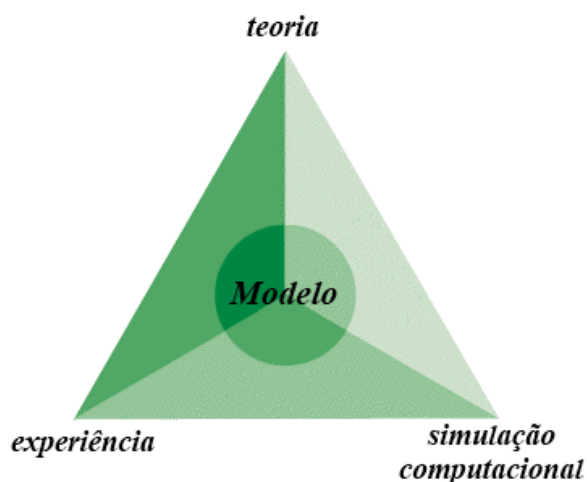


Fig. 1 – Os modelos podem ser concebidos como os mediadores entre as teorias, a realidade e as simulações computacionais (BRANDÃO, 2008).

Isso ocorre porque, assim como as teorias científicas, as simulações computacionais são desenvolvidas com base em modelos e nunca abarcam todas as características do sistema físico. Os modelos computacionais são “recortes” da realidade, ou seja, são implementações computacionais de modelos específicos, e, como tais, desprezam diversos aspectos do sistema real, a fim de focar a atenção em certos aspectos particulares da natureza, o que facilita a compreensão do fenômeno físico. Além disso, as teorias envolvidas no processo admitem entidades ideais e mecanismos internos imaginários. Portanto, as simulações computacionais proporcionam ao aluno a interação com uma natureza ideal, ou melhor, com uma representação do objeto ou fenômeno escolhido no processo de modelagem. Tal fato é destacado por Medeiros & Medeiros (2002, p. 80):

Seria primordial notar-se que um sistema real é frequentemente muito complexo e as simulações que o descrevem são sempre baseadas em modelos que contêm, necessariamente, simplificações e aproximações da realidade.

[...] Existe uma diferença significativa entre o ato de experienciar-se um fenômeno através de um fenômeno real e de uma simulação computacional.

Ao contrário das ASC, as AE, que têm o papel de avaliar os modelos teóricos segundo Bunge (1974), possibilitam que o aluno se aproxime dos referentes reais e dos eventos em análise, propiciando-lhe melhores condições para apreciar a influência dos aspectos desprezados pelo modelo. A análise de erros evidencia aos alunos o papel da modelagem científica, enfatizando o caráter abstrato dos modelos e possibilitando uma avaliação da precisão dos mesmos. Portanto, usos integrados de AE e ASC têm potencial para promover a aprendizagem baseada nos três aspectos centrais do ensino de Física (HODSON, 1994, p. 305):

- (1) aprender ciência – adquirir e desenvolver conhecimento conceitual e teórico;*
- (2) aprender acerca da ciência – desenvolver uma compreensão sobre a natureza e métodos da ciência e uma percepção das complexas interações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente;*
- (3) fazer ciência – empenhar-se e desenvolver competências em investigação científica e resolução de problemas.*

II.3 Os Ciclos de Modelagem de David Hestenes

O ensino de Física por meio de ciclos de modelagem parte do princípio de que os alunos aprendem de forma mais significativa a partir de atividades que os envolvam ativamente na construção e utilização de modelos e que os façam comunicar seus resultados aos colegas. Para otimizar a aprendizagem, essas atividades devem ser cuidadosamente planejadas e gerenciadas pelo professor.

Dentre as muitas propostas de estruturas de atividades focadas na modelagem, os ciclos de modelagem de David Hestenes (2006) têm se destacado como uma das mais promissoras. Tal proposta vem sendo amplamente divulgada e utilizada nos Estados Unidos, onde aproximadamente 10% dos professores de Física já participaram de, no mínimo, um curso de formação para se familiarizar com seus ciclos de modelagem (BREWE, 2008). Somente no verão de 2011, foram realizados quarenta e oito *workshops* envolvendo mais de oitocentos professores (MIP, 2011). No entanto, apesar da proporção que tal proposta vem assumindo entre os norte-americanos, possivelmente os ciclos de modelagem apresentados no presente artigo sejam os primeiros conduzidos no Brasil. A fim de divulgar tal metodologia e destacar suas potencialidades, apresentamos, nesta seção, alguns dos aspectos mais importantes dos ciclos de modelagem de Hestenes.

Como citado anteriormente, Hestenes (1996) entende que o objetivo primordial do ensino de Ciências é desenvolver nos alunos habilidades para confeccionar e usar modelos para que eles possam entender o mundo físico e avaliar informações relatadas por outros. Buscando abranger tal objetivo, o autor propõe que o ensino de Ciências seja desenvolvido por meio de ciclos de modelagem. Tais ciclos são divididos em dois estágios principais, denominados pelo autor como *desenvolvimento do modelo e implementação do modelo*.

Tipicamente o primeiro estágio começa por uma demonstração e uma discussão em classe. Nessa fase, denominada *discussão pré-laboratorial*, o objetivo é estabelecer um entendimento comum de uma pergunta a ser respondida sobre a natureza (JACKSON; DUKERICH; HESTENES, 2008). Essa demonstração pode ser conduzida de diferentes formas, podendo ser explorados vídeos, simulações computacionais, experimentos de laboratório, etc. Além disso, ao contrário de iniciar pela exposição de uma situação física para que os estudantes explorem e construam um modelo teórico com o intuito de descrevê-lo, o ciclo pode começar com a apresentação de um modelo teórico, cabendo aos alunos avaliar a sua adequação para descrever uma determinada situação. O essencial é que o problema envolva o uso de habilidades e ferramentas de modelagem (HESTENES, 1996) e, para isso, até mesmo típicos problemas acadêmicos podem ser adaptados para ciclos de modelagem. Brewe (2008) apresenta um exemplo que é exibido no Quadro 2.

Quadro 2 – Exemplo de problema adaptado para atividades de modelagem (BREWE, 2008).

Problema Padrão	Problema de Modelagem
Uma corda é usada para puxar um bloco de 3,57 kg ao longo de 4,06 m com velocidade constante em um piso horizontal. A força exercida pela corda sobre o bloco tem uma magnitude de 7,68 N e forma um ângulo de $15,0^\circ$ com a superfície. Quais são (a) o trabalho realizado pela força da corda, (b) o aumento da energia térmica do sistema bloco-piso, e (c) o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso?	Construa o modelo mais completo que conseguir da seguinte situação: Um bloco de 3,57 kg é puxado com velocidade constante ao longo de 4,06 metros de um piso horizontal por uma corda. A força exercida pela corda sobre o bloco tem uma magnitude de 7,68 N e forma um ângulo de $15,0^\circ$ com a superfície.

A segunda fase do primeiro estágio dos ciclos de modelagem é denominada *investigação*. Em pequenos grupos, os alunos trabalham no planejamento e condução de experimentos para responder ou esclarecer o problema proposto (JACKSON; DUKERICH; HESTENES, 2008). Durante essa fase, os professores devem estar preparados para introduzir novas ferramentas de representação na medida em que os alunos estiverem preparados para fazer bom uso delas. Hestenes (2006) destaca que é necessário dar maior atenção ao papel crítico do tipo de representação no desenvolvimento da compreensão física. Deve-se reconhecer que a habilidade de modelar, e assim compreender, depende das ferramentas disponíveis (equações, gráficos, tabelas, diagramas, etc.). Portanto, as atividades devem ser projetadas para desenvolver habilidades no estudante para utilizar tais ferramentas. Além disso, os termos técnicos também são introduzidos pelo professor na medida em que são necessários para aprimorar a qualidade do discurso dos estudantes. Durante esse processo, os alunos contam com o auxílio de um pequeno quadro branco (120 cm x 90 cm) onde compartilham suas ideias. Esse mesmo quadro voltará a ter um papel de destaque na última fase desse estágio do ciclo de modelagem, quando os alunos comunicam seus achados de forma oral aos colegas e dialogam comparando os resultados de cada grupo. A Fig. 2 apresenta um desses quadros brancos sendo utilizado em um ciclo de modelagem.

Ainda durante a fase de investigação, os estudantes devem avaliar a adequação do modelo teórico utilizado para representar o fenômeno físico estudado. Hestenes (1996) ressalta que não é de se esperar uma correspondência perfeita, porque cada modelo é uma representação incompleta, isto é, há sempre algumas características do sistema que não são representadas pelo modelo. Essa avaliação de validade passa por uma análise do que é negligenciado pelo modelo teórico, e pode envolver também um balanço das fontes de incerteza dos experimentos e das consequentes incertezas dos dados empíricos obtidos.

A última fase do estágio de desenvolvimento dos ciclos de modelagem é denominada *discussão pós-laboratorial*, na qual os alunos apresentam e justificam as suas conclusões na forma oral e escrita (JACKSON; DUKERICH; HESTENES, 2008). Para isso, utilizam as mais diversas ferramentas de representação, destacando-as em seus quadros brancos, como é ilustrado na Figura 2. Com isso, busca-se aprimorar a habilidade de argumentação dos alunos e a qualidade de seus discursos. Durante essa etapa, é importante estabelecer um clima de abertura e respeito em que cada estudante se sinta incentivado a participar. O professor assume o papel de mediador e fica atento às principais concepções alternativas que os alunos externalizam sobre os conteúdos de Física abordados. Esses equívocos são discutidos com os estudantes, que são convidados a explicitar suas ideias e seu raciocínio, de modo que, a partir de suas contribuições, se estabeleçam as bases para o compartilhamento de significados entre os participantes do processo de ensino-

aprendizagem. A participação ativa dos estudantes nas etapas anteriores do ciclo de modelagem melhora a qualidade dessa discussão de encerramento (HESTENES, 2006).



Fig. 2 – Estudantes apresentando seus resultados aos colegas.

No segundo e último estágio dos ciclos de modelagem, denominado *implementação*, os estudantes utilizam o modelo recém explorado em novas situações para refinar e aprofundar a sua compreensão (JACKSON, DUKERICH & HESTENES, 2008). Os estudantes trabalham em problemas desafiadores em pequenos grupos, e depois apresentam e defendem seus resultados para a classe por meio dos quadros brancos. Essa fase inclui questionários, testes, trabalhos em laboratório, implementação computacional, etc. O Quadro 3 resume os estágios e as fases dos ciclos de modelagem de Hestenes.

O elemento mais crítico na implementação bem sucedida dos ciclos de modelagem é a habilidade do professor em sala de aula. Ele deve ter clareza dos seus objetivos e deve manter sempre um ambiente de abertura com seus alunos. Os estudantes devem ser envolvidos repetidamente nas discussões sobre modelagem para que naturalmente substituam termos vagos da linguagem cotidiana por termos científicos e esse processo pode durar semanas (HESTENES, 1996).

Quadro 3 – Resumo dos estágios e das fases dos ciclos de modelagem propostos por Hestenes.

Primeiro Estágio: Desenvolvimento do modelo	1) Discussão pré-laboratorial: professor apresenta o problema. 2) Investigação: em pequenos grupos, os alunos trabalham no planejamento e na condução de experimentos. 3) Discussão pós-laboratorial: em conjunto, os alunos apresentam e justificam as suas conclusões na forma oral e escrita por meio dos quadros brancos.
Segundo Estágio: Implementação do modelo	Alunos implementam o modelo recém confeccionado em outras situações. • Problemas • Novos experimentos • Implementação computacional

III. Relato de experiência

Nas seções que seguem, apresentamos um relato do desenvolvimento de dois ciclos de modelagem, assim como duas alternativas de uso do computador para o desenvolvimento de um desses ciclos de modelagem. Nessa experiência, coletamos dados por meio de observações realizadas durante o desenvolvimento das atividades, de mensagens eletrônicas enviadas pelos estudantes antes da execução dos ciclos de modelagem, de gravações em vídeo das discussões em grande grupo dos ciclos com o uso dos quadros brancos, e de gravações em áudio de entrevistas semiestruturadas. Devido à indisponibilidade de alguns alunos, essas entrevistas, realizadas cerca de um mês após o término do semestre letivo, foram conduzidas com sete dos treze estudantes participantes do estudo. O foco da coleta de dados esteve voltado para a avaliação dos seguintes aspectos associados aos ciclos de modelagem:

- a aprendizagem do conteúdo e de procedimentos;
- a importância da discussão final em grande grupo para o compartilhamento de significados;

- as dificuldades enfrentadas pelos alunos na realização das atividades;
- o uso dos quadros brancos para que os estudantes apresentem seus modelos teóricos.

De modo a não estender demasiadamente este trabalho, a seção 3.3, sobre os modos como o computador pode ser utilizado para a resolução dos problemas propostos, se aterá a apresentar possibilidades para o primeiro dos ciclos de modelagem. Uma discussão sobre resultados obtidos nos dois ciclos de modelagem será apresentada na seção 4 deste trabalho.

III.1 Implementação do ciclo de modelagem

Durante o segundo semestre de 2011, conduzimos dois ciclos de modelagem no decorrer de cinco aulas, cada uma delas com quatro horas de duração, em uma disciplina sobre o uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) no ensino de Física, integrante da grade curricular de um Mestrado Profissional em Ensino de Física (MPEF). Os 13 estudantes matriculados na disciplina participaram de nosso estudo.

Devido à polissemia com que o termo “modelo” é utilizado tanto informalmente como em trabalhos publicados na área, decidimos por adotar, em nossa experiência, a concepção de modelagem científica de Mario Bunge (1974). Para ele, o processo de modelagem científica começa pela definição de uma questão que se queira responder sobre algum fenômeno do mundo físico. Focado no propósito de responder a essa questão, é realizado, então, o delineamento de um *objeto-modelo* (também chamado de *modelo conceitual*), ou seja, constitui-se uma representação conceitual esquemática de algo ou de uma situação real ou suposta como tal. Para isso, simplifica-se a descrição do mundo real. Em outras palavras, definem-se os traços-chave dos objetos concretos (os elementos reais pertinentes para a confecção do modelo científico) e, portanto, os modelos conceituais sempre negligenciam muitos aspectos da realidade. A incorporação de um objeto-modelo em uma teoria geral (se possível) resulta, finalmente, no que Bunge denomina como *modelo teórico* ou *teoria específica*. Caso as discrepâncias entre os dados factuais e os dados teóricos sejam maiores do que o desejado, modificações podem ser implementadas tanto no modelo conceitual como na teoria geral considerada.

Todo modelo teórico versa, em última análise, sobre objetos reais ou supostos como tais. Além disso, a ciência busca tratá-los de maneira objetiva (separando-os do sujeito e considerando-os invariantes com respeito ao operador) e verdadeira (adequada). Esses objetos reais (independentes da mente) são chamados *referentes* e, sem eles, não há sentido na teorização de uma teoria específica. Só se

pode estimar a adequação de um modelo teórico comparando-o com o comportamento dos referentes reais considerados. De modo geral, quanto mais referentes forem considerados pelo modelo conceitual, mais complexo será o modelo teórico e maior será a precisão da teoria específica. No entanto, um modelo teórico nunca produzirá uma “imagem especular” da realidade. Por isso, não se pode esperar que tal adequação seja completa, se não for por outro motivo, pelo menos porque uma teoria física é construída pela invenção de um modelo simplificado e inteiramente hipotético do referente pretendido (BUNGE, 1974).

Os estudantes que participaram de nossa experiência já haviam tomado conhecimento de aspectos da modelagem científica de Mario Bunge em disciplina anterior e no início do semestre da disciplina em que introduzimos os ciclos de aprendizagem. Nessas aulas, os alunos realizaram tarefas que envolviam o uso de diagramas AVM (LÓPEZ RIOS; VEIT; ARAUJO, 2011; ARAUJO; VEIT; MOREIRA, 2012) para elucidar o processo de modelagem em simulações computacionais. No entanto, antes dos ciclos de modelagem, não foram utilizados experimentos reais em nenhuma das aulas ministradas na disciplina. Os alunos, todos professores de Física em exercício, mostravam-se, em sua maioria, interessados e empenhados nas atividades propostas no curso. Tratando-se de alunos de um mestrado profissional, que se submeteram a uma prova de seleção com concorrência de, no mínimo, quatro candidatos por vaga, podemos dizer que os estudantes que participaram de nosso estudo pertencem a uma amostra privilegiada em nosso Estado. Apesar disso, cabe ressaltar que faz muitos anos que a maioria deles concluiu seus cursos de graduação e diversos deles não tiveram mais contato com conteúdos de Física de Ensino Superior desde então. Neste artigo, destacamos alguns aspectos que consideramos mais pertinentes relacionados a essas duas atividades. Centramo-nos, principalmente, no desenvolvimento do primeiro desses dois ciclos, enfatizando a forma como ferramentas computacionais podem ser utilizadas para explorar o problema proposto nessa atividade.

III.2 Os problemas propostos

Dois problemas de natureza distinta foram explorados nos dois ciclos de modelagem realizados. No primeiro deles, apresentamos aos estudantes um modelo teórico e solicitamos que fosse investigado seu poder de predição em diferentes situações. Já no segundo, descrevemos um fenômeno físico e solicitamos aos alunos que elaborassem um modelo teórico para representá-lo. Em ambos os ciclos, nosso objetivo foi, acima de tudo, enfatizar o processo de modelagem de fenômenos físicos e levar os estudantes a identificarem situações que forneçam sentido a

modelos teóricos da Física. Embora apresentemos aqui os problemas propostos nos dois ciclos de modelagem conduzidos, o foco do presente artigo é uma análise do desenvolvimento de um deles: o primeiro. No entanto, optamos por destacar, também, alguns aspectos do segundo ciclo de modelagem que consideramos que enriquecem nossa análise.

É bastante comum, no desenvolvimento de AE e ASC, a busca pela “prova” ou até mesmo “descoberta” das teorias gerais, quando nem ao menos os estudantes utilizam tais teorias de forma direta, mas sim se amparam em modelos teóricos que se valem de tais teorias. Buscando afastar-se desse frequente equívoco epistemológico, nosso trabalho se voltou para o seguinte foco: o uso de ASC e AE com o intuito de explorar a precisão das previsões de alguns modelos teóricos da Física sobre os diferentes fenômenos físicos.

Os ciclos de modelagem desenvolvidos tiveram algumas modificações em relação à proposta original de Hestenes. Dentre elas, talvez a mais importante tenha sido a forma como os problemas são propostos aos estudantes. Diferentemente das questões tipicamente apresentadas nos ciclos de Hestenes e de seus colaboradores, optamos por atividades mais “abertas”, nas quais os alunos ficam responsáveis por mais do que apenas coletar e analisar dados. É também solicitado a eles o levantamento de hipóteses e o delineamento do trabalho. Em outras palavras, não delimitamos que tipo de atividade os estudantes deveriam conduzir com o objetivo de explorar o problema proposto; eles tinham liberdade para definir de que forma iriam abordar a questão apresentada, tendo inclusive a possibilidade de optar por AE ou ASC para tentar respondê-la. Podemos dizer que as atividades desenvolvidas encontram-se no grau IV de liberdade intelectual de Pella (apud CARVALHO, 2010) ou no nível 2 de atividade investigativa de Tamir³ (apud BORGES, 2002). Cabe ressaltar, no entanto, que os professores auxiliavam os grupos permanentemente durante o processo de delineamento dos procedimentos que seriam executados no ciclo de modelagem, tanto com sugestões como com incentivo ao uso de ferramentas de representação.

Outra distinção importante entre os ciclos conduzidos e a proposta de Hestenes está relacionada ao estágio de implementação do modelo teórico. Devido ao seu caráter exploratório, estávamos focados primordialmente em avaliar como

³ Nas atividades de grau IV de liberdade intelectual de Pella, o professor apresenta um problema e os alunos formulam hipóteses, produzem um plano de trabalho, coletam dados e apresentam suas conclusões. Já nas atividades investigativas de nível 2 de Tamir, o problema é dado pelo professor, enquanto os procedimentos e as conclusões ficam a cargo dos estudantes.

os estudantes exploram e confeccionam modelos teóricos e em como a metodologia utilizada pode influir na forma como aprendem. Por isso, o segundo estágio do ciclo de modelagem, no qual os estudantes deveriam utilizar o modelo teórico recém explorado em novas situações, não foi realizado em nossa investigação. Em relação ao primeiro ciclo, buscamos evidenciar os limites do domínio de validade de um modelo teórico em que utilizamos o objeto-modelo do pêndulo simples e o exploramos com a mecânica newtoniana⁴. Entre outros objetivos, procuramos, com essa atividade, levar os estudantes a avaliarem o significado da condição de pequenas amplitudes, frequentemente utilizada neste modelo com o intuito de simplificar sua solução. O problema foi enunciado do seguinte modo:

É comum reduzirmos a descrição de movimentos pendulares ao modelo de pêndulo simples. Nesse modelo são consideradas algumas idealizações e aproximações que limitam seu poder preditivo sobre fenômenos físicos “reais”. Nesta tarefa exploraremos o contexto de validade do modelo de pêndulo simples. Para isso, queremos que vocês, seja por meio de atividades experimentais ou computacionais, explorem os limites nos quais a incerteza do período predito pelo modelo de pêndulo simples é menor que 5%.

Para possibilitar aos estudantes um tempo maior para o planejamento dos procedimentos que realizariam para explorar o problema proposto, apresentamos o enunciado da atividade com duas semanas de antecedência em relação ao desenvolvimento do ciclo de modelagem. Além disso, solicitamos que os alunos nos enviassem mensagens eletrônicas compartilhando conosco suas ideias para investigar o modelo de pêndulo simples.

A questão-foco do segundo ciclo de modelagem fornecia aos alunos uma tabela com dados referentes à temperatura da água de um prato aberto e de um prato fechado, além da temperatura ambiente do dia em que foi realizado o experimento. Os estudantes foram, então, incentivados a explicarem as diferenças entre os decaimentos das temperaturas das águas dos dois pratos. Abaixo, apresentamos o enunciado do problema.

Os dados⁵ da tabela apresentam medidas de temperatura de dois pratos cheios de água (um deles aberto e outro fechado) em função do tempo. Também é apresentada a temperatura ambiente do local onde o experimento foi realizado.

⁴ Por simplicidade, doravante denominaremos tal modelo como “modelo de pêndulo simples”.

⁵ Dados gentilmente cedidos pelo Prof. Dr. Fernando Lang da Silveira (UFRGS).

No dia em que foi realizado o experimento (início de janeiro), a umidade relativa era de 70%. O local onde os dois pratos ficavam era próximo de uma janela que estava aberta. Assim sendo também havia uma pequena corrente de ar no local. Nessa atividade você deverá, com o auxílio de um experimento real ou virtual, elaborar um modelo teórico que explique a evolução da temperatura dos dois pratos apresentados na tabela abaixo.

Tempo (minutos)	Temperatura do prato aberto (°C)	Temperatura do prato fechado (°C)	Temperatura ambiente (°C)
0	59,8	59,8	26,1
5	45,2	47,2	26,1
22	33,8	39,7	26,4
32	31,0	37,3	26,5
45	28,9	35,2	26,5
66	26,8	32,4	26,5
86	25,9	30,9	26,6
101	25,4	30,0	26,7
116	25,2	29,5	27,0
131	25,1	29,1	27,0
146	25,0	28,6	26,9
161	24,8	28,4	26,7
176	24,6	28,0	26,9
191	24,5	27,9	27,0
211	24,6	27,7	27,0
231	24,5	27,8	27,2

Um dos objetivos da atividade apresentada nesse exemplo é o de evidenciar os limites do domínio de validade da lei de resfriamento de Newton. Os experimentos, sejam reais ou virtuais, deveriam ser utilizados para avaliar os modelos teóricos elaborados pelos alunos em situações diferentes da apresentada na tabela como, por exemplo, em ambientes com diferentes umidades relativas. A implementação dos modelos teóricos no computador também permitiria que os alunos analisassem as diferenças entre as predições dos modelos utilizados e os dados fornecidos no problema.

Ressaltamos também que, nos dois ciclos de modelagem conduzidos, solicitamos aos estudantes que identificassem os referentes reais, as idealizações e as aproximações consideradas. Sempre que possível, incentivamos os alunos a investigarem o quanto as idealizações e as aproximações impostas pelos modelos teóri-

cos afastavam os resultados teóricos dos experimentais para os fenômenos físicos estudados. As atividades foram conduzidas em grupos de dois a três integrantes em cada um deles.

Na próxima seção, apresentamos sucintamente duas alternativas de ferramentas computacionais para explorar o modelo de pêndulo simples. Em uma delas, o Modellus, o foco foi na implementação computacional do modelo investigado e na análise do comportamento desse modelo teórico em diferentes situações. Já na segunda, o Tracker, é proposta a coleta de dados de um experimento real para possibilitar uma análise da adequação do modelo de pêndulo simples para uma situação específica.

III.3 O uso de ferramentas computacionais para explorar o modelo de pêndulo simples

Explorar pêndulos no ensino de Física é tão frequente que, em um levantamento realizado em apenas quatro revistas da área, Gauld (2004) catalogou mais de duzentos e cinquenta artigos envolvendo usos deles para o ensino de diversos conteúdos de Física. Além disso, é evidente o potencial que tal objeto tem para se enfatizar o processo de modelagem e, conseqüentemente, para auxiliar os professores na incansável busca por uma mais adequada concepção de Ciência por parte dos alunos. No entanto, é bastante comum que os professores não explicitem em suas aulas as idealizações e as aproximações consideradas no modelo de pêndulo simples. Já na literatura, são comuns os trabalhos que utilizam tal modelo para ilustrar aspectos epistemológicos da Física. Silveira e Ostermann (2002), por exemplo, defendem a insustentabilidade da lógica indutiva como método de produção de conhecimento apresentando uma reflexão sobre uma atividade de laboratório em que supostamente se pretende “descobrir a Lei do Pêndulo Simples”. Medina, Velazco & Salina (2004) apresentam uma análise dos limites do domínio de validade do modelo de pêndulo simples e também destacam que, com ele, pode-se promover uma melhor compreensão do processo de modelagem científica por parte dos alunos.

Não é nossa intenção, neste artigo, resolver o problema do pêndulo simples. No entanto, ressaltamos alguns aspectos que serão fundamentais para a discussão que segue.

O modelo de pêndulo simples se distancia da realidade pelo fato de alguns pressupostos serem assumidos durante o delineamento do seu objeto-modelo. São eles:

- as dimensões do corpo suspenso são consideradas desprezíveis;

- o fio de sustentação do pêndulo é considerado inextensível, inflexível e de massa desprezível;
- forças dissipativas são desconsideradas, ou seja, o movimento é conservativo;
- o movimento do pêndulo é considerado estritamente bidimensional.

Dada a Fig. 3, o sentido do torque é para dentro do plano da página, no caso do corpo suspenso se encontrar à direita do eixo vertical, e para fora, quando se encontrar à esquerda, ou seja, é um torque do tipo restaurador, que, adotando-se um referencial em que torques positivos apontam para fora do plano da página, pode ser escrito como:

$$\tau = -m \cdot g \cdot l \cdot \sin \theta,$$

onde θ é medido em relação à vertical, sendo positivo à direita da vertical e negativo, à esquerda. A constante g representa a intensidade do campo gravitacional local e l , o comprimento do fio de sustentação do pêndulo.

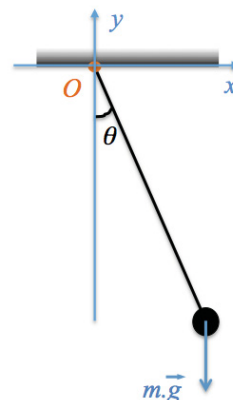


Fig. 3 – Representação de um pêndulo.

Já o momento de inércia I de tal corpo, considerado como pontual, também em relação ao seu eixo de sustentação é:

$$I = m \cdot l^2.$$

Usando a versão rotacional da Segunda Lei de Newton, temos $\vec{\tau} = I \cdot \vec{\alpha}$, onde $\vec{\alpha}$ representa a aceleração angular. Por meio de tal equação, podemos perceber que a aceleração angular tem a mesma direção e sentido que o torque resultante sobre o corpo suspenso. De posse do torque total e do momento de inércia do sistema e adotando um referencial que tem um dos seus eixos paralelos ao eixo de sustentação apontando para fora do plano da página, podemos representar matematicamente a projeção da aceleração angular nesse eixo por meio de:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\tau}{I} = -\frac{g}{l} \sin \theta.$$

No caso do pêndulo simples, é comum que linearizemos sua função horária para simplificar a solução. Para esses casos, impõe-se a aproximação de pequenas amplitudes para o modelo teórico. Em outras palavras, considera-se $\sin \theta = \theta$

para pequenos ângulos. A equação horária do pêndulo simples linearizado fica, então:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l}\theta = 0.$$

Uma solução analítica dessa equação diferencial linear é:

$$\theta(t) = A \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} \cdot t + \varphi\right),$$

onde A representa a amplitude máxima de oscilação do pêndulo e φ , a sua constante de fase. Daí, temos que o período T desse pêndulo deve ser:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Nas duas próximas seções, apresentamos duas propostas de uso do computador para explorar o domínio de validade do modelo do pêndulo simples.

3.3.1 O uso do *software* Modellus

O Modellus⁶ é um *software* gratuito multiplataforma que possibilita a implementação computacional de modelos teóricos através da resolução numérica dos mais diversos tipos de equações. A Fig. 4 apresenta a implementação computacional do modelo teórico do pêndulo simples no Modellus.

Na janela “Modelo Matemático”, devem-se inserir as equações matemáticas que representam o modelo teórico que se busca investigar; no presente caso, o modelo de um pêndulo simples e a correspondente simulação. Visto que as grandezas vetoriais torque (*torque*), velocidade angular (ω) e aceleração angular (*alfa*) apontam sempre na direção perpendicular ao plano de oscilação, não usamos a representação vetorial nos estudos que realizamos, mas simplesmente consideramos suas projeções em um eixo que sai da página. Ademais, usamos I para representar o momento de inércia do pêndulo simples em relação ao eixo de sustentação, m , para a massa do corpo suspenso, l , para o comprimento do fio de sustentação, g , para a intensidade do campo gravitacional local, e $teta$, para o ângulo formado pelo pêndulo e um eixo vertical que passa pelo ponto de sustentação do pêndulo. As transformações para coordenadas cartesianas x e y foram inseridas para a implementação do modelo teórico em uma animação. Interpretando tais equações,

⁶ Disponível em: <http://modellus.fct.unl.pt/>. Um tutorial (em inglês) sobre suas funções básicas está disponível em: http://modellus.fct.unl.pt/file.php/32/Modellus_4_A_visual_introduction_for_teachers.pdf.

o *software* apresenta nas janelas “Gráfico” e “Tabela” a evolução temporal do modelo teórico, permitindo que os estudantes possam avaliar suas predições.

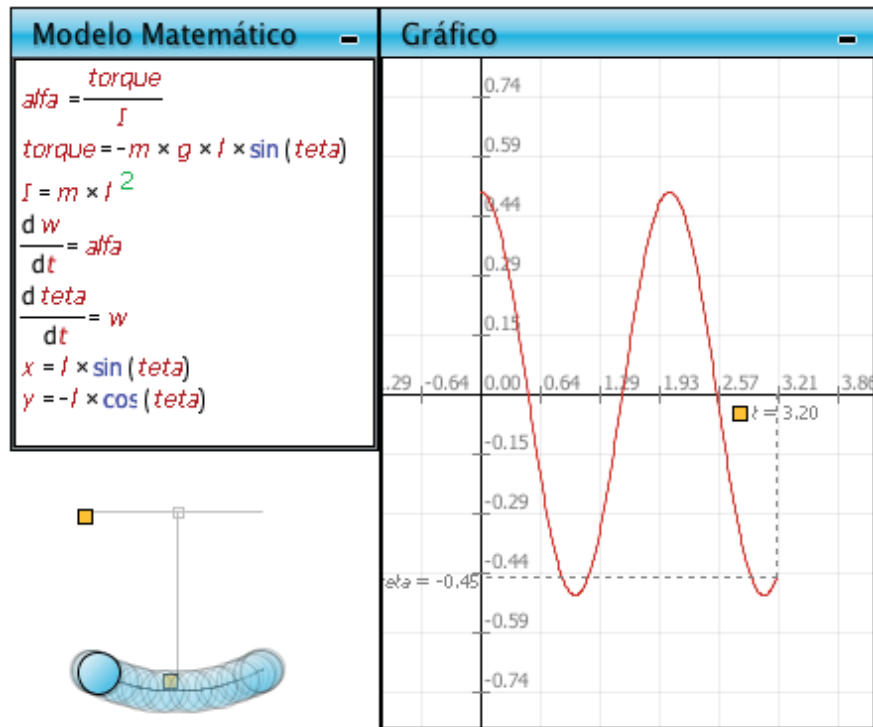


Fig. 4 – Implementação computacional do modelo de pêndulo simples com o *software* Modellus.

Durante o ciclo de modelagem que conduzimos, uma série de questões poderiam ser exploradas fazendo uso da modelagem computacional. Apesar de não haver uma resposta definitiva para tais perguntas, pois elas dependem do grau de precisão desejado por quem utiliza o modelo teórico, apresentamos algumas delas aqui e discutimos como o *software* Modellus pode ser útil para auxiliar os estudantes a avaliarem o domínio de validade do modelo teórico de pêndulo simples.

Quais as dimensões máximas do corpo suspenso para que ele possa ser considerado pontual?

Para avaliar a influência das dimensões do corpo suspenso no modelo de pêndulo simples, utilizaremos um novo modelo teórico em que idealizamos o corpo suspenso como uma esfera de raio R . Com isso, o novo momento de inércia do corpo suspenso em relação ao eixo de sustentação é:

$$I = m \cdot (l + R)^2 + \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2.$$

O torque resultante sobre o corpo suspenso também se altera, pois a distância de aplicação da força gravitacional em relação ao eixo de sustentação é acrescida do raio da esfera suspensa:

$$\tau = -m \cdot g \cdot (l + R) \cdot \sin \theta.$$

A fim de facilitar a compreensão da análise, denominaremos esse modelo teórico, que considera os demais pressupostos iguais aos do modelo de pêndulo simples, como pêndulo não pontual. A implementação do modelo matemático no Modellus é ilustrada na Fig. 5.

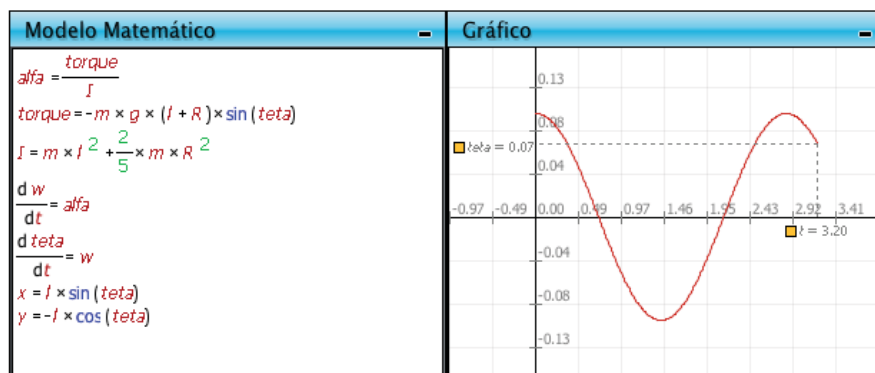


Fig. 5 – Implementação do modelo de pêndulo não pontual no Modellus.

Nossa análise tem enfoque na variação do período do pêndulo não pontual em função da razão entre os raios das esferas e o comprimento do fio. Para isso, consideramos pêndulos com fio de sustentação com dois metros de comprimento. A Fig. 6 apresenta um gráfico da diferença entre os valores dos períodos dos pêndulos não pontuais obtidos com o Modellus e o período do pêndulo simples em função da razão entre o raio das esferas suspensas nos pêndulos não pontuais e o comprimento do fio de sustentação. O período do pêndulo simples foi obtido considerando nulo o raio da esfera suspensa.

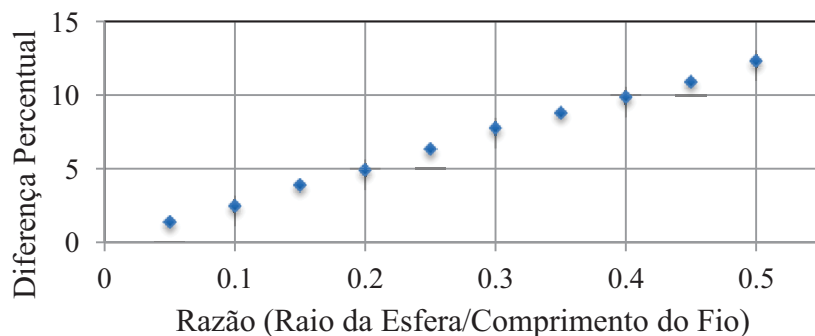


Fig. 6 – Gráfico da diferença percentual entre os períodos dos pêndulos não pontuais e o período do pêndulo simples em função da razão entre os raios das esferas suspensas nos pêndulos não pontuais e o comprimento do fio de sustentação.

A análise do gráfico nos mostra que, para um pêndulo de fio de sustentação com dois metros de comprimento, uma diferença de 5% entre o período do pêndulo não pontual e o período do pêndulo simples é obtida quando a razão entre o raio da esfera suspensa no pêndulo não pontual e o comprimento do fio de sustentação é aproximadamente 0,2.

Qual a máxima massa do fio de sustentação para que ela seja considerada desprezível?

No modelo teórico que confeccionamos para explorar tal questão, idealizamos o fio de sustentação como uma vareta delgada, ou seja, uma vareta unidimensional. Com isso, o novo momento de inércia do corpo suspenso em relação ao seu eixo de sustentação é:

$$I = m.l^2 + \frac{1}{3}.M.l^2,$$

onde M é a massa do fio de sustentação.

O torque resultante sobre o novo objeto-modelo também se diferencia do pêndulo simples. Nesse caso, temos que considerar, ainda, o torque executado pela força gravitacional sobre o fio de sustentação, pois sua massa deixa de ser desprezível. Tal qual no torque sobre o corpo suspenso, o sentido do torque sobre o fio de sustentação em relação ao ponto O da Fig. 3 é para dentro do plano da página, no caso do corpo suspenso se encontrar à direita do eixo vertical, e para fora, quando

se encontrar à esquerda. Portanto, podemos representar matematicamente a projeção do torque total sobre um eixo perpendicular ao plano da página que aponta para fora como:

$$\tau = -m \cdot g \cdot l \cdot \sin \theta - M \cdot g \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin \theta.$$

Denominaremos esse modelo teórico, que novamente considera os demais pressupostos iguais aos do modelo de pêndulo simples, como pêndulo de fio massivo. A implementação do modelo matemático no Modellus é ilustrada na Fig. 7.

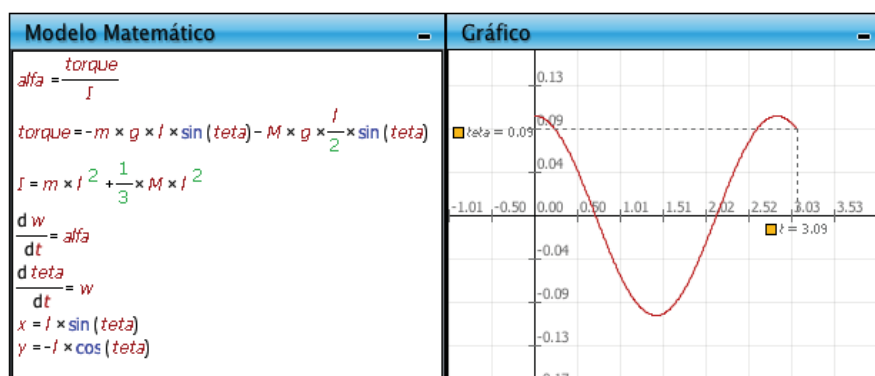


Fig. 7 – Implementação do modelo teórico de pêndulo de fio massivo no Modellus.

Em nossa análise, variamos a massa do fio de sustentação do pêndulo de fio massivo e avaliamos a influência dessa variação no seu período. Consideramos pêndulos com fios de sustentação com dois metros de comprimento e com corpos suspensos com dois quilogramas. A Fig. 8 apresenta um gráfico da diferença entre os valores dos períodos dos pêndulos de fios massivos obtidos com o Modellus e o período do pêndulo simples em função da razão entre a massa dos fios nos pêndulos de fios massivos e a massa do corpo suspenso. O período do pêndulo simples foi obtido considerando nula a massa do fio de sustentação.

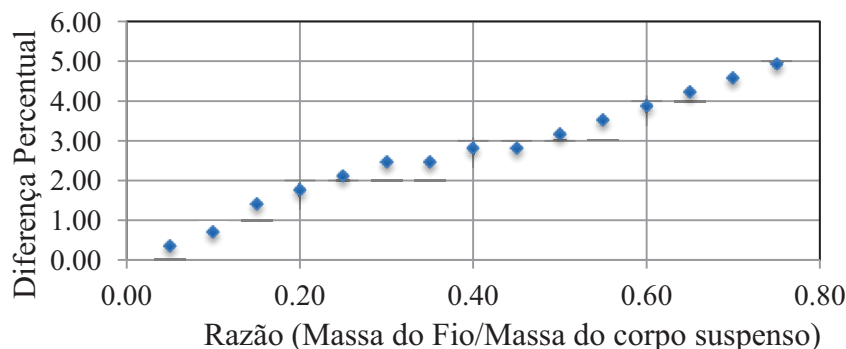


Fig. 8 – Gráfico da diferença percentual entre os períodos dos pêndulos de fios massivos e o período do pêndulo simples em função da razão entre as massas dos fios de sustentação nos pêndulos de fios massivos e a massa do corpo suspenso.

Podemos concluir, então, que, para um pêndulo com massa de dois quilogramas, diferenças de 5% entre o período predito pelo modelo teórico de pêndulo de fio massivo e o período predito pelo modelo de pêndulo simples só são obtidas quando a razão entre a massa do fio de sustentação e a massa suspensa é maior que 0,75.

Qual a máxima força resistiva exercida pelo ar que o pêndulo pode sofrer para que ela seja considerada desprezível?

Para avaliar a influência da resistência do ar no período de um pêndulo, inserimos no modelo de pêndulo simples um torque resistivo proporcional à velocidade angular do pêndulo, apontando no sentido contrário. Desse modo, a projeção do torque total do sistema sobre um eixo perpendicular ao plano de movimento do pêndulo e apontando para fora fica, então:

$$\tau = -m \cdot g \cdot l \cdot \sin \theta - b \cdot \omega \cdot l,$$

onde b é uma constante de resistividade com o ar.

Considerando os outros mesmos pressupostos do modelo de pêndulo simples, denominaremos esse modelo teórico como pêndulo amortecido. A implementação do modelo matemático no Modellus é ilustrada na Fig. 9.

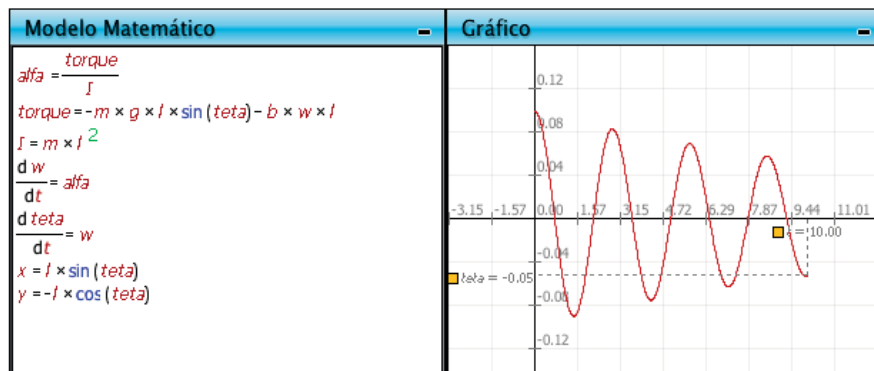


Fig. 9 – Implementação do modelo teórico de pêndulo amortecido no Modellus.

Exploramos nesse experimento a influência de variações na constante de resistividade (b) no período do pêndulo. Consideramos pêndulos com fios de sustentação com dois metros de comprimento e com corpos suspensos com dois quilogramas. A Fig. 10 apresenta um gráfico da diferença entre os valores dos períodos das primeiras oscilações dos pêndulos amortecidos obtidos no Modellus e o período do pêndulo simples em função do valor da constante de resistividade. O período do pêndulo simples foi obtido considerando-se nula a constante de resistividade.

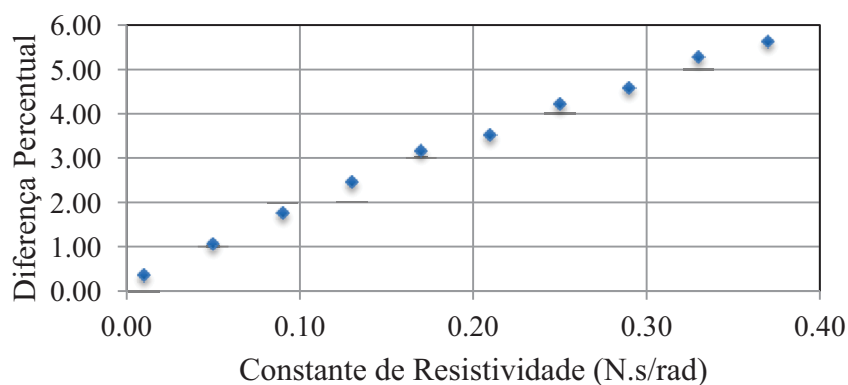


Fig. 10 – Gráfico da diferença percentual entre os períodos das primeiras oscilações dos pêndulos amortecidos e o período do pêndulo simples em função da constante de resistividade.

Para um pêndulo de dois metros de comprimento e com massa suspensa de dois quilogramas, concluímos que uma diferença de 5% entre o período predito pelo modelo teórico de pêndulo amortecido e o período predito pelo modelo do pêndulo simples é obtida quando a constante de resistividade é aproximadamente 0,3.

Qual a amplitude máxima de um pêndulo simples para que ela seja considerada pequena?

No modelo teórico que utilizaremos aqui, avaliaremos como a aproximação $\theta \approx \sin \theta$ pode influenciar o período do pêndulo simples. Para isso, basta que modifiquemos o torque resultante sobre o corpo suspenso em relação ao seu eixo de sustentação por:

$$\tau = -m \cdot g \cdot l \cdot \theta.$$

Denominaremos esse modelo teórico como pêndulo linearizado. A implementação do modelo matemático no Modellus é ilustrada na Fig. 11.



Fig. 11 – Implementação do modelo teórico de pêndulo linearizado no Modellus.

Nessa experiência, variamos a amplitude do pêndulo linearizado e avaliamos a influência dessa variação no período de tal pêndulo. Novamente, consideramos pêndulos com fios de sustentação com dois metros de comprimento. A Fig. 12 apresenta um gráfico da diferença entre os valores dos períodos dos pêndulos linearizados obtidos com o Modellus e o período do pêndulo simples em função da amplitude máxima.

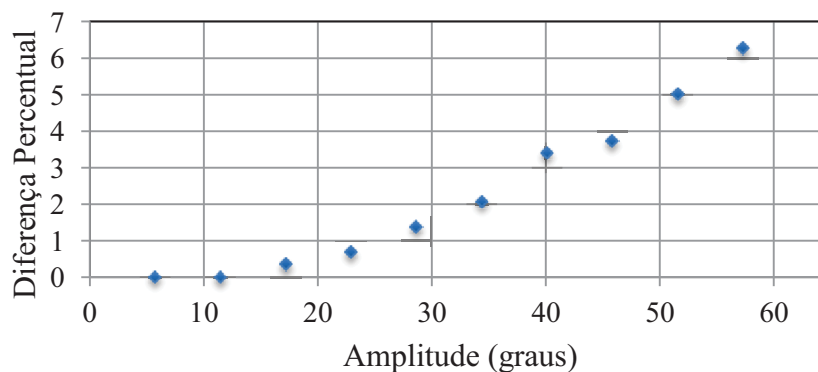


Fig. 12 – Gráfico da diferença percentual entre os períodos dos pêndulos linearizados e o período do pêndulo simples em função de suas amplitudes.

Talvez esse seja o resultado mais surpreendente da análise realizada com o Modellus. Uma diferença de 5% entre o período do pêndulo linearizado e o período do pêndulo simples só ocorre com amplitudes de aproximadamente 50° ou maiores.

A análise realizada com o Modellus traz a vantagem de possibilitar a avaliação, de forma isolada, de cada um dos pressupostos considerados no modelo teórico do pêndulo simples. Em outras palavras, a modelagem computacional conduzida com o Modellus proporciona ao estudante a oportunidade de modificar, a cada vez, apenas uma das idealizações ou aproximações consideradas nos modelos teóricos. Outra vantagem é alertá-los do fato de que as respostas às questões são relativas, pois dependem das dimensões características do sistema. No presente caso, as respostas dependem do comprimento do fio para questões relacionadas à influência das dimensões do corpo suspenso no modelo de pêndulo simples, e da massa do corpo suspenso para questões referentes à influência da massa do fio de sustentação; assim como dependem da precisão desejada (veja as Fig. 7 e 9). No entanto, para que ocorra uma compreensão holística dos alunos do processo de modelagem, é importante que eles avaliem a adequação dos modelos teóricos comparando suas previsões com dados empíricos, levando em conta a precisão desejada. Na próxima seção apresentamos o *software* Tracker como uma alternativa para o uso do computador para fins de comparação de dados teóricos e experimentais nos modelos do pêndulo simples e do pêndulo amortecido.

III.3.2 O uso do *software* Tracker

O Tracker⁷ é um *software* gratuito que possibilita a vídeo-análise de fenômenos físicos. Suas últimas versões estão disponíveis no formato .jnlp (*Java Network Launching Protocol*), o que o torna multiplataforma.

Na discussão que apresentamos aqui, focamos-nos em avaliar a adequação dos modelos de pêndulo simples e de pêndulo resistivo para descrever um fenômeno real. Para avaliar a adequação do primeiro modelo, utilizamos como exemplo um vídeo⁸ de um pêndulo em movimento com fio de sustentação com 1,76 metros, com uma bola suspensa de raio de sete centímetros e de massa 850 gramas e com amplitude inicial de aproximadamente 15°. A Fig. 13 ilustra a vídeo-análise realizada.

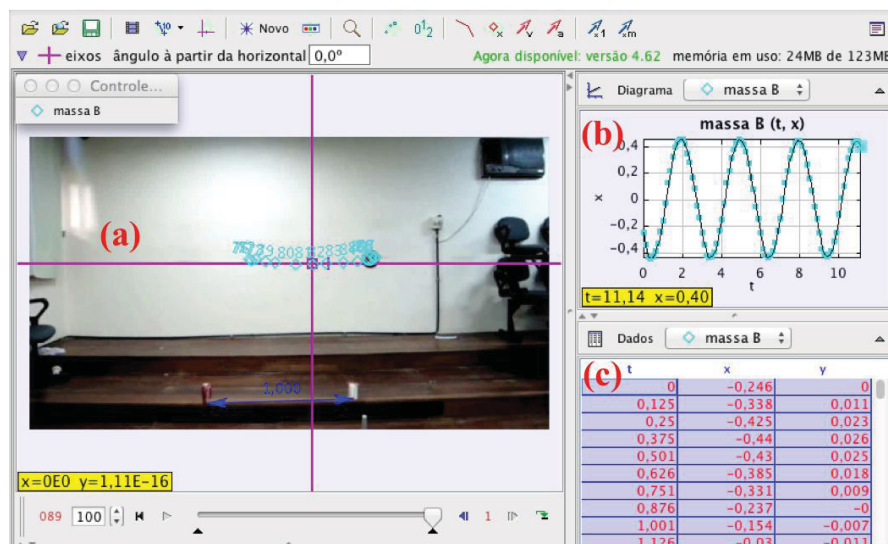


Fig. 13 – Vídeo-análise de um pêndulo produzida com o *software* Tracker. O campo (a) apresenta o vídeo estudado, os pontos coletados pelo programa e o referencial adotado no problema. Nos campos (b) e (c), esses dados são apresentados por meio de gráficos e tabelas, respectivamente.

⁷ Disponível em: <<http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>>. Um tutorial sobre tal programa produzido pelos autores deste artigo está disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/uab/lab/tracker.html>>.

⁸ Vídeo disponível em: <www.if.ufrgs.br/cref/tracker/pendulo.mov>.

Os dados adquiridos por meio da vídeo-análise com o *software* Tracker foram exportados para uma planilha eletrônica⁹. Devido ao fato de o pêndulo estudado apresentar um amortecimento pequeno, ele foi desconsiderado e, pelo método dos mínimos quadráticos, os dados obtidos foram ajustados para uma curva do tipo:

$$X(t) = A_x \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} \cdot t + \varphi\right)$$

onde X representa a projeção da posição da bola suspensa no eixo horizontal e A_x , a amplitude de oscilação do pêndulo no eixo x . Tal equação é uma solução da equação linearizada do modelo do pêndulo simples para a projeção da posição do corpo suspenso no eixo horizontal. O coeficiente de determinação (R^2) obtido com o ajuste foi de 0,998, e os coeficientes da curva ajustada foram $A_x = 0,44$ m, $\sqrt{\frac{g}{l}} = 2,09$ Hz e $\varphi = 2,25$ rad. Dessas informações, podemos deduzir o período do pêndulo por $T = \frac{1}{2,09} * 2\pi = 2,99$ s, o que evidencia uma diferença de aproximadamente 12% em relação ao valor predito pelo modelo de pêndulo simples linearizado, ou seja, por $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,76 \text{ m}}{9,8 \text{ m/s}^2}} = 2,64$ s, onde a intensidade do campo gravitacional local é aproximada por $9,8 \text{ m/s}^2$. A Fig. 14 apresenta o gráfico dos dados obtidos por meio da vídeo-análise realizada e a curva de ajuste confeccionada.

Após a vídeo-análise, os estudantes devem ser estimulados a avaliar quais fatores são importantes para explicar as diferenças entre os dados empíricos e os dados preditos pelo modelo teórico de pêndulo simples linearizado.

Para avaliar a adequação do modelo teórico do pêndulo amortecido a um fenômeno físico, a bola utilizada no primeiro vídeo foi substituída por uma bola de isopor com raio de 11 centímetros e massa de 50 gramas¹⁰. Em comparação com o pêndulo utilizado na primeira vídeo-análise, esse pêndulo apresenta um amorteci-

⁹ O Tracker possui uma ferramenta de ajuste de curvas. No entanto, mesmo em suas últimas versões, ele tem apresentado com frequência problemas em ajustes senoidais. Somado a esse motivo, optamos pelo uso de uma planilha eletrônica também para que pudéssemos calcular o coeficiente de determinação da curva ajustada, que não é fornecido nos ajustes realizados com o Tracker.

¹⁰ Vídeo disponível em: <www.if.ufrgs.br/cref/tracker/amortecido.mov>.

mento mais intenso e notório e, por esse motivo, foi escolhido nessa fase pelos alunos.

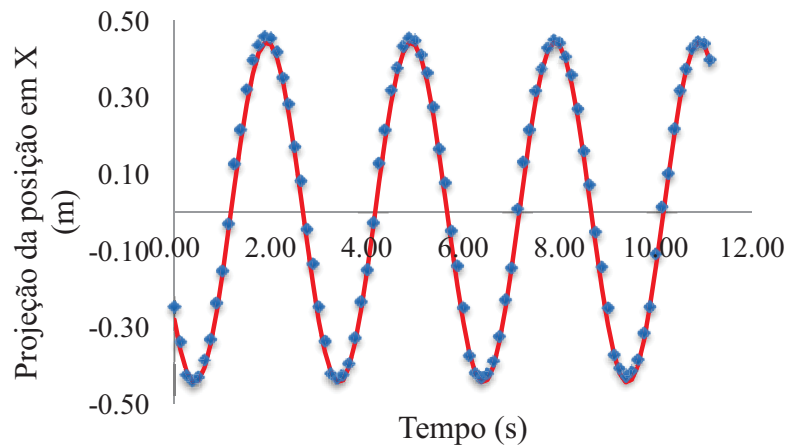


Fig. 14 – Gráfico com os dados obtidos por meio da vídeo-análise do movimento de um pêndulo.

Assim como no primeiro exemplo, os dados adquiridos por meio dessa vídeo-análise foram exportados para uma planilha eletrônica. O curva ajustada, nesse caso, foi do tipo:

$$X(t) = A_x \cdot e^{-\frac{b}{2m}t} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} \cdot t + \varphi\right).$$

O formato da curva ajustada foi escolhido porque tal equação é uma solução do modelo teórico do pêndulo subamortecido (HALLIDAY; RESNIK; WALKER, 2007). O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,999, e os coeficientes da curva ajustada foram $A_x = 0,72$ m, $\sqrt{\frac{g}{l}} = 2,038$ Hz, $\varphi = 3,65$ rad e $b = 0,007$ N.s/rad. A Fig. 15 apresenta o gráfico dos dados obtidos por meio da vídeo-análise realizada e a curva de ajuste confeccionada.

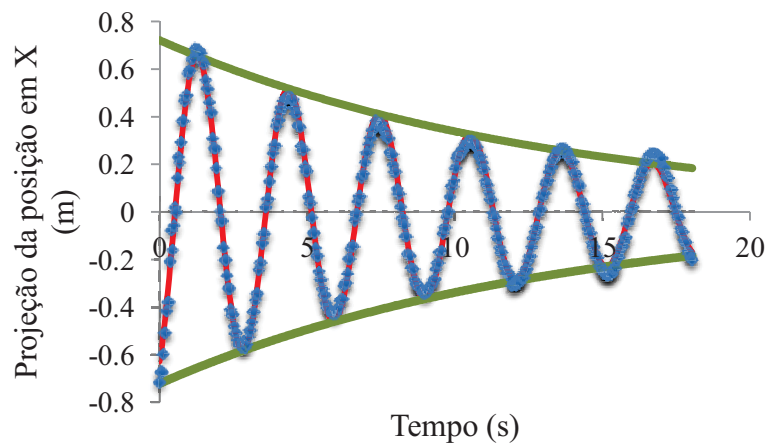


Fig. 15 – Gráfico com os dados obtidos por meio da video-análise do movimento de um pêndulo amortecido.

4. Discussão dos Resultados

Por mais curioso que possa parecer, talvez o aspecto que mais nos saltou aos olhos durante os ciclos de modelagem foi a dificuldade dos estudantes, todos docentes de Física, em participar de uma atividade na qual eles possuíam liberdade para delinear suas ações. Apesar de disporem de duas semanas para planejarem as atividades que executariam para resolverem os problemas propostos, com frequência os alunos não conseguiam realizar tal tarefa. Era evidente o desconforto desses alunos com o fato de não haver uma “resposta certa” para a atividade. Tal fato se refletiu nas escassas e imprecisas mensagens que nos foram enviadas antes do primeiro ciclo de modelagem. Os estudantes não conseguiam tornar claras suas ideias e dois deles explicitavam que não compreendiam as orientações da atividade. Em uma mensagem, o Aluno 8 questionou “O que espera que façamos para a próxima semana? Que, por exemplo, coloquemos as equações no Modellus para então discutirmos o domínio de validade?”. Outro deles, o Aluno 2, destacou a dificuldade que teve para superar sua dificuldade em dialogar com os professores, argumentando que não está familiarizado com atividades em que ele dispõe de espaço para questionar e propor ideias ao professor. Esse mesmo aluno enfatizou tal fato em entrevista: “Do ponto de vista do aluno, acho que sempre a liberdade é complicada. Porque o aluno sempre acha que está sozinho, desamparado. É desconfortável”. Ao menos quatro alunos destacaram essa dificuldade em entrevista.

Quanto ao uso dos quadros brancos, eles se mostraram bastante úteis na fase de discussão em grande grupo. A facilidade para comparar os modelos teóricos utilizados foi um dos pontos altos desse instrumento didático. O Aluno 3 destacou tal fato em sua entrevista: “Da forma como estava configurado, podíamos comparar os resultados dos grupos. (...) Os quadros brancos favoreciam a integração dos grupos”. Já o Aluno 4 ressaltou que a discussão em grupo com os quadros brancos promoveu um diálogo mais aberto: “Acho que foi uma maneira de expor as nossas soluções e ver as soluções dos colegas de uma forma conjunta. (...) Numa situação em que todos se olham, fica uma coisa mais igual”. O Aluno 8 afirmou que a possibilidade de comparar os trabalhos é valiosa, mas ressaltou que tal fato não é decorrência do uso dos quadros brancos: “Eu acho que a dinâmica de todos mostrarem seus resultados ao mesmo tempo foi positiva, não necessariamente os quadros brancos. Poderia ser todos apresentando um experimento ao mesmo tempo, por exemplo”. Ainda assim, dois alunos declararam não ter aprovado o uso de quadros brancos na tarefa. O Aluno 5, por exemplo, afirmou que os achou pobres: “Eu sentia necessidade de mostrar mais coisas. (...) O projetor seria mais proveitoso”.

Do ponto de vista dos professores, a discussão em grande grupo se mostrou um desafio. É importante, durante esse processo, que os estudantes reflitam conjuntamente sobre suas conclusões, e nós, como mediadores, muitas vezes tivemos de nos conter para incentivar que eles, por si só, conseguissem avançar em suas conclusões. Talvez em função da forma como estamos acostumados a ministrar e a participar de nossas aulas, sentíamos a necessidade de ressaltar aspectos importantes dos modelos teóricos antes mesmo de os estudantes sentirem tal necessidade. Também não foram raros os momentos em que os mediadores tinham de se conter para não tornar a discussão em uma espécie de avaliação em grupo, o que limitaria o ambiente de abertura que se busca quando promovemos tal discussão nos ciclos de modelagem.

Apesar de incentivado, o uso dos quadros brancos na fase de delineamento dos ciclos de modelagem foi pouco frequente. Apenas o Aluno 1 destacou em entrevista o uso desse recurso nessa fase da atividade: “Oferecia a possibilidade de organizar e reorganizar o pensamento o tempo todo”. O mais comum ainda foi o uso de lápis e papel durante as discussões intragrupos. No entanto, percebemos, em nossas observações, um pequeno aumento no uso desse recurso do primeiro para o segundo ciclo de modelagem. O mesmo ocorreu em relação à compreensão da proposta de ciclos de modelagem por parte dos alunos. Na segunda atividade, os alunos já apresentavam mais habilidade para delinear suas ações.

Possivelmente em função das atividades sobre modelagem científica que já haviam sido conduzidas com os estudantes antes dos ciclos de modelagem, a identificação de referentes, idealizações e aproximações não se destacou como uma dificuldade dos alunos. Já a modelagem matemática se mostrou um obstáculo significativo para eles. Assim como destacado na literatura (e. g. PIETROCOLA, 2002; LABURÚ; SILVA; SALES, 2010), percebemos um certo desprezo dos estudantes a aspectos quantitativos dos modelos teóricos, ao contrário do que ocorreu com os aspectos qualitativos dos mesmos. Em alguns casos foi necessário o incentivo dos professores para que os alunos se empenhassem em realizar medidas empíricas nos experimentos que estavam realizando. Também foram evidentes as dificuldades dos estudantes em utilizar as ferramentas matemáticas. Em um dos grupos, por exemplo, foi necessário que o professor sentasse ao lado dos alunos para que resolvessem a equação diferencial do pêndulo simples linearizado. Levando-se em conta que a maioria dos alunos é professor da Educação Básica, é provável que poucos deles tenham contato com equações diferenciais com frequência, e possivelmente esse é o motivo que fez com que eles tenham apresentado tamanha dificuldade para resolvê-las. O mesmo ocorreu com cálculos de produtos vetoriais, como no caso dos torques resultantes sobre pêndulos.

As discussões em grande grupo, que constituíram o último estágio dos ciclos conduzidos neste estudo, mostraram-se bastante proveitosas. Por meio das discussões dos alunos, pode-se observar um salto de qualidade nos seus discursos. Termos como “idealizações”, “modelo” e “validade” foram frequentes nas falas dos estudantes, o que nos evidenciava que os ciclos de modelagem estavam complementando o conhecimento dos alunos sobre modelagem científica e promovendo uma melhor concepção de ciência por parte deles. O Aluno 4 ressaltou espontaneamente tal fato em sua entrevista: “Eu aprendi bastante em termos de modelagem. (...) Ficou mais completo na minha cabeça o que é modelagem depois desses ciclos”. No entanto, foi evidente, também, a dificuldade dos estudantes em avaliar os trabalhos dos seus colegas. Em alguns momentos, os professores da disciplina, que se portavam como mediadores no processo, tinham que estimular a discussão com questionamentos do tipo “Todos concordam com isso?”. Quando perguntado sobre o quão à vontade sentia-se para discutir os estudos dos colegas, o Aluno 4 destacou tal desconforto em sua entrevista: “Me sentir à vontade, eu acho que nunca vou me sentir à vontade para criticar, porque às vezes as pessoas levam para um lado negativo, achando que tu está querendo sacanear ele”.

A evidência de uma melhor concepção de ciência por parte dos alunos não se repetiu durante as entrevistas com os estudantes. Os termos relacionados com a modelagem científica, que eram frequentes durante a discussão final, não se repeti-

ram. Um caso curioso foi o do Aluno 5 que, apesar de buscar evidenciar o processo de modelagem das atividades, afirmando que os ciclos de modelagem têm como objetivo “avaliar o domínio de validade de algumas leis físicas”, enfatizou a validação de “leis físicas”, o que, como já destacamos, é um equívoco, pois as teorias físicas não podem ser validadas diretamente”. Esse aparente declínio na qualidade do discurso dos alunos durante as entrevistas evidencia que a promoção de uma visão de Ciência adequada por parte deles é um processo longo e penoso.

O uso de ferramentas computacionais se mostrou um recurso importante durante os ciclos de modelagem. Pôde-se perceber, nas discussões em grande grupo, que os alunos começaram a se preocupar mais com os modelos teóricos subjacentes às simulações computacionais, o que possivelmente os auxiliava a esclarecer as diferenças entre modelos teóricos e os fenômenos físicos. O Aluno 1, por exemplo, destacou que não é possível avaliar o domínio de validade de um modelo teórico com uma simulação fechada se não soubermos as características do modelo teórico subjacente a ela.

Durante as entrevistas, os alunos foram estimulados a ressaltar o que haviam aprendido durante os ciclos de modelagem. Quatro dos sete entrevistados foram capazes de explicar as diferenças entre as representações matemáticas do modelo de pêndulo simples e de um modelo de pêndulo em que não se imponha a idealização de dimensões desprezíveis para o corpo suspenso. Três estudantes destacaram espontaneamente que ficaram surpresos em perceber que uma incerteza de 5% no valor do período predito pelo modelo de pêndulo simples linearizado só é atingida com aproximadamente 50° de amplitude. Todos os entrevistados afirmaram acreditar que aprenderam mais com os ciclos de modelagem do que aprenderiam em um hipotético curso conduzidos nos moldes tradicionais. Quanto ao segundo ciclo de modelagem, todos os alunos entrevistados foram capazes de atribuir as diferenças entre as temperaturas das águas do prato aberto e do prato fechado à evaporação da água no prato aberto. Além disso, cinco deles destacaram que a umidade relativa é um parâmetro que influi na quantidade de água que evapora no prato aberto.

Apesar das dificuldades para compreender as atividades, a avaliação de todos os estudantes entrevistados sobre os ciclos de modelagem desenvolvidos foi positiva. Essa impressão é compartilhada pelos autores deste artigo. Podemos perceber um alto nível de aprendizagem e motivação por parte dos alunos. No entanto, os entrevistados destacaram a importância de uma base conceitual para um bom aproveitamento dos ciclos de modelagem. Quatro deles, por exemplo, afirmaram em entrevista que acreditam que os ciclos de modelagem serão mais eficazes quando os estudantes já tiverem participado de aulas tradicionais.

V. Considerações finais

Os ciclos de modelagem visam corrigir algumas das mais tradicionais deficiências do ensino tradicional, como a forte ênfase na resolução de problemas acadêmicos, que têm levado os estudantes a uma postura passiva, e a apresentação dos conteúdos de forma fragmentada e descontextualizada. Certamente, a resolução de problemas acadêmicos, típicos dos livros-texto de Física, é um aspecto importante do ensino de Física, mas pensamos que ele deva ser subserviente à modelagem. Hestenes (2006) destaca que os vários modos de modelagem, focados na implementação computacional, em experimentos reais ou mesmo em experimentos imaginários, levantam uma série de problemas, e por isso os problemas podem ser classificados de acordo com seus papéis nos processos de modelagem. Em um sentido profundo, os modelos fornecem soluções para os problemas da Física. E como Bunge (1974) destaca, um único modelo teórico pode ser aplicado a diferentes situações, e um pequeno conjunto de modelos é suficiente para resolver uma enorme quantidade de problemas.

Entendemos que nossa experiência com ciclos de modelagem foi bastante proveitosa. Ficou evidente aos nossos olhos o entusiasmo dos estudantes em buscar explorar os desafios propostos nas atividades. Além disso, apesar de necessitarmos de estudos mais profundos sobre o assunto, a sensação durante os ciclos de modelagem era de que a aprendizagem dos alunos ocorria de forma mais sólida, amparada em situações que davam sentido aos conceitos estudados, tanto aos relacionados com conteúdos de Física como aos relacionados à modelagem científica. Ainda que o processo de produção de uma boa visão de Ciência seja lento e árduo, podemos perceber também uma evolução por parte dos alunos no que diz respeito a aspectos relacionados à epistemologia da Física. Claramente as atividades favoreciam a ancoragem de conceitos como “idealização”, “modelo”, etc., na estrutura cognitiva dos estudantes.

Apesar das vantagens observadas na metodologia de ciclos de modelagem, era claro, e de certo modo preocupante, o desconforto dos alunos com a abertura da qual dispunham para o desenvolvimento das tarefas. Tal fato, com grande probabilidade, é uma herança do ensino tradicional pelo qual passaram, no qual eram incentivados à passividade, sendo submetidos a aulas em que “recebiam” o conhecimento transmitido pelo professor e executavam tarefas em que seguiam passos rigidamente em busca de uma “resposta certa”. Provavelmente, o legado deixado por tal abordagem também se refletiu na dificuldade apresentada por eles em expor suas propostas aos professores e também em analisar criticamente os trabalhos dos colegas. O que se pode concluir dessas dificuldades enfrentadas

pelos estudantes é que os ciclos de modelagem devem ser utilizados com parcimônia. Mesmo se tratando de alunos de pós-graduação que já haviam estudado conceitos de modelagem científica, nossa amostra demonstrou dificuldades para compreender a proposta das atividades. Em função disso, é fundamental que sua implementação ocorra aos poucos, com atividades intermediárias em que somente alguns dos aspectos dos ciclos de modelagem sejam utilizados.

A essência dos ciclos de modelagem é promover habilidades de modelagem nos estudantes por meio do contato com um pequeno conjunto de modelos teóricos básicos entendidos como constituintes de um núcleo do conteúdo de Física. No entanto, a literatura tem evidenciado que outras vantagens decorrem desse objetivo fundamental. Brewe, Laird & O'Brien (2009), por exemplo, detectaram atitudes mais positivas em estudantes de cursos de Física introdutória que passaram por ciclos de modelagem em comparação com estudantes de cursos tradicionais. Brewe et al. (2010) promoveram um curso com alunos sócio-historicamente prejudicados nos Estados Unidos (e.g. negros, mulheres e hispânicos) e obtiveram resultados que evidenciaram que os ciclos de modelagem podem favorecer a igualdade de conhecimento entre esses estudantes e outros grupos. Vesenka et al. (2002) compararam o desempenho de estudantes que participaram de ciclos de modelagem com alunos que passaram pelo ensino tradicional em cursos de mecânica no questionário FCI (HESTENES; WELLS; SWACKHAMER, 1992) e detectaram melhores performances nos estudantes que passaram pelos ciclos de modelagem. Brewe (2008) destaca que os ciclos de modelagem têm potencial para tornar a visão de Ciência dos estudantes mais coerente, fazendo com que os alunos percebam o conhecimento científico como algo em constante progresso. Além disso, Andrews, Oliver & Vesenka (2003) relatam um curso com o objetivo de familiarizar professores de Ciências com a metodologia de ciclos de modelagem e destacaram uma boa receptividade por parte deles. Entretanto, são escassos os estudos correlacionando habilidades metacognitivas relacionadas ao processo de modelagem e às habilidades desenvolvidas durante os ciclos de modelagem (MALONE, 2007). Assim é fundamental que estudos sejam realizados com o intuito de avaliar como essa metodologia pode modificar a estrutura cognitiva dos estudantes.

A experiência relatada neste artigo se enquadra em um programa de pesquisa mais amplo que busca investigar a influência de ciclos de modelagem na estrutura cognitiva de estudantes de Física. O estudo aqui apresentado é um primeiro passo, em que se buscou avaliar os aspectos mais básicos dessa metodologia. Obviamente, sabemos que os ciclos de modelagem não resolverão todos os problemas envolvidos na difícil tarefa de se ensinar Física. No entanto, o que apresentamos é uma tentativa. Em outras palavras, mais do que trazer os resultados de um

estudo definitivo, nosso intuito foi apresentar uma proposta que inspire os professores e pesquisadores a criarem novas alternativas que, de fato, cheguem à sala de aula e possam contribuir para a melhoria no ensino de Física.

Agradecimentos

Agradecemos aos árbitros deste artigo pelas valiosas sugestões apresentadas.

Referências

ANDRÉS, M. M. Z.; PESA, M.; MOREIRA, M. A. El trabajo de laboratorio en cursos de física desde la teoría de campos conceptuales. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 12, n. 2, p. 129-142, jun. 2006.

ANDREWS, D.; OLIVER, M.; VESENKA, J. Implications of Modeling Method training on physics teacher development in California's Central Valley. **Journal of Physics Teacher Education Online**, Chicago, v. 1, n. 4, p. 14-24, March 2003.

ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos a tecnologias computacionais no ensino de física. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 4, n. 3, p. 5-18, set. 2004.

ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. Modelos Computacionais no ensino-aprendizagem de Física: um referencial de trabalho. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 341-366, ago. 2012.

BRANDÃO, R. V. **Investigando a aprendizagem do campo conceitual associado à modelagem científica por parte de professores de física do ensino médio**. 2008. 203 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica vista como um campo conceitual. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 3, p. 507-545, dez. 2011.

BREWE, E. Modeling theory applied: Modeling Instruction in introductory physics. **American Journal of Physics**, Melville, v. 76, n. 12, p. 1155-1160, Dec. 2008.

BREWE, E.; KRAMER, L.; O'BRIEN, G. Modeling Instruction: Positive attitudinal shifts in introductory physics measured with CLASS. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, College Park, v. 5, n. 1, 013102 5p., June 2009.

BREWE, E.; SAWTELLE, V.; KRAMER, L.; O'BRIEN, G.; RODRIGUEZ, I.; PAMELÁ, P. Toward equity through participation in Modeling Instruction in introductory university physics. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, College Park, v. 6, n. 1, 010106 12p., May 2010.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24, n. Especial, p. 9-30, 2002.

BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1974.

CARVALHO, A. M. P. As práticas experimentais no ensino de Física. In: _____. (Org.). **Ensino de Física**. São Paulo: Cengage Learning, 2010. p. 53-78. cap. 3.

DORNELES, P. F. T.; VEIT, E. A.; ARAUJO, I. S. Atividades experimentais e computacionais como recursos instrucionais que se complementam: um estudo exploratório no ensino de eletromagnetismo em física geral. In: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE INVESTIGACIÓN EN LA DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS, 8, 2009, Barcelona, Espanha. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, p. 1806-1810, 2009. n. extra ampl. corr.

FINKELSTEIN, N.; ADAMS, W.; KELLER, C.; KOHL, P.; PERKINS, K.; PODOLFSKY, N.; REID, S. When learning about the real world is better done virtually: a study of substituting computer simulations for laboratory equipment. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, College Park, v. 1, n. 1, 010103 8p., July 2005.

GAULD, C. Pendulums in the Physics education literature: a bibliography. **Science & Education**, New York, v. 13, n. 7, p. 811-832, Aug. 2004.

HALLIDAY, D; RESNIK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of physics**. 8th ed. Toronto: Willey, 2007.

HEIDEMANN, L. A. **Crenças e atitudes sobre o uso de atividades experimentais e computacionais no ensino de física por parte de professores do ensino**

médio. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HENNESSY, S.; DEANEY, R.; RUTHVEN, K. Situated expertise in integrating use of multimedia simulation into secondary science teaching. **International Journal of Science Education**, London, v. 28, n. 7, p. 701-732, June 2006.

HESTENES, D. Modeling software for learning and doing physics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THINKING SCIENCE FOR TEACHING - THE CASE OF PHYSICS HELD IN ROME, Rome, Italy, p. 22-27, 1994.

_____. Modeling methodology for physics teachers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNDERGRADUATE PHYSICS EDUCATION, College Park, United States, p. 935-958, 1996.

_____. Notes for a Modeling Theory of Science, Cognition and Instruction. In: GIROP CONFERENCE: MODELLING IN PHYSICS AND PHYSICS EDUCATION, Amsterdam, Netherlands, 2006.

HESTENES, D.; WELLS, M.; SWACKHAMER, G. Force Concept Inventory. **The Physics Teacher**, Melville, v. 30, n. 3, p. 141-156, March 1992.

HODSON, D. Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 12, n. 3, p. 299-313, nov. 1994.

JAAKKOLA, T.; NURMI, S. Fostering elementary school students understanding of simple electricity by combining simulation and laboratory activities. **Journal of Computer Assisted Learning**, New York, v. 24, n. 4, p. 271-283, Aug. 2008.

JACKSON, J.; DUKERICH, L.; HESTENES, D. Modeling Instruction: an effective model for Science Education. **Science Educator**, Indianapolis, v. 17, n. 1, p. 10-17, Jan. 2008.

KRAPAS, S.; QUEIROZ, G.; COLINVAUX, D.; FRANCO, C. Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em Ensino de Ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 185-205, nov. 1997.

LABURÚ, C. E.; SILVA, O. H. M.; SALES, D. R. Superações conceituais de estudantes do Ensino Médio em medição a partir de questionamentos de uma situação experimental problemática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 32, n. 1, 1402 15p., 2010.

LÓPEZ RÍOS, S.; VEIT, E. A.; ARAUJO, I. S. Modelación computacional apoyada en el uso del diagrama V de Gowin para el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 10, n. 1, p. 202-226, mar. 2011.

MALONE, K. The convergence of knowledge organization, problem-solving behavior, and metacognition research with the Modeling Method of physics instruction – Part II. **Journal of Physics Teacher Education Online**, Chicago, v. 4, n. 2, p. 3-15, Winter 2007.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. D. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-86, jun. 2002.

MEDINA, C.; VELAZCO, S.; SALINAS, J. Experimental control of simple pendulum model. **Science & Education**, New York, v. 13, n. 7, p. 631-640, Aug. 2004.

Modeling Instruction Program. Annual Report/2011. Arizona: Arizona State University. Disponível em: < http://modeling.asu.edu/ModInst_AnnualReport11.doc>. Acesso em: 24 jan. 2012.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 7-29, mai. 2002.

_____. ¿Cuál es el perfil del profesor de una universidad que forma profesores? Investigación básica en educación en ciencias: una visión personal. **Revista Chilena de Educación Científica**, Santiago, v. 3, n. 1, p. 10-17, marzo 2004.

PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de Mario Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 213-227, set. 1999.

_____. A matemática como estruturante do conhecimento Físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 1, p. 213-227, mai. 2002.

RICARDO, E. C. Problematização e contextualização no ensino de Física. In: CARVALHO, A. M. P. (Org.). **Ensino de Física**. São Paulo: Cengage Learning, 2010. p. 29-51. cap. 2.

RONEN, M.; ELIAHU, M. Simulation: a bridge between theory and reality: the case of electric circuits. **Journal of Computer Assisted Learning**, New York, v. 16, n. 1, p. 14-26, March 2000.

SILVEIRA, F. L.; OSTERMANN, F. A insustentabilidade da proposta indutivista de "descobrir a lei a partir de resultados experimentais". **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. Especial, p. 7-27, jun. 2002.

TARAKEGN, G. Can computer simulations substitute real laboratory apparatus? **Latin-American Journal of Physics Education**, Ciudad de Mexico, v. 3, n. 3, p. 506-517, Sept. 2009.

TEODORO, V. D. Modelação no ensino de Física: seis ideias básicas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 15, 2003, Curitiba. **Atas...** Curitiba: Nilson Garcia, 2003. 1 CD-ROM.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. D. Modelagem no ensino/aprendizagem em física e os novos parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 87-96, jun. 2002.

VESENKA, J.; BEACH, P.; MUNOZ, G.; JUDD, F.; KEY, R. A comparison between traditional and "modeling" approaches to undergraduate physics instruction at two universities with implications for improving physics teacher preparation. **Journal of Physics Teacher Education Online**, Chicago, v. 1, n. 1, p. 3-7, June 2002.

ZACHARIA, Z. Comparing and combining real and virtual experimentation: an effort to enhance students' conceptual understanding of electric circuits. **Journal of Computer Assisted Learning**, New York, v. 23, n. 2, p. 120-132, April 2007.

ZACHARIA, Z.; ANDERSON, O. R. The effects of an interactive computer-based simulation prior to performing a laboratory inquiry-based experiment on students' conceptual understanding of physics. **American Journal of Physics**, Melville, v. 71, n. 6, p. 618-629, June 2003.