

MODELOS COMPUTACIONAIS NO ENSINO-APRENDIZAGEM DE FÍSICA: UM REFERENCIAL DE TRABALHO
(Computational models in physics teaching: a framework)

Ives Solano Araujo¹ [ives@if.ufrgs.br]

Eliane Angela Veit [eav@if.ufrgs.br]

Marco Antonio Moreira [moreira@if.ufrgs.br]

Instituto de Física – UFRGS – Caixa Postal, 15051 - Campus do Vale
91501-970, Porto Alegre, RS – Brasil.

Resumo

No presente artigo temos como objetivo a apresentação de um referencial de trabalho que possa contribuir para promover e auxiliar a aprendizagem de Física através de modelos computacionais. Nossa proposta está baseada no uso de uma ferramenta para o delineamento de atividades computacionais potencialmente significativas, o diagrama AVM (Adaptação do V de Gowin para a Modelagem). Nossa ideia é fornecer um ponto de partida para a construção e implementação de abordagens didáticas alicerçadas em uma concepção epistemológica coerente sobre o processo de modelagem científica, que permitam aumentar a eficácia dos modelos computacionais na aprendizagem de Física.

Palavras-chave: modelagem científica; modelagem computacional; simulações computacionais; ensino-aprendizagem de Física.

Abstract

The purpose of the present paper is to present a theoretical framework to promote and assist meaningful physics learning through computational models. Our proposal is based on the use of a tool, the AVM diagram, to design educational activities involving modeling and computer simulations. The idea is to provide a starting point for the construction and implementation of didactical approaches grounded in a coherent epistemological view about scientific modeling.

Keywords: scientific modeling; computer simulations; computational modeling; physics education.

Introdução

Tentativa de apreensão do real, ou suposto como tal, pelo pensamento. Poucas frases capturam tão bem, e em tão poucas palavras, a intenção primeira por trás do grandioso empreendimento humano conhecido como Ciências Naturais. Mesmo com visões paradigmáticas distintas, físicos, químicos e biólogos, compartilham entre si a busca pela compreensão do mundo que nos cerca, investindo boa parte de seu tempo e recursos na construção, análise e aplicação de modelos científicos. Esses modelos, peças fundamentais na construção do conhecimento científico, são elaborados a partir da observação diligente da natureza, razão, intuição, e, sobretudo, imaginação dos cientistas, não necessariamente nessa ordem.

Nas palavras de Mario Bunge:

Converter coisas concretas em imagens conceituais cada vez mais ricas e expandi-las em modelos teóricos progressivamente complexos e cada vez mais fiéis aos fatos, é o único método efetivo para apreender a realidade pelo pensamento. [...] A observação é apenas uma fonte (não a única) de problemas e um teste (não o único tampouco) de nossos modelos teóricos.

¹ Bolsista da CAPES - Proc. n°: BEX 2271/09-5.

[...] *A razão, enfim, é o instrumento que nos permite construir sistemas com a pobre matéria-prima dos sentidos e da intuição. Nenhuma destas componentes do trabalho científico – observação, intuição e razão – pode, por si só, nos dar a conhecer o real. Elas não passam de aspectos diversos da atividade típica da pesquisa científica contemporânea: a construção de modelos teóricos e sua comprovação* (Bunge, 1974, p. 30, grifo nosso).

O termo “comprovação” na parte grifada refere-se à adequação dos resultados teóricos previstos pelos modelos com os resultados empíricos (usualmente elaborados e interpretados à luz de teorias instrumentais), a coerência com pressupostos filosóficos assumidos e outros conhecimentos científicos que supomos como verdadeiros, ou seja, que mesmo de forma aproximada e parcial representam algum aspecto da realidade.

Em termos do Ensino de Ciências, e mais especificamente do Ensino de Física, foco deste trabalho, a questão que se coloca é: *como atividades de ensino voltadas para os processos de elaboração e análise de modelos científicos podem contribuir para propiciar aos alunos uma aprendizagem significativa dos conteúdos e também uma visão mais adequada da práxis científica atual?*

Nas aulas convencionais de Física em cursos de nível médio e superior, não é rara a ocorrência de oscilações entre extremos no que diz respeito a atividades de ensino: em uma ponta, professores que associam o aprendizado a receitas de resolução de problemas, tendo algebrismos como foco; e em outra, docentes que abolem praticamente todo o formalismo necessário para uma compreensão adequada do conteúdo. Um desafio que se apresenta é como trazer elementos fundamentais em Ciência como a representação de fenômenos reais através de modelos, conceitos, trabalho colaborativo, formulação e teste de hipóteses, por exemplo, para a sala de aula.

Dentre as diferentes potencialidades do uso de estratégias de ensino centradas em modelos encontradas na literatura, o entendimento sobre a construção do conhecimento científico compatível/coerente com visões epistemológicas atuais (Islas & Pesa, 2001) e o desenvolvimento de processos cognitivos de alto nível e de habilidades de resolução de problemas por parte dos alunos (Doerr, 1997) estão entre as que mais se destacam.

Em relação ao desenvolvimento de atividades de ensino de Física, focadas em modelos, talvez a linha em que mais esforços tenham sido investidos nos últimos anos esteja associada ao uso de microcomputadores no processo de criação e exploração de modelos computacionais por parte dos alunos. Além das potencialidades já mencionadas, o uso do computador em atividades de modelagem e simulação computacionais permite (Doerr, 1997; Medeiros & Medeiros, 2002):

- estudo de fenômenos que sejam muito caros, ou perigosos de se produzir nos laboratórios escolares;
- realização de experimentos que envolvam medições de eventos que ocorram em uma escala de tempo muito reduzida, ou muito demorada;
- elaboração e teste de hipóteses, por parte dos alunos, sobre os fenômenos estudados;
- explicitação de elementos que fazem parte do trabalho científico contemporâneo;
- promoção de habilidades de raciocínio crítico;
- reificar conceitos altamente abstratos, facilitando seu entendimento;
- atendimento individualizado aos alunos, fornecendo *feedback* no momento em que as dúvidas aparecem.

Em consequência do entusiasmo natural oriundo dessas potencialidades podemos observar

nos últimos anos uma imensa proliferação dos chamados Objetos de Aprendizagem (OA), voltados para o ensino de Física, disponíveis gratuitamente na internet. Apesar de serem, potencialmente, excelentes recursos instrucionais, boa parte vem sendo subutilizada, em propostas de atividades que simplesmente os colocam à disposição dos alunos para que os explorem, sem uma orientação relevante que possa guiá-los à aprendizagem do conteúdo envolvido.

Sem dúvida, uma das principais potencialidades dos OA está relacionada às impressionantes representações gráficas que este tipo de ferramenta permite alcançar. Entretanto, seu uso não deve ficar limitado à visualização, que poderia em muitos casos ser feita alternativamente através de exibições de vídeos e animações em um aparelho de TV; outras possibilidades devem ser consideradas. Por exemplo, a dos alunos interagirem com os OA para testarem as suas hipóteses e avaliarem as suas próprias explicações para determinados fenômenos.

Muitos destes OA, na melhor das hipóteses, deixam a cargo do professor a exploração de aspectos fundamentais tais como a discussão sobre o que de fato está sendo representado e o contexto de validade do modelo computacional, deixando implícito o caráter representacional dos modelos.

Com um motor de busca como o Google ou mesmo em repositórios de OA, pode-se encontrar facilmente diversas propostas de atividades computacionais exploratórias que limitam o trabalho do aluno à escolha de valores para determinadas condições iniciais, parâmetros e às vezes algumas relações matemáticas, até atingir os resultados esperados, em uma legítima busca por soluções via tentativa-e-erro. Em relação a atividades computacionais expressivas, são comuns também a apresentação de problemas e exercícios, típicos de livros texto, que tratam de situações altamente simplificadas, sem o contexto de sua ocorrência no mundo real, sem o esclarecimento dos pressupostos teóricos assumidos para sua construção.

Como consequência, mesmo com a introdução de uma ferramenta poderosa como o computador em sala de aula, os resultados deixam muito a desejar (Schwarz & White, 2005). A aceitação implícita de simulações computacionais como imagens especulares do que essas representam; confusão do virtual com o real (Medeiros & Medeiros, 2002); uso acrítico de simulações como jogos; desconhecimento dos objetivos, referentes, idealizações e contexto de validade dos modelos teóricos subjacentes aos modelos computacionais são alguns exemplos destes resultados indesejáveis.

De modo geral, podemos apontar a *falta de reflexão*, tanto na concepção das atividades pelos professores quanto no desenvolvimento das atividades pelos alunos, como fator principal pelo reiterado malogro alcançado por iniciativas, mesmo que bem intencionadas, de favorecer uma melhor compreensão de conceitos e práticas científicas por meio de atividades de simulação e modelagem computacionais.

No presente artigo, temos como objetivo apresentar um referencial de trabalho que possa auxiliar a aprendizagem de Física através da construção e/ou uso de modelos computacionais. Nossa proposta está baseada no uso do dAVM (Adaptação do Vê de Gowin para a Modelagem), apresentado na seção 4, como uma ferramenta voltada para o delineamento de atividades computacionais potencialmente significativas, aumentando a eficácia de materiais disponíveis e apontando elementos importantes para a construção de novos. Nossa ideia é fornecer um ponto de partida tanto para quem pretende conceber atividades, como para quem as explorará.

Devido às particularidades existentes na concepção e uso de modelos científicos (Greca & Santos, 2005) em cada área das Ciências Naturais, nos restringiremos aqui a abordar modelos científicos em Física, área de nossa atuação acadêmica, apesar de alguns elementos serem comuns a outras áreas. Devido à polissemia do termo “modelo” (Krapas *et al.*, 1997), e muitas vezes à falta de consenso nas acepções utilizadas, especificaremos na seção 2 os significados que adotaremos, em

conjunto com a apresentação do embasamento epistemológico de nosso referencial.

Na seção 3, discutiremos brevemente alguns trabalhos que nos serviram de suporte para a formulação e estruturação do diagrama AVM (dAVM), que, na sequência, será abordado em maiores detalhes (seção 4). Na seção 5 teceremos comentários de ordem geral sobre nossa proposta de referencial de trabalho.

Modelagem Científica

Com o duplo objetivo de explicitar a base epistemológica, subjacente à proposta do dAVM, e as acepções do termo modelo ao longo do presente trabalho, abordaremos de forma bastante resumida alguns elementos relacionados à concepção epistemológica de Mario Bunge sobre o conhecimento científico.

Para Bunge o objetivo maior da Ciência está centrado na compreensão do real, ou suposto como tal. Para obter esta compreensão, não bastam apenas conceitos e a coleta e acumulação de dados, é preciso construir teorias a fim de que se possa, além de deduzir fatos possíveis, também prevê-los e explicar porque ocorrem, fazendo uso da Lógica e da Matemática sempre que possível. Em linhas gerais, esta construção envolve a formulação clara de questões de pesquisa, imaginação de *modelos conceituais* das coisas, às vezes *teorias gerais*, e a tentativa de justificar o que se faz, seja através da lógica, de outras teorias, ou de experiências aclaradas por teorias (Bunge, 1974, p.13).

Ao definir suas questões de pesquisa o cientista restringe sua atenção a determinados fenômenos de seu interesse, buscando isolá-los do todo restante. Obviamente, este “isolamento” é flexível. O pesquisador durante o processo de investigação pode perceber que fatores negligenciados (considerados) em um primeiro instante de fato (não) são relevantes para os seu estudo e incorporá-los (descartá-los).

Tendo em vista a representação teórica da realidade para sua compreensão, o processo de modelagem científica pode parecer em um primeiro momento paradoxal, por descartar informações tão logo o foco de estudo tenha sido definido. Entretanto, a ideia que ancora tal operação é ir progressivamente aumentando a complexidade dos modelos conceituais a partir da compreensão dos resultados, muitas vezes grosseiros, mas instrutivos, que os modelos mais simples forneceram.

O processo de restrição e seleção de informações pertinentes à pesquisa, qual seja, a definição de sistemas e suas interações com sua vizinhança, se faz necessário para que possam ser construídos *modelos conceituais* científicos. Estes modelos, também chamados por Bunge de *objetos (ou eventos)-modelo*, são esboços hipotéticos que têm por objetivo representar coisas, fatos ou eventos tidos como reais (*referentes*). Esta representação é sempre parcial: os modelos conceituais sempre deixam de fora certas características de seus referentes e conseguem apenas aproximadamente captar as relações entre os traços julgados essenciais tendo em vista os objetivos do estudo. Vejamos um exemplo: se um cientista tivesse como objetivo estudar o movimento de translação dos planetas ao redor do Sol, poderia descrevê-los como partículas pontuais (modelo conceitual). Não obstante, se seu foco estivesse em seus movimentos de rotação, poderia considerá-los como corpos esféricos, rígidos, ainda que se saiba que sua forma real não é esférica e tampouco sejam objetos rígidos.

Numerosos outros exemplos de modelos conceituais em Física podem ser citados, tais como o modelo de gás ideal, o modelo atômico de Bohr, o modelo de pêndulo simples, o modelo de elétrons livres em um metal, etc. Em resumo, o cientista em sua tentativa de compreender a realidade elabora representações esquemáticas (modelos conceituais), não especulares, sobre sistemas físicos tidos como reais, procurando representar características avaliadas como pertinentes

para os fenômenos em estudo, desconsiderando, de forma não definitiva, o restante das informações disponíveis.

Entretanto, para que o cientista consiga de fato explicar e prever fenômenos físicos, faz-se necessário construir uma teoria específica associada aos modelos conceituais adotados, ou seja, um *modelo teórico*. Um modelo teórico, nas palavras de Bunge, pode ser caracterizado como *um sistema hipotético-dedutivo relacionado a um objeto-modelo, que é, por sua vez, uma representação conceitual esquemática de uma coisa ou de uma situação real ou suposta como tal* (Bunge, 1974, p.16).

Dependendo do grau de avanço teórico do campo científico, a elaboração de teorias específicas poderá ser feita a partir da inserção, do engaste, de um modelo conceitual em *teorias gerais* existentes. A Física, por exemplo, possui várias destas teorias tais como as mecânicas newtoniana, relativística, estatística e quântica. Para descrever o comportamento de certo gás real, contido em um recipiente, pode-se lançar mão do modelo de gás ideal, e inseri-lo na mecânica newtoniana, gerando o modelo de gás ideal clássico, ou ainda, inseri-lo na mecânica quântica e gerar outra teoria específica, qual seja, o modelo de gás ideal quântico.

Assim como um determinado modelo conceitual pode ser inserido em diversas teorias gerais a fim de formar um modelo teórico, com o mesmo intuito, vários modelos conceituais também podem ser inseridos em uma mesma teoria geral. Ainda no estudo de um gás real, poderíamos supor o modelo de partículas pontuais, ou o modelo de esferas rígidas, para representá-lo, inseri-los na mecânica clássica e obter duas teorias específicas diferentes, cada uma relacionada ao respectivo modelo conceitual adotado. Neste contexto, Bunge chega a definir espirituosamente o cientista como “um animal criador e testador de modelos” (Bunge, 1974, p. 40).

Em ciências que não estejam tão avançadas teoricamente, ou seja, em um estado pré-teórico na denominação usada por Bunge, o trabalho do cientista se concentra na busca por variáveis relevantes, padrões de comportamento, dados singulares, classificações e hipóteses que possam estabelecer relações entre estas variáveis que expliquem os dados coletados. Entretanto, os resultados obtidos neste estágio carecem de unidade lógica: as ideias dessas ciências não se enriquecem nem controlam umas às outras. À medida que se desenvolvem as pesquisas, descobrem-se ou inventam-se relações entre as hipóteses antes isoladas e se introduzem hipóteses mais fortes, que não só contêm as antigas, como fornecem generalizações inesperadas (Bunge, 1989). Como resultado, constituem-se um ou mais sistemas de hipóteses, que vêm a formar as teorias gerais.

As teorias gerais não se manifestam sobre problemas particulares, ou seja, situações específicas, logo não podem ser diretamente contrastadas com resultados advindos de experimentos. Para avaliar a concordância dos resultados teóricos com os experimentais, é preciso inserir modelos conceituais de referentes reais - que por si só são estéreis - em sua estrutura. Essa inserção fornecerá uma teoria específica sobre o “recorte” da realidade que se pretende representar, um modelo teórico, e somente seus resultados é que serão passíveis de comparação com os resultados empíricos. Apesar da comparação empírica ser sempre mais lembrada, Bunge salienta que pelo menos outros três tipos de avaliações são necessárias para que se aceite um modelo teórico como verdadeiro, até segunda ordem: testes inter-teóricos; metateóricos e filosóficos (Bunge, 1974, p. 205).

Outro ponto inerente ao conhecimento científico, explicado a partir da concepção epistemológica de Bunge, é sua transitoriedade, tendo em vista que modelos teóricos são sempre passíveis de serem corrigidos. No caso em que resultados previstos pelo modelo não passam nos testes realizados, não se pode saber *a priori* onde está o erro. Dependendo do grau de confiança que temos nos dados empíricos, em nossas “certezas” filosóficas ou ainda nos serviços prestados pelos modelos conceituais e pela teoria geral utilizada, poderemos escolher um desses elementos como ponto de partida para o processo de correção sem, no entanto, termos juízes supremos sobre o que

está certo ou não. A busca pela adequação empírica, filosófica e epistêmica do modelo teórico em questão, revela uma busca pela racionalidade (coerência) e objetividade (cerceamento de especulações sem controle) para o conhecimento científico.

Feita essa breve exposição do referencial epistemológico adotado neste trabalho, cabem aqui ainda algumas considerações sobre outros termos referentes à palavra modelo que lançaremos mão. No contexto do ensino-aprendizado de Física, distinguimos as atividades computacionais de simulação e modelagem pelo acesso que os alunos têm aos primitivos que compõem o modelo computacional. Essas atividades podem ser desdobradas em quatro categorias:

- a) *Atividade exploratória de simulação* - caracterizada pela observação, análise e interação do sujeito com modelos já construídos, que permitem que sejam alterados valores iniciais e parâmetros (e.g. physlets).
- b) *Atividade exploratória de modelagem* - definida pela análise da estrutura básica de um modelo computacional já construído. O aluno tem acesso aos primitivos do modelo e precisa descrevê-lo, corrigi-lo e/ou complementá-lo (e.g. um modelo no *software* Modellus).
- c) *Atividade expressiva de simulação* - identificada pela elaboração de modelos computacionais a partir da configuração e ajuste de propriedades de macroelementos presentes em um repertório pré-definido (e.g. Phun, Interactive Physics).
- d) *Atividade expressiva de modelagem* - caracterizada pelo processo de construção do modelo computacional desde sua estrutura lógica (regras lógicas), matemática (equações) ou icônica (metáforas). A construção de modelos computacionais com os aplicativos Worldmaker, LOGO (ou Modellus) e Stella, respectivamente, ilustra esse processo. Neste tipo de atividade são apresentadas questões que visam à elaboração de modelos a partir de determinados fenômenos de interesse, sobre os quais podem ser fornecidas tanto informações qualitativas quanto quantitativas do sistema. O aluno pode interagir totalmente com o seu modelo, podendo reconstruí-lo tantas vezes quanto lhe pareça necessário para a produção de resultados que lhe sejam satisfatórios.

Cabe ressaltar que no escopo deste trabalho, não serão abordados modelos mentais, ou seja, representações internas, implícitas às mentes dos indivíduos. Nossas considerações sobre modelos e modelagem se aterão a representações externas.

Na próxima seção, apresentaremos algumas noções metodológicas associadas à construção de nossa proposta.

Elementos metodológicos para o desenvolvimento de atividades de modelagem computacional aplicada ao ensino de Física

Durante o processo de criação do diagrama AVM como um instrumento heurístico para a modelagem e simulação computacionais aplicadas ao ensino de Física, consideramos os cinco estágios não-hierárquicos definidos por Halloun (Halloun, 1996, 2004), as seis áreas definidas por Santos & Ogborn (1992), a estratégia para construção de modelos apresentada por Camiletti & Ferracioli (2002) e elementos da metodologia P.O.E. (*Predict Observe Explain*) (White & Gunstone, 1992; Tao & Gunstone, 1999). Esses elementos aparecem “diluídos” em vários campos do dAVM, e os estágios, no processo dialético de elaboração do dAVM.

A modelagem esquemática proposta por Halloun

Halloun (1996, 2004) sugere o uso do processo genérico de modelagem esquemática, proposto por Hestenes (1987) e ilustrado na Figura 1. Este processo pode ser sistematicamente aplicado no contexto de uma teoria conveniente para a construção de novos modelos, refinando-os e/ou empregando-os para compreender situações (físicas) específicas, que podem ser oriundas do dia a dia, de experimentos de laboratório, problemas do tipo “livro-texto”, etc.

O primeiro estágio do processo de modelagem consiste em identificar e descrever a composição de cada sistema físico em questão e o respectivo fenômeno. Então, ou em paralelo, são identificados o *propósito* (conjunto de objetivos de uma experiência de laboratório, por exemplo) e a *validade* das saídas esperadas (incluindo a precisão dos resultados). Seguindo estes estágios, importantes para a escolha da teoria apropriada no contexto da qual a modelagem deve seguir, um modelo apropriado é selecionado a partir de um repertório de modelos básicos preexistentes e um modelo específico para a situação abordada é construído, passando a ser processado e analisado, enquanto é continuamente validado. Seguindo essa análise, conclusões apropriadas são inferidas sobre o sistema em questão e as saídas são *justificadas* em função do propósito da modelagem e da validade requerida (Halloun; Hestenes; apud op. cit.).

Halloun propõe que a modelagem esquemática seja empregada na solução de problemas paradigmáticos, definidos como problemas que abrangem características especiais evitando a aplicação direta de fórmulas numéricas e incluindo questões abertas que permitem que os estudantes reflitam sobre suas próprias concepções sobre os sistemas físicos. A resolução desse tipo de problema ocorre em cinco estágios: seleção, construção, validação, análise e expansão. O processo é não-hierárquico. Os três estágios intermediários sobrepõem-se, e alguns desses passos podem ser conduzidos simultaneamente. Em cada estágio, o modelador pergunta a si mesmo questões específicas e tenta respondê-las sistematicamente.

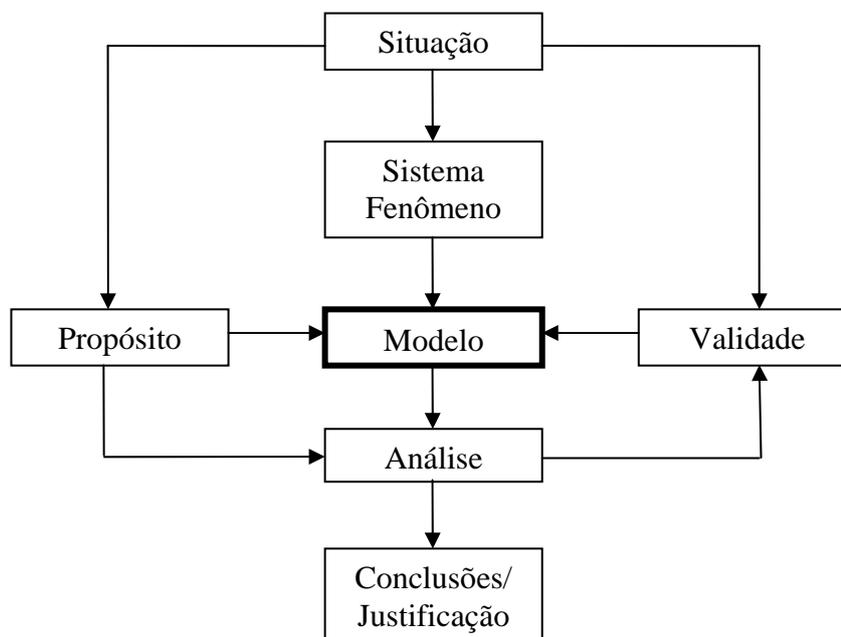


Figura 1 - Representação esquemática do processo de modelagem (Hestenes *apud* Halloun, 1996).

Um modelo para o ensino e pesquisa com modelagem computacional proposto por Santos & Ogborn

Santos & Ogborn (1992) partem dos sete estágios da modelagem matemática (*Open University* apud Santos & Ogborn, op. cit.) e os reorganizam e ampliam de modo a estabelecerem um referencial de trabalho para o processo de modelagem computacional. Esse referencial deve ser visto como um esquema para auxiliar os professores a elaborar atividades para seus alunos, e não como um esquema para ser seguido pelos alunos, para facilitar a construção de modelos com o uso do computador. Os autores argumentam que um referencial para o ensino de modelagem necessita ao menos de dois níveis: um primeiro nível relacionado à construção de modelos específicos e um segundo, mais geral, vinculado à aprendizagem de diferentes tipos de modelos, que apresentam estruturas matemáticas subjacentes comuns.

A Figura 2 ilustra o referencial de trabalho proposto por Santos & Ogborn (op.cit. p. 69). Há seis áreas (A-F), que se diferenciam umas das outras pelo tipo de aprendizagem ou entendimento requerido. Para cada uma dessas áreas são discriminadas as atividades que precisariam ser desenvolvidas no ensino da modelagem, particularmente de modelos dinâmicos que possam ser representados por equações diferenciais ou de diferença. Cinco dessas áreas (A-E) estão relacionadas a estratégias de ensino no nível de construção de modelos. Sucintamente: *Área A* – Escolha do sistema a ser modelado; *Área B* – Mecanismos causais, identificação de variáveis; *Área C* – Tipo de modelo requerido; *Área D* – Geração de saídas pelo modelo e *Área E* – Interpretação, verificação, validação e uso. A outra área, situada no segundo nível de aprendizagem, é especificada como *Área F* – Generalizar e aprender as estruturas dos modelos

Estratégia para a construção de modelos de Camilletti & Ferracioli

Camilletti & Ferracioli (2002) sugerem que sete passos básicos sejam propostos para os alunos a fim de auxiliá-los no processo de construção de um modelo, quais sejam:

- definição do sistema a ser estudado;
- escolha do fenômeno de interesse a ser estudado no sistema escolhido;
- listagem das variáveis relevantes para a construção do modelo;
- construção do modelo através de diagramas causais;
- representação do modelo no ambiente de modelagem computacional escolhido;
- simulação do modelo construído;
- validação do modelo a partir da análise de seu comportamento em relação ao comportamento esperado do fenômeno em estudo.

A estratégia P.O.E. para simulações computacionais proposta por Tao & Gunstone

Interessados em provocar conflitos conceituais que pudessem promover a aprendizagem conceitual, Tao & Gunstone (1999) propuseram a estratégia P. O. E. (Predizer, Observar, Explicar) para que os alunos trabalhassem com um conjunto de simulações computacionais². De acordo com esta estratégia, os alunos, em pares, devem (ibid, p. 863):

² Atualmente existem várias outras estratégias desse mesmo estilo propostas, mas a P.O.E. é a mais disseminada.

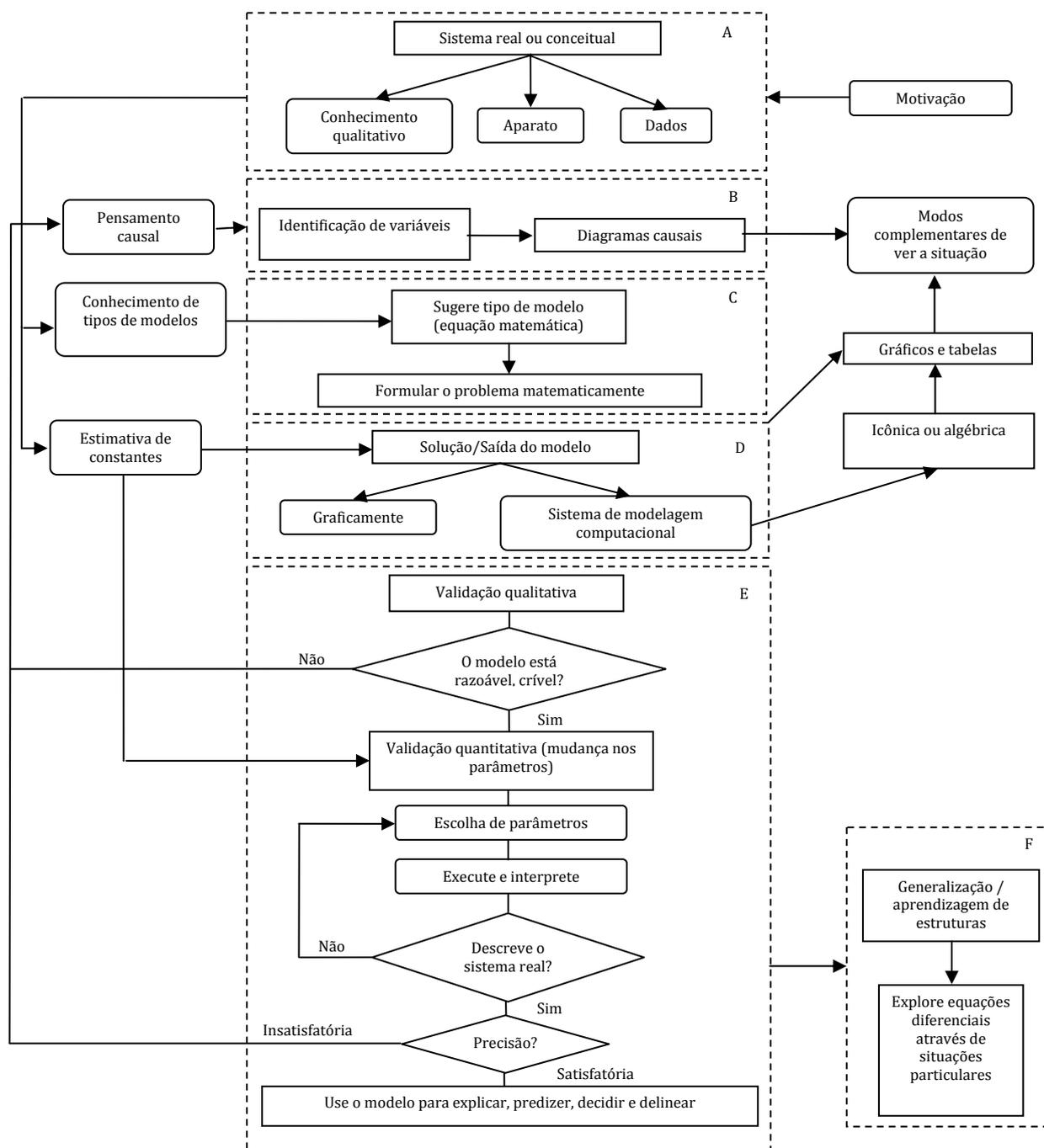


Figura 2 – Referencial de trabalho de Santos & Ogborn para o ensino da construção de modelos (extraído de Santos & Ogborn, 1992).

- *fazer uma predição sobre as consequências de determinadas modificações nas simulações computacionais;*
- *explicar as suas predições;*
- *executar o programa para testar as suas predições;*
- *reconciliar qualquer discrepância entre as suas predições e as observadas no micromundo oferecido pelas simulações.*

Durante a implementação do método, solicita-se aos alunos que registrem por escrito as suas predições, explicações e observações.

O Vê de Gowin ou diagrama V

O *Vê epistemológico* ou *Vê de Gowin* é um instrumento heurístico proposto por D.B. Gowin (1981; Gowin & Alvarez, 2005) para explicitar o processo de produção do conhecimento, ou para “desempacotar” o conhecimento documentado em artigos ou outras formas de publicação de asserções de conhecimento. Mais recentemente esse instrumento tem sido chamado de *diagrama V* (Gowin & Alvarez, 2005; Moreira, 2006).

A origem do diagrama V é um conjunto de cinco questões propostas por Gowin para a análise crítica de trabalhos de pesquisa:

1. Qual a questão-foco, a questão central, aquela que “conta tudo” (*a telling question*), do trabalho?
2. Quais os conceitos-chave envolvidos na pesquisa (sua fundamentação teórica)?
3. Qual a metodologia (a sequência de passos seguida)?
4. Quais as asserções de conhecimento, i.e., as respostas (tentativas e/ou provisórias) à questão-foco?
5. Quais as asserções de valor (qual o valor do conhecimento produzido, das asserções de conhecimento)?

Diagramadas, estas questões (relativas a um determinado fenômeno de interesse) se estruturam em um Vê onde a *questão-foco* está no meio, o *objeto* ou *evento* estudado está no vértice e nos lados esquerdo e direito estão, respectivamente, o *domínio conceitual* (o pensar) e o *domínio metodológico* (o fazer), tal como sugere a Figura 3. Alguns dos itens integrantes do Vê serão esclarecidos a seguir, outros estão suficientemente claros no próprio diagrama.

Questões-foco são perguntas sobre o **fenômeno de interesse**. Mas são perguntas que dizem algo (*telling questions*, em inglês), sugerem eventos (que acontecem naturalmente ou que fazemos acontecer) a pesquisar e métodos e técnicas a utilizar. Por isso, estão no centro do V, não no lado esquerdo como poderiam, em princípio, estar. As questões-foco indicam desde o início que a produção de conhecimentos resulta da permanente interação entre os domínios conceitual e metodológico. Não são hipóteses. Hipóteses são proposições do tipo “se... então”, ou seja, “se uma certa condição for alterada, se uma certa variável for manipulada, ocorrerá tal e tal coisa” (Gowin, 1981, pp. 90-91).

Conceitos são signos ou símbolos que remetem, que apontam, que se referem, a regularidades em eventos ou em registros de eventos. **Estruturas conceituais** são agrupamentos de conceitos e a maneira como estão relacionados. **Construtos** são ideias que ajudam a manter juntos certos conceitos-chave. São construções entre conceitos, uma espécie de ponte. Não têm definições operacionais; não têm referentes concretos. (op. cit., pp. 92-96).

Transformações metodológicas são procedimentos metodológicos para ir de registros e dados até possíveis respostas à(s) questão(ões)-foco, ou seja, até asserções de conhecimento.

Asserções de conhecimento são produtos de pesquisa. Uma pesquisa inclui uma pergunta, conceitos, métodos e técnicas como constituintes do processo que produz asserções de conhecimento. Estas são construções, artefatos, resultados de fazeres deliberados. O termo asserção sugere a possibilidade de erro, o que está bem, pois tais conhecimentos dependem do padrão de pesquisa utilizado e podem mudar, podem ser abandonados, reconstruídos. (op. cit., p. 101).

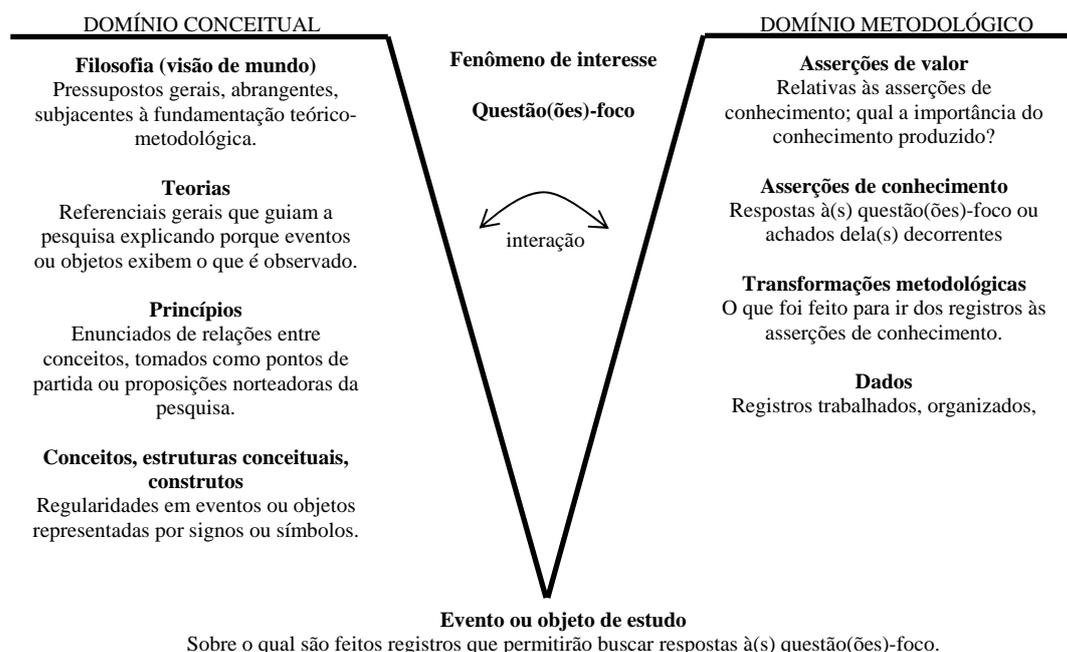


Figura 3 - O Vê epistemológico de Gowin; o diagrama V (Gowin, 1981; Gowin e Alvarez, 2005; Moreira, 2006).

Asserção de valor é um enunciado sobre o valor de alguma coisa; no caso, sobre o conhecimento produzido (as asserções de conhecimento). (op. cit., p. 105). Algumas asserções de valor referem-se mais diretamente às asserções de conhecimento (por exemplo, a utilidade desse conhecimento, a precisão de uma certa técnica, a clareza de um conceito). Outras são mais indiretas, mas sempre se referem ao conhecimento construído, ou seja, às asserções de conhecimento. Podem ser de natureza utilitária, científica, educacional, social, moral, estética. Há muitos possíveis valores associados à produção de um certo conhecimento.

O diagrama AVM

Nossa proposta foi desenvolvida partindo do pressuposto que atividades de simulação e modelagem computacionais aplicadas ao ensino de Física precisam ser realizadas de forma crítica e reflexiva, para serem bem sucedidas em termos da aprendizagem significativa dos conteúdos.

Consideramos como fundamental para a formação de uma concepção epistemológica coerente e também para a aprendizagem significativa de Física usando modelos computacionais: o entendimento das relações entre os objetivos da modelagem/simulação (associados a descrição, explicação ou predição do comportamento ou estrutura de sistemas físicos); os referentes reais representados; as idealizações realizadas; a contrastação dos resultados fornecidos pelo modelo computacional com os resultados do modelo teórico (coerência interna) e com os resultados empíricos (coerência externa); entre outros fatores.

Desde de sua formulação original (Araujo, 2005) o dAVM sofreu algumas modificações, tais como a retirada do campo *Filosofia(s)* e a alteração da nomenclatura de alguns campos, em função dos resultados de sua aplicação com turmas de alunos do ensino superior e professores do ensino médio que tiveram como objetivo refinar o instrumento (Araujo, Veit & Moreira, 2006). A Figura 4 traz sua versão atualizada.

Podemos pensar no dAVM como um instrumento constituído de três partes

interdependentes: I) o propósito do modelo computacional (parte central do Vê); II) o domínio conceitual (parte esquerda do Vê) e III) o domínio metodológico (parte direita do Vê). Na sequência apresentamos os campos que compõem cada parte.

I) Propósito do modelo computacional

Para a definição do objetivo epistêmico da atividade de modelagem computacional, aquilo que se tenciona conhecer (ou que seja conhecido) ao final da atividade, fazemos uso de três campos: *objetivo geral, situação em foco e questões-foco*.

O campo *objetivo geral* está associado com o objetivo cognoscitivo pretendido com a construção e/ou exploração do modelo computacional, podendo estar relacionado diretamente a uma determinada situação real, ou ainda, a um ou mais conjuntos de situações reais possíveis de serem representadas por um modelo teórico que se queira estudar. Como ilustração do primeiro caso podemos citar a análise da aerodinâmica de um lance específico em um jogo de futebol. Por exemplo, Aguiar & Rubini (2004) discutem o lance famoso, conhecido como “o gol que Pelé não fez”, ocorrido durante a Copa do Mundo de 1970 em que o jogador Pelé chutou a bola do meio do campo e por pouco não fez um gol. Como exemplo do segundo caso podemos citar a análise de variações na magnitude de grandezas eletromagnéticas em circuitos elétricos resistivos e capacitivos (Dorneles, Araujo & Veit, 2008); bem como o estudo cinemático e/ou dinâmico da queda dos corpos.

A *situação em foco* está relacionada ao que supomos como fatos reais (ocorrências possíveis ou efetivas no mundo real) e que, por alguma razão, elegemos como relevante estudar. De certo modo, ela contextualiza o que foi definido como objetivo geral representacional da atividade de modelagem em questão. Antes de mais nada, é uma situação específica. Um jogador de basquete arremessando uma bola em direção à cesta, ou um canhão disparando uma bala contra um forte, são exemplos de situações em foco que poderiam ser abordadas por meio de uma simulação computacional com o objetivo de estudar movimento de projéteis.

Diversas simulações, por pretenderem ser genéricas, não trazem referência alguma a situações particulares. Assim como muitos problemas apresentados em livros-texto de forma completamente descontextualizada, simulações computacionais sem vínculo com situações reais podem conduzir à indesejável perda da referência objetiva implícita na modelagem científica em Física. Como consequência, o uso desse recurso pode contribuir para auxiliar o aluno a compreender o modelo matemático subjacente, mas dificilmente promoverá uma compreensão conceitual adequada sobre a física envolvida. Não se trata de uma tentativa de restringir a generalidade ou aplicação de simulações computacionais capazes de representar uma gama variada de situações reais sem se deter a uma ou outra em particular, mas sim de explicitar o vínculo com o real que um modelo que verse sobre sistemas físicos deve ter.

Apesar de ser possível construir ou explorar um modelo computacional sem fazer menção a qualquer situação física em particular, tendo em vista sua natureza matemática, reiteramos a importância de se discutir de forma mais detalhada do que ilustrativa, alguma situação real de referência, se o objetivo da atividade for aprender Física.

O terceiro campo para a definição do propósito da atividade de modelagem está associado à determinação das *questões-foco* a serem respondidas pela construção ou exploração do modelo computacional. A elaboração destas questões e a busca por suas respostas, por parte do aluno, são pontos-chave para a promoção de aprendizagens significativas do conteúdo em voga. Mesmo que o professor apresente algumas questões prontas, apregoamos que, em alguma etapa, seja contemplado o exercício de formulação de perguntas. Ensinar a formular questões relevantes, talvez seja a tarefa isolada mais importante da atividade docente. O bom desenvolvimento das tarefas didáticas associadas ao modelo computacional dependerá diretamente da qualidade das perguntas

formuladas. Quanto mais o aluno tiver que interagir (inteligentemente), avaliar e refletir para respondê-las, respeitando seus limites cognitivos, melhor. Como recomendação geral, questões que para serem respondidas exijam apenas a manipulação algébrica ou cálculo de valores numéricos devem ser evitadas.

Tendo em vista a interdependência explícita entre esses três campos na definição do propósito do modelo computacional acrescentamos, em relação ao Vê de Gowin, uma seta vertical no centro do dAVM com o intuito de salientar a interação necessária para definir à(s) questão(ões)-foco a partir da situação em foco, ou vice-versa (de forma coerente com o objetivo geral estabelecido).

II) Domínio conceitual

Um modelo computacional de objetos ou eventos físicos (referentes reais), em última instância, é uma representação matemática possível de ser implementada em máquina. Admitimos que quando o usuário constrói seu modelo computacional estabelecendo relações matemáticas e/ou proposicionais para as propriedades atribuídas aos referentes físicos, o modelo construído está ancorado em algum modelo conceitual ou teórico (incluídos aqueles não oriundos de uma teoria geral) ainda que seja incoerente e incompleto. Partindo desse pressuposto estabelecemos que os referentes diretos dos modelos computacionais são os objetos-modelo (ou eventos-modelo) constituintes dos modelos conceituais. Os objetos ou eventos reais, ou supostos como tais, são referentes indiretos do modelo computacional, na medida que são representados primariamente pelos construtos. Sob esse ponto de vista, podemos encarar um modelo computacional como um metamodelo.

A distinção entre os referentes diretos e indiretos se faz importante porque a partir dela podemos explicitar o papel dos modelos computacionais como uma forma de geração de resultados teóricos e estabelecimento de consequências lógicas da escolha dos pressupostos teóricos assumidos sobre o mundo físico, e não como uma representação matemática direta dele.

Um modelo computacional tem sua adequação aos fatos subordinada à sua adequação ao modelo conceitual ou teórico subjacente, mesmo que implicitamente. Podemos ter um modelo computacional (matemático) que represente adequadamente algum aspecto da realidade, apenas se o seu modelo conceitual ou teórico correspondente “transmitir” essa coerência. Simulações computacionais com representações gráficas altamente refinadas, assemelhando-se a vídeos de uma situação real, se trabalhadas acriticamente com os alunos podem mascarar essa transmissão, passando a ideia equivocada de uma representação isomórfica do real, capaz de substituir a atividade experimental sob todos os aspectos.

No dAVM, os referentes indiretos do modelo computacional são discutidos em um campo com o nome de *Referentes reais*, enquanto que os referentes diretos (objetos-modelo ou eventos-modelo), suas relações e representações simbólicas são discutidas ao longo dos campos *Idealizações e aproximações; Variáveis, parâmetros, constantes e suas representações e Relações matemáticas e/ou proposicionais*.

O campo *referentes reais* serve ao propósito de explicitar, dentro de uma abordagem sistêmica, os alvos da representação dos modelos teóricos, ou seja, quais os objetos e eventos reais que compõem os sistemas físicos, e definem suas interações com a vizinhança. Essas interações podem ser discriminadas a partir da definição de agentes externos que interagem com o sistema. Esses agentes, pertencentes à vizinhança do sistema, a princípio constituída pelo conjunto universo (contendo todos os objetos e fatos considerados reais) menos o sistema físico em estudo, podem também ser tratados como outros sistemas físicos, descrevendo a situação em foco em termos de sistemas interagentes. Há ainda as interações internas, entre os elementos que compõem os próprios sistemas.

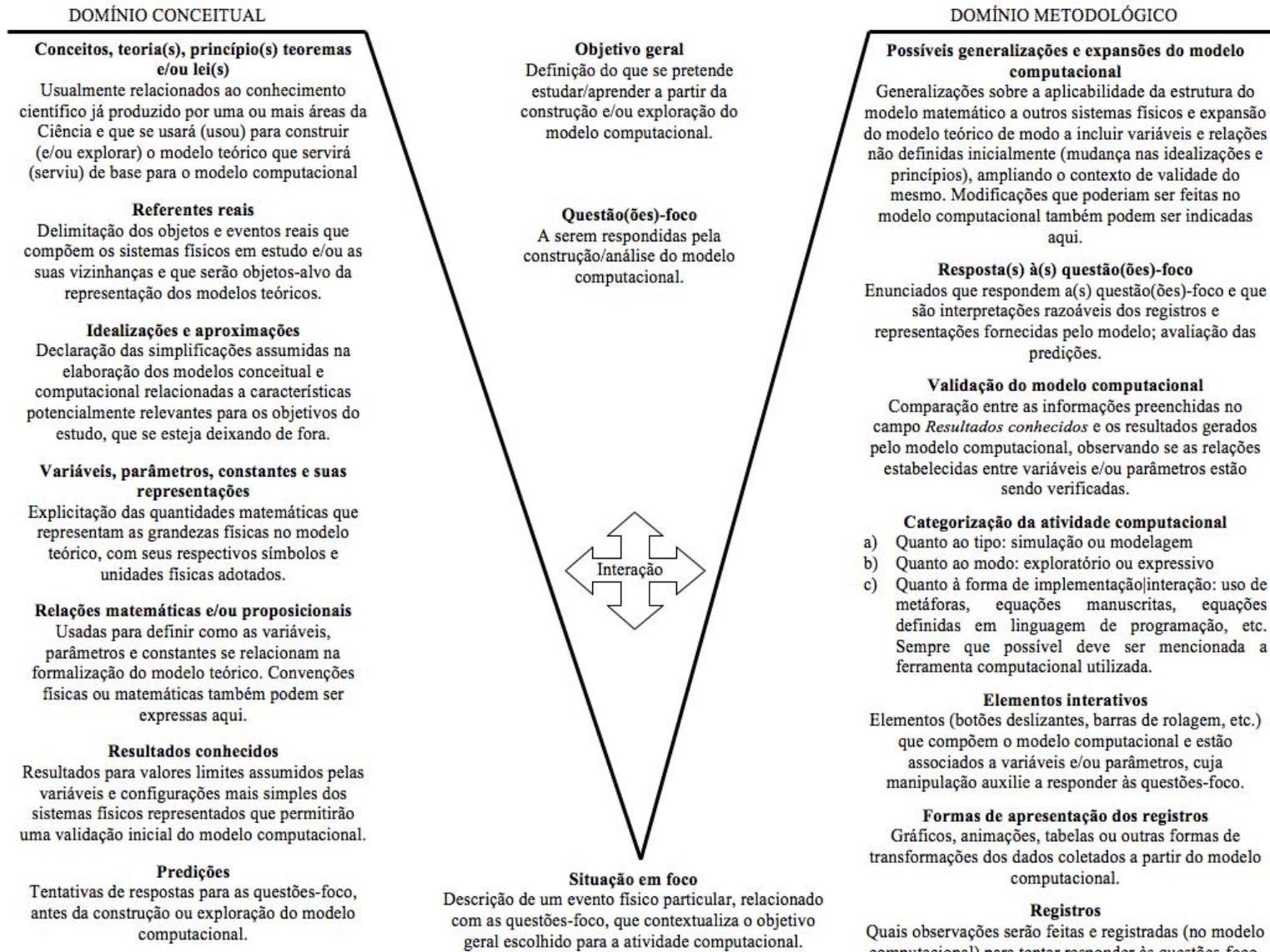


Figura 4 – Diagrama AVM

Muitas vezes essas interações internas podem ser descartadas, como no exemplo a seguir: na análise do movimento de um caiaque descendo uma corredeira, o próprio caiaque pode ser considerado como sistema físico, a vizinhança Terra como responsável pela atração gravitacional, a vizinhança água, responsável pela força de empuxo e pelo transporte do caiaque e a vizinhança ar, que oferece resistência ao movimento do caiaque. Essas interações com a vizinhança do sistema podem ser descritas como interações gravitacionais ou eletromagnéticas. Entretanto, forças eletromagnéticas e nucleares responsáveis pela coesão dos átomos e moléculas que compõem o caiaque são tidas como irrelevantes para a descrição de seu translado. Observe que dependendo do propósito representacional, aquilo que escolhemos como referente dentro de uma mesma situação real pode mudar. Se nos restringirmos à descrição cinemática do movimento, poderíamos estipular a aceleração do sistema, sem levar em conta as interações que a ocasionam. Para o primeiro caso (dinâmica) os referentes reais seriam o caiaque (sistema físico), a Terra, a água e o ar (vizinhanças), para o segundo (cinemática) poderíamos considerar apenas o caiaque.

A partir da definição dos referentes reais podemos passar à construção do modelo conceitual, erigido a partir de idealizações deles. Em nosso exemplo, poderíamos representar o caiaque como uma partícula, ou como um corpo extenso, desprezar a resistência do ar, considerar o fluxo de água laminar, a distribuição de água homogênea, etc. Ou seja, seguindo a acepção bungeana, idealizar significa simplificar ou esquematizar um objeto ou evento físico no processo de sua representação conceitual.

Como um modelo conceitual não é isomórfico com seus referentes reais, ele não conterà todas as informações que podem ser associadas a eles, pois são praticamente infinitas. Logo, ao se fazer uma idealização (esquematização ou simplificação) explicitam-se os traços considerados importantes de serem representados, em conformidade com os objetivos, e também aqueles que dentro do escopo da representação poderiam ser relevantes, mas que por alguma razão (e.g. diminuição da complexidade) estão sendo deixados de lado. Implicitamente, admite-se que todas as outras informações não especificadas não são relevantes para o propósito estabelecido. Conforme mencionamos, o número de informações que podem ser associadas aos referentes reais é quase infinito.

Pense que ao descrever a trajetória de um carro saltando sobre uma rampa, por exemplo, descartamos, sem mencionar, informações sobre sua cor, temperatura, estados quânticos dos átomos que compõem o carro, a atração gravitacional que o motorista exerce sobre os pneus, o som que motor emite, etc..

Contudo se, por exemplo, a resistência do ar ao movimento do carro fosse desprezada, seria desejável que isso fosse mencionado, mesmo que seu efeito fosse desprezível. Esse esclarecimento um tanto óbvio se faz pertinente para orientar o preenchimento do campo *Idealizações e aproximações*, explicando porque, na medida do possível e do didaticamente desejável, deve-se procurar listar todas as características e propriedades que o modelo conceitual está representando, mas apenas algumas das quais ele deixa de representar.

Podemos também divisar outro conceito intimamente relacionado com as idealizações, conhecido como aproximação. Uma aproximação pode ser pensada como uma simplificação, usualmente matemática, feita sobre o modelo teórico para facilitar a resolução matemática de problemas (e.g. consideração de $g \cong 10 \text{ m/s}^2$), ou ainda para viabilizar a produção de uma descrição teórica (não exata) mais tratável e próxima o suficiente de uma solução mais ampla (Portides, 2007) (e.g. aproximação para pequenos ângulos feita em um modelo teórico de um pêndulo simples). No dAVM, ambos os conceitos têm espaço no campo *Idealizações e aproximações*.

Ao se fazer idealizações no processo de elaboração de um modelo teórico em Física, atribuem-se aos objetos e eventos reais em estudo propriedades que representam alguns de seus

traços característicos considerados como relevantes. Usualmente estas propriedades são quantificáveis (grandezas), ou seja, podem ser expressas a partir de um valor numérico acompanhado de sua unidade, quando a grandeza não for adimensional. É possível fazer uma distinção entre as grandezas físicas em termos de constantes, variáveis e parâmetros.

Grosso modo, uma constante física pode ser definida como uma grandeza invariável, independente de uma situação física em particular (e.g. constante gravitacional, constante de Planck, número de Avogadro, velocidade da luz no vácuo, etc.). Em oposição, uma variável seria uma grandeza física que pode ter seu valor numérico alterado, podendo ser divididas em variáveis independentes e dependentes. As independentes levam esse nome por poderem variar livremente, sem estarem subordinadas às alterações nos valores de outras variáveis (e.g. o tempo, em contextos não-relativísticos). As variáveis dependentes, por outro lado, são aquelas que têm seus valores diretamente ligados aos valores assumidos pelas variáveis independentes e pelos parâmetros (e.g. a posição de um corpo caindo com resistência do ar). Essa distinção é contextual, associada com os modelos teóricos e com a forma que estão expressos matematicamente.

Um *parâmetro*, por sua vez, é um tipo especial de variável que dentro de um contexto específico não tem seu valor alterado em função de variações nos valores de outras variáveis independentes ou dependentes (e.g. a aceleração de um corpo em queda livre, considerada constante). Entretanto, em sistemas físicos reais, as propriedades associadas aos parâmetros do modelo não são estritamente constantes. Logo, se quisermos ser mais realistas aumentando a complexidade do modelo, poderíamos considerar como variáveis grandezas que em modelos mais simples são consideradas como parâmetros porque variam a uma taxa menor do que as consideradas como variáveis nesses modelos.

O campo do dAVM *Variáveis, parâmetros, constantes e suas representações* tem como objetivo explicitar as quantidades matemáticas que representam as grandezas físicas no modelo teórico, especificando também os símbolos que as representam e as unidades físicas adotadas. Já no campo *Relações matemáticas e/ou proposicionais*, a ideia é informar quais as sentenças matemáticas e/ou relações de causa e efeito (e.g. aumentando “x” diminui “y”) que interligam às variáveis e parâmetros do modelo teórico representado computacionalmente. Outras informações pertinentes que também podem constar são a indicação do referencial estabelecido e os zeros de energias potenciais, por exemplo.

Um campo do dAVM que discute aspectos hierarquicamente superiores aos dois últimos apresentados diz respeito às seguintes construções teóricas: conceitos, princípios, teoremas e leis. Estes elementos estarão diretamente conectados às teorias gerais na acepção de Bunge, se existentes para o campo de estudo. Conceitos são unidades cognitivas de significado que apontam regularidades em eventos ou objetos. Com eles são formuladas proposições, tais como princípios, teoremas e leis. Os princípios (postulados ou axiomas) são assunções iniciais em uma teoria ou argumento, não demonstráveis dentro da teoria em questão, mas justificáveis por suas consequências (e.g. princípio da conservação de energia) (Bunge, 2006). Os teoremas são proposições demonstráveis a partir dos princípios e dos demais constituintes de sistema teórico.

Cabe ressaltar que um teorema numa determinada teoria pode ser assumido como um princípio em outra e vice-versa, o que de certo modo talvez explique porque proposições que identificadas hoje como teoremas de certas teorias são chamadas historicamente de princípios (e.g. princípio de Pascal). O uso do termo “lei” em Física está associado à descrição de algum padrão universal, e na prática é usado tanto para designar princípios como para designar teoremas (e.g. lei de Gauss para eletricidade (princípio), lei de Stevin (teorema)) (Silveira & Medeiros, 2009). Mais do que incitar uma discussão taxonômica sobre termos filosóficos concernentes à elaboração de teorias, pretendemos nesse campo destacar a importância de explicitar os princípios e os teoremas subjacentes à construção do modelo teórico, base do modelo computacional. Acreditamos que o nível de detalhamento e discussão destes elementos deve ficar subordinado às intenções

pedagógicas da atividade de modelagem computacional aplicada ao ensino, mas não devem ser ignorados.

Antes que se possa usar o modelo computacional para responder às questões-foco, precisamos nos assegurar que respostas geradas por esse modelo são minimamente confiáveis, ou seja, precisamos verificar se o modelo computacional é capaz de reproduzir alguns resultados conhecidos para situações limites e/ou configurações mais simples do sistema físico. Por exemplo, num modelo que represente um circuito RC sem fonte a corrente elétrica no circuito deve tender a zero, quando o tempo tender ao infinito; num sistema conservativo, sua energia mecânica deve permanecer constante, etc. A explicitação dos resultados que se pretende que sejam reproduzidos pelo modelo é feita no campo *Resultados conhecidos*, que está intimamente relacionado com o campo *Validação do modelo computacional*, presente no domínio metodológico do dAVM. Essa validação inicial do modelo computacional estará associada diretamente aos resultados desejados e corretamente previstos por seu modelo teórico subjacente e indiretamente com os resultados empíricos alvos desse modelo teórico.

Antes ainda de se usar o modelo computacional para responder às questões, é didaticamente interessante que o aluno prediga quais serão as respostas obtidas, aumentando com isso a reflexão necessária para explicar em um momento subsequente, possíveis discrepâncias entre o que ele previu e o que foi fornecido pelo modelo. As respostas são mesmo conflitantes? Qual delas deve estar correta? Onde está o problema? Essa etapa de predição, em essência o primeiro componente do método P.O.E. discutido anteriormente, toma forma no campo *Predições* do dAVM. Ao tentar responder às questões, concepções alternativas e dificuldades conceituais podem emergir, auxiliando o processo de ensino-aprendizagem do conteúdo abordado.

Outro ponto fundamental relacionado a esse campo é que ele abre espaço para o trabalho de formulação de hipóteses científicas por parte dos alunos, o que é altamente desejável no ensino de Física. Entretanto, deve-se tomar um cuidado especial para que não se crie a visão de que a simulação computacional está sempre correta, podendo servir de juiz supremo na aceitação ou rejeição das hipóteses feitas. Os resultados oferecidos pelos modelos devem ser sempre acompanhados de uma reflexão crítica sobre sua validade, contextualizados pelos seus objetivos e domínios (conceitual e metodológico).

III) Domínio metodológico

Começamos indicando quais registros serão efetuados na tentativa de responder às questões-foco, tendo em vista as variáveis e os parâmetros utilizados para representar as propriedades dos sistemas físicos modelados, os resultados conhecidos e as predições realizadas. Os resultados a serem fornecidos pelo modelo computacional, ocupam lugar no campo *Registros* do dAVM. Por exemplo, para responder à pergunta: “Como varia a corrente elétrica no processo de descarga de um capacitor num circuito RC?”, poderíamos escolher como registro os valores de carga ou corrente elétrica no capacitor em função do tempo.

Entretanto, não basta apenas registrar de qualquer maneira os valores assumidos por variáveis e parâmetros do modelo. Para facilitar o entendimento, e de fato se conseguir responder às questões-foco, é imprescindível, na maior parte das vezes, que se organizem os registros de modo a favorecer a compreensão dos resultados, bem como a visualização de padrões e tendências. Assim, é útil que se destaque quais *Formas de apresentação dos registros*, tais como tabelas, gráficos, animações, etc., se tem ou terá disponível no modelo computacional e que são ou serão relevantes nas atividades realizadas. O destacado em itálico na última frase dá nome a mais um campo do dAVM. O professor precisa estar atento, pois, não raro, as simulações computacionais escolhidas podem trazer representações visuais que dificultam, ou não possibilitam, o alcance dos objetivos didáticos por ele estipulados, tanto pelo excesso quanto pela falta.

Além do uso de representações visuais adequadas, outro aspecto a que se deve destinar atenção especial está relacionado às possibilidades de interação do aluno com o modelo computacional. A interatividade é um recurso fundamental para fomentar sua participação ativa no processo de ensino-aprendizagem, tornando-o (cor)responsável pela sua própria aprendizagem, na medida em que favorece seu engajamento cognitivo nas atividades realizadas. Incentivar a reflexão por parte dos professores sobre a escolha ou construção de simulações computacionais que possibilitam interações desse tipo e, no que tange aos alunos, destacar estas possibilidades, são os objetivos centrais do campo *Elementos interativos* no dAVM. Podemos citar como exemplos de elementos interativos em simulações computacionais: barras de rolagem, botões deslizantes, campos para inserção de valores, botões de controle de execução (*play, pause, stop...*), etc. Enfim, qualquer componente do modelo computacional que esteja associado ao ajuste/inserção de valores para variáveis, parâmetros e constantes cuja manipulação auxilie a responder às questões-foco. A possibilidade de alterar parâmetros, constantes e valores iniciais para variáveis, mesmo quando essa alteração não modifica o comportamento dos fenômenos representados, pode se mostrar uma excelente oportunidade para testar hipóteses que o aluno tenha em mente.

Para auxiliar à leitura posterior dos dAVM produzidos, acrescentamos o campo *Categorização da atividade computacional* cujo objetivo é esclarecer o tipo de atividade (simulação ou modelagem), o modo em que ela foi/está sendo realizada (exploratório ou expressivo) e também a forma de implementação/interação com o modelo (e.g. metáfora de Forrester, equações manuscritas, equações definidas em linguagem de programação, etc.) acompanhada, sempre que possível, do nome da ferramenta computacional utilizada (e.g. *Modellus, Stella, Powersim, Physlets, applets, Starlogo*, etc.). Esse campo pode ser preenchido pelo próprio professor se os alunos tiverem dificuldades.

Conforme mencionado anteriormente, precisamos tomar certos cuidados para garantir que respostas obtidas com o modelo computacional sejam dignas de confiança, antes que possamos utilizá-lo para responder às questões-foco. Para avaliar sua coerência interna deve-se comparar os resultados gerados pelo modelo computacional com os resultados conhecidos, explicitados previamente no campo *Resultados conhecidos*, para casos particulares do modelo teórico que, por sua vez, deverão estar de acordo com resultados experimentais associados à situação em estudo dentro de certo grau de precisão, definido pelos objetivos da modelagem. Por exemplo, devemos avaliar se as relações matemáticas estão sendo implementadas corretamente no computador, o que pode ser feito, por exemplo, se a forma da função utilizada para descrever a relação entre duas variáveis é conhecida e um gráfico é gerado com o modelo para comparação. A partir do momento que garantimos que o modelo computacional reproduz o modelo teórico de forma apropriada é que podemos considerar o primeiro como uma forma reificada do segundo e avaliar sua coerência externa, ou seja, com que grau de precisão o modelo computacional(-teórico) representa o sistema físico (real) de referência. Esta análise sobre a coerência do modelo computacional tem espaço no campo *Validação do modelo* no dAVM.

Nesta etapa, é importante que se reflita também sobre os limites de validade do modelo teórico, ou seja, sob que condições os resultados fornecidos por ele estarão dentro de uma margem tolerável de erro em relação aos resultados experimentais, que varia de acordo com o objetivo do modelo e com as idealizações/aproximações realizadas.

Quando o modelo computacional falha em representar algum sistema real, é possível que os erros estejam associados à implementação em máquina, ao modelo teórico em si e/ou aos resultados experimentais. Todas estas possibilidades devem ser avaliadas de forma crítica e reflexiva. A princípio, sempre que os resultados conhecidos do modelo teórico não tenham sido alcançados deve-se revisar o modelo computacional até que esse os reproduza, entretanto no que tange à contrastação entre os resultados experimentais e teóricos, não podemos atribuir o erro sempre à parte teórica.

Finalmente, pode-se então explorar o modelo computacional na tentativa de responder às questões-foco, tendo como ponto de partida as previsões realizadas. É fundamental neste estágio, associado ao Observar e Explicar do método P.O.E., que as discrepâncias entre os resultados obtidos com o modelo e os resultados previstos sejam explicitadas e que se procure explicar o porquê das diferenças. Para o preenchimento do campo *Resposta(s) à(s) questão(ões)-foco* do dAVM, além das respostas em si para cada questão, é altamente desejável que, de forma sucinta, se apresente também essas explicações.

O último campo a ser preenchido do dAVM está associado às *Possíveis generalizações e expansões do modelo computacional*. As ideias por trás deste campo são:

- favorecer a percepção sobre as possibilidades de uso do mesmo modelo matemático, subjacente ao modelo teórico implementado computacionalmente, para representar outros sistemas físicos (e.g. o mesmo modelo matemático usado para representar um oscilador massa-mola, pode também representar um circuito elétrico RLC);
- aumentar a complexidade do modelo teórico para que este possa representar outros aspectos negligenciados em sua construção, envolvendo a inclusão/modificação de idealizações, aproximações, variáveis, parâmetros, constantes e relações matemáticas, ampliando seu contexto de validade (e.g. considerar os efeitos da resistência do ar no movimento de um projétil acrescentando uma força, cujo módulo depende de sua velocidade, oriunda da interação do sistema (projétil), com a vizinhança (ar));
- indicar que modificações poderiam ser feitas no modelo computacional de modo a aumentar as possibilidades de representação gráfica (ou sonora) dos dados e também de interação com o usuário de modo a auxiliá-lo na consecução do objetivo geral da atividade (e.g. acréscimo de barras de rolagem para a manipulação de parâmetros ocultos no modelo; possibilidade de solicitação de gráficos simultâneos de duas grandezas diferentes em função do tempo).

Ordem de preenchimento dos campos do dAVM

Uma das razões para o formato em “Vê” do dAVM, conforme já mencionado, está relacionada com a explicitação das interações entre campos nos domínios conceitual e metodológico, orientados pelos elementos no centro do Vê. Apesar da discussão e do preenchimento dos campos poderem ser feitos de forma bastante variada, dependendo do enfoque e dos objetivos em cada atividade computacional, apresentamos a seguir algumas considerações, a título de orientação, sobre o uso do dAVM. De modo geral, sugerimos que em primeiro lugar sejam preenchidos os campos no centro do Vê (em qualquer ordem), seguidos pelos campos do domínio conceitual e do domínio metodológico.

A ordem de preenchimento dos campos na parte central do diagrama dependerá intrinsecamente da motivação inicial em se realizar a atividade de modelagem computacional e também do modo de uso do dAVM, conforme será explicitado na próxima subseção. Podemos começar por qualquer um dos três campos (*objetivo geral, situação em foco e questões-foco*) e definir os outros dois em função dele. Como exemplo, supondo que o objetivo geral inicialmente estabelecido seja estudar o movimento de corpos carregados sob a ação de campos eletromagnéticos, a situação em foco poderia ser a trajetória de um feixe de íons em um espectrômetro de massa de Bainbridge para tentar responder as seguintes questões-foco: qual a relação entre o raio de curvatura da trajetória e a carga de uma partícula carregada? Como combinar um campo elétrico com um magnético para construir um filtro de velocidades, garantindo que as partículas entrem na câmara do espectrômetro com a mesma velocidade?

No domínio conceitual, sugerimos que o campo *Predições* seja o primeiro a ser preenchido,

seguido pelos campos: Conceitos, *Teoria(s)*, *princípio(s)*, *teorema(s)* e *lei(s)*; *Referentes reais*; *Idealizações e aproximações*; *Variáveis, parâmetros, constantes e suas representações*; *Relações matemáticas e/ou proposicionais* e *Resultados conhecidos*.

Feito o preenchimento inicial dos campos do domínio conceitual do modelo computacional, sugerimos que sejam preenchidos os campos: *Registros*; *Formas de apresentação dos registros*; *Elementos interativos*; *Categorização da atividade computacional* (se o professor já não tiver entregue preenchido) e *Validação do modelo*. Se o modelo não se mostrar válido e a atividade em desenvolvimento for do tipo expressiva (construção de um modelo computacional) deve-se procurar exaustivamente por erros de implementação. Caso estes não sejam detectados, os campos já preenchidos do dAVM, principalmente os do domínio conceitual, devem ser criticamente revisados e só se seguir adiante se as modificações realizadas culminarem na adequação do modelo. Se a atividade for exploratória e o modelo computacional não for válido deve-se, na medida do possível, tentar identificar as fontes de erro, indicando porque o modelo não pode ser usado para responder corretamente às questões-foco. Somente após se dispor de um modelo validado é que os campos *Reposta(s) à(s) questão(ões)-foco* e *Possíveis generalizações e expansões dos modelos* devem ser preenchidos. Observe-se que o preenchimento deste último campo também serve para apontar perspectivas para futuras atividades de modelagem.

É importante destacar que o preenchimento da maioria dos campos tem implicações diretas no preenchimento dos demais, logo os campos não devem ser abordados de forma estanque e isolada: várias “idas e vindas” tornam-se necessárias até se ter um dAVM adequado e é exatamente neste processo que reside seu potencial de promoção da aprendizagem significativa dos conteúdos abordados, incentivando o raciocínio crítico e reflexivo.

Algumas formas de uso do dAVM

Na tentativa de levar em conta alguns aspectos fundamentais da modelagem científica e mimetizar sua recursividade intrínseca, o dAVM possui um certo grau de complexidade que deve ser observado em seu uso. Pensando nos primeiros contatos dos alunos com o instrumento, se faz necessário um cuidado adicional para não sobrecarregá-los cognitivamente e conduzi-los para um preenchimento mecânico dos campos, como se fosse apenas um questionário tradicional com uma nova distribuição espacial de suas questões.

Apesar de todos os campos do dAVM e suas interações mútuas terem relevância no desenvolvimento de atividades de modelagem computacional crítico-reflexivas no ensino de Física, nem todos precisam ser introduzidos/explicitados ao mesmo tempo: é preciso que a partir de uma visão geral sobre o processo de modelagem, seja feita uma diferenciação progressiva de seus conceitos, sem esquecer de integrá-los ao longo desse processo. Tendo isso em vista, outra consideração de ordem prática que podemos fazer é que os campos não precisam ser preenchidos de forma exaustiva e detalhada de uma só vez. Conforme as interações entre eles vão sendo consideradas, sempre se pode voltar para um campo anteriormente preenchido e modificá-lo, acrescentando-se (retirando-se) coisas entendidas como (ir)relevantes.

A intenção dessa abordagem é dar ao aluno condições de dominar gradualmente os aspectos relevantes presentes na ferramenta e, por meio dela, refletir criticamente sobre os conceitos e raciocínios apresentados até chegar ao ponto em que a lógica do processo seja internalizada e o dAVM seja posto de lado, servindo apenas como um possível material de consulta, que ele possa olhar ocasionalmente para ver se não esqueceu alguma coisa.

Para levar a cabo essa estratégia, vislumbramos quatro modos básicos para uso do dAVM, após uma visão geral do processo. São eles (Araujo, Veit & Moreira, 2006):

a) *Modo exploratório dirigido* - no diagrama AVM, o Objetivo geral, as Questões-foco e a

Situação em foco são definidos pelo professor e uma simulação computacional é apresentada. A elaboração reflexiva do Vê servirá como um guia para exploração do modelo de modo a responder as questões apresentadas.

b) *Modo exploratório aberto* - é apresentada uma simulação computacional e pede-se que, através do diagrama AVM, o aluno explore de forma reflexiva, dando atenção especial à formulação das questões em foco. Este modo pode ser especialmente útil para a construção de materiais educacionais a partir de simulações criadas por terceiros, o que é interessante tanto para o próprio professor, que venha a usar materiais disponíveis na rede, por exemplo, quanto para os alunos.

c) *Modo expressivo dirigido* - neste caso apenas o Objetivo geral, as Questões-foco e a Situação em foco são fornecidos previamente pelo professor, ficando a cargo do aluno elaborar o restante do Vê e construir seu modelo computacional correspondente. Este modo pode ser usado quando desejamos que o aluno construa um modelo computacional sobre um determinado conteúdo, levando em consideração determinados aspectos-chave definidos pelo professor.

d) *Modo expressivo aberto* - são propostas atividades em que o aluno deve construir o modelo computacional a partir da elaboração reflexiva do diagrama AVM, definindo ele mesmo o objetivo geral, as questões e a situação em foco, que guiarão o seu trabalho. Este modo de uso do diagrama AVM pode auxiliar o professor ou os alunos na construção de seus próprios modelos.

Cabe salientar que esses modos não são os únicos possíveis e tampouco estanques, devendo ser pensados de forma global em função do planejamento das atividades de modelagem computacional. O objetivo de usar o dAVM para o trabalho com modelos computacionais em um dos modos acima, ou ainda em uma combinação dos mesmos, é oportunizar, progressivamente, uma melhor compreensão dos conceitos físicos e também de alguns elementos do processo de modelagem científica e suas interações. A decisão final sobre a ênfase a ser dada em cada campo do diagrama, bem como a melhor maneira de preenchê-los, é do professor.

Independente do modo escolhido, sugerimos que duas estratégias sejam utilizadas na implementação das atividades com os alunos, quais sejam: *o trabalho colaborativo* em pequenos grupos (duplas ou trios) e a *apresentação* dos respectivos dAVM elaborados por eles para o grande grupo. Essa apresentação, a ser realizada pelos alunos, é uma excelente oportunidade do professor discutir e avaliar o entendimento dos conteúdos que estão sendo trabalhados. Se disponível, um projetor multimídia (*datashow*) pode facilitar bastante a viabilização dessa dinâmica.

A título de ilustração, apresentamos nas Figuras 5 e 6 dois dAVM relacionados com modelos computacionais representando um movimento de queda com resistência do ar e um circuito elétrico do tipo RC, respectivamente.

Na sequência, apresentamos algumas considerações de ordem geral sobre o presente artigo.

Considerações finais

Gil Perez *et al.* (1999) apresentam uma importante reflexão sobre a validade de se continuar segmentando atividades de ensino em termos de aprendizagem de conceitos, resolução de problemas do tipo lápis e papel e realização de práticas de laboratório, salientando que essa separação não guarda vínculo algum com a prática científica real. Os autores argumentam que aulas teóricas, práticas e de solução de problemas precisariam ser transformadas numa espécie de atividade de “pesquisa dirigida” em que os alunos tenham a possibilidade de trabalhar com esses três aspectos integradamente e, desse modo, alcançarem uma concepção coerente da práxis científica.

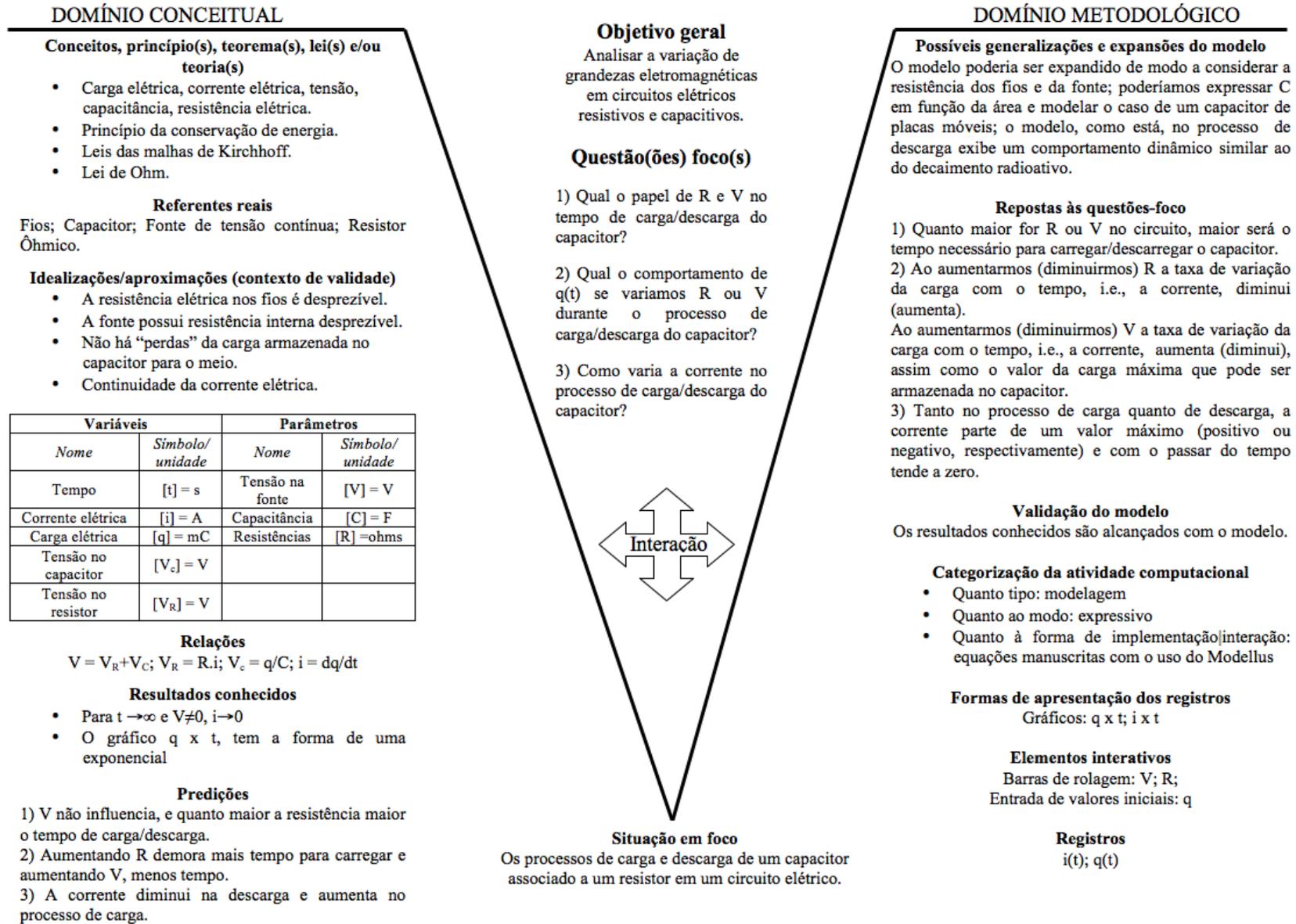


Figura 6 - Diagrama AVM para a construção de um modelo computacional sobre um circuito RC do ponto de vista de um aluno iniciante (observe os erros nas predições e menção desnecessária à Lei de Ohm).

De modo geral nossos objetivos finais são semelhantes: procuramos que os alunos aprendam significativamente conceitos físicos e desenvolvam ao longo do processo uma concepção adequada sobre Ciência, mais especificamente uma concepção que articule uma noção de modelagem científica com o pensamento sistêmico. Mesmo reconhecendo a relevância do laboratório experimental didático, nosso foco esteve fixado em um aspecto diferente, também parte integrante do fazer científico atual, as ferramentas computacionais.

Para alcançar tal fim, desenvolvemos um referencial de trabalho para o delineamento e implementação de atividades de modelagem e simulações computacionais voltadas para o ensino-aprendizado de Física. Ao longo do tempo, um princípio motivador esteve sempre presente: o uso do computador para fins didáticos precisa ir além do chamado “efeito novidade”.

Sem menosprezar a potencial motivação ocasionada pelo uso de tal recurso, buscamos apontar um caminho para o desenvolvimento de habilidades crítico-reflexivas por parte dos alunos, tendo como base a análise e construção de modelos computacionais que representem fenômenos físicos. Em nossa proposta esse caminho passa pela discussão de aspectos epistemológicos, em especial a noção de modelo e modelagem científica, de maneira indissociável ao próprio conteúdo através do estudo de modelos computacionais e do desenvolvimento de habilidades associadas à formulação de perguntas e elaboração e teste de hipóteses.

Na tentativa de facilitar a operacionalização de nosso referencial construímos o dAVM, um instrumento que acreditamos ser capaz de sintetizar os principais aspectos que julgamos relevantes no trabalho com simulações e modelagem computacionais no contexto do ensino de Física. Através da reflexão ocasionada para um preenchimento adequado dos campos do diagrama, esperamos que os alunos sejam capazes de perceber as interações teórico-metodológicas que se fazem presentes para elaboração e uso de modelos computacionais. Conforme salientamos anteriormente, deve-se tomar cuidado para não sobrecarregar cognitivamente o aluno ao abordar em detalhe todos os campos nas primeiras aplicações do instrumento. Ratificamos que é preciso inicialmente se apresentar uma visão geral sobre o processo de modelagem computacional, para que posteriormente seja feita uma diferenciação progressiva de seus conceitos, sem esquecer de integrá-los ao longo desse processo (abordagem ausubeliana; Moreira, 2006).

As perspectivas apontadas pelo referencial de trabalho proposto estão sendo avaliadas através de estudos empíricos sobre o uso do dAVM com alunos do ensino superior e também com professores de Física do ensino médio em cursos de formação continuada. Dentre esses destacamos um estudo exploratório, no escopo de uma tese de doutorado em ensino de Ciências, sobre o processo de aprendizagem de conceitos básicos da dinâmica newtoniana com alunos do curso superior de Ciências Naturais e Educação Ambiental da Universidade da Antioquia, Colômbia (López, Veit & Araujo, 2011).

Para finalizar, chamamos a atenção para a necessidade de que o ensino de Física atual, assim como de outros conteúdos, seja repensado para retirar o foco do exercício de habilidades mecânicas de resolução de problemas e acúmulo de informações para outro, voltado para o desenvolvimento de habilidades metacognitivas. Obviamente, isso não é novidade, mas de certo modo pode ficar mascarado pela inserção de inovações tecnológicas em sala de aula como um fim em si. Avolumam-se hoje uma grande quantidade de materiais, supostamente didáticos, disponíveis para o uso de qualquer pessoa com acesso à *internet*, sem que haja muitas vezes qualquer avaliação crítica do seu conteúdo. Entre esses recursos, não raros são os modelos computacionais com erros, fisicamente implausíveis e descontextualizados. Trazer o computador para o contexto de sala de aula implica também na responsabilidade em desenvolver estratégias de como usá-lo. Transformar tal instrumento em um ferramenta capaz de auxiliar o processo de ensino-aprendizagem em Física resume nossos esforços ao propor o presente referencial de trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores Neusa T. Massoni (IF-UFRGS), Fernando Lang da Silveira (IF-UFRGS), Sonia López Ríos (Universidade de Antioquia - Colombia) e Jefferson Rodrigues dos Santos (IFRS) pelas leituras críticas e sugestões para o trabalho.

Referências

- Araujo, I. S. (2005). *Simulação e modelagem computacionais como recursos auxiliares no ensino de Física Geral*. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 229 f.
- Araujo, I. S.; Veit, E. A. & Moreira, M. A. (2006). Adapting Gowins V diagram to computational modelling and simulation applied to physics education. In: GIREP 2006 Conference, Amsterdam. *Proceedings of the GIREP 2006*.
- Aguiar, C.E. & Rubini, G. (2004). A aerodinâmica da bola de futebol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 26(4), 297-306.
- Bunge, M. (1974). *Teoria e Realidade*, São Paulo: Ed. Perspectiva.
- Bunge, M. (1989). *La investigación científica: su estrategia y su filosofía*, Barcelona: Ariel.
- Bunge, M. (2006). *Dicionário de Filosofia*. São Paulo: Ed. Perspectiva.
- Camiletti, G. & Ferracioli, L. (2002). A utilização da modelagem computacional semiquantitativa no estudo do sistema mola-massa, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 24(2).
- Doerr, H. M. (1997). Experiment, simulation and analysis: an integrated instructional approach to the concept of force. *International Journal of Science Education*, London, 19 (3), p. 265-282.
- Dorneles, P. F. T.; Araujo, I. S. & Veit, E. A. (2008). Simulação e modelagem computacionais no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos básicos de eletricidade. Parte II - circuitos RLC *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 30(3).
- Gil-Pérez, D.; Furió Más, C.; Valdés, P.; Salinas, J.; Martínez-Torregrosa, J.; Guisasola, J.; González, E.; Dumas Carré, A.; Goffard, M. & Carvalho, A. M. P. (1999) ¿Tiene sentido seguir distinguendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 12, n. 2, p. 311-320.
- Gowin, D.B. (1981). *Educating*. Ithaca, N.Y.: Cornell University Press. 210p.
- Gowin, D.B. & Alvarez M.C. (2005). *The art of educating with V diagrams*. New York: Cambridge University Press. 231p.
- Greca, I. M. & Santos, F. M. T. (2005). Dificuldades da generalização das estratégias de modelação em Ciências: o caso da Física e da Química. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 10(1).
- Halloun, I. (1996). Schematic modeling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, 33(9), p. 1019-1041.
- Halloun, I. A. (2004). *Modeling theory in science education*. Dordrecht Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American journal of physics*,

55(5), p. 440-454.

Islas, S. M. & Pesa, M. A. (2001) Futuros Docentes y Futuros Investigadores se Expresan sobre el Modelado em Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(3), p. 319-328.

Krapas, S.; Queiroz, G.; Colinvaux, D. & Franco, C. (1997). Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 2(3).

López, S.; Veit, E., & Araujo, I. (2011). 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*, V10(1), 202-226,

Medeiros, A. & Medeiros, C. F. (2002). Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24(2), pp. 77-86.

Moreira, M. A. (2006). *A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula*. Brasília; Ed. da UnB.

Moreira, M.A. (2006). *Mapas conceituais e diagramas V*. Porto Alegre: Ed. do Autor. 103p.

Pérez, D. G.; Más, C. F.; Valdés, P.; Salinas, J.; Martínez-Torregrosa, J.; Guisasola, J.; González, E.; Dumas-Carré, A.; Goffard, M.; & Carvalho, A. M. P. (1999). ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lapis y papel y realización de practices de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, 17(2), p. 311-320.

Portides, D. P. (2007). The Relation between Idealisation and Approximation in Scientific Model Construction. *Science & Education*, 16(7), 699-724.

Santos, A. C. K. & Ogborn, J. (1992). A model for teaching and researching into a computational modelling. *Journal of Computer Assisted Learning*, London, 8, p. 67-78.

Schwarz, C.V. & B.Y.White (2005), Metamodeling Knowledge: Developing Students' Understanding of Scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 23, 165-205.

Silveira, F. L. & Medeiros, A. (2009). O Paradoxo Hidrostático de Galileu e a Lei de Arquimedes. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, 26(2), p. 237-294.

Tao, P. K. & Gunstone, R. F. (1999). The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, New York, 36(7), p. 859-882.

White, R. T., & Gunstone, R. F. (1992). *Probing understanding*. London; New York: Falmer.

Recebido em: 12.04.11

Aceito em: 21.08.2012