

ALEXANDRIA

Revista de Educação em Ciência e Tecnologia

A Estratégia da Modelagem Didático-Científica para a Conceitualização do Real no Ensino de Física: Um Estudo de Caso com Professores de Ensino Médio

The Didactic-Scientific Modeling Strategy for the Conceptualization of Real in the Physics Teaching: A Case Study with High School Teachers

Rafael Vasques Brandrão^a; Ives Solano Araujo^b; Eliane Angela Veit^b

^a Colégio de Aplicação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil - rafael.brandao@ufrgs.br

^b Departamento de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil – ives@if.ufrgs.br, eav@if.ufrgs.br

Palavras-chave:

Modelagem didático-científica. Ensino de física. Professores de física do ensino médio.

Resumo: Na pesquisa em Ensino de Física é praticamente consensual a relevância de estratégias didáticas que privilegiem uma reflexão crítica sobre os tópicos trabalhados em sala de aula. Com base em estudos anteriores, partiu-se da premissa de que um referencial teórico-metodológico promissor para esse fim é a “modelagem didático-científica”. Seu fundamento se apoia, sobretudo, na teoria dos campos conceituais de Vergnaud e na postura filosófica de Bunge sobre o processo de modelagem científica. Esse referencial foi empregado em uma disciplina obrigatória de um Mestrado Profissional, para dar sentido às formas preditiva e operatória do conhecimento acerca do processo de conceitualização de eventos físicos, com ênfase em modelagem computacional. Este estudo empírico, com enfoque qualitativo e propósito explanatório, permitiu coletar evidências de concepções, dificuldades e avanços na conceitualização do real por parte dos professores de Física do Ensino Médio matriculados nessa disciplina e, ainda, identificar possíveis invariantes operatórios utilizados por esses professores.

Keywords:

Didactic-scientific modeling. Physics teaching. High school physics teachers.

Abstract: It is almost consensus in the context of physics education research the relevance of teaching strategies focused on critical reflections about the topics on discussion. Based on previous studies, we assumed that “didactic-scientific modeling” strategy is a promising theoretical-methodological framework for this purpose. Its theoretical background was mainly based on Vergnaud’s conceptual fields theory and the Bunge’s epistemological conception concerning scientific modeling process. This framework has been used on a compulsory graduate course of a professional master in physics teaching. This empirical study, with qualitative focus and explanatory purpose, allowed us to collect evidences of conceptions, difficulties and advances in the conceptualization of the real by the students enrolled in this course and also to identify possible operative invariants used by them.



Esta obra foi licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Introdução

O modo excessivamente formal como os conteúdos de Física costumam ser abordados no Ensino Médio partindo de situações-problema idealizadas, e restringindo-se a elas, resulta num distanciamento entre os conhecimentos construídos em sala de aula e a realidade vivenciada pelos estudantes fora dela. Acrescente-se a esse problema, a falta de discussão sobre o que é Ciência e como é construída; e, ainda, para agravar a situação, o uso da lógica empirista-indutivista em atividades de laboratórios e em alguns livros-texto (SILVEIRA; OSTERMANN, 2002).

Esse quadro, além de tornar a aprendizagem de Física pouco atraente e útil, tem reforçado a concepção de que o conhecimento científico é sinônimo de verdade definitiva e perene, cujo progresso parece resultar da mera acumulação de sucessivos descobrimentos e constante aperfeiçoamento de teorias. Como os professores tendem a ensinar da maneira como foram ensinados (LORTIE, 2002), não é surpreendente que essa ainda seja a visão prototípica do fazer científico na Educação Básica.

Especialmente por isso, é praticamente consensual no contexto das pesquisas em Ensino de Ciências a relevância de estratégias didáticas que privilegiem uma reflexão crítica dos conteúdos abordados, tanto por parte dos estudantes, quanto por parte dos professores. Dentre essas estratégias, a da modelagem científica tem sido apontada com uma das mais promissoras, podendo contribuir não somente para a aprendizagem de conceitos científicos e para a resolução de problemas teóricos e práticos, como também para a construção de concepções e competências associadas à natureza da Ciência e à prática científica contemporâneas (e. g. HESTENES, 1987; 2006; PIETROCOLLA, 1999; HALLOUN, 2004; JUSTI, 2006; MATTHEUS, 2007; BREWE, 2008; MOZZER; JUSTI, 2017).

Há um número considerável de pesquisas sobre o que pensam os professores sobre modelos e modelagem científica (e.g. SMIT; FINEGOLD, 1995; VAN DRIEL; VERLOOP, 1999; 2002; ISLAS; PESA, 2001; 2002; JUSTI; GILBERT, 2002). No entanto, o desenvolvimento de concepções e competências associadas à natureza da Ciência e à prática científica contemporâneas não costuma estar presente entre os objetivos de ensino na Educação Básica, exceto nos documentos oficiais, e a maioria dos estudantes e professores não reflete sobre a importância da modelagem científica no Ensino de Física. Por isso, Coll e Lajium (2011) defendem que é preciso: (i) seguir favorecendo e investigando a aquisição de conhecimentos acerca dos modelos e da modelagem científica por parte dos professores; e (ii) fazer mais pesquisas em sala de aula para avaliar as possibilidades e limitações de estratégias centradas no processo de modelagem científica em termos de uma evolução conceitual e epistemológica.

Após dois estudos exploratórios com professores de ensino médio (BRANDÃO et al., 2010; 2011b), considerou-se necessária a construção de um referencial teórico-metodológico que articulasse coerentemente uma teoria de aprendizagem com concepções epistemológicas contemporâneas sobre o processo de modelagem científica para aplicações na pesquisa e ensino de Física. Esse referencial foi construído por meio de uma costura teórica entre a Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud (1988; 1996) e as ideias de Bunge (1974; 1989) sobre modelos e modelagem científica, e é sucintamente apresentado na segunda seção.

Uma proposta de ensino centrada nesse referencial foi implementada na disciplina de pós-graduação de Tecnologias de Informação e Comunicação II (TICs-II) de um Mestrado Profissional em Ensino, a partir do segundo semestre letivo (agosto a dezembro) de 2008. A disciplina passou a ter dois objetivos: i) a introdução de noções epistemológicas contemporâneas e ii) o desenvolvimento de competências associadas à construção e à validação de modelos computacionais com fins didáticos, por meio da ressignificação de atividades que costumam ser abordadas tradicionalmente em cursos de formação inicial de professores de Física.

Nessa disciplina, foi conduzido um estudo de caso único, seguindo as concepções metodológicas de estudos de caso de Yin (2005), cujos resultados foram narrados em (BRANDÃO et al., 2014). O objetivo do estudo foi investigar as formas predicativa e operatória do conhecimento mobilizadas por um(a) professor(a) do ensino médio no enfrentamento de situações-problemas do campo conceitual da modelagem didático-científica em Física. Por forma predicativa do conhecimento, entende-se, na perspectiva de Vergnaud (1996) e no contexto de modelagem de situações da Física, saber explicitar, oralmente ou por escrito, os objetos e suas propriedades, os conceitos, princípios e leis da Física; já a forma operatória implica saber-fazer, ou seja, operacionalizar conhecimentos que permitam enfrentar com êxito situações-problemas de diversos campos da Física.

Decidiu-se selecionar para o estudo o(a) aluno(a) da turma com melhor rendimento acadêmico para se eliminar a hipótese que poderia explicar possíveis dificuldades enfrentadas no campo conceitual da Modelagem Didático- Científica (MDC) em Física meramente por deficiências de conteúdo. Tomando por base os resultados do exame vestibular para ingresso no curso de Licenciatura em Física e dos conceitos obtidos ao longo do curso de graduação, foi selecionada uma mestranda para o estudo. Acompanhou-se os avanços e retrocessos dessa mestranda nas concepções de modelo científico, no processo de conceitualização do real e, ainda, foi possível detectar dois invariantes operatórios utilizados pela mestranda nas atividades de modelagem propostas no contexto daquela disciplina.

Na investigação relatada no presente artigo buscou-se estender a investigação anterior tomando como caso uma turma de mestrandos, professores de Física do Ensino Médio

matriculados em TICs-II no ano seguinte. Essa busca teve como objetivo dar sentido às formas predicativa e operatória do conhecimento dos alunos de TICs-II em ‘situações de modelagem computacional’ em Física, com fins didáticos. Cabe observar que este estudo não visa generalizar os resultados anteriores para uma população maior de professores, pois à semelhança dos experimentos em Ciências Sociais¹, os resultados são generalizáveis a proposições teóricas, e não a populações ou universos (YIN, 2005).

A turma em que o estudo foi conduzido era composta por oito alunos e as questões de pesquisa respondidas neste artigo são:

(i) Quais, e a que se devem, as dificuldades enfrentadas e os avanços obtidos na conceitualização do real em Física pelos alunos nas tarefas de modelagem que lhes foram propostas em TICs-II?

(ii) Quais, e como, os invariantes operatórios evidenciados pelos alunos nas tarefas de modelagem que lhes foram propostas em TICs-II, influenciaram na conceitualização do real em Física?

Para responder a essas questões de pesquisa este artigo foi organizado do seguinte modo. Na segunda seção é apresentado sucintamente o referencial-teórico metodológico da Modelagem Didático-Científica (MDC); na terceira, a metodologia da pesquisa e na quarta, os resultados do estudo. A última seção é reservada aos comentários finais.

Referencial teórico

A partir das concepções de Mario Bunge (1974; 1989) acerca do processo de modelagem científica e da Teoria dos Campos Conceituais (TCC) de Vergnaud (1988; 1996), em combinação com as ideias de Weil-Barais e Vergnaud (1990), foi possível defender a tese de que “o processo de modelagem científica em Física pode ser visto como um campo conceitual subjacente ao domínio de campos conceituais específicos dessa ciência” (BRANDÃO et al., 2011a). Campo conceitual é entendido como “um conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição” (VERGNAUD, 1982, p. 40).

Estabeleceu-se, então, para o campo conceitual da MDC, uma Estrutura Conceitual de Referência (ECR), adotando a definição de Otero (2006, p. 27), ou seja, a ECR contém “conjunto dos conceitos, das relações entre eles, dos princípios, das asserções de conhecimento e das explicações relativas a um campo conceitual, como ele é formulado,

¹ Embora esta pesquisa seja de cunho educacional e não em Ciências Sociais, é possível utilizar a estratégia de estudo de caso, com as devidas adaptações, para a análise de fenômenos educacionais.

debatido e acordado nas discussões e nos textos especializados próprios de uma determinada comunidade científica de referência”.

A ECR construída para a MDC é apresentada na Figura 1, onde constam os principais conceitos associados à modelagem de uma situação-problema da Física, conforme a perspectiva epistemológica de Bunge (1974). Essa ECR sintetiza, também, os principais conceitos-em-ação, que, em conjunto com as concepções e os esquemas de ação mobilizados pelo sujeito em situações de modelagem, compõem o que se entende por campo conceitual da modelagem científica em Física, com fins didáticos. Foi possível, ainda, estabelecer invariantes-operatórios de referência, que apontam os procedimentos centrais a serem operacionalizados, em alguma medida, pelo sujeito em situação de modelagem. Entenda-se que “Um teorema-em-ação é uma proposição considerada como verdadeira sobre o real. Um conceito-em-ação é uma categoria de pensamento considerada como pertinente” (VERGNAUD, 1996, p. 202).

Nesta sucinta exposição do campo conceitual da MDC, a ECR da Figura 1 será exposta em conjunto com os principais invariantes-operatórios de referência propostos (BRANDÃO et al., 2014). Convém salientar, entretanto, de antemão, que não há um único modo de enfrentar situações-problemas no campo da Física. A modelagem aqui descrita é uma das formas de resolver determinados tipos de situações-problemas; especialmente aquelas tratadas nos cursos introdutórios de Física em todos os níveis de ensino.

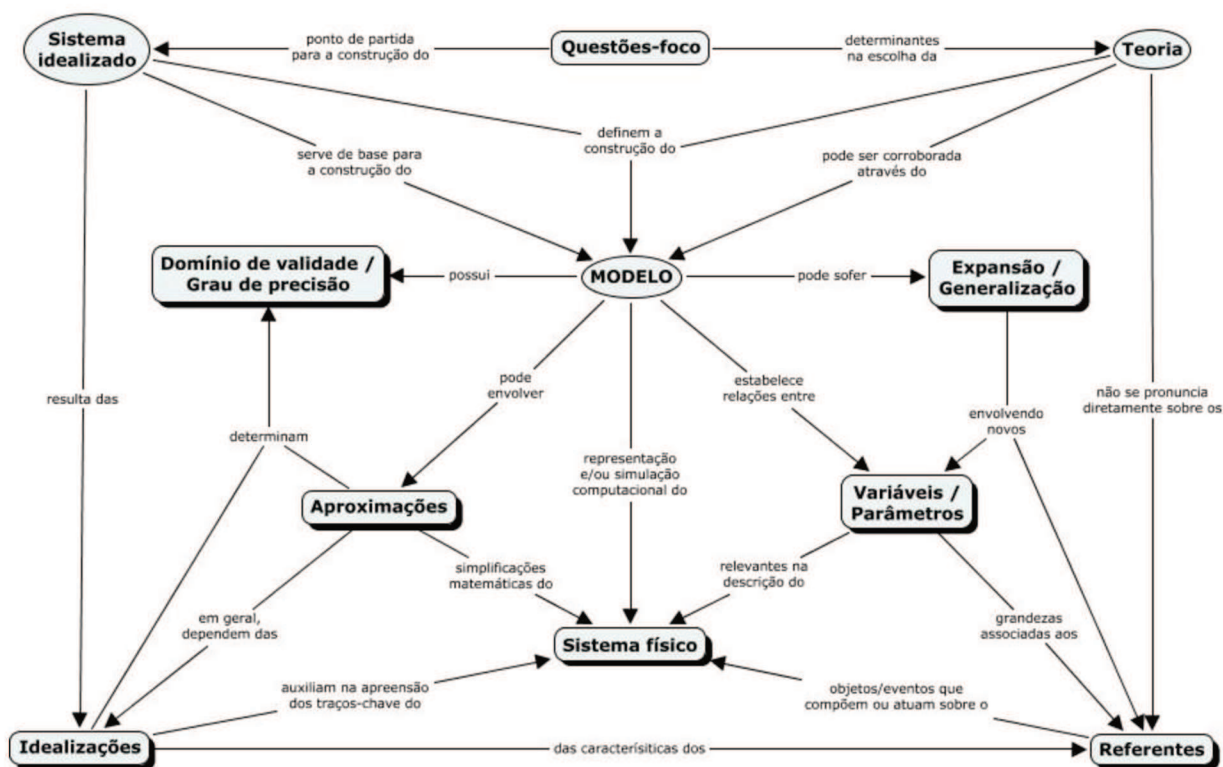


Figura 1 – Estrutura conceitual de referência associada à noção de modelo e ao processo de modelagem científica em Física.

Fonte: BRANDÃO et al. (2011a, p. 527).

O estudo de um fenômeno, evento ou sistema físico, começa com uma questão de pesquisa, requerendo, portanto, o invariante-operatório: *formular questão sobre uma situação física a ser respondida pela construção e/ou exploração de um modelo científico.*

Como não há um único caminho a ser seguido, é necessário *decidir que tipo de representação construir para responder à questão formulada*, ou seja, construir (ou escolher) um modelo para representar de modo simplificado o sistema ou fenômeno real em estudo. Esse é o denominado **objeto-modelo**.

Avançando no sentido da teorização, é preciso *representar a situação física de modo esquemático e à luz de algum campo conceitual específico da Física*, de preferência à luz de alguma Teoria Geral. As teorias não se pronunciam diretamente sobre os objetos reais (ou supostos com tais), porém aplicadas aos objeto-modelos geram modelos teóricos específicos para o estudo de classes de sistemas físicos.

O modelo a ser construído (ou escolhido) deverá ser um análogo estrutural do fenômeno que se pretende representar, jamais um análogo especular. Logo, faz-se necessário *delimitar objetos e eventos reais, ou supostos como tais, que compõem o sistema físico e sua vizinhança e que serão alvo de representação.* (São os chamados **referentes**.) E *dado um sistema físico, decidir quais dos seus traços-chave apreender*, ou seja, é preciso fazer alguma **idealização**. Pode ocorrer, contudo, que uma **aproximação** matemática seja conveniente ou necessária. O invariante-operatório associado é enunciado como: *dado um sistema físico previamente idealizado, decidir quais simplificações matemáticas serão assumidas, tais como: desprezar efeitos que são pequenos, considerar relações lineares, desprezar ruídos, etc.*

A descrição do sistema físico é expressa em termos de dois tipos de grandezas físicas: as que variam e as que se mantêm constante no intervalo de tempo compreendido pelo estudo. Denominam-se, respectivamente, por **variáveis e parâmetros**, sendo preciso *identificar quais variáveis e parâmetros são necessários para representar o sistema físico.*

É inerente à sua natureza, que modelos não descrevem perfeitamente fenômenos reais, então, é preciso avaliar o **grau de precisão** do modelo, ou seja, *dada uma idealização, avaliar qualitativa e quantitativamente o erro por ela introduzido no modelo.* Adicionalmente os modelos têm domínio de validade, de modo que é preciso *identificar situações em que os resultados teóricos fornecidos pelo modelo não descrevem o comportamento do sistema físico, dentro de margem tolerável de erro.*

Para ampliar o leque de situações-problemas tratáveis, pode-se fazer uma **expansão** do modelo, ou seja, *incluir novos referentes, variáveis, parâmetros, relações e conceitos físicos, a fim de obter resultados mais precisos e/ou melhor interpretáveis com o modelo.* Por fim, a

generalização implica, *dado um modelo conceitual e/ou matemático, verificar se ele pode ser útil para representar outros sistemas físicos distintos daquele para o qual foi concebido.*

Os oito conceitos grifados em negrito na exposição da ECR são considerados centrais na construção e uso de modelos científicos; as frases em itálico resumem os invariantes-operatórios de referência que, sob o ponto de vista didático, podem ser vistos como objetivos esperados das aprendizagens. Contudo, tem-se ciência que aprender a modelar não pode ser um objetivo de curto prazo. Como enfatizado por Vergnaud (1988; 1996), o domínio de um campo conceitual é um processo lento e progressivo, com avanços e retrocessos, por meio da experiência, maturidade e aprendizagem.

Foge ao escopo dessa ECR incluir conceitos específicos vinculados ao trabalho experimental, como os de evidência e de predição. Não que os autores não reconheçam a sua relevância, mas em se tratando de uma primeira articulação teórica entre as concepções de Vergnaud e Bunge, consideraram mais adequado limitar a ECR aos conceitos mais gerais do campo da MDC. Uma ampliação desse referencial, incluindo conceitos específicos do fazer experimental, foi construída, levando à definição de mais doze invariantes operatórios de referência (HEIDEMANN et al., 2018). Porém, como o estudo empírico descrito neste artigo não inclui o enfrentamento de situações experimentais, essa ampliação não é aqui discutida.

À luz da TCC, a construção de novos conhecimentos depende das concepções que o sujeito já dispõe para lidar com situações dominadas. As concepções dizem mais respeito aos significados e aos significantes, cientificamente aceitos ou não, que aquele que deseja aprender associa aos conceitos de um domínio de conhecimento. Tais concepções podem ser compatíveis com a construção dos novos conceitos, e nesse caso são consideradas precursores cognitivos; mas também podem ser incompatíveis, a ponto de constituírem-se em obstáculo epistemológico à aprendizagem de um novo conceito. Há, ainda, as concepções consideradas vieses cognitivos (não errôneas); são aquelas que conduzem o estudante a sistematicamente dar respostas a certas classes de situações e problemas que diferem das esperadas. Esses vieses se manifestam em certas regularidades observadas nas respostas dos estudantes frente a essas classes de situações (WEIL-BARAI; VERGNAUD, 1990).

A presente pesquisa investigou, a partir da metodologia apresentada na próxima seção, aspectos conceituais subjacentes às concepções e aos esquemas de pensamento utilizados por professores do Ensino Médio em atividades de modelagem científica em Física.

Metodologia de pesquisa

Segundo Vergnaud (1988), o estudo sistemático de um campo conceitual inicia com a identificação e a classificação de situações potencialmente capazes de dar sentido aos conceitos que se pretende que os sujeitos dominem e que, conseqüentemente, possam facilitar o desenvolvimento cognitivo a partir do processo de conceitualização (VERGNAUD, 1996). Posteriormente, é necessário “coletar dados sobre procedimentos e outras maneiras através das quais os estudantes expressam seu raciocínio” (VERGNAUD, 1988, p. 149). Assim, um ciclo de investigação tem início com o delineamento de situações e problemas e a correspondente identificação de invariantes operatórios, a partir da observação e análise dos fenômenos que ocorrem. Então, com objetivo de melhorar o anterior, inicia-se um novo ciclo de investigação e assim por diante. Dessa forma, Vergnaud entende que o estudo de um campo conceitual é um programa que deve ser pensado a longo prazo.

Tendo em vista a abordagem canônica ao estudo de um campo conceitual proposta por Vergnaud e o estudo de caso único realizado (BRANDÃO et al., 2014), decidiu-se também no presente estudo eleger a estratégia de pesquisa de estudo de caso, na acepção de Yin (2005; 2011).

Seguindo as orientações metodológicas de Yin (ibid.) um estudo explanatório, como o presente, tem início com proposição(ões) teóricas(s) a serem avaliadas ao longo do estudo. A proposição teórica que norteou o presente estudo pode ser enunciada da seguinte forma: o processo de modelagem científica permeia toda a Física e os elementos conceituais necessários para o seu domínio desempenham um papel fundamental nas explicações e práticas científicas. Conseqüentemente, as explicações dos professores de Física do Ensino Médio, seja quando estão ensinando ou aprendendo para ensinar, estão impregnadas de concepções associadas aos conceitos de ‘modelo’ e ‘modelagem científica’ em Física. Da mesma forma, seus esquemas de pensamento contêm invariantes operatórios, cientificamente corretos ou não, para lidar com situações capazes de dar sentido aos conceitos de ‘idealização’, ‘aproximação’, ‘referente’, ‘variável’, ‘parâmetro’, ‘domínio de validade’, ‘grau de precisão’, ‘expansão’ e ‘generalização’ de modelos didático-científicos.

A turma investigada era composta, inicialmente, por uma aluna e dez alunos, todos com formação no curso de Licenciatura Plena em Física. Ao longo das três primeiras semanas, três alunos cancelaram a matrícula em TICs-II, alegando impossibilidade de cursá-la por motivos particulares. Logo, permaneceram na disciplina uma aluna e sete alunos que serão chamados pelos nomes fictícios de Alison, Élvís, Gerônimo, Gilson, Guilherme, Luis, Rosária e Robson.

Ao longo de toda a disciplina os alunos foram defrontados com ‘situação de modelagem computacional’, entendidas como situações em que é necessário realizar uma

atividade de exploração e/ou construção de uma simulação ou um modelo computacional, individual ou coletivamente, com ou sem o auxílio do instrumento heurístico conhecido como diagrama AVM (dAVM). A sigla AVM quer dizer Adaptação do Vê de Gowin para a Modelagem e simulação computacionais aplicadas ao Ensino de Física (ARAUJO et al., 2012). Trata-se de um instrumento que visa promover uma ação reflexiva do sujeito que realiza uma atividade de modelagem computacional acerca dos domínios conceitual e metodológico do ‘modelo didático-científico’ explorado ou implementado. Em particular, esse instrumento provoca a mobilização de conhecimentos associados aos principais conceitos da Estrutura Conceitual de Referência apresentada no referencial teórico.

A forma predicativa do conhecimento dos alunos acerca do campo conceitual da MDC foi analisada a partir da coleta de dados, fundamentalmente, nas formas escrita e verbal. Mais especificamente, em entrevistas individuais, uma no início e outra no final da disciplina; testes de associação escrita de conceitos, um no início e outro no final; observações dos alunos realizando e apresentando suas atividades de modelagem exploratórias e expressivas, apoiadas ou não no dAVM; e análise de avaliações individuais. Já o estudo da forma operatória do conhecimento partiu das observações e da análise das gravações em áudio dos alunos em ‘situação de modelagem computacional’, pelo primeiro autor deste trabalho, que esteve presente nas 64 horas-aula ministradas a essa turma de alunos nessa disciplina no segundo semestre de 2009. Foram 16 encontros semanais, com quatro horas-aula de duração em cada encontro.

Resultados e discussão do estudo

As duas primeiras semanas de aula foram utilizadas primordialmente para detectar os conhecimentos prévios dos alunos sobre modelos e modelagem científica. Na primeira aula, a professora² expôs o plano de ensino da disciplina TIC-II e apresentou o *software* Modellus³ 4.01, que seria um dos principais recursos computacionais da disciplina. Os alunos iniciaram uma lista sobre cinemática uni e bidimensional, a ser resolvida com o auxílio desse *software*. Então, com a finalidade de mensurar o conhecimento inicial a respeito de modelos e modelagem científica, todos os alunos foram entrevistados individualmente, tendo sido questionados sobre ‘o que é’ e ‘para o que serve’ um modelo científico em Física. Foram questionados, também, sobre a relação entre teoria, modelo e realidade, no contexto da Física. O Quadro 1 apresenta algumas das respostas dos alunos.

Nesses depoimentos observam-se termos que tem íntima relação com a natureza dos modelos científicos, no contexto da Física, como por exemplo: ‘situação’, ‘realidade’,

² Terceira autora deste trabalho.

³ Software gratuito disponível em <http://modellus.co/index.php>

‘representação’, ‘algo’, ‘complexo’, ‘simplificação’, ‘variáveis’ e ‘aproximação’. Contudo, observa-se, também, que essas manifestações são confusas; nenhum aluno foi capaz de manifestar uma concepção consistente e adequada no início da disciplina.

Somente após a coleta dos dados referentes aos conhecimentos iniciais dos alunos, começaram as aulas sobre modelos e modelagem científica. Nas quatro primeiras aulas dessa sequência, parte da aula era utilizada pela professora para a apresentação, em uma exposição dialogada, dos fundamentos da modelagem-didático científica. No restante da aula os alunos trabalhavam de formas diversas. Por exemplo, na primeira parte da Aula 03, se reuniram em grande grupo para realizar a leitura e a discussão de um texto sobre modelos científicos da Física, extraído de um livro-texto voltado para estudantes do Ensino Médio (GASPAR, 2000, p. 15). Na segunda parte, a professora ministrou uma aula sobre ‘Modelos científicos e modelagem no Ensino de Física’. Ao final dessa aula, a professora solicitou que realizassem as tarefas 2 e 3, até a aula seguinte.

Quadro 1 - Ilustração de enunciados explicitados por alguns alunos no início da disciplina.

Modelo é algo que a gente usa para representar uma determinada situação. Então, eu crio um modelo. Eu crio uma situação que é parecida com aquela ou uma situação em que eu tenha menos variáveis, ou seja, uma situação que eu consiga descrever ela. [...] Então, criar um modelo é tentar dar uma representação visual de um determinado fenômeno.[...]É tentar criar uma representação, uma imagem ou uma descrição de algo que eu imagino que seja. Isso seria a criação de um modelo, assim como eu faço uma maquete de algo que eu estou planejando, criando um modelo daquilo ali, daquilo que eu julgo que seja a verdade sobre aquilo ali (Robson).

Quando você tem uma situação física muito complexa, você começa a podar algumas coisas para simplificar. Então, um modelo seria uma simplificação de uma situação real, que é muito útil, pois serve para descrever várias coisas de maneira mais simples. Só que ele tem as limitações dele. Você não pode pegar um modelo e sair aplicando, se ele tem condições muito mais especiais do que aquelas nas quais você construiu ele (Rosária).

O modelo científico não traduz exatamente a realidade, mas pode se aproximar bastante da realidade. Eu posso ter vários modelos para um mesmo fenômeno. Mas, normalmente, a gente tem um modelo que está associado a uma teoria. Porque eu posso ter vários. Mas é um que está associado à teoria. E ele pode se aproximar bastante do que nós temos na realidade (Gilson).

Fonte: autores

Na Tarefa 2, os alunos deveriam problematizar uma situação física por meio da formulação de questões a serem respondidas com a proposição de um modelo teórico adequado, explicitando o objeto-modelo e a teoria geral que lhes deram origem. Já na Tarefa 3, deveriam ler uma coletânea de textos de apoio sobre modelos e modelagem científica em Física (BRANDÃO et al., 2010) e, depois, responder a dez questões relacionadas a tópicos tratados em tais textos.

Essas tarefas foram discutidas pelo grande grupo e as dificuldades enfrentadas se manifestavam nas acalouradas discussões. Todavia, após a realização das tarefas 2 e 3, todos os alunos obtiveram um avanço significativo na conceitualização de ‘modelo científico’ em Física, em comparação com a compreensão inicial, ilustrada no Quadro 1. Com o intuito de exemplificar tal avanço, o Quadro 2 apresenta as respostas de dois alunos, em duas das dez

questões propostas na Tarefa 3. Como pode ser observado, o avanço conceitual diz respeito à compreensão do conceito de idealização, cuja importância é fundamental quando se pensa em descrever um fenômeno, uma situação ou um evento físico por meio de uma representação esquemática, à luz de uma perspectiva teórica.

Quadro 2 - Exemplos de respostas dos alunos a duas questões da Tarefa 3.

Questão	Respostas
4.b. Modelo é algo que a gente usa para representar uma determinada situação. Então, eu crio um modelo. Eu crio uma situação	<i>Ao tentar descrever de maneira utópica a plenitude das relações que envolvem o movimento da Lua em torno da Terra, eu poderia citar alguns pontos que deveriam ser levados em consideração, tais como: a não homogeneidade da composição de ambos os Astros, a interferência de forças gravitacionais externas ao sistema Terra-Lua, as imperfeições da trajetória da órbita, as variações de velocidade ao longo da órbita, entre outras (Robson).</i>
4.b. Explique agora quais as idealizações que devem ser feitas para tratar o fenômeno de forma simplificada. Descreva o objeto-modelo resultante.	<i>Uma forma de idealizar o movimento da Lua em torno da Terra, iniciaria pela determinação de um sistema isolado, onde a ação de forças externas são desconsideradas, seguida pela suposição de que ambos os astros são como pontos materiais em movimento no espaço imperturbável, onde a Lua descreve um movimento circular uniforme em torno da Terra. Dentro desta ótica, o modelo proposto seria facilmente descrito com base em princípios da Mecânica Newtoniana (Robson).</i>
5.a. Considere uma criança 'andando' de balanço. Faça uma relação de todos os aspectos que, do seu ponto de vista, deveriam ser levados em conta para uma descrição 'completa' (e impraticável) da situação.	<i>Considerar a massa da criança e do balanço. Deve ser levada em conta também a força de atrito da corrente com o suporte do balanço, assim como a resistência com o ar. Levando em conta o formato da criança para considerar a resistência do ar. Considerar que no local a aceleração da gravidade sofre pequenas variações a serem levadas em conta. A massa da corda do balanço deve ser considerada, podendo também sofrer pequenas variações em seu comprimento. Deve-se também levar em conta que a criança produz movimentos enquanto o balanço oscila, podendo assim manter a oscilação do balanço ou até aumentá-la (Gilson).</i>
5.b. Explique agora quais as idealizações que devem ser feitas para tratar a situação de forma simplificada. Descreva o objeto-modelo resultante.	<i>Desprezar a força de atrito no balanço e a resistência com o ar. Considerar a criança como sendo um ponto material onde se localiza toda a sua massa. Desprezar a massa do balanço. Adotar a aceleração da gravidade do local constante e o cabo do balanço inextensível (Gilson).</i>

Fonte: autores

Nas tarefas das aulas 02 e 03, os alunos puderam não só explicitar e compartilhar significados como também tornar operatório o conceito de idealização frente a um conjunto de situações capaz de dar sentido a esse conceito; puderam refletir sobre a importância das idealizações na representação de um fenômeno, evento ou situação real percebida por meio de um fenômeno, evento ou situação idealizada. Em outros termos, se quer dizer que mobilizaram tanto a forma predicativa quanto a operatória de seus conhecimentos acerca das idealizações no contexto da modelagem científica em Física. E isso parece ter contribuído significativamente para melhor compreensão de outros conceitos da ECR da MDC.

Esse avanço conceitual também se refletiu na comparação entre os testes de associação escrita de conceitos aplicados no início e no final da disciplina, a exemplo do que já ocorrera

em estudo anterior (BRANDÃO et al., 2014). O Quadro 3 mostra as cinco primeiras palavras, ordenadas conforme o grau de importância, associadas ao conceito de ‘modelo’, no contexto da Física, no início e no final de TICs-II, por três alunos. Observa-se que ‘forma’ e ‘padrão’ foram as principais categorias de pensamento associadas ao conceito de ‘modelo’, antes de iniciar a disciplina. Destaca-se, ainda, que somente um aluno, entre os oito, associava a ideia de ‘representação’ ao conceito de ‘modelo’, nessa época. Contudo, após o final da disciplina, os alunos foram unânimes em associar a ideia de ‘representação’ ao conceito de ‘modelo’, no contexto da Física. Além disso, ‘idealização’, ‘aproximação’, ‘realidade’ e ‘multiplicidade’ também passaram a figurar entre as categorias de pensamento mais associadas ao conceito de ‘modelo’ em Física.

Quadro 3 - Cinco primeiras palavras associadas ao conceito de ‘modelo’ em Física por três alunos, no início e no final do semestre..

Aluno	Teste inicial	Teste final
Gerônimo	Maneira Forma Descrição Padrão Configuração	Representação Computacional Matemático Idealização Definição
Guilherme	Forma Metodologia Exemplo a seguir Padrão Exemplo de situação	Representação Vários Forma Aproximações Realidade
Robson	Representação Padrão Idealização Contextualização Ideia	Representação Idealização Protótipo Visualização Descrição

Fonte: autores

Na Aula 04 a professora ministrou uma aula expositivo-dialogada sobre ‘Validação e adequação de modelos teóricos aos dados empíricos’ e, logo após, apresentou o *software Excel* como uma ferramenta para o ajuste de curvas teóricas a dados empíricos. Em seguida, os alunos deram início a uma série de atividades de modelagem, com o *software Excel* e a ferramenta de modelagem e vídeo-análise *Tracker*⁴, enfatizando a importância dos modelos teóricos na escolha da função matemática que ‘melhor’ ajusta os dados empíricos relativos a um sistema, evento, processo ou fenômeno físico de interesse. Essas atividades (tarefas 4, 5, 6 e 7) estenderam-se até a Aula 06, quando foi realizada a segunda avaliação individual sobre ajuste de curvas.

Em diferentes momentos ao longo dessa sequência de tarefas ficou evidente a utilização de um esquema de raciocínio, por parte de Alison, Élvís, Guilherme, Gerônimo e

⁴ O *software Tracker* é um programa gratuito para análise de vídeo e construção de modelos concebido no ambiente Java do projeto [Open Source Physics](#) (OSP, Física de Código Aberto). Foi pensado para ser usado no Ensino de Física.

Rosária, frente à opção por uma função de ajuste a um conjunto de dados empíricos que privilegiava aspectos matemáticos em detrimento de pressupostos fornecidos por um modelo teórico capaz de auxiliar na interpretação física da situação de interesse. A partir dessas evidências se inferiu que na base conceitual desse esquema encontrava-se o seguinte invariante operatório: **a função matemática que ‘melhor’ ajusta um conjunto de dados empíricos é a que minimiza o somatório dos quadrados dos resíduos e que pode ser representada por uma expressão que seja a mais simples ou familiar possível.** Tal invariante operatório parece estar atuando como um obstáculo epistemológico à compreensão acerca da adequação quantitativa de modelos teóricos da Física à realidade (CUDMANI; SANDOVAL, 1991). A seguir são apresentadas duas situações em que esse invariante operatório foi utilizado pelos alunos supracitados.

Na Tarefa 4, realizada em dupla e com auxílio do *software Excel*, os alunos tinham que: fazer um gráfico para um conjunto de dados empíricos fornecido pela professora; enunciar um fenômeno físico capaz de ser descrito pelo gráfico do item anterior; optar por uma função de ajuste, explicitando os pressupostos teóricos levados em conta para a sua escolha e utilizando o método dos mínimos quadrados do *software Excel*; fazer o gráfico da função escolhida, explicitando sua forma analítica; associar os parâmetros de ajuste a grandezas físicas adequadas ao fenômeno físico escolhido, especificando suas unidades de medida; e comparar os resultados com a linha de tendência fornecida pelo *software Excel*.

A Figura 2 apresenta o ajuste proposto por Gerônimo e Rosária na Tarefa 4, para o qual deram a seguinte explicação:

Os dados experimentais se ajustariam bem tanto a uma função quadrática como a uma função logarítmica. Fazendo o ajuste de curvas para esses dois tipos de função, obtivemos que a soma dos quadrados das distâncias entre os valores experimentais e teóricos (método dos mínimos quadrados) é um pouco menor para um ajuste quadrático. Portanto, 0,450 seria a aceleração do corpo em metros por segundo ao quadrado, -2,661 seria a velocidade inicial do corpo e 9,9369 seria a sua posição inicial.

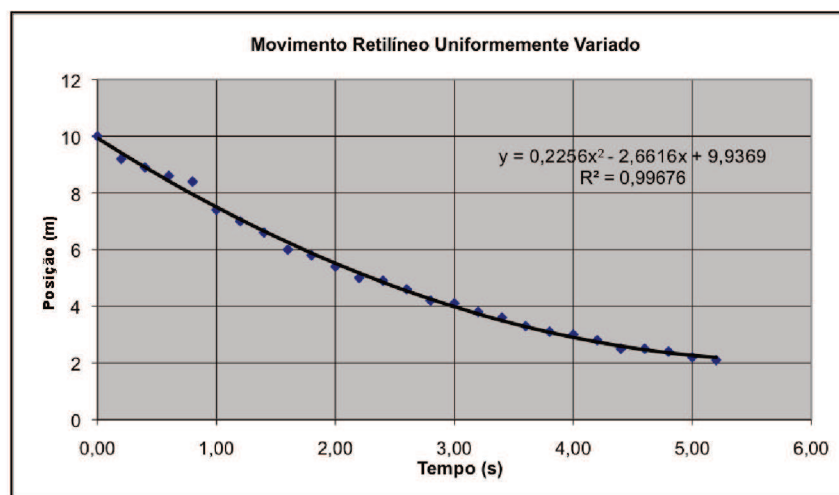


Figura 2 – Função matemática proposta por Gerônimo e Rosária para descrever o movimento uniformemente variado de um objeto.

Fonte: participantes da pesquisa.

Como se pode constatar, Gerônimo e Rosária optaram por uma função quadrática em detrimento de uma função logarítmica, levando em consideração apenas aspectos matemáticos, deixando a determinação física dos parâmetros que relacionam as variáveis estudadas (posição em função do tempo) em segundo plano. A utilização de tal esquema de raciocínio foi reforçada pelo comentário postado por Gerônimo no *Moodle*, uma semana após ter realizado a tarefa:

Cara professora, ao trabalhar na Tarefa 4 cometemos um equívoco ao escolher uma função com R^2 com valor menor. Penso que confundimos com a ideia de tentar conseguir o menor valor no método dos mínimos quadrados e estender este raciocínio para o R^2 . Poderia explicar, novamente, o item R^2 no ajuste dos gráficos?

Na Aula 06 os alunos realizaram a segunda avaliação individual na disciplina, composta de duas questões sobre ajuste de curvas a serem realizadas: uma com lápis e papel e a outra no *Excel*. Na Questão 1, deveriam indicar e justificar qual das funções um físico elegeria como a melhor candidata a descrever os resultados e de um experimento (hipotético) em que se deixa uma pequena esfera de aço cair no ar, a partir do repouso, de diversas alturas próximas ao solo e se mede os correspondentes intervalos de tempo de queda. Alison, Élvis e Guilherme optaram pela função 3 (incorreta) enquanto os demais escolheram a função 2 (correta). Duas respostas representativas, uma adequada e outra inadequada à descrição do experimento, são mostradas no Quadro 4.

Quadro 4 - Escolhas e justificativas de dois alunos na Questão 1 da segunda avaliação individual.

Escolha e justificativa da função de ajuste	
Adequada ao experimento	Inadequada ao experimento
<p>1.a. A função escolhida é a do ajuste dois, uma função polinomial de ordem dois, pois é a função que se utiliza para o estudo das posições em função do tempo nos movimentos uniformemente acelerados a partir do repouso. Podemos também desconsiderar a força de resistência do ar pela grande diferença de densidade da esfera de aço em relação ao ar e pela baixa velocidade relativa adquirida pela esfera em tão pouco tempo. 1.b. Para a função escolhida, $H=500t^2$, que é uma função do tipo $y=y_0+v_0t+(at^2)/2$, que nesse caso fica $H=H_0+v_0t+500t^2$. Como H_0 é zero e v_0 é zero, o objeto é abandonado da posição inicial zero metros, no tempo zero segundos, com velocidade inicial zero metros por segundo. Sendo H a distância percorrida em metros, e o tempo t em segundos, o valor de 500 é o da aceleração dividido por dois (Gerônimo).</p>	<p>1.a. Dentre as funções apresentadas, a que apresenta um menor erro percentual entre os resultados experimentais e teóricos é a de número 6. Por se tratar de uma função que envolve t na quarta potência sua solução torna-se muito complicada. Tendo em vista a descrição dos dados experimentais e a teoria conhecida sobre queda dos corpos, um físico deveria escolher a função de número 3 para descrever os resultados. 1.b. Para descrever a queda dos corpos sabemos que a função da posição é dada por $y=y_0+v_0t+(gt^2)/2$, onde y é a posição final (cm), y_0 é a posição inicial (cm), v_0 é a velocidade inicial (cm/s) e g é a aceleração da gravidade (cm/s²). Chamando $H=y-y_0$, podemos reescrever $H=(gt^2)/2+v_0t$. Logo, os parâmetros são: 591 o valor da aceleração da gravidade dividida por 2 (cm/s²) e -50 o valor da velocidade inicial (cm/s) (Élvis).</p>

Fonte: autores

Como se pode observar, Élvís optou por funções matemáticas não condizentes com as condições experimentais, ainda que não tenha levado em conta apenas considerações de natureza matemática na sua escolha. (A manifestação de Alison foi semelhante.) Como a esfera de aço foi abandonada do repouso, sua velocidade inicial deveria ser nula e não poderia assumir um valor diferente de zero. Já Gerônimo, nesse momento, parece ter compreendido que “a decisão por uma função de ajustamento transcende os resultados experimentais, envolvendo considerações teóricas” (SILVEIRA; OSTERMANN, 2002). (Também Rosária foi capaz de expressar esse entendimento.)

Na segunda metade da Aula 06, a professora ministrou uma aula expositivo-dialogada sobre “Exemplos de atividades de simulação e modelagem computacionais nos modos exploratório e expressivo”. Ao final desse encontro, a professora solicitou aos alunos que realizassem, até a aula da semana seguinte, a Tarefa 8, em duplas.

Nessa tarefa, cada dupla deveria escolher um dos oito modelos computacionais previamente selecionados pela professora entre os exemplos oferecidos pelo *software Modellus 4.01*. Após explorar o modelo computacional escolhido, sob as mais diversas perspectivas, os alunos deveriam identificar os referentes reais, as idealizações assumidas, as variáveis e os parâmetros envolvidos nas relações matemáticas subjacentes ao modelo implementado em computador. Todas as quatro duplas apresentaram dificuldades para cumprir essa tarefa.

Possivelmente essas dificuldades se devem à falta de invariantes operatórios ‘de referência’ que precisariam estar entre os ingredientes essenciais dos esquemas de pensamento dos alunos para lidar com situações para as quais seja de fundamental importância: (i) determinar o sistema físico de interesse, incluindo não só os objetos que o constituem como também os agentes externos que com ele interagem; e (ii) diferenciar os objetos reais, ou supostos como tais, que compõem o sistema físico a ser estudado e sua vizinhança, das grandezas físicas que descrevem suas propriedades, estrutura, estados, interações, etc. Como apontam Islas e Pesa (2001; 2002), tais dificuldades tendem a se acentuar na medida em que a porção de realidade a ser representada se constitui por entidades cada vez menos acessíveis à percepção.

Na Aula 07, a professora conduziu uma aula expositivo-dialogada sobre o “Diagrama AVM: um instrumento heurístico para aprendizagem em Ciências através de atividades de simulação e modelagem computacionais”. A partir desse encontro, os alunos passaram a realizar todas as atividades de modelagem computacional, exploratórias ou expressivas, com auxílio do diagrama AVM (ARAUJO et al., 2012).

Nas atividades de simulação ou modelagem computacionais do tipo exploratórias (tarefas 9, 10 e 11), os alunos exploraram e buscaram validar, sob as mais diversas

perspectivas, simulações ou modelos computacionais não construídos por eles. Nas atividades de modelagem computacionais do tipo expressivas (tarefas 12 e 13), os alunos passaram a construir e validar seus próprios modelos, desde as representações matemática e icônica até a análise da razoabilidade dos resultados obtidos com a implementação computacional do modelo didático-científico subjacente.

Com base nas observações dos alunos realizando essas atividades e nas gravações em áudio das apresentações dos respectivos dAVMs aos colegas foi possível obter outras evidências acerca das dificuldades e dos avanços no processo de conceitualização do real, bem como dos esquemas de pensamento, e invariantes operatórios, utilizados pelos mesmos na exploração, criação e validação de modelos computacionais no *software Modellus*.

Visto que a Tarefa 9 requeria que construíssem seu primeiro dAVM, foi proposto que eles trabalhassem com o modelo computacional já explorado na Tarefa 8, pois eles já haviam identificado alguns aspectos conceituais subjacentes ao modelo, constantes nos campos do dAVM.

Na Tarefa 10, os alunos deviam construir e apresentar, individualmente, o segundo dAVM da disciplina, relativo a uma simulação computacional disponível na *Internet* ou a um modelo computacional oferecido como exemplo pelo *software Modellus*, de livre escolha.

Esses dois primeiros dAVMs foram construídos de maneira *pro forma* pelos alunos, apenas para cumprir uma formalidade exigida pela disciplina, sem maior significado. Prova disso são os aspectos conceituais explicitados, ou a falta desses, pelos alunos nos campos relativos: (i) ao centro do dAVM, em que constam o fenômeno de interesse, as questões-foco e a situação-problema; (ii) aos ‘referentes reais’, às ‘idealizações e aproximações’, aos ‘resultados conhecidos’ e às ‘predições’, pertencentes ao domínio conceitual do dAVM; e (iii) à ‘validação do modelo computacional’ e às ‘resposta(s) à(s) questão(ões)-foco’, pertencentes ao domínio metodológico do dAVM.

Em relação à(s) ‘questão(ões)-foco’ e à ‘situação-problema’, que deveriam contextualizar o fenômeno de interesse da atividade de modelagem computacional e, portanto, dizer respeito a uma situação real, ou suposta como tal, é preciso chamar a atenção para o seguinte fato. Ao menos em uma dessas duas tarefas (9 e 10), quatro (Alison, Robson, Elvis e Luis) dos oito alunos incluíram entidades ideais na formulação das questões-foco ou na descrição da situação-problema. Isso evidencia o uso de esquemas de raciocínio, por parte desses alunos, que estão associados a situações prototípicas, completamente idealizadas, costumeiramente tratadas em sala de aula e que permanecem distantes daquelas vivenciadas no cotidiano, tal como foi alertado na introdução desse trabalho.

Em relação aos ‘referentes reais’ e às ‘idealizações e aproximações’ assumidas pelos modelos computacionais da Tarefa 10, ressalta-se que Luis usou o invariante operatório detectado no estudo anterior (BRANDÃO et al., 2014), que diz respeito à: **necessidade de idealizar ao máximo a situação física de interesse, a fim de tratá-la da forma mais esquemática possível, independentemente da perspectiva teórica sob a qual a situação esteja sendo abordada.**

O modelo computacional explorado por Luis enfocava a descrição cinemática de uma situação completamente idealizada: o movimento uniformemente acelerado de um objeto representado pictoricamente por um dinossauro movendo-se horizontalmente. No entanto, Luis identificou: (i) as leis de Newton e da gravitação como as envolvidas na construção do modelo computacional; (ii) o dinossauro e o solo como os referentes reais; e (iii) a ausência de resistência do ar e de atrito com o solo como as idealizações/aproximações assumidas pelo construtor desse modelo. Ou seja, o aluno fez uso de um esquema de raciocínio que introduziu uma entidade real (solo) para, em seguida, desconsiderar a sua influência (atrito entre objeto e solo) na descrição da situação física de interesse. Adicionalmente, Luis despreza a força de resistência do ar, a fim de simplificar ao máximo a descrição da situação, quando sequer faz sentido falar de ‘força’, haja vista que se trata da representação do movimento de um objeto sob a perspectiva da Cinemática.

Esse mesmo esquema de raciocínio também foi adotado por Élvis, na Tarefa 10. Ao identificar uma superfície plana, que não é representada no modelo computacional, como um referente real do mesmo, Élvis demonstra a necessidade de introduzir uma entidade real para em seguida justificar a ausência de atrito entre a superfície e o carro (que representa pictoricamente o objeto em movimento) como uma idealização assumida pelo modelo computacional. Cabe ressaltar que nenhum outro alunos demonstrou ter utilizado tal esquema de raciocínio, nesta tarefa.

Em relação aos ‘resultados conhecidos’, às ‘predições’ e à ‘validação do modelo computacional’, nas tarefas 9 e 10, destaca-se que nenhum aluno foi capaz de explicitar quais foram as comparações estabelecidas entre os aspectos conceituais por eles identificados nos dois primeiros campos e os resultados obtidos com o modelo computacional, a fim de verificar possíveis fontes de erro ou eventuais discordâncias entre os mesmos. Tal fato evidencia, como se verá a seguir, na Tarefa 11, a presença de um invariante operatório que parece estar atuando como obstáculo epistemológico à análise da razoabilidade dos resultados obtidos com os modelos computacionais em atividades exploratórias.

Modelos didático-científicos podem ser entendidos como versões didáticas de modelos aceitos por uma comunidade científica. Por sua vez, modelos computacionais com fins didáticos podem ser entendidos como versões computacionais de modelos didático-

científicos. Logo, os resultados obtidos por esses modelos computacionais devem necessariamente reproduzir os resultados previstos pelos modelos didático-científicos a eles subjacentes. Evidentemente, isso não quer dizer que os modelos computacionais estejam validados.

Na validação de modelos computacionais explorados e/ou construídos com fins didáticos deve-se estar atento às seguintes possibilidades: (i) o modelo computacional pode não representar adequadamente a situação física de interesse, pois é o modelo didático-científico subjacente que não o faz; ou (ii) o modelo didático-científico, apesar de representar adequadamente a situação física de interesse, pode ser mal implementado em computador. Em ambos os casos, resultam modelos computacionais que possuem erros e, por consequência, não representam de maneira adequada a situação física de interesse, seja por questões de implementação computacional, seja por estarem baseados em pressupostos teóricos inadequados. Por fim, pode-se ter, como é o esperado, modelos computacionais com fins didáticos que representam adequadamente a situação física de interesse, na medida em que se apoiam em modelos didático-científicos implementados corretamente e cientificamente aceitos.

Tendo em vista as possíveis fontes de erro que podem estar presentes na concepção e/ou implementação de uma simulação ou modelo computacional, trabalhar com atividades de modelagem computacionais exploratórias em que se introduz algum tipo de erro, de forma deliberada, pode se constituir numa estratégia de ensino valiosa, especialmente quando se pensa em mobilizar concepções e competências relativas à validação dos resultados obtidos com simulações ou modelos computacionais.

De modo geral, nem os estudantes, quando constroem seus próprios modelos, nem os professores, quando utilizam simulações computacionais no ensino de algum conteúdo, costumam realizar testes ou analisar a razoabilidade dos resultados obtidos com os modelos de que fazem uso.

Na Tarefa 11, cada dupla de alunos tinha que explorar e validar um modelo computacional construído pela professora no *software Modellus 2.5*, com o auxílio do dAVM. Posteriormente, cada dupla deveria apresentar e discutir o seu dAVM com os demais colegas. Entretanto, o modelo computacional que a professora de TICs-II forneceu a cada uma das quatro duplas continha um erro proposital.

Como exemplo do tipo de erro introduzido, detalhamos o modelo computacional explorado por Gilson e Luis, que simulava o lançamento vertical de um objeto. O erro introduzido propositalmente estava associado à força de resistência do ar, que agia sempre no sentido vertical para baixo, independentemente do sentido do movimento vertical do corpo. Assim, a força era exercida contrariamente ao movimento do objeto, na subida, mas a seu

favor, na descida, acelerando-o em vez de frená-lo. Isso porque, a expressão estava escrita na forma $F_y = -m \times g - b \times v_y^2$ em vez do modo correto, $F_y = -m \times g - b \times v_y^2 \times v_y/|v_y|$

A análise dos dAVMs relativos à Tarefa 11 permitiu constatar que os alunos não foram capazes de adotar procedimentos para submeter os modelos computacionais por eles explorados a testes robustos, na tentativa de validá-los. Mesmo Gerônimo e Rosária, que exploraram o modelo de pêndulo simples e fizeram testes para validá-lo, se limitaram a um único teste simples (para $g = 0$, não há oscilação). Demonstraram, com isso, estar fazendo uso de um invariante operatório, já inferido no estudo de caso anterior (BRANDÃO et al.; 2014), que parece estar atuando como obstáculo epistemológico à análise da razoabilidade dos resultados obtidos pelos modelos computacionais: **o pressuposto de que as simulações ou modelos computacionais estão corretos e não precisam ser submetidos a testes capazes de identificar eventuais fontes de erro e/ou limites de validade.**

Contudo, após terem explorado modelos computacionais com erros, sem ter identificados as suas causas, os alunos passaram a apresentar uma atitude mais crítica e reflexiva acerca do processo de validação de modelos computacionais. Adicionalmente, à medida que seguiram apresentando e discutindo os dAVMs correspondentes às atividades de modelagem computacional expressivas, os alunos iniciaram um processo gradual de conscientização de que o instrumento dAVM, de fato, era capaz de auxiliá-los na exploração e/ou criação, validação e revisão de seus modelos computacionais. Tal processo de conscientização foi acompanhado por um avanço na conceitualização das situações físicas sobre as quais os modelos computacionais versavam, que se traduziu na riqueza de informações contidas nos vários campos dos dAVMs e suas interações, nas Tarefas 12 e 13.

Tais avanços puderam ser atestados pela análise dos aspectos conceituais explicitados, nas tarefas 12 e 13, em relação aos campos: (i) do centro do dAVM, em que constam o fenômeno de interesse, as questões-foco e a situação-problema; (ii) dos ‘referentes reais’, das ‘idealizações e aproximações’, dos ‘resultados conhecidos’ e das ‘predições’, pertencentes ao domínio conceitual do dAVM; e (iii) da ‘validação do modelo computacional’, das ‘resposta(s) à(s) questão(ões)-foco’ e das ‘possíveis generalizações e expansões do modelo computacional’, pertencentes ao domínio metodológico do dAVM.

Em relação ao centro dos dAVMs construídos nessas últimas duas tarefas, destaca-se que todos os alunos passaram a construir modelos computacionais que tinham como objetivo representar situações-problema mais realísticas, tais como: o movimento de uma bola de sinuca após uma tacada (Alison e Robson), o movimento da bola de futebol chutada por Pelé em um jogo válido pela Copa do Mundo de 1970 (Élvis e Guilherme), o movimento de um foguete lançado a uma certa altura da superfície da Terra (Gerônimo e Rosária) e o comportamento de circuitos elétricos mistos utilizados em residências (Gilson e Luis). A

exceção ficou por conta da situação-problema e das questões-foco formuladas por Gilson e Luis, na Tarefa 12.

Cabe ressaltar também que em todos os dAVMs construídos pelos alunos nas tarefas 12 e 13, os referentes reais e as idealizações e aproximações assumidas pelos modelos computacionais passaram a ser identificados adequadamente. A exceção foi, novamente, Gilson e Luis, na Tarefa 12, que identificaram uma ‘partícula’ como referente real do modelo computacional por eles concebido. Aqui cabe chamar a atenção do leitor para o seguinte aspecto. O referente direto de todo o modelo didático-científico, esteja ou não implementado em computador, é o objeto-modelo (ou modelo conceitual) que lhe deu origem. No entanto, na medida em que esse modelo didático-científico é utilizado para representar uma situação real, ou suposta como tal, ele passa a ter referentes reais, ou seja, objetos do mundo real sobre os quais ele pretende versar. Foi nesse sentido que a professora de TICs-II sempre insistiu com os seus alunos.

Em relação aos demais campos supracitados dos dAVMs construídos pelos alunos nas tarefas 12 e 13, chama-se a atenção do leitor para os seguintes aspectos: (i) a tentativa de estabelecer uma comparação entre os campos ‘resultados conhecidos’ e ‘validação do modelo computacional’, a fim de testar alguns aspectos dos modelos; (ii) a preocupação com a busca por respostas mais objetivas e específicas às questões-foco inicialmente formuladas; e (iii) a explicitação de aspectos conceituais que poderiam ser levados em conta em possíveis generalizações e/ou expansões dos modelos computacionais, evidenciando uma consciência acerca das limitações de tais modelos computacionais.

Levando-se em conta todos dados coletados, em grande parte ilustrados nesta seção, tem-se condições de responder às duas questões de pesquisa deste estudo explanatório.

Como resposta à primeira questão de pesquisa desse estudo, *Quais, e a que se devem, as dificuldades enfrentadas e os avanços obtidos na conceitualização do real em Física pelos alunos nas tarefas de modelagem que lhes foram propostas em TICs-II?* Os quadros 5 e 6 apresentam, respectivamente, as principais dificuldades enfrentadas e os avanços obtidos na conceitualização do real em Física pelos alunos de TICs-II nas tarefas de modelagem que lhes foram propostas.

Quadro 5 - Dificuldades enfrentadas na conceitualização do real em Física nas tarefas de modelagem propostas.

Dificuldade na conceitualização do real	Possivelmente deve-se
Identificar as idealizações e as aproximações de modelos didático-científicos da Física e suas implicações no contexto de validade dos mesmos.	a situações prototípicas para as quais são assumidas idealizações e aproximações automaticamente, sem a devida reflexão acerca das 'simplificações' que tais ações introduzem no processo de modelagem didático-científica em Física.
Identificar os referentes reais de modelos didático-científicos da Física.	à indeterminação do sistema físico de interesse e dos agentes externos que com ele interagem; à falta de clareza entre os objetos reais, ou supostos como tais, e as grandezas físicas que descrevem suas propriedades, estrutura, estados, interações, etc.

Fonte: autores

Quadro 6 - Avanços obtidos na conceitualização do real em Física nas tarefas de modelagem propostas.

Avanço na conceitualização do real	Possivelmente deve-se
Compreensão acerca da natureza e da construção de modelos didático-científicos da Física.	à compreensão do que significa idealizar e suas implicações no processo de modelagem didático-científica em Física.
Análise da razoabilidade das soluções encontradas com modelos didático-científicos da Física.	à postura mais crítica e reflexiva adotada pelos alunos após explorarem modelos computacionais com erros introduzidos propositalmente pela professora e que não foram identificados.

Fonte: autores

Como resposta à segunda questão, *Quais, e como, os invariantes operatórios evidenciados pelos alunos nas tarefas de modelagem que lhes foram propostas em TICs-II, influenciaram na conceitualização do real em Física?* O Quadro 7 apresenta três possíveis invariantes operatórios utilizados pelos alunos de TICs-II nas tarefas de modelagem que lhes foram propostas.

Quadro 7 - Invariantes operatórios utilizados nas tarefas de modelagem propostas.

Invariante operatório	Atua como
Necessidade de idealizar ao máximo a situação física de interesse, a fim de tratá-la da forma mais esquemática possível, independentemente da perspectiva teórica sob a qual a situação esteja sendo abordada.	Viés cognitivo à compreensão da natureza e à construção de modelos didático-científicos em Física.
Pressuposto de que as simulações ou modelos computacionais estão corretos e não precisam ser submetidos a testes capazes de identificar eventuais fontes de erro e/ou limites de validade.	Obstáculo epistemológico à validação de simulações ou modelos computacionais em Física.
A função matemática que ‘melhor’ ajusta um conjunto de dados empíricos é a que minimiza o somatório dos quadrados dos resíduos e que pode ser representada por uma expressão que seja a mais simples ou familiar possível.	Obstáculo epistemológico à adequação quantitativa de modelos didático-científicos em Física.

Nota: Os dois primeiros invariantes corroboram resultados de estudo anterior.

Fonte: autores

Conclusões

Neste artigo são apresentados resultados empíricos de um referencial teórico-metodológico concebido tendo como primeiro princípio: o papel central que os modelos e a modelagem científica assumem em Física também é crucial na aprendizagem de Física. Partindo desse princípio e tendo como aportes teóricos a Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud e as concepções epistemológicas de Bunge, foi possível, em estudo anterior (BRANDÃO, 2012; BRANDÃO et al., 2011a) mostrar que a modelagem científica se constitui em um campo conceitual subjacente aos campos da Física, definir uma estrutura conceitual de referência e estabelecer invariantes operatórios de referência para esse campo conceitual. Em um estudo anterior (BRANDÃO et al., 2014), esse referencial se mostrou profícuo para investigar as formas predicativa e operatória do conhecimento mobilizadas por um professor do ensino médio, com destacado conhecimento de física, no enfrentamento de situações-problemas do campo conceitual da modelagem didático-científica em Física. O presente estudo permitiu corroborar a proposição teórica inicial, qual seja, que as explicações dos professores de Física do Ensino Médio, seja quando estão ensinando ou aprendendo para ensinar, estão impregnadas de concepções associadas aos conceitos de ‘modelo’ e ‘modelagem científica’ em Física. Da mesma forma, seus esquemas de pensamento contêm invariantes operatórios, cientificamente corretos ou não, para lidar com situações capazes de dar sentido aos conceitos de ‘idealização’, ‘aproximação’, ‘referente’, ‘variável’, ‘parâmetro’, ‘domínio de validade’, ‘grau de precisão’, ‘expansão’ e ‘generalização’ de modelos didático-científicos. Portanto, trabalhar com esses conceitos básicos da modelagem didático-científica é imprescindível quando se deseja que os alunos progridam na compreensão do da Física

como construção humana, provida de modelos científicos que, ainda que tenham limitações, permitem responder questões sobre eventos físicos.

Este estudo corrobora diversos resultados da literatura; por exemplo, falta de reflexão dos professores sobre o significado e o emprego dos modelos em Física, e sérias dificuldades para interpretar como os modelos se relacionam com a realidade (SMIT; FINEGOLD, 1995; ISLAS; PESA, 2002); e falta de valorização do papel que os modelos desempenham na construção do conhecimento científico (SMIT; FINEGOLD, 1995; ISLAS; PESA, 2002; JUSTI; GILBERT, 2002). Também mostra, como Louca e Zacharia (2012) apontam em artigo de revisão da literatura, a potencialidade de atividades de modelagem científica no ensino de Física para a compreensão conceitual de conteúdos científicos e compreensão da natureza operatória da Ciência, entre outros benefícios.

Este estudo se destaca por estar inserido em um programa de pesquisa abrangente, no qual se construiu um referencial teórico metodológico que articula consistentemente uma teoria de aprendizagem (TCC de Vergnaud) com uma postura filosófica sobre modelos e modelagem científica (Bunge). Encerra-se com esse artigo um ciclo em que a ênfase esteve na construção, validação e aplicação de modelos computacionais na descrição dos eventos físicos. Resultados de outro ciclo, cuja ênfase está nos modelos didáticos-científicos como elo entre a teoria e a prática, foram recentemente publicados por Heidemann et al. (2018).

Ainda em aberto estão as possibilidades e desafios de transpor os resultados encontrados em nossa pesquisa para alunos de ensino médio. Em particular, é premente a necessidade de elaboração de metodologias ativas de ensino que favoreçam a construção do conhecimento de Física, coerentes com concepções epistemológicas contemporâneas.

Agradecimentos

Agradecemos aos avaliadores do presente artigo pelos comentários e sugestões que contribuíram para o enriquecimento e maior clareza do texto. Rafael Vasques Brandão agradece à CAPES. Ives Solano Araujo agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida.

Referências

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*, v. 17, n. 2, p. 341-366, 2012.

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

BRANDÃO, R. V. *A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no ensino de Física*. 2012. 230 f. Tese (Doutorado 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. Introdução à modelagem Científica. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, v. 21, n. 6, 2010. Disponível em: < http://www.if.ufrgs.br/public/tapf/v21_n6_brandao_araujo_veit.pdf >. Acesso em 07 de setembro de 2018.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Concepções e dificuldades dos professores de Física no campo conceitual da modelagem científica. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 9, n. 3, p. 669-695, 2010.

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

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Um estudo de caso para dar sentido à tese de que a modelagem científica pode ser vista como um campo conceitual. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias (En línea)*, v. 9, p. 1-21, 2014.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A.; SILVEIRA, F. L. Validación de un cuestionario para investigar concepciones de profesores sobre ciencia y modelaje científico en el contexto de la física. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, v. 6, n. 1, p. 43-60, 2011b.

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

BUNGE, M. *La investigación científica: su estrategia y su filosofía*. 2. Ed. Barcelona: Editorial Ariel, 1989.

COLL, R. K.; LAJIUM, D. (2011) Modeling and the future of science learning. In: KHINE, M. S.; SALEH, I. M. (Eds.). *Models and modeling: cognitive tools for scientific enquiry*. London: Springer.

CUDMANI, L. C.; SANDOVAL, J. S. Modelo físico e realidade. Importância epistemológica de sua adequação quantitativa. Implicações para a aprendizagem. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 8, n. 3, p. 193-204, 1991.

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

HALLOUN, I. A. *Modeling theory in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.

HESTENES, D. Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 55, n. 5, p. 440-454, May, 1987.

HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S. e VEIT, E. A. Dificuldades e avanços no domínio do campo conceitual da modelagem didático-científica: um estudo de caso em uma disciplina de Física Experimental. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 23, n. 2, p. 352-382, 2018.

ISLAS, S. M.; PESA, M. A. Futuros docentes y futuros investigadores se expresan sobre el modelado em física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 3, p. 319-328, 2001.

_ISLAS, S. M.; PESA, M. A. ¿Qué ideas tienen los profesores de física de nivel medio respecto al modelado? *Ciência e Educação*, v. 8, n. 1, p. 13-26, 2002.

JUSTI, R. La enseñanza de Ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 24, n. 2, p. 173-184, 2006.

JUSTI, R.; GILBERT, J.K. Modelling, teachers' view on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, v. 24, n. 4, p. 369-387, 2002.

LORTIE, D. C. *Schoolteacher: a sociological study*. (2a. ed.) Chicago: University of Chicago Press, 2002.

LOUCA, L.; ZACHARIA, Z. Modeling-based learning in Science education: cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions. *Educational Review*, v. 64, n. 4, p. 471-492, 2012.

MATHEUS, M. R. Models in science and in science education: an introduction. *Science & Education*, v. 16, n. 7-8, p. 647-652, 2007.

MOZZER, N. B.; JUSTI, R. Modelagem analógica no ensino de Ciência. *Investigações em Ensino de Ciências*, aceito para publicação 2017.

OTERO, M. R. Emociones, sentimientos y razonamientos en didáctica de las ciencias. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, v. 1, n. 1, p. 24-53, 2006.

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, p. 213-227, 1999.

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*, v. 19, n. esp., p. 7-27. 2002.

SMIT, J. J. A.; FINEGOLD, M. Models in physics: perceptions held by final-year prospective physical science teachers studying at south african universities. *International Journal of Science Education*, v. 17, n. 5, p. 621-634, 1995.

VAN DRIEL, J. H.; VERLOOP, N. Teachers' knowledge of models and modelling in science. *International Journal of Science Education*, v. 21, n. 11, p. 1141-1153, Nov. 1999.

VAN DRIEL, J. H.; VERLOOP, N. Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. *International Journal of Science Education*, v. 24, n. 12, p. 1255-1272, 2002.

VERGNAUD, G. A classification of cognitive tasks and operations of thought involved in addition and subtraction problems. In: CARPENTER, T.; MOSER, J. M.; ROMBERG, T. (Eds.). *Addition and subtraction. A cognitive perspective..* Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1982. p. 39-59.

VERGNAUD, G. Multiplicative structures. In: HIEBERT, H; BEHR, M. (Eds.). *Research Agenda in Mathematics Education. Number Concepts and Operations in the MiddleGrades.* Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1988. p. 141-161.

VERGNAUD, G. A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. *Revista do GEEMPA*, v. 4, p. 9-19, 1996.

WEIL-BARAIS, A.; VERGNAUD, G. Students conception in Physics and Mathematics: biases and helps. In: CAVERNI, J. P.; FABRE, J. M.; GONZÁLEZ, M. (Eds.). *Cognitive biases.* North Holland: Elsevier Science Publishers, 1990. p. 69-84.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos.* (3ª ed.) Porto Alegre: Bookman. 2005.

YIN, R. K. *Qualitative research from start to finish.* New York: The Guilford Press. 2011.

SOBRE OS AUTORES

RAFAEL VASQUES BRANDÃO. Bacharel em Física Médica pela Pontifícia Universidade Católica/RS (1997), bacharel (2002) e licenciado em Física (2005), mestre em Ensino de Física (2008) e Doutor em Ensino de Física (2012) pela Universidade Federal de Rio Grande. Desde de 2011, é professor efetivo do Departamento de Ciências Exatas e da Natureza do Colégio de Aplicação da UFRGS, sendo atualmente Diretor. Coordena o Centro de Tecnologia Acadêmica Júnior que reúne estudantes da educação básica e superior em torno de tecnologias e recursos educacionais abertos e livres.

IVES SOLANO ARAUJO. Licenciado e bacharel em Física pela Universidade Federal de Rio Grande (2000). Mestre (2002) e doutor (2005) em Física, na área de concentração Ensino de Física, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Realizou estágio pós-doutoral na Universidade de Harvard (EUA, 2009-2010). Professor Associado do Departamento de Física da UFRGS e editor da revista *Investigações em Ensino de Ciências (IENCI)*. Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UFRGS atuando como professor e orientador de teses de doutorado e dissertações de mestrado. Bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq – Nível 2 (Educação).

ELIANE ANGELA VEIT. Licenciada em Física (1975), mestre em Física (1979) e doutora em Ciências (1981) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Realizou estágio pós-doutoral na Universidade de British Columbia (Canadá, 1982-1984). Professora Titular do Departamento de Física da UFRGS e editora adjunta da revista *Investigações em Ensino de Ciências (IENCI)*. Membro do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UFRGS atuando como professora e orientadora de teses de doutorado e dissertações de mestrado.

Recebido: 01 de novembro de 2017.

Revisado: 20 de setembro de 2018.

Aceito: 01 de novembro de 2018.