
A MODELAGEM CIENTÍFICA VISTA COMO UM CAMPO CONCEITUAL⁺

Rafael Vasques Brandão¹
Ives Solano Araujo²
Eliane Angela Veit
Instituto de Física – UFRGS
Porto Alegre – RS

Resumo

Este trabalho defende 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 e possui implicações relevantes para o seu ensino e pesquisa. Para tanto, apoia-se na visão epistemológica de Mario Bunge sobre modelagem científica e na Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud, levando em conta as ideias de Weil-Barais e Vergnaud sobre concepções em Física.

Palavras-chave: *Modelagem científica. Campo conceitual. Ensino de Física.*

⁺ The scientific modelling seen as a conceptual field

* *Recebido: novembro de 2010.
Aceito: setembro de 2011.*

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

² Bolsista da CAPES - Proc. N^o: BEX 2271/09-5.

Abstract

This paper supports the idea that the scientific modeling process in physics could be viewed as a conceptual field underlying the domain of specific conceptual fields of that science and it has important implications to their teaching and research. For this, it relies on the Mario Bunge's epistemological viewpoint concerning scientific modeling and the Gérard Vergnaud's Conceptual Fields Theory, taking into account the ideas of Weil-Barais and Vergnaud about conceptions in Physics.

Keywords: *Scientific Modelling. Conceptual Field. Physics Teaching.*

I. Introdução

Modelagem científica pode ser entendida como o abrangente processo de construção, validação, uso e revisão de modelos científicos. Esses, por sua vez, podem ser entendidos como representações simplificadas e idealizadas de sistemas, processos e fenômenos da natureza, aceitos por uma comunidade de cientistas. Tal processo desempenha um papel fundamental no desenvolvimento das modernas Ciências Naturais (BUNGE, 1974; WALISER, 1977; PATY, 1995; MORGAN; MORRISON, 1999; GIERE; BICKLE; MAULDIN, 2006; DEVELAKI, 2007). Entretanto os cientistas não possuem receitas infalíveis para construir modelos que contenham fundamento na realidade e que concordem com os fatos, dentro de um contexto de validade, com desejável grau de precisão.

De forma análoga, não existem métodos de ensino que garantam o sucesso da aprendizagem do processo de modelagem científica, que também pode assumir um lugar de destaque na Educação em Ciências, visto que, como sugerem Justi e Gilbert (2002a)³: (a) 'aprender Ciência' significa, em grande parte, conhecer os modelos concebidos pelos cientistas, além das teorias, das leis, dos princípios e dos conceitos de que fazem uso em suas construções; (b) 'aprender sobre Ciência' é, em certa medida, refletir sobre o que versam os modelos científicos, sua natureza,

³ Justi e Gilbert (2002a) argumentam que os modelos e a modelagem no Ensino de Ciências contemplam o que na visão de Hodson (1992) poderiam ser os propósitos da Educação Científica: (a) uma aprendizagem 'da' Ciência; (b) uma aprendizagem 'sobre' Ciência; e (c) uma aprendizagem 'para fazer' Ciência.

suas funções, suas limitações e seu contexto histórico de desenvolvimento; e (c) 'aprender a fazer Ciência' também é ser capaz de criar, testar e expressar seus próprios modelos.

A implementação de estratégias capazes de promover um Ensino de Ciências centrado no processo de modelagem científica com fins didáticos exige, entretanto, a participação dos estudantes e professores de Ciências em espaços que propiciem a reflexão sobre os propósitos acima mencionados, imbricados com o conteúdo disciplinar a ser aprendido (BRANDÃO, 2008). Como argumentam Cupani e Pietrocola (2002),

Só parece capaz de realizar esta tarefa o educador que puder aliar bons conhecimentos sobre o conteúdo que ele pretende ensinar com sólidas formações nos domínios didático-pedagógico e epistemológico. Dessa forma, torna-se necessário entender os processos de produção da ciência, assim como as características e o estatuto do conhecimento por ela produzido (p. 117).

Diversos estudos de natureza qualitativa (GROSSLIGHT *et al.*, 1991; ISLAS; PESA, 2001, 2002; JUSTI; GILBERT, 2002a, 2002b, 2003; BRANDÃO; ARAUJO; VEIT, 2010) e quantitativa (SMIT; FINEGOLD, 1995; VAN DRIEL; VERLOOP, 1999, 2002; TREAGUST; CHITTLEBOROUGH; MAMIALA, 2002; CHITTLEBOROUGH *et al.*, 2005; BRANDÃO *et al.*, 2011) têm investigado as concepções de estudantes e professores de Ciências sobre modelos e modelagem científica. Os resultados sugerem que a maioria dos estudantes e professores de Ciências analisados não costuma refletir sobre a natureza, a construção, a validação, o uso e a revisão de modelos científicos. Por consequência, não atribuem a devida importância ao processo de modelagem científica que está na base de produção do conhecimento das Ciências da Natureza.

Frente a essa problemática, estratégias de ensino pautadas em diferentes perspectivas teóricas sobre modelos e modelagem científica têm sido propostas para favorecerem a aquisição de concepções e competências por parte de estudantes e professores de Ciências (HESTENES, 1987, 1992; WELLS; HESTENES; SWACKHAMER, 1995; FEURZEIG; ROBERTS, 1999; HALLOUN, 1996, 2004; ADÚRIZ-BRAVO; MORALES, 2002; SCHWARZ; WHITE, 2005; LOPES; COSTA, 2007; SENSEVY *et al.*, 2008; BRANDÃO; ARAUJO; VEIT, 2008c).

Tendo em vista os possíveis reflexos que uma compreensão adequada do processo de modelagem científica pode aportar às concepções e competências de estudantes e professores de Ciências, este trabalho defende a tese de que o processo de modelagem científica pode ser visto como um campo conceitual subjacente

ao domínio de campos conceituais específicos em Física, possuindo implicação didática para o Ensino de Física e para a pesquisa nessa área.

Para tanto, do ponto de vista epistemológico, a tese se apoia na concepção de Mario Bunge (1974) sobre o processo de modelagem científica. Do ponto de vista da didática das Ciências Naturais, ela se vale da Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud (1993), levando em conta as ideias de Weil-Barais e Vergnaud (1990) sobre concepções em Física.

II. Modelagem científica na concepção de Mario Bunge

A obra do físico e filósofo da Ciência Mario Bunge é vasta (MATTHEWS, 2003, 2009). O presente trabalho enfocará apenas a concepção bungeana de modelo científico (BUNGE, 1974) devido à sua relevância para um Ensino de Ciências centrado na estratégia da modelagem (PIETROCOLA, 1999). Além disso, parte da epistemologia de Bunge, e algumas de suas implicações didáticas para o Ensino de Ciências, já se constituiu em objeto de análise de outros autores (CUPANI; PIETROCOLA, 2002; WESTPHAL; PINHEIRO, 2004). O presente artigo se diferencia desses pelo interesse nos aspectos conceituais largamente implícitos nas concepções de estudantes e professores de Ciências acerca do processo de modelagem científica, à luz da Teoria dos Campos Conceituais e das ideias de Weil-Barais e Vergnaud (1990). Para tanto, adota a postura epistemológica de Bunge sobre modelagem científica para a construção de uma estrutura conceitual de referência⁴ (OTERO, 2006) associada à noção de modelo científico em Física. Por sua vez, essa estrutura conceitual pode servir de referência para o ‘diagnóstico’ das concepções de estudantes e professores de Ciências relativas aos conceitos e suas relações, que compõem, juntamente com as situações e os esquemas de pensamento a elas associados, o que se entende por campo conceitual da modelagem científica em Física.

Segundo Bunge (1960), o empreendimento científico tem possibilitado uma reconstrução conceitual do mundo em que vivemos cada vez mais ampla,

⁴ Segundo Otero (2006), uma estrutura conceitual de referência “é um conjunto de conceitos, relações entre eles, princípios, afirmações de conhecimento e explicações relativos a certo campo conceitual, conforme aparece formulado, explicado e consensuado nas discussões e nos textos especializados próprios de uma certa comunidade científica de referência” (p. 47). Um campo conceitual, como se verá na próxima seção, é mais do que simplesmente uma estrutura conceitual de referência, pois também considera os esquemas de pensamento e as representações que costumam ser empregadas por aqueles que tentam solucionar situações que dão sentido aos conceitos necessários ao seu domínio.

profunda e detalhada. Mas com que objetivo os cientistas teorizam acerca da natureza? Em última instância, ensina-nos Bunge, com o objetivo de apreender a realidade pelo pensamento (BUNGE, 1974).

No processo de teorização, que implica sempre uma tentativa de trazer a realidade para um plano conceitual, é possível seguir por um ou outro caminho teórico. Podem ser construídas teorias do tipo representacionais, em que se opta por uma descrição detalhada e profunda de alguns aspectos da realidade, mediante a introdução de variáveis hipotéticas, de modo a explicitar os mecanismos internos (não-observáveis) do sistema, processo ou fenômeno de interesse. Outro tipo são as chamadas teorias fenomenológicas (ou de caixa-negra), em que se busca uma abordagem mais direta, isto é, mais próxima aos dados empíricos disponíveis e que faz uso de variáveis externas (observáveis) do tipo entrada-e-saída, de modo a descrever o comportamento externo do sistema. Como exemplos de teorias do tipo caixa-negra em Física podem ser citadas a Cinemática e a Óptica Geométrica. Já a Dinâmica e a Óptica Física são exemplos de teorias científicas do tipo representacionais. Enquanto a Cinemática realiza uma descrição puramente matemática dos movimentos, em termos das variáveis de entrada (tempo) e saída (posição, velocidade e aceleração), a Dinâmica se preocupa com as causas (forças) dos movimentos. Enquanto a Óptica Geométrica realiza uma descrição com base em argumentos puramente geométricos sobre a formação de imagens conjugadas por sistemas de espelhos e lentes, a Óptica Física faz suposições acerca da natureza da luz. Mas como argumenta Bunge, não se deve preferir um tipo de teoria em detrimento de outro. Ambas devem ser entendidas como complementares.

Embora as teorias científicas se constituam no ‘sistema nervoso’ da Ciência (BUNGE, 1989), a pedra fundamental para o entendimento da atividade científica moderna, na visão de Bunge, é o conceito de modelo (BUNGE, 1974). De acordo com Bunge, os dois principais sentidos que devem ser considerados para o termo *modelo*, nas Ciências Fatais da natureza e do homem, são: “o modelo enquanto representação esquemática de um objeto concreto e o modelo enquanto teoria relativa a esta idealização” (*Ibid.*, p. 30). O primeiro sentido define o que Bunge denomina de objeto-modelo de um objeto (ou evento) concreto. O segundo sentido resume o que o autor entende por modelo teórico. Esse conceito, cujo referente direto é o objeto-modelo que lhe deu origem, é concebido como um sistema hipotético-dedutivo específico e deve ser representado por um conjunto de hipóteses e expressas de preferência em linguagem matemática. Mais adiante, será discutido como Bunge descreve a elaboração de modelos teóricos, também conhecidos como teorias específicas.

O modo como Bunge concebe o processo de modelagem revela a importância que atribui à noção de modelo na produção do conhecimento científico. Embora desempenhem papel fundamental no contexto científico, as teorias mais gerais e abstratas, por si sós, não se aplicam diretamente às coisas do mundo real. Um exemplo de teoria geral e abstrata é o Eletromagnetismo Clássico, pois faz uso de conceitos tais como o de distribuição superficial de carga e de corrente. No extremo oposto, os dados empíricos, apesar de muito próximos da realidade, não são passíveis de ser inseridos em sistemas lógicos para gerar conhecimento (PIETROCOLA, 1999). A função dos modelos é justamente a de mediar a relação entre teoria e realidade (BUNGE, 1974; MORGAN; MORRISON, 1999; KOPONEN, 2007).

A reconstrução conceitual da realidade começa pela representação esquemática dos objetos (ou fatos) que se quer apreender. Mais precisamente, inicia-se com as idealizações que resultam em classes de equivalência, ou seja, objetos que são reunidos por apresentarem alguns aspectos semelhantes, apesar de se mostrarem claramente distintos (BUNGE, 1974). Isso é tão somente uma classificação que resume os traços relevantes de objetos diferentes que, num certo sentido, são considerados idênticos. Como exemplo, pode-se citar a classificação das partículas elementares em léptons (que não interagem via força forte) e hádrons (que interagem via força forte). Os léptons são partículas elementares de *spin* 1/2. Os hádrons são divididos em bárions, partículas com *spin* fracionário (1/2, 3/2, 5/2,...), e mésons, partículas com *spin* inteiro (1, 2, 3,...). Na medida em que esses objetos puderem ser tratados por uma teoria, isto é, que lhes forem atribuídas propriedades e relações em grande parte não-observáveis (carga, massa, *spin*, estranheza, cor, sabor, etc.) que fazem parte da estrutura sintática da teoria, surge um construto, mais ou menos elaborado, que Bunge denomina de objeto-modelo (ou modelo conceitual)⁵. Esse modelo conceitual pode, em princípio, ser tão complicado quanto se queira; jamais completo.

Veja-se outro exemplo: o problema do caminhante aleatório unidimensional. Esse problema consiste em saber qual a probabilidade P de um indivíduo estar na posição x (em relação à origem) de uma reta após ter dado um total de N passos (todos de mesmo comprimento), para a direita com probabilidade p , ou para a esquerda, com probabilidade $q = 1 - p$. Existe uma série de idealizações assumidas até se chegar ao enunciado desse problema. E caso se esteja interessado nas ver-

⁵ Daqui para frente, os termos ‘objeto-modelo’ e ‘modelo conceitual’ serão empregados como sinônimos.

sões bi e tridimensional do problema, ambas só podem ser descritas vetorialmente, o que as torna demasiado complicadas. Entretanto, por meio dessas representações ‘mais realistas’ é possível estudar o fenômeno da difusão de uma molécula gasosa que sofre colisões intermoleculares. Ainda assim, esse modelo conceitual não é uma representação especular da realidade, entre outras coisas, porque não considera a possibilidade da molécula ‘dar passos’ de comprimento variado nas diferentes direções. Esse exemplo ilustra um papel fundamental desempenhado pelos modelos conceituais: propiciar representações simbólicas que, embora devam ser constantemente aperfeiçoadas, auxiliam na descrição de sistemas, processos e fenômenos reais, ou supostos como tais. Ao trabalhar com modelos unidimensionais, sabe-se de antemão que mais cedo ou mais tarde eles fracassarão. Por outro lado, modelos unidimensionais fornecem soluções matemáticas mais simples e, por consequência, melhor interpretáveis (BUNGE, 1974).

Porém a construção de objetos-modelo não é suficiente para que se obtenha o que Bunge denomina de modelo teórico (ou teoria específica)⁶. É preciso que o modelo conceitual seja acolhido por uma teoria geral, ou melhor, por “um corpo de ideias no seio do qual se possa estabelecer relações dedutivas” (*Ibid.*, p. 23). Veja-se o exemplo da Teoria Cinética dos Gases. Essa teoria específica resulta do modelo de gás ideal⁷ que, à luz da Mecânica Estatística Clássica⁸, possibilita a dedução de uma série de resultados, tais como: a equação de estado e as distribuições de velocidades das moléculas de um gás ideal. Além disso, a Teoria Cinética dos Gases pode estimar valores para os calores específicos de alguns gases reais, o que a torna passível de contrastação empírica.

Em suma, o processo de modelagem científica reside no fato de que teorias gerais, que em princípio não se pronunciam diretamente sobre a realidade, ao acolherem modelos conceituais, produzem representações de parte da realidade, ou seja, modelos teóricos que fornecem soluções a situações-problema particulares. Segundo Bunge, no processo de modelagem:

⁶ Daqui para frente, os termos ‘modelo teórico’ e ‘teoria específica’ serão empregados como sinônimos.

⁷ O modelo (conceitual) de gás ideal está sendo entendido como um conjunto de hipóteses sobre a composição da matéria no estado gasoso.

⁸ A Mecânica Estatística Clássica está sendo entendida como uma teoria geral que não se pronuncia sobre a natureza dos elementos que constituem o sistema envolvido.

[...] deve-se distinguir as seguintes construções: o objeto-modelo m representando os traços-chave (ou supostos-chave) de um objeto concreto r (ou suposto concreto); o modelo teórico T_s especificando o comportamento e/ou o(s) mecanismo(s) interno(s) de r por meio de seu modelo m ; e a teoria geral T_g acolhendo T_s (e muitas outras) e que deriva seu valor de verdade bem como sua utilidade de diversos modelos teóricos que podemos construir com o seu auxílio – mas jamais sem suposições e dados que a extravasam e recolhidos pelo objeto-modelo m (*Ibid.*, p. 25).

Entretanto, é preciso dizer que diversas áreas do conhecimento humano não possuem (ou nem sempre possuíram) teorias gerais. Para Bunge, a ausência de teorias gerais e abstratas em certas áreas do conhecimento indica a falta e/ou a dificuldade de uma desejável maturidade teórica. Nesses casos, a construção de modelos teóricos (ou teorias específicas) inicia-se pelo extremo oposto, ou seja, a partir de algumas hipóteses muito próximas dos dados empíricos oriundos da observação e da experimentação. Esse é um dos motivos pelo qual se optou pelas ideias de Bunge sobre modelos científicos, haja vista que a Física é um corpo de conhecimento bem estabelecido, no seio do qual há várias teorias gerais igualmente bem estabelecidas e que podem ser úteis quando se pensa em modelagem científica com fins didáticos. O Quadro 1, inspirado em Bunge, ilustra o processo de modelagem de algumas situações de interesse em Física (*Ibid.*, p. 35).

Quadro 1 – Situações e construtos envolvidos no processo de modelagem em Física, na concepção de Bunge (BRANDÃO; ARAUJO; VEIT, 2008a).

Situação a ser modelada	Objeto-modelo	Teoria geral	Modelo teórico
Escoamento da água no interior de uma tubulação	Fluido contínuo sem viscosidade	Mecânica dos Fluidos	Modelo de fluido ideal
	Fluido contínuo com viscosidade		Modelo de fluido viscoso
Certa quantidade de gás contida num recipiente fechado	Sistema de partículas, termicamente isolado, que interagem via colisões perfeitamente elásticas	Mecânica Estatística e Mecânica Clássica	Modelo de gás ideal clássico
		Mecânica Estatística e Mecânica Quântica	Modelo de gás ideal quântico
Comportamento da matéria em nível microscópico	Sistema planetário	Mecânica Clássica e Eletromagnetismo	Modelo atômico de Rutherford

Situação a ser modelada	Objeto-modelo	Teoria geral	Modelo teórico
Movimento dos planetas do Sistema Solar		Mecânica Clássica	Modelo gravitacional de Newton

Como se pode intuir pelo Quadro 1, em Física, existem tantos modelos conceituais quantas forem as idealizações e os objetivos a serem almejados. Com isso, são muitos os modelos teóricos para representar a realidade. A construção de modelos teóricos é uma atividade de criação que depende, entre outras coisas, do tipo de conhecimento disponível sobre o sistema físico, sem falar das idiossincrasias (habilidades e preferências intelectuais) do cientista. Os modelos teóricos diferem basicamente quanto ao tipo de hipótese que formulam acerca do sistema que pretendem representar. Enquanto alguns modelos se limitam a previsões sobre o comportamento global do sistema, outros formulam hipóteses a respeito dos mecanismos mais internos (diretamente inacessíveis) do sistema. Enquanto aqueles pouco se distanciam dos dados empíricos, esses podem prever fenômenos desconhecidos. Enquanto os primeiros permanecem isolados da massa de conhecimento, os segundos estabelecem conexões com outras teorias e áreas do conhecimento. Nesse último caso, é possível extrapolar o modelo para situações além das quais foi inicialmente construído (MAOR, 1972).

Veja-se o exemplo de Bunge (1974) sobre a Teoria de Bloch para o estado sólido. Inicialmente, com base num conjunto de hipóteses sobre a constituição de um corpo cristalino, Bloch formulou um modelo conceitual do cristal. À luz da Mecânica Quântica, esse modelo conceitual forneceu explicações para algumas propriedades da maioria dos cristais, a saber: as condutividades elétrica e térmica e a susceptibilidade magnética. Além disso, embora não tivesse previsto, o modelo teórico resultante pôde explicar a diferença entre materiais isolantes, semicondutores e condutores em termos das bandas de energia no interior do cristal. Em suma, hipóteses formuladas por alguns modelos são mais ousadas, pois supõem a existência de um mecanismo interno ao sistema. Entretanto, para que sejam corroboradas, é preciso que forneçam explicações de comportamentos já conhecidos, estejam de acordo com grande parte do conhecimento já estabelecido e prevejam novos acontecimentos.

Ainda sobre a construção de modelos conceituais, Bunge nos ensina que, no processo de idealização, pode-se: (a) elaborar um único objeto-modelo com a finalidade de representar toda uma classe de objetos concretos; ou (b) esquematizar um único objeto concreto através de diversos modelos conceituais. Ou seja, mode-

los conceituais podem representar tanto um conjunto de objetos quanto apenas um objeto real, ou suposto como tal. Diferentes representações conduzem a diferentes modelos: cada um levando em conta alguns aspectos negligenciados pelos demais. A Fig. 1 ilustra de forma esquemática as duas possibilidades.

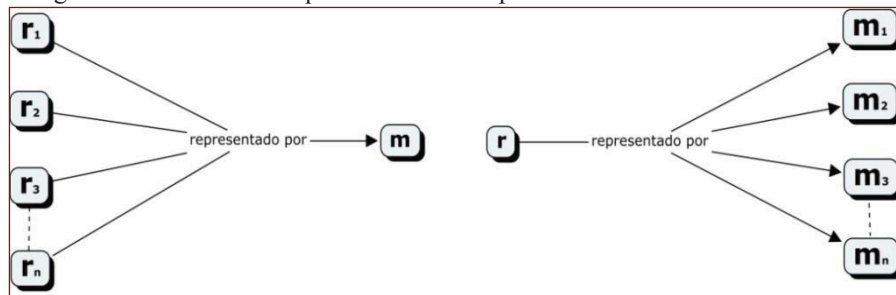


Fig. 1 – À esquerda, n objetos concretos (r) distintos sendo representados por apenas um modelo conceitual (m); à direita, um objeto concreto (r) sendo representado por n modelos conceituais (m) distintos.

Para exemplificar a situação à direita na Fig. 1, tomar-se-á como exemplo o movimento de translação da Terra ao redor do Sol. Para representar o sistema Terra-Sol, poder-se-ia concebê-lo através de um modelo conceitual de partícula em movimento circular. Embora se saiba que a Terra não descreve uma trajetória circular, mas aproximadamente elíptica ao redor do Sol, essa poderia ser uma primeira representação caso o interesse fosse avaliar a sua velocidade de escape, ou seja, a velocidade mínima que a Terra deveria possuir para escapar do campo gravitacional criado pelo Sol. Porém, se o objetivo fosse estudar os fenômenos das estações do ano e dos eclipses (solares e lunares), parece claro que esse modelo não seria mais útil. Um modelo capaz de representar a Terra como um corpo (esfera) rígido pareceria mais interessante. Agora, suponha que se deseje estudar as condições do clima na Terra. De novo, parece clara a insuficiência desses modelos para dar conta, ainda que de forma simplificada, do problema que se pretende resolver. É preciso complicá-los, isto é, atribuir à Terra propriedades até então negligenciadas pelos modelos anteriores.

Porém, permita que se reflita um pouco mais sobre o modelo que poderia ser construído para estudar as estações do ano e os eclipses. Na medida em que fosse atribuído ao globo terrestre um formato tridimensional e não mais de partícula, estar-se-ia fazendo uma idealização que implicaria algum tipo de aproximação matemática, a fim de facilitar os cálculos. A diferença entre idealizações e aproxi-

mações é bastante sutil em se tratando de modelagem científica (PORTIDES, 2007). Vejam-se dois exemplos na tentativa de esclarecer esse ponto:

Primeiramente, considere o movimento de queda de um corpo próximo à superfície da Terra, e a seguinte suposição inicial: o ar deve ser considerado um fluido em repouso. Nesse caso, a suposição pode ser encarada como uma idealização do modelo que pretende representar conceitualmente o sistema físico em questão. E por quê? Exatamente por ter sido imaginada no início da formulação do problema. As idealizações constituem o passo inicial na construção de um modelo conceitual de um sistema (ou classe de sistemas). Já as aproximações são simplificações na tentativa de facilitar os cálculos de um sistema previamente idealizado, seja pela incapacidade das técnicas matemáticas, seja pelos objetivos almejados. Com isso, não se quer dizer que as idealizações não venham a facilitar os cálculos, senão que elas são pensadas inicialmente. Em última análise, tanto as idealizações quanto as aproximações são simplificações de algum referente real. Contudo, as idealizações estão mais relacionadas com a constituição do sistema a ser modelado. Enquanto que as aproximações, se necessárias, viriam depois e estariam mais relacionadas à simplificação dos cálculos para a obtenção de resultados teóricos melhor interpretáveis.

Veja-se, agora, o exemplo do pêndulo simples. Um pêndulo simples é um modelo conceitual que consiste de uma massa pontual m oscilando em torno de uma posição de equilíbrio, suspensa por um fio inextensível de comprimento l e massa desprezível. Sob o ponto de vista da Mecânica Clássica, este esquema conceitual dá origem a um modelo teórico baseado numa equação diferencial de segunda ordem que descreve o movimento oscilatório do sistema. Além disso, dadas as condições iniciais e os parâmetros do pêndulo, é possível calcular seu período, ou seja, o tempo transcorrido para que o sistema descreva uma oscilação completa. Em geral, o período do pêndulo simples depende da amplitude do movimento. Entretanto, se o pêndulo oscila com pequenas amplitudes, é possível aproximar $\sin\theta \approx \theta$ na equação diferencial que descreve seu movimento. Nesse caso, o período do pêndulo independe da amplitude do movimento, fato que foi descoberto por Galileu e batizado de isocronismo das pequenas oscilações (MATTHEWS, 2004; NOLA, 2004).

Como já foi dito, o processo de modelagem não está restrito à construção de modelos conceituais. É preciso formular teorias específicas a fim de submetê-las à corroboração empírica e avaliar seu domínio de validade (KOPONEN, 2007). Com isso, torna-se evidente a incapacidade tanto dos modelos conceituais quanto das teorias gerais de propiciarem, mesmo que se refiram a fatos supostamente reais, soluções para casos particulares. Assim, o conhecimento sobre a realidade

pode ser incrementado de dois modos: (a) é preciso multiplicar cada vez mais o número de modelos teóricos, cada qual focalizando diferentes aspectos da realidade; e (b) aperfeiçoar os modelos teóricos já existentes, de modo a obter descrições cada vez melhores (fidedignas) do mundo em que vivemos. A Fig. 2 ilustra de forma esquemática o que, segundo Bunge, de algum modo, costuma se fazer em Ciência teórica fatual.

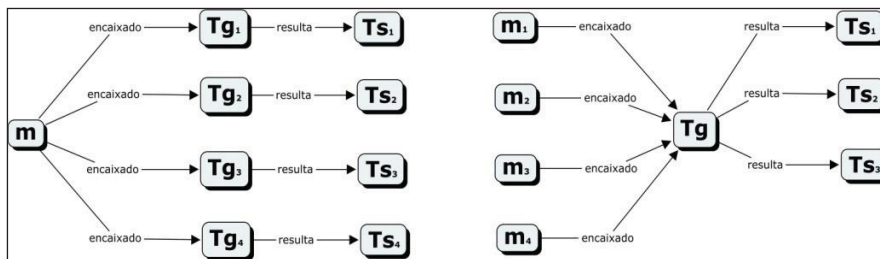


Fig. 2 – À esquerda, um modelo conceitual (m) acolhido por quatro teorias gerais distintas (Tg_1, Tg_2, Tg_3, Tg_4) resulta em quatro teorias específicas ou modelos teóricos (Ts_1, Ts_2, Ts_3, Ts_4) distintos; à direita, quatro modelos conceituais (m_1, m_2, m_3, m_4) acolhidos pela mesma teoria geral (Tg) resultam em três teorias específicas (Ts_1, Ts_2, Ts_3). O número de teorias gerais (à esquerda) e de modelos conceituais (à direita) é meramente ilustrativo. Além disso, nem todo modelo conceitual dá origem a um modelo teórico.

Para ilustrar a situação à direita da Fig. 2, suponha que o interesse seja o de estudar o comportamento de um fluido real escoando no interior de um tubo cilíndrico. Se o objetivo for estabelecer relações entre grandezas físicas macroscópicas, pode-se optar por uma descrição em que o fluido possa ser representado por um meio contínuo. Nesse caso, qualquer elemento de fluido, não importando seu volume, deverá conter um número muito grande de moléculas. Em outros termos, o elemento de volume do fluido deve ser muito menor que as dimensões do sistema físico, porém muito maior que as típicas distâncias intermoleculares. Além disso, a representação poderá ou não levar em consideração efeitos da viscosidade (atrito interno) e de condução térmica do fluido, isto é, poder-se-á optar por construir um modelo de fluido ideal ou um modelo de fluido viscoso. Para obter um modelo teórico capaz de descrever a situação real, que atenda aos objetivos, estes modelos devem ser acolhidos pela Mecânica dos Fluidos. Nesses casos, como se sabe, será possível obter as equações básicas que governam o escoamento do fluido, ou seja, os respectivos modelos teóricos.

Não obstante, Bunge aprofunda seu entendimento sobre o processo de modelagem científica, ao afirmar que os modelos teóricos, além de representarem, têm a função de simular a realidade mediante à inferência de mecanismos hipotéticos internos (hipóteses não-observáveis), que possibilitam não só explicar uma série de dados, como também “o que o cientista denomina de interpretação dos mesmos dados” (BUNGE, 1974, p. 84). O adjetivo ‘hipotético’ para o mecanismo a ser inferido tem um significado bastante preciso para Bunge. Ele indica a necessidade de abastecer os sentidos perceptivos com conhecimento teórico a fim de aprofundar a visão sobre a realidade. Em suma,

Para apreender o real começa-se por afastar-se da informação. Depois, se lhe adicionam elementos imaginários (ou antes hipotéticos) mas com uma intenção realista. Constitui-se assim um objeto-modelo mais ou menos esquemático e que, para frutificar deverá ser enxertado sobre uma teoria suscetível de ser confrontada com os fatos (Ibid., p. 16).

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

III. Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud⁹

Nesta seção, far-se-á uma breve exposição da Teoria dos Campos Conceituais (TCC) de Gérard Vergnaud (1990, 1993), levando em conta as ideias de Weil-Barais e Vergnaud (1990) sobre concepções em Física, para dar sentido à tese defendida e a suas implicações para o Ensino de Física e para a pesquisa nessa área.

⁹ O psicólogo francês Gérard Vergnaud doutorou-se em 1968, sob orientação de Jean Piaget, defendendo a tese intitulada *A resposta instrumental como solução de problema*. Atualmente, é diretor emérito de estudos do Centro Nacional de Pesquisas Científicas (CNRS, em francês), em Paris.

A TCC se ocupa do estudo de atividades cognitivas complexas, especialmente as que dependem ou estão envolvidas na aquisição de conhecimentos matemáticos, científicos e técnicos (VERGNAUD, 1990, 1993). Por ser uma construção teórica de natureza psicológica, cognitivista e pragmática, a TCC atribui ao conhecimento a função primeira de apoiar a ação do sujeito nas situações¹⁰ com as quais ele se confronta. Nesse sentido, “um dos problemas da psicologia cognitiva é o de reconstruir os conhecimentos implícitos na ação” (VERGNAUD, 1996, p. 14).

Como nem sempre somos capazes de fazer o que sabemos explicitar, ou explicitar o que sabemos fazer, “um dos problemas do ensino é desenvolver, ao mesmo tempo, a forma operatória do conhecimento, isto é, o saber-fazer, e a forma preditiva do conhecimento, isto é, saber explicitar os objetos e as suas propriedades” (*Ibid.*, p. 13). Explicitar os objetos do mundo, suas propriedades, relações e transformações é o que Vergnaud (2007) entende por conceitualização do real, quer a identificação resulte de uma percepção direta ou quase direta, quer de uma construção.

Os processos de conceitualização do real são tidos como atividades cognitivas que resultam na aquisição de conhecimentos a curto e a longo prazos. A curto prazo, esses processos cognitivos organizam as percepções, as representações e a conduta do sujeito em atividade. A longo prazo, são responsáveis pelas concepções e competências desenvolvidas pelo indivíduo em interação adaptativa com as situações que vivencia no curso de sua experiência (FRANCHI, 1999).

Segundo Weil-Barais e Vergnaud (1990), o termo ‘concepção’ inclui, em certo sentido, os significados e os significantes, cientificamente aceitos ou não, associados aos conceitos de um domínio de conhecimento, de modo consciente ou inconsciente, pelo sujeito que deseja aprendê-los. Já as competências estão relacionadas às ações do sujeito para lidar com as situações (FRANCHI, 1999).

A TCC parte do pressuposto de que o conhecimento está organizado em campos conceituais que podem ser entendidos como unidades de estudo frutíferas para dar sentido às dificuldades observadas nos processos de conceitualização do real nas mais diversas atividades humanas (VERGNAUD, 1983, p. 393). Mais precisamente, campo conceitual é, para Vergnaud, “um conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e ope-

¹⁰ Segundo Escudero, Moreira e Caballero (2003), o conceito de situação na TCC é suficientemente abrangente para incluir “problemas, tarefas, perguntas, tanto as tradicionalmente escolares, como as que estão fora desse âmbito na condição de que permitam levar os estudantes a interrogarem-se sobre determinadas relações complexas e especialmente sobre a coerência do sistema em estudo” (p. 203).

rações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição” (VERGNAUD, 1982, p. 40).

A justificativa de Vergnaud para a tese dos campos conceituais se apoia em três argumentos: (a) um conceito não se forma dentro de um só tipo de situação; (b) uma situação não se analisa com um só conceito; e (c) a construção e apropriação de todas as propriedades de um conceito ou de todos os aspectos de uma situação é um processo de larga duração, com avanços e retrocessos entre situações, concepções e competências (VERGNAUD, 1983).

Na Matemática, Vergnaud se interessou pelos campos conceituais das estruturas aditivas e multiplicativas (VERGNAUD, 1994, 1997). Segundo ele, o campo conceitual das estruturas aditivas é, ao mesmo tempo, o conjunto das situações e dos esquemas de pensamento que envolvem as operações de adição e subtração, e dos conceitos e teoremas que permitem abordar tais situações como tarefas matemáticas. A mesma ideia se aplica ao campo conceitual das estruturas multiplicativas.

Em Física, Vergnaud se interessou pelos campos conceituais da Mecânica (WEIL-BARAIS; VERGNAUD, 1990) e da Eletricidade (VERGNAUD, 1993). O campo conceitual da Eletricidade, por exemplo, pode ser entendido como o conjunto de situações e esquemas de pensamento que organizam as ações do sujeito nesta área. Por outro lado, esse mesmo campo conceitual também diz respeito à análise e à dissociação dos conceitos de intensidade de corrente elétrica, diferença de potencial, resistência elétrica, energia elétrica, etc.

A dupla análise de um mesmo campo conceitual em termos de situações e de “esquemas de pensamento”, por um lado, e de conceitos como objetos de pensamento, por outro lado, dão conta das duas formas do conhecimento, operatória e preditiva (VERGNAUD, 2007, p. 36).

A TCC supõe, ainda, que a aprendizagem de novos conhecimentos depende dos problemas e das situações previamente dominados pelo sujeito, conferindo ao processo de construção do conhecimento um caráter contextual (VERGNAUD, 1996). Em função disso, muitas das nossas concepções estão relacionadas às primeiras situações que fomos capazes de dominar ou à nossa experiência tentando modificá-las (*Ibid.*, p. 117). Nesse sentido, os novos conhecimentos podem ser entendidos como concepções e competências necessárias para lidar com novas situações ou com situações previamente dominadas a partir de um novo olhar.

Nessa perspectiva teórica, as concepções que o sujeito dispõe para lidar com situações previamente dominadas podem ser compatíveis com a construção de novos conceitos e, por isso, consideradas como precursores cognitivos, ou podem

ser incompatíveis, a ponto de constituírem-se em obstáculo epistemológico à introdução de certo conceito novo. Mas há, também, concepções que podem ser vistas como vieses cognitivos para a construção de novos conceitos, em vez de serem consideradas errôneas (WEIL-BARAIS; VERGNAUD, 1990).

Concepções que conduzem o sujeito a dar respostas sistemáticas que diferem das esperadas a certas classes de situações e problemas podem ser vistas como vieses cognitivos, que se manifestam por meio de certas regularidades e que podem ser observadas a partir das respostas elaboradas às situações propostas.

Weil-Barais e Vergnaud (1990) apontam que há concepções em Física que atuam como vieses cognitivos na compreensão de significados atribuídos a conceitos físicos como, por exemplo, o de calor e de força. No dia a dia, esses conceitos são vistos, em geral, como propriedades dos corpos. Já em Física, calor e força são concebidos como entidades físicas que representam interações entre dois ou mais objetos de um ou mais sistemas físicos. O viés cognitivo, nesse caso, está associado a um processo de pensamento que consiste na preservação do significado atribuído a um conceito físico em diferentes contextos, e que se percebe como um invariante operatório inadequado para lidar com certas classes de situações e problemas (*Ibid.*, p. 72). Segundo esses autores, alguns pesquisadores tratam essa questão como um problema de definição, ou relacionado ao vocabulário ou ainda como sendo uma dificuldade de aquisição de sistemas gráficos e matemáticos formalizados, o que acaba por reduzir o processo de formação de conceitos a uma espécie de jogo de símbolos.

O Quadro 2 mostra alguns exemplos de invariantes operatórios, detectados em estudos recentes, que parecem estar atuando como precursores ou vieses cognitivos, ou ainda como obstáculo epistemológico à compreensão de novos conceitos e ao tratamento de certas classes de situações, em diferentes campos conceituais da Física.

Quadro 2 – Campo conceitual, conceitos envolvidos e diferentes tipos de invariantes operatórios para lidar com certas classes de situações tradicionalmente tratadas no Ensino de Física, investigadas em estudos recentes.

Campo conceitual	Conceito	Invariante operatório		
		Precursor cognitivo	Viés cognitivo	Obstáculo epistemológico
Física Atômica (GRECA; MOREIRA, 2002)	Sistema Atômico, Estado do Sistema,			Estado do sistema antes de uma medida é igual ao estado

	Medida, Nível de Energia			do sistema após uma medida.
Cinemática (ESCUADERO; MOREIRA; CABALLERO, 2003)	Sistema de Referência, Velocidade e Aceleração		O primeiro sistema de referência é o observador juntamente com o seu entorno e sua bagagem cultural.	
			Se um móvel tem velocidade (ou rapidez) em um determinado instante é porque ele já vinha movimentando-se em certo intervalo de tempo anterior.	
			Se a aceleração de um móvel é negativa, ele vai voltar.	
Termodinâmica (GRINGS; CABALLERO; MOREIRA, 2008)	Calor e Temperatura		Ocorre transferência de calor somente quando os corpos estão encostados.	
			É sempre necessária uma fonte de calor para aumentar a temperatura de um corpo.	
Mecânica (COVALEDA; MOREIRA; CABALLERO, 2009)	Sistema e equilíbrio	Sistema como um conjunto de elementos que interagem entre si.		
		Sistema como uma parte do universo cujo comportamento e suas interações se quer estudar.		

		Equilíbrio como um estado de um corpo ou de um sistema no qual a força resultante que atua sobre o sistema é igual a zero.		
		Equilíbrio como um estado em que se cumprem condições ou regras para que em um corpo, sistema, partícula ou matéria não haja perturbação e seu estado permaneça inalterado.		

A TCC considera o processo de formação de conceitos em três níveis. Para Vergnaud, os conceitos devem ser entendidos como um tripleto de conjuntos, $C = (S, I, R)$, em que: S é o conjunto de situações que dão sentido ao conceito C ; I é o conjunto de invariantes (objetos, propriedades e relações) que permite aos sujeitos operacionalizarem o conceito, de modo a lidar com as situações que compõem o conjunto S ; e R é o conjunto de representações simbólicas necessárias para indicar e representar o conjunto I de invariantes e, por consequência, as situações que dão sentido ao conceito. O primeiro conjunto, de situações, é o referente do conceito. O segundo, de invariantes operatórios, é o significado do conceito. Já o terceiro, de representações simbólicas, é o significante do conceito (VERGNAUD, 1983). Em termos psicológicos, o conjunto S é a realidade e os conjuntos I e R a representação desta realidade.

Entretanto, o sentido atribuído aos conceitos não está propriamente nas situações nem mesmo na representação simbólica destes conceitos. O sentido está na interação do sujeito com as situações e com os significantes. Em outras palavras, são os esquemas utilizados pelo sujeito frente às situações ou aos significantes que dão sentido a ambos para este sujeito. Além disso, uma determinada situação ou representação simbólica não é capaz de evocar todos os esquemas disponíveis no repertório do sujeito para tratar com aquela situação ou representação em particular. Mais precisamente, Vergnaud entende um esquema como “uma organização

invariante do comportamento para uma classe de situações determinada” (VERGNAUD, 1996, p. 201). O conceito piagetiano de esquema torna-se, assim, fundamental na teoria dos campos conceituais, uma vez que o desenvolvimento cognitivo consiste, basicamente, do repertório de esquemas que o sujeito tem à sua disposição para enfrentar uma determinada quantidade de situações, tratando-as como problemas passíveis de serem resolvidos. Nesse sentido, a tarefa mais importante do professor é a de “fornecer oportunidades para as crianças desenvolverem seus esquemas potenciais na zona de desenvolvimento proximal” (VERGNAUD, 1998, p. 181).

Para Vergnaud, os esquemas estão intrinsecamente ligados às situações (ou classes de situações). Assim, ele distingue entre:

(a) classes de situações em que o sujeito dispõe, no seu repertório, em dado momento de seu desenvolvimento e sob certas circunstâncias, das competências necessárias ao tratamento relativamente imediato da situação; e (b) classes de situações em que o sujeito não dispõe de todas as competências necessárias, o que o obriga a um tempo de reflexão e exploração, a hesitações, a tentativas frustradas, levando-o, eventualmente, ao sucesso ou ao fracasso (VERGNAUD, 1993, p. 2).

O conceito de esquema diz respeito às duas classes de situações. Contudo, seu modo de funcionamento difere de uma classe para a outra. No primeiro caso, é possível observar um único esquema de organização do comportamento, amplamente automatizado, dando conta de determinada classe de situações. Já no segundo caso, observa-se o uso de vários esquemas na tentativa de alcançar a solução esperada. Nesse processo, que pode resultar numa competição de esquemas, os mesmos sofrem contínuas acomodações, descombinações e recombinações. Segundo Moreira (2004):

Está aí a ideia piagetiana de que os esquemas estão no centro do processo de adaptação das estruturas cognitivas, isto é, na assimilação e na acomodação. Contudo, Vergnaud dá ao conceito de esquema um alcance muito maior do que Piaget e insiste em que os esquemas devem relacionar-se com as características das situações às quais se aplicam (p. 13-14).

Embora o conceito de esquema possua definição precisa na teoria de Vergnaud é necessário aprofundar sua discussão, senão pela importância teórica que possui no vínculo entre o comportamento e a representação, pelo simples fato de que “é nos esquemas que se devem pesquisar os conhecimentos-em-ação do sujeito, isto é, os elementos cognitivos que fazem com que a ação do sujeito seja

operatória” (VERGNAUD, 1993, p. 2). Esses conhecimentos contidos implicitamente nos esquemas são designados pelos termos *conceito-em-ação* e *teorema-em-ação*. São também conhecidos pela expressão geral ‘invariantes operatórios’. “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). Os invariantes operatórios contidos nos esquemas são responsáveis pelo reconhecimento dos elementos relevantes à situação. A partir dessa informação, é possível inferir a meta a ser atingida e as regras de ação necessárias para tal fim. Entretanto, os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação não são tidos como verdadeiros conceitos e teoremas científicos. Para que adquiram *status* de conhecimento científico, precisam ser explicitados, compartilhados e avaliados quanto à sua pertinência e veracidade, respectivamente. Esse não é o caso dos invariantes operatórios que, na maioria das vezes, permanecem totalmente implícitos nos esquemas disponíveis do sujeito.

Cabe ao Ensino de Ciências facilitar a transformação desse conhecimento implícito em conhecimento explícito, e cientificamente aceito, o que não ocorre de maneira abrupta e que, de forma alguma, é tarefa das mais simples. O professor e a interação social entre alunos desempenham papéis fundamentais nesse processo de explicitação e compartilhamento do conhecimento (MOREIRA, 2004).

IV. A modelagem científica vista como um campo conceitual em Física

De modo geral, a Física faz uso de modelos científicos para representar a realidade. Estes, por sua vez, fazem uso de representações simbólicas e de elementos conceituais, tais como os conceitos de sistema, estado, interação, transferência, conservação, etc. (WEIL-BARAIS; VERGNAUD, 1990). Portanto, a compreensão dos conhecimentos em Física depende da habilidade que o sujeito possui para manipular representações simbólicas e para identificar aspectos conceituais intrínsecos ao domínio conceitual deste conhecimento.

Seguindo essa linha de raciocínio, o presente artigo parte da premissa de que o processo de modelagem científica permeia toda a Física e, por conseguinte, que os elementos conceituais necessários para o seu domínio desempenham um papel fundamental nas explicações científicas (GILBERT; BOULTER; RUTHERFORD, 1998a, 1998b). Consequentemente, as explicações dos estudantes e professores devem conter invariantes operatórios de caráter geral, que podem estar associados aos conceitos de modelo e de modelagem científica em Física, e de caráter específico, que podem estar associados aos conceitos de idealização, aproximação,

referente, variável, parâmetro, domínio de validade, grau de precisão, expansão e generalização de modelos científicos.

Esses conceitos e suas relações, concebidos como uma estrutura conceitual de referência associada à noção de modelo e ao processo de modelagem científica, juntamente com os esquemas de pensamento que organizam as ações do sujeito em situações de modelagem, compõem o que se entende por campo conceitual da modelagem científica em Física, como mostra a Fig. 3 (BRANDÃO; ARAUJO; VEIT, 2010).

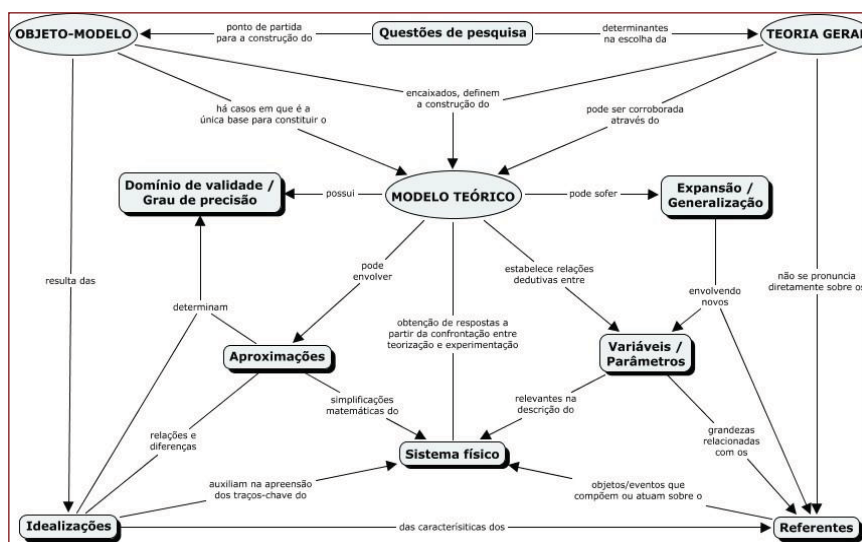


Fig. 3 - Estrutura conceitual de referência associada à noção de modelo e ao processo de modelagem científica em Física.

Para compreender o processo de modelagem científica em Física, é fundamental, portanto, que o sujeito domine um conjunto de situações e problemas que requerem, por sua vez, o domínio de conceitos específicos, de naturezas distintas, porém inseparáveis da noção de modelo e do processo de modelagem científica em Física.

À luz da Teoria dos Campos Conceituais, a modelagem científica em Física pode, então, ser vista como um campo conceitual constituído:

- pelo conjunto S de situações que dão sentido aos conceitos associados à noção de modelo e ao processo de modelagem científica em Física; ou se-

ja, o conjunto de situações que podem ser analisadas e solucionadas por meio da construção e/ou exploração de uma versão, mais ou menos didática, de um modelo científico, capaz de aproximar teoria e realidade, e de dar sentido às dificuldades observadas no processo de conceitualização do real, no contexto da Física;

- pelo conjunto *I* de invariantes operatórios de caráter geral, associados à noção de modelo e ao processo de modelagem científica em Física, e de caráter específico, associados aos conceitos da ECR, que podem ser reconhecidos e usados pelo sujeito para analisar as situações do primeiro conjunto, denominadas situações de modelagem em Física; e
- pelo conjunto *R* de representações simbólicas que podem ser usadas para indicar esses invariantes e, conseqüentemente, representar as situações e os procedimentos de modelagem para lidar com elas; este conjunto é fortemente dependente do campo conceitual específico da Física em que o sujeito esteja modelando.

Nessa perspectiva, não importa se os modelos didático-científicos são avançados ou introdutórios, se as situações do mundo real a que se referem são demasiadamente complexas ou não e se o sujeito que as modela é um estudante, professor ou cientista. O que muda, de um caso para o outro, são apenas os objetivos a serem alcançados. Seja no contexto científico ou educacional, a modelagem científica deve ser vista como uma ferramenta teórico-metodológica capaz de apoiar a ação do sujeito nas situações em que ele necessita, de alguma forma, aproximar teoria e realidade. No contexto educacional, tal ferramenta pode ser denominada de modelagem didático-científica.

O Quadro 3 apresenta quatro exemplos de invariantes operatórios de caráter geral, associados à noção de modelo e ao processo de modelagem científica em Física, e um de caráter específico para cada conceito que compõe a estrutura conceitual de referência da Fig. 3.

Quadro 3 – Exemplos de invariantes operatórios gerais e específicos.

Conceito	Invariante operatório
Modelo e modelagem científica	Formular questões sobre uma situação física a serem respondidas pela construção e/ou exploração de um modelo científico.
	Decidir que tipo de representação construir para responder às questões formuladas.

	Representar a situação física de modo esquemático e à luz de algum campo conceitual específico da Física.
	Analisar a razoabilidade dos resultados obtidos com a versão do modelo científico construído e/ou explorado por meio da busca de suportes empíricos e/ou racionais.
Referente	Delimitar objetos e eventos reais, ou supostos como tais, que compõem o sistema físico e sua vizinhança e que serão alvo de representação.
Idealização	Dado um sistema físico, decidir quais dos seus traços-chave apreender.
Aproximação	Dado um sistema físico previamente idealizado, decidir quais simplificações matemáticas serão assumidas, tais como: desprezar efeitos que são pequenos, considerar relações lineares, desprezar ruídos, etc.
Variável	Identificar quais variáveis são necessárias para representar o sistema físico e quais delas podem assumir valores numéricos contínuos e quais discretos.
Parâmetro	Identificar quais os parâmetros fixos no tempo e quais os variáveis.
Domínio de validade	Identificar um fenômeno como sendo o caso limite de outro.
Grau de precisão	Dada uma idealização, avaliar qualitativa e quantitativamente o erro por ela introduzido no modelo.
Expansão	Incluir novos referentes, variáveis, parâmetros, relações e conceitos físicos, a fim de obter resultados mais precisos e/ou melhor interpretáveis com o modelo.
Generalização	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 invariantes operatórios apresentados no Quadro 3 são exemplos de conhecimentos acerca dos modelos e da modelagem científica em Física que devem ser postos em ação pelo sujeito, em situação de modelagem, com o intuito de reconhecer os elementos pertinentes à situação a ser representada. Eles constituem a base conceitual, implícita ou explícita, que permite selecionar as informações relevantes, inferir o objetivo a ser alcançado e os procedimentos mais adequados durante o processo de modelagem.

Vejamos um exemplo de situação-problema em Física, com o intuito de exemplificar o uso de alguns dos invariantes operatórios acima mencionados, que estudantes e professores deveriam evocar em situação de modelagem, bem como a

forte dependência das representações com o campo conceitual específico da Física em que a situação é modelada.

Suponha que estejamos interessados em analisar a estabilidade do Sistema Solar, em particular do sistema Sol-Terra-Lua. Portanto, o Sol, a Terra e a Lua constituem-se nos referentes do modelo construído para analisar a estabilidade deste sistema de três corpos. Sabemos que o Sol possui uma massa cerca de 300.000 vezes maior do que a da Terra e que a distância Sol-Lua é aproximadamente 400 vezes maior do que a distância Terra-Lua (SILVEIRA, 2000). A primeira idealização feita sobre esse sistema aparece implicitamente na própria formulação do problema. Na medida em que o foco passa a ser a estabilidade do sistema Sol-Terra-Lua, estamos desconsiderando a atração gravitacional entre cada um desses corpos e o restante do Universo. Com isso, ao considerarmos somente a atração mútua entre Sol, Terra e Lua, estamos realizando um ‘recorte da realidade’, a fim de delimitarmos nosso objeto de estudo. Os cientistas fazem isso a todo instante porque são incapazes de fornecer respostas para o todo. Além disso, para que possamos avaliar a estabilidade desse sistema previamente idealizado, é preciso adotar um referencial adequado. E o podemos fazer fixando o Sol na origem do sistema de coordenadas, visto que os três corpos podem ser considerados como partículas pontuais e que $M_{Sol} \gg (M_{Terra} + M_{Lua})$. Essa aproximação implica o fato de que as acelerações produzidas pela Terra e pela Lua sobre o Sol são desprezíveis, se comparadas às acelerações produzidas por esse último sobre as primeiras. Para os nossos objetivos, o Sol pode ser considerado um referencial inercial em relação ao qual Terra e Lua estão aceleradas. Outra aproximação importante é a seguinte: como a dimensão do sistema Terra-Lua (distância entre elas) é muito menor do que sua distância ao Sol, as forças gravitacionais que atuam sobre a Terra e a Lua, devidas à presença do Sol, são praticamente as mesmas, tanto em intensidade quanto em orientação. Assim, o sistema Terra-Lua permanece inalterado, o que equivale a considerar o campo gravitacional criado pelo Sol como uniforme. Resumindo, tanto a Terra quanto a Lua estão submetidas à mesma aceleração (em intensidade e orientação). Consequentemente, o movimento relativo do sistema Terra-Lua praticamente independe da influência do Sol, dependendo apenas das forças internas deste sistema.

Com base no que foi dito nesta seção, o campo conceitual da modelagem didático-científica em Física também pode ser entendido como o conjunto de atividades no Ensino de Física que visam à criação e/ou à exploração de versões didáticas de modelos científicos construídos pelos físicos. Tais atividades podem ser sintetizadas em três classes de situações, que são capazes de dar sentido aos conceitos da ECR que se quer introduzir. São elas: (a) atividades de modelagem com-

putacional: envolvendo teoria e simulação; (b) atividades de modelagem em laboratório de ensino: envolvendo teoria e experimento; e (c) atividades de modelagem computacional-experimental: envolvendo simulação e experimento acerca de sistemas, processos e fenômenos físicos.

V. Implicação para o Ensino de Física e para a pesquisa nessa área

Esta seção apresenta a principal implicação didática para o Ensino de Física e para a pesquisa nessa área da tese defendida na seção anterior. A importância de ambas reside nos seguintes fatos: (a) modelar em Física apresenta peculiaridades e dificuldades específicas que precisam ser levadas em consideração (GRECA; SANTOS, 2005); e (b) a natureza de tal processo, em sua essência, exige que o sujeito mobilize conhecimentos teóricos (de natureza preditiva) e metodológicos (de natureza operatória) que dispõe para representar sistemas, processos e fenômenos físicos do seu interesse.

V.1 Implicação didática para o Ensino de Física

A principal implicação didática para o Ensino de Física da tese de que a modelagem científica deve ser vista como um campo conceitual subjacente ao domínio de campos específicos da Física reside na questão das situações que costumam ser trabalhadas em sala de aula. Segundo Vergnaud (1993), “os processos cognitivos e as respostas do sujeito são função das situações com que ele se confronta” (p. 12). Ou seja, os esquemas de pensamento que os estudantes costumam evocar no contexto da sala de aula dependem fortemente das situações e do modo como os professores de Ciências costumam abordá-las.

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

a outra que, embora constituída de concepções alternativas, fornece explicações para muitas situações do dia a dia.

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

Nos últimos anos, a modelagem emergiu como uma estratégia didática da Física capaz de inserir conteúdos de natureza epistemológica, imbricados com os conteúdos de campos específicos, para favorecer a aquisição de concepções e competências associadas à natureza e à construção do conhecimento científico mais adequadas à atividade científica contemporânea, cuja essência está na criação e na validação de modelos científicos (BUNGE, 1974; ASTOLFI; DEVELAY, 1995; PATY, 1995). Nesse sentido, Cupani e Pietrocola (2002) apontam para o fato de que:

Boa parte das críticas lançadas ao longo de décadas pelos estudantes aos seus professores consiste em que eles não veem utilidade naquilo que lhes é ensinado. Em se apresentando os conteúdos da ciência como forma de produzir e validar modelos para explicar porções do mundo, parte destas críticas pode ser minimizada. As teorias vistas com essa possibilidade modelizadora permitem apontar caminhos para a construção de representações não arbitrárias do mundo, de onde explicações podem ser produzidas (p. 121).

A maioria dos problemas que os estudantes estão acostumados a resolver em campos conceituais específicos da Física se limita à manipulação de expressões matemáticas relativas a um modelo teórico que, em geral, não são associadas às entidades físicas que, de fato, correspondem. Consequentemente, ao serem confrontados com situações de modelagem em Física, para as quais é preciso evocar esquemas de pensamento que contêm um ou mais dos invariantes operatórios apresentados como exemplo no Quadro 3, os estudantes costumam enfrentar dificuldades no processo de conceitualização do real.

No ‘ensino tradicional’, costuma-se alertar o estudante de que a realidade é demasiada complexa. Em seguida, justifica-se, por meio de argumentos didático-pedagógicos, que o conteúdo será introduzido através de situações altamente idealizadas com o intuito de que, em um futuro próximo, muitas vezes jamais alcançado, o estudante será capaz de compreender as situações mais realísticas. Com isso,

o estudante é alertado de que o assunto é complexo e de que ele só será capaz de compreender as situações mais simples naquele momento. Porém, não é dito, e sequer mostrado, o quão restrito é o domínio de validade do conhecimento que ele acaba de adquirir. Por isso, não raramente se escuta, por parte dos estudantes, o seguinte tipo de questionamento: “Em que situações eu posso aplicar essa equação, professor?”

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

V.2 Implicação para a Pesquisa em Ensino de Física

No contexto da Pesquisa em Ensino de Física, diversos estudos têm buscado interpretar seus resultados à luz da TCC, em diferentes campos conceituais específicos, tais como: *Conceito de Campo em Física Clássica* (LLANCAQUEO; CABALLERO; MOREIRA, 2003), *Gravitação* (STIPCICH; MOREIRA; SAHELICES, 2005), *Conceitos de Sistema e Equilíbrio em Mecânica* (COVALEDA; MOREIRA; CABALLERO, 2005), *Ondulatória* (BRAVO; PESA, 2005), *Termodinâmica* (GRINGS; CABALLERO; MOREIRA, 2006, 2008), *Relatividade Especial* (ARRIASSECQ; GRECA, 2006), *Dinâmica* (LOPES; COSTA, 2007), *Conceitos de Sistema e Equilíbrio em Mecânica e Termodinâmica* (COVALEDA; MOREIRA; CABALLERO, 2009), *Física de Partículas* (KREY; MOREIRA, 2009) e *Física Quântica* (FANARO; OTERO; ARLEGO, 2009).

Como pode-se constatar, esses estudos têm se ocupado de concepções associadas a campos específicos da Física, e não de concepções de caráter mais geral. Há, por certo, linhas de pesquisa mais gerais no Ensino de Física, como a de resolução de problemas, mas que costumam fundamentar-se na TCC para investigarem concepções específicas de um campo de conhecimento, como *Eletricidade* (SOUZA; FÁVERO, 2002) e *Cinemática* (ESCUDEIRO; MOREIRA; CABALLERO, 2003).

Por outro lado, desde o final do século passado, Weil-Barais e Vergnaud (1990) já chamavam a atenção para a presença de certos invariantes operatórios relacionados ao modo como os estudantes costumam interpretar experimentos em diferentes campos conceituais da Física. Ainda que esses modos de interpretação sejam fortemente dependentes das situações e, portanto, dos conteúdos de conhecimento envolvidos, Weil-Barais e Vergnaud (1990) apontam alguns aspectos comuns às explicações dos estudantes, que costumam: enfatizar as características perceptivas e relacionadas ao evento da situação: ações, movimentos e mudanças de aspectos (deformações, modificações na cor, etc.); descrever os vários elementos da situação em termos de suas propriedades e funções; conceber as interações entre os elementos de uma situação de modo assimétrico; compreender o evento, no tempo e no espaço, de modo sequencial. Tais modos de interpretação, que são fortemente relacionados ao evento da situação, ao invés de serem do tipo conceitual como é desejável em Física, conduzem, frequentemente, os estudantes a previsões que apresentam falhas.

Os autores argumentam, ainda, que diferentes enfoques teóricos têm sido propostos para explicarem a questão da persistência dessas concepções, mesmo em estudantes de níveis mais avançados. Em todos eles, a percepção visual desempenha um papel fundamental na construção do conhecimento por parte do sujeito. Apesar disso, Weil-Barais e Vergnaud (1990) apontam que poucas pesquisas haviam sido realizadas sobre o papel funcional dessas concepções e sobre as dificuldades e os modos pelos quais os estudantes constroem suas concepções em interação adaptativa com o contexto que os cerca.

É justamente sobre o papel funcional dos aspectos conceituais subjacentes às concepções de estudantes e professores acerca do processo de modelagem científica que reside a principal implicação para a Pesquisa em Ensino de Física da tese defendida na seção anterior. Como foi dito anteriormente, as explicações de estudantes e professores devem conter invariantes operatórios associados à noção de modelo e modelagem científica, que podem estar atuando como vieses ou precursores cognitivos para a aquisição de novos conhecimentos nos mais diversos campos conceituais específicos da Física. Portanto, é fundamental que eles sejam investigados quanto à sua natureza, às situações que costumam ser empregados e ao modo como podem evoluir ou acabar se constituindo em obstáculos epistemológicos à construção de novos conhecimentos.

Mas, para identificar as concepções de um estudante, seja como um viés ou como um precursor cognitivo, ou ainda como um obstáculo epistemológico, não basta uma abordagem exclusivamente psicológica. É preciso fazer referência aos conceitos, modelos, tipos de raciocínio e representações simbólicas da Física (WE-

IL-BARAIS; VERGNAUD, 1990). Isso significa adotar uma postura epistemológica acerca do conhecimento produzido nessa disciplina, a fim de compreender as dificuldades encontradas pelos estudantes e professores no processo de conceitualização do real nessa área do conhecimento. Este trabalho parte da premissa de que, no contexto da Física, os processos de conceitualização do real, por meio dos quais o sujeito se desenvolve cognitivamente, envolvem elementos que, em sua essência, fazem parte do processo de modelagem científica ou, em última instância, de um processo de mediação entre teoria e realidade.

VI. Conclusão

O presente artigo teve como objetivo apresentar e defender a tese de que o processo de modelagem científica pode ser visto como um campo conceitual subjacente ao domínio de campos conceituais específicos da Física. Além disso, pretendeu mostrar que essa ideia possui implicação didática relevante para o Ensino de Física e para a pesquisa nesta área.

No contexto do Ensino de Física, a principal implicação didática diz respeito à questão das situações que costumam ser trabalhadas em sala de aula, seja do Ensino Básico ou Superior. Em termos práticos, é preciso repensar o Ensino de Física no que diz respeito às atividades (e situações) que são propostas aos estudantes, se quisermos que eles desenvolvam esquemas de pensamento que contenham elementos conceituais envolvidos no processo de modelagem científica e que permeiam toda a Física.

Em razão disso, é desejável que os professores dediquem esforços no planejamento de atividades que favoreçam a aquisição de concepções e competências, por parte dos estudantes, associadas ao processo de modelagem científica no Ensino de Física. Tais atividades foram sintetizadas em três classes de situações, capazes de darem sentido aos conceitos que se quer introduzir e que serão discutidas detalhadamente em um próximo artigo, que enfoca o planejamento didático centrado no processo de modelagem visto como um campo conceitual. Essas atividades não têm como objetivo transformar os estudantes e professores em modeladores profissionais, mas sim o de favorecer a aquisição de concepções e competências associadas à modelagem científica em Física, por parte de ambos, levando em conta aspectos conceituais para o seu domínio que costumam permanecer largamente implícitos na aquisição de conteúdos de conhecimento em Física.

No contexto da Pesquisa em Ensino de Física, essas atividades acabam delimitando o campo conceitual da modelagem didático-científica como uma unidade de estudo frutífera para dar sentido às dificuldades enfrentadas por estudantes

e professores no processo de conceitualização do real nos mais diversos domínios de conhecimento da Física. Nesse sentido, a principal implicação da tese para a Pesquisa em Ensino de Física reside na possibilidade de investigar a natureza e como podem evoluir os invariantes operatórios que estudantes e professores evocam em situação de modelagem, ou seja, nas situações de interesse da Física em que se impõe a necessidade de um processo de mediação e/ou contrastação entre teoria e realidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos avaliadores do presente artigo pelos comentários e pelas sugestões que enriqueceram e deram maior clareza ao texto e à Prof^a. Dr^a. Marta A. Pesa pela contribuição inestimável ao seu desenvolvimento teórico.

Referências bibliográficas

ADÚRIZ-BRAVO, A.; MORALES, L. El concepto de modelo en la enseñanza de la física – consideraciones epistemológicas, didácticas y retóricas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 1, p. 79-92, abr. 2002. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/409>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Introducción de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio/polimodal de enseñanza: identificación de teoremas-en-acto y determinación de objetivos-obstáculo. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 189-218, ago. 2006. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/?go=artigos&idEdicao=36>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

ASTOLFI, J-P.; DEVELAY, M. **A didática das ciências**. 4. ed. Campinas: Papyrus Editora, 1995. 132 p.

BRANDÃO, R. V. **Investigando a aprendizagem do campo conceitual associado à modelagem científica por parte dos professores de física do ensino médio**. 2008. 205f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/12667>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica de fenômenos físicos e o ensino de física. **A Física na Escola**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 10-14, maio. 2008a. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol9/Num1/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

_____. Investigating the learning of key concepts of scientific modeling by high school teachers. In: GIREP International Conference MPTL 13th Workshop, 2008, 8, Nicosia. **Proceedings GIREP 2008 International Conference: physics curriculum design, development and validation**, Nicosia: University of Cyprus, 2008c. p. 175-176.

_____. Concepções e dificuldades de professores de física no campo conceitual da modelagem científica. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 9, n. 3, p. 669-695, dez. 2010. Disponível em: <<http://www.saum.uvigo.es/reec>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A.; SILVEIRA, F. L. Validación de un cuestionario para investigar concepciones de profesores sobre ciencia y modelado científico en el contexto de la física. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, Buenos Aires, v. 6, n. 1, p. 43-60, julio, 2011. Disponível em: <<http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

BRAVO, S.; PESA, M. La construcción de representaciones sobre movimiento ondulatorio. Una interpretación a partir de la integración de la teoría de campos conceptuales de Vergnaud y la teoría de modelos mentales de Johnson-Laird. **Revista de la Enseñanza de la Física**, Rosario, v. 18, n. 2, p. 25-42, oct. 2005.

BUNGE, M. **La ciencia, su método y su filosofía**. Buenos Aires: Ediciones Siglo Veinte, 1960. 110 p.

_____. **Teoría e realidade**. Tradução: Gita K. Guinsburg. (Debates, 72). São Paulo: Editora Perspectiva, 1974. 243 p.

_____. **La investigación científica: su estrategia y su filosofía**. Tradução: Manuel Sacristán. 2. ed. Barcelona: Editorial Ariel, 1989. 955 p.

CHITTLEBOROUGH, G. D.; TREAGUST, D. F.; MAMIALA, T. L.; MOCERINO, M. Students' perceptions of the role of models in the process of science and in

the process of learning. **Research in Science & Technological Education**, London, v. 23, n. 2, p. 195-212, nov. 2005.

COVALEDA, R.; MOREIRA, M. A.; CABALLERO, M. C. Los significados de los conceptos de sistema y equilibrio en el aprendizaje de la mecánica. Estudio exploratorio con estudiantes universitarios. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 4, n. 1, abr. 2005. Disponível em: <<http://www.saum.uvigo.es/reec/lang/spanish/reecantiguo.htm>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

_____. Los conceptos de sistema y equilibrio en el proceso de enseñanza/aprendizaje de la Mecánica y Termodinámica. Posibles invariantes operatorios. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 2, p. 722-744, ago. 2009. Disponível em: <<http://www.saum.uvigo.es/reec/lang/spanish/reecantiguo.htm>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

CUPANI, A.; PIETROCOLA, M. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, p. 100-125, jun. 2002. n. esp. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1139>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

DEVELAKI, M. The model-based view of scientific theories and the structuring of school science programmes. **Science & Education**, New York, v. 16, n. 7-8, p. 725-749, Aug. 2007.

ESCUADERO, C.; MOREIRA, M. A.; CABALLERO, C. Teoremas-en-acción y conceptos-en- acción en clases de física introductoria de secundaria. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 2, n. 3, p. 201-226, dez. 2003. Disponível em: <<http://www.saum.uvigo.es/reec>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; ARLEGO, M. Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 37-64, mar. 2009. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/?go=artigos&idEdicao=42>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

FEURZIEG, W.; ROBERTS, N. **Modeling and simulation in science and mathematics education**. New York: Springer-Verlag, 1999. 334 p. (Modeling dynamic systems, 4).

FRANCHI, A. Considerações sobre a teoria dos campos conceituais. In: MACHADO, S. D. A. *et al.* **Educação Matemática: uma introdução**. São Paulo: EDUC, 1999. p. 155-195.

GIERE, R. N.; BICKLE, J.; MAULDIN, R. F. **Understanding scientific reasoning**. 5. ed. Toronto: Thomson Wadsworth, 2006. 320 p.

GILBERT, J. K.; BOULTER, C.; RUTHERFORD, M. Models in explanations, part 1: horses for courses? **International Journal of Science Education**, London, v. 20, n. 1, p. 83-97, 1998a.

_____. Models in explanations, part 2: whose voice? Whose ears? **International Journal of Science Education**, London, v. 20, n. 2, p. 187-203, 1998b.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Além da detecção de modelos mentais dos estudantes: uma proposta representacional integradora. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 31-53, jan. 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

GRECA, I. M.; SANTOS, F. M. T. Dificuldades da generalização das estratégias de modelação em ciências: o caso da física e da química. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 31-46, mar. 2005. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

GRINGS, E. T. O.; CABALLERO, C.; MOREIRA, M. A. Possíveis indicadores de invariantes operatórios apresentados por estudantes em conceitos da termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 463-471, dez. 2006. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/index.php?vol=28&num=4>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

_____. Avanços e retrocessos dos alunos no campo conceitual da Termodinâmica. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 7, n. 1, p. 23-46. abr. 2008. Disponível em: <<http://www.saum.uvigo.es/reec/index.htm>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

GROSSLIGHT, L.; UNGER, C.; JAY, E.; SMITH, C. L. Understanding models and their use in science: conceptions of middle and high school students and experts. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 28, n. 9, p. 799-822, Nov. 1991.

HALLOUN, I. A. Schematic modeling for meaningful learning of physics. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 33, n. 9, p. 1019-1041, Nov. 1996.

_____. **Modeling theory in science education**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 250 p. (Science & Technology Education Library, 24).

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

_____. Modeling games in the newtonian world. **American Journal of Physics**, Woodbury, v. 60, n. 8, p. 732-748, Aug. 1992.

HODSON, D. In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. **International Journal of Science Education**, London, v. 14, n. 5, p. 541-562, 1992.

ISLAS, S. M.; PESA, M. A. Futuros docentes y futuros investigadores se expresan sobre el modelado em física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 319-328, set. 2001. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/indice.php?vol=23&num=3>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

_____. Qué ideas tienen los profesores de física de nivel medio respecto al modelado? **Ciência & Educação**, Bauru, v. 8, n. 1, p. 13-26, jun. 2002. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewissue.php?id=24>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

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

_____. Science teachers' knowledge about and attitudes towards the use of models and modelling in learning science. **International Journal of Science Education**, London, v. 24, n. 12, p. 1273-1292, Dec. 2002b.

_____. Teachers' views on the nature of models. **International Journal of Science Education**, London, v. 25, n. 11, p. 1369-1386, Nov. 2003.

KOPONEN, I. T. Model and modelling in physics education: a critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. **Science & Education**, New York, v. 16, n. 7-8, p. 751-773, Aug. 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/0926-7220/16/7-8/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

KREY, I.; MOREIRA, M. A. Implementación y evaluación de una propuesta de enseñanza para el tópico física de partículas en una disciplina de estructura de la materia basada en la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 3, p. 812-833, dez. 2009. Disponível em: <<http://www.saum.uvigo.es/reec/lang/spanish/reecantiguo.htm>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

LLANCAQUEO, A.; CABALLERO, M. C.; MOREIRA, M. A. El aprendizaje del concepto de campo en física: una investigación exploratoria a luz de la teoría de Vergnaud. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 399-417, dez. 2003. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/ojs/index.php/rbef>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

LOPES, J. B.; COSTA, N. The evaluation of modelling competences: difficulties and potentials for the learning of the sciences. **International Journal of Science Education**, London, v. 29, n. 7, p. 811-851, June. 2007.

MAOR, E. A repertoire of S.H.M. **The Physics Teacher**, College Park, v. 10, n. 7, p. 377-382, Oct. 1972.

MATTHEWS, M. R. Mario Bunge: physicist and philosopher. **Science & Education**, New York, v. 12, n. 5-6, p. 431-444, Aug. 2003.

_____. Idealisation and Galileo's pendulum discoveries: historical, philosophical and pedagogical considerations. **Science & Education**, New York, v. 13, n. 4-5, p. 689-715, July. 2004.

_____. Mario Bunge: físico, filósofo y defensor de la ciencia. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, Buenos Aires, v. 4, p. 1-9, julio. 2009. n. esp. Disponível em:

<<http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/numero-especial>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

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

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a investigação nesta área. In: ___ (Org.). **A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, o Ensino de Ciências e a Investigação nesta Área**. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2004, cap. 1, p. 7-32.

MORGAN, M. S.; MORRISON, M. **Models as mediators: perspectives on natural and social science**. New York: Cambridge University Press, 1999. 401 p. (Ideas in context, 52).

NOLA, R. Pendula, models, constructivism and reality. **Science & Education**, New York, v. 13, n. 4-5, p. 349-377, July. 2004. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/0926-7220/13/4-5/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

OTERO, M. R. Emociones, sentimientos y razonamientos en didáctica de las ciencias. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, Buenos Aires, v. 1, n. 1, p. 24-53, oct. 2006. Disponível em: <<http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

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

PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de Mario Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 213-227, Set. 1999. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/?go=artigos&idEdicao=15>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

PORTIDES, D. P. The relation between idealisation and approximation in scientific model construction. **Science & Education**, New York, v. 16, n. 7-8, p. 699-724, Aug. 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/0926-7220/16/7-8/>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

SCHWARZ, C. V.; WHITE, B. Y. Metamodeling knowledge: developing student's understanding of scientific modeling. **Cognition and Instruction**, London, v. 23, n. 2, p. 165-205, June. 2005.

SENSEVY, G.; TIBERGHEN, A.; SANTINI, J.; LAUBÉ, S.; GRIGGS, P. An epistemological approach to modeling: cases studies and implications for science teaching. **Science Education**, New York, v. 92, n. 3, p. 424-446, May. 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sce.v92:3/issuetoc>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

SILVEIRA, F. L. Questão discursiva número 4 do Provão – 2000 do MEC para a licenciatura em física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 17, n. 2, p. 229-234, Ago, 2000.

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**, London, v. 17, n. 5, p. 621-634, Sept. 1995.

SOUZA, C. M. S. G.; FÁVERO, M. H. Análise de uma situação de resolução de problemas de física, em situação de interlocução entre um especialista e um novato, à luz da teoria dos campos conceituais de Vergnaud. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 55-75, jan. 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/?go=artigos&idEdicao=22>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

STIPCICH, M. S.; MOREIRA, M. A.; SAHELICES, C. C. Las situaciones de una propuesta didáctica sobre la interacción gravitatoria. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 61-75, mai-ago. 2005. <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revista/index.html>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

TREAGUST, D. F.; CHITTLEBOURGH, G. D.; MAMIALA, T. L. Students' understanding of the role of scientific models in learning science. **International Journal of Science Education**, London, v. 24, n. 4, p. 357-368, Apr. 2002.

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

_____. Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. **International Journal of Science Education**, London, v. 24, n. 12, p. 1255-1272, Dec. 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. (p. 39-59). Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1982.

_____. Quelques problèmes théoriques de la didactique a propos d'un exemple: les structures additives. **Atelier International d'été: Recherche en Didactique de la Physique**. La Londe les Maures, França, 26 de junho a 13 de julho, 1983.

_____. La théorie des champs conceptuels. **Recherches en Didactique des Mathématiques**, v. 10, n. 2-3, p. 133-170, 1990.

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

_____. Multiplicative conceptual field: what and why? In: GUERSHON, H.; CONFREY, J. (Eds.). **The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics**. (p. 41-49). New York: State University of New York Press, 1994.

_____. A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. **Revista do GEEMPA**, Porto Alegre, v. 4, p. 9-19, jul. 1996.

_____. The nature of mathematical concepts. In: NUNES, T.; BRYANT. P. (Eds.). **Learning and teaching mathematics**. An international perspective. (p. 1-28). Hove: Psychology Press, 1997.

_____. A comprehensive theory of representation for mathematics education. **Journal of Mathematical Behavior**, Dordrecht, v. 17, n. 2, p. 167-181, June. 1998.

_____. **Activité humaine et conceptualisation**: questions à Gérard Vergnaud. Toulouse: Presses Universitaires du Mirail, 2007. 375 p.

WALISER, B. **Systemes et modèles**: introduction critique à l'analyse de systemes. Paris: Éditions du Seuil, 1977. 248 p.

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.

WELLS, M.; HESTENES, D.; SWACKHAMER, G. A modeling method for high school physics instruction. **American Journal of Physics**, Woodbury, v. 63, n. 7, p. 606-619, July. 1995.

WESTPHAL, M.; PINHEIRO, T. C. A epistemologia de Mario Bunge e sua contribuição para o ensino de ciências. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 585-596, dez. 2004. Disponível em: <<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/viewissue.php?id=3>>. Acesso em: 08 ago. 2011.