

QUESTÕES PEDAGÓGICAS DA MODELAGEM EM ENGENHARIA

Marcos Azevedo da Silveira¹

RESUMO

Analisa-se o problema da modelagem de sistemas dinâmicos a partir da teoria desenvolvida por Raymond Duval sobre a conversão entre registros de representações semióticas. Em particular, estuda-se a problemática pedagógica do uso e compreensão desta modelagem a partir de um exemplo retirado da disciplina de sistemas de controle lineares.

Palavras-chave: Modelagem, representações, pedagogia, teoria cognitiva, educação em engenharia.

ABSTRACT

The dynamical system modeling problem is analyzed from the theory developed by Raymond Duval about the conversion of registers of semiotic representations. In particular, the pedagogic problems for the use and understanding of this modeling is studied as presented in a example from the linear control systems theory.

Key-words: Modeling, representations, pedagogy, engineering education.

INTRODUÇÃO

A construção de modelos matemáticos, sua manipulação e uso para a resolução de problemas constituem um desafio pedagógico considerável para o ensino de engenharia. Como o repertório de representações matemáticas costuma ser fornecido previamente aos alunos, as dificuldades concentram-se na relação do modelo (ou dos modelos) com o objeto modelado, na construção dos conceitos abstratos necessários para a modelagem e resolução do problema e na transformação e operação desses modelos durante o encaminhamento da solução. A dificuldade fica evidente quando, após a aplicação do algoritmo ensinado, o aluno não consegue interpretar o resultado, referindo-o ao contexto original, isto é, não aprendeu o conceito e não apreendeu a relação de modelagem.

Neste trabalho é discutido o aspecto cognitivo deste aprendizado, buscando descrever essas dificuldades do ponto de vista do aluno que aprende, adaptando a teoria semiótica desenvolvida em Duval (1995), segundo o caminho delineado em da Silveira (2005). Dessa descrição são destacadas algumas das questões a serem enfrentadas para que ocorra o aprendizado, quando o objetivo é desenvolver a competência de uso da ferramenta de modelagem para a

resolução de problemas de engenharia, sem esquecer que, na constituição dos modelos, há uma concepção teórica associada. Essa abordagem aprofunda a desenvolvida em da Silveira (2001, 2003).

Consultando Houaiss (2001), Japiassu e Marcondes (1991) e Bunge (2002), encontramos várias definições de “modelo”, sem que nenhuma delas explicita o caráter pragmático dessa noção (fundamental em engenharia): não há relação explícita entre “modelo”, “interesse” e “objetivo”. Nessa literatura, modelos substituem, representam, ou exemplificam uma dada realidade. Aproximações ou simplificações são vistas como faltas a serem preenchidas no futuro. O caráter cognitivo de um modelo também não é explorado; os modelos são tratados como objetos dados ou inventados, porém esse caráter cognitivo é essencial para construir uma pedagogia da modelagem.

No presente trabalho limita-se a abordagem a alguns aspectos da modelagem pragmática de sistemas dinâmicos, a partir de exemplos da área de controle e automação. Esses modelos são montados a partir da reunião funcional de outros modelos de objetos mais simples, em geral retirados de um repertório já conhecido – e obtidos num dos domínios anteriormente assinalados (circuitos elétricos, mecânica clássica, motores elétricos, equações di-

¹ Marcos Azevedo da Silveira; Professor Associado; Docteur d'État, Spec. Automation, UPS (Toulouse); PUC-Rio; DEE/PUC-Rio, rua Marquês de São Vicente, 225, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL; tel: 55-21-3527-1629; fax: 55-21-35271232. E-mail: marcos@ele.puc-rio.br

ferenciais ordinárias, sinais e sistemas, por exemplo). O caráter dinâmico de parte dos submodelos gera uma grande complexidade, necessitando-se do uso controlado de diferentes representações e de suas relações. A integração de sistemas, além de ser uma etapa essencial à maioria das tecnologias modernas, faz emergir novos conceitos próprios a estruturas causais e/ou temporais interligadas – e esse é o conteúdo próprio de boa parte dos cursos de controle e automação.

Ao deixar de discutir o delicado problema da referência à realidade concreta, limitando a abordagem, tem-se o interesse de realçar as questões relativas às mudanças de registro e de representações, que entendo serem essenciais ao aprendizado/construção de novos conceitos e métodos de resolução por parte do aluno.

MODELAGEM E REPRESENTAÇÕES

O processo de modelagem pode ser representado pelo diagrama da Figura 1.

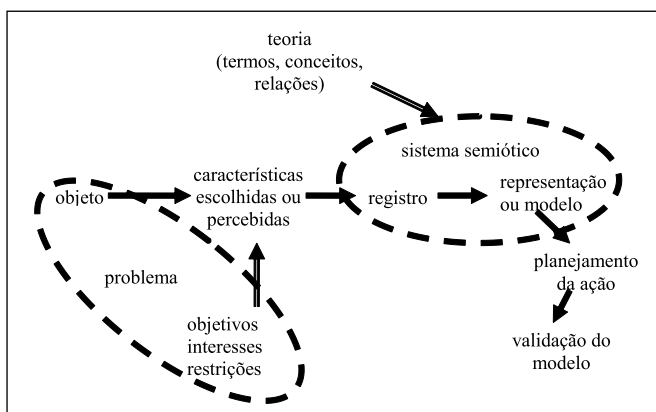


Figura 1 - Modelagem de um problema

Problemas de engenharia são especificados por objetivos a serem alcançados envolvendo um determinado objeto físico ou gerencial, na forma de critérios a serem atendidos sob restrições a serem respeitadas. Como o problema pode não ter solução na sua forma original, ou possuir múltiplas soluções, acaba sendo necessário negociar um certo relaxamento das exigências ou a escolha da solução a ser implementada dentro de um quadro de interesses mais vasto que o inicialmente exposto, e raramente formalizável.²

Segundo a literatura usualmente utilizada³, a modelagem começa pela escolha das variáveis consideradas relevantes diante dos interesses e objetivos e das características que lhe são relacionadas conforme as teorias científicas autorizadas. Depois, usando essas teorias e uma compreensão lógica apropriada do problema (isto é, adaptada às estruturas possíveis e aos interesses presentes), são representados o objeto em estudo, os objetivos e as restrições.

Em outros termos, as condições cognitivas e valorativas (explícitas ou implícitas⁴) na escolha das características de relevância a serem adotadas, que moldam os interesses do engenheiro, forjam a delimitação de uma determinada parcela da realidade e a escolha dos objetivos a serem atingidos (eventualmente expostos na forma de restrições, como “a ponte deve suportar cargas menores ou iguais a 20 toneladas”). É esse conjunto de restrições que deverá ser representado (usando as teorias autorizadas e alguma competência lógico-discursiva), de forma a permitir a resolução do problema colocado a partir dos objetivos.

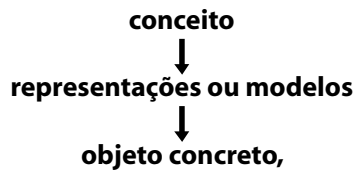
O objetivo essencial da modelagem em engenharia é resolver um problema colocado, mesmo que para isso seja necessário relaxar as especificações ou realizar compromissos com outros interesses do cliente ou da sociedade. O objetivo não é a representação mais acurada possível do objeto, como se pretende na modelagem científica.

Mas o que são, do ponto de vista cognitivo, as teorias e as representações citadas acima? Como o aluno as apreende e torna-se competente em utilizá-las na resolução de problemas e/ou no seu desenvolvimento?

Teorias são o arcabouço necessário para podermos falar de dedução, sendo compostas por termos, definições e conceitos, além de axiomas, proposições e relações lógicas envolvendo os termos e conceitos (BUNGE, 1974). Uma teoria fazendo referência ao mundo concreto ainda possui um conjunto de regras semânticas, relacionando objetos do mundo concreto a termos da teoria.

Essa visão formalista exige uma definição mais clara do termo “conceito”, visto aqui como um objeto abstrato (eventualmente correspondendo a um objeto concreto, uma intuição ou uma idéia geral via uma regra semântica) ou como uma relação assinalando novas propriedades do objeto de que trata a teoria (um predicado do objeto abstrato) (BUNGE, 1974). Bachelard (1985) considera que um conceito pode também ser um *explicandum* tornado necessário pela lógica interna da teoria, como *quark*, “número de Avogadro” ou “estado do sistema”. A “intuição” desse conceito aparece (no cientista e no aluno que aprende) ao longo do trabalho de relacioná-lo com outros conceitos já conhecidos ou com experiências concretas.

Mas continuamos com a mesma questão: como os alunos (e demais estudiosos) constroem conceitos de um ponto de vista cognitivo? Abstraindo a partir de experiências (indução), ou deduzindo-os a partir de necessidades teóricas (dedução)? Para responder a essas perguntas faz-se necessário estudar o problema da abstração e da formação de conceitos de um ponto de vista cognitivo, lembrando-se que entre o conceito abstrato e o objeto concreto há uma ou várias representações, que, pragmaticamente, representaremos na forma:



não esquecendo que um conceito se refere a uma teoria e o objeto concreto está imerso em (ou visto a partir de) um dado problema e dos interesses subjacentes.

REPRESENTAÇÕES E CONCEITOS

Para estudar a relação entre representações e conceitos abstratos podemos usar a teoria cognitiva desenvolvida por Duval (1995), que via uma análise semiótica facilita a discussão pedagógica da construção dos modelos e dos conceitos associados, assim como de sua mobilização em atividades de pensamento.

Assim, uma “representação semiótica” é formada por signos pertencentes a um determinado sistema semiótico, o que lhe confere um significado dentro de um contexto dado. Um “sistema semiótico” é definido por:

- um conjunto de relações (regras de designação) entre significados e signos;
- a escolha de "registros", como linguagem natural, linguagem escrita, símbolos matemáticos, diagramas de um certo tipo, imagens etc.;
- a escolha de signos dentro dos registros: sons, palavras, nós e arestas etc.;
- uma gramática interna (regras de formação de frases ou aglomerados significativos de signos);
- regras de transformação entre representações.

Como serão admitidos registros diferentes, isto é, sistemas semióticos diferentes referidos ao mesmo conteúdo, será preciso considerar que os diversos sistemas fazem parte de um sistema semiótico composto, referido ao mesmo conteúdo (ou a variações de um mesmo conteúdo, ressaltando diferentes aspectos cognitivos deste, operando a partir de intuições diferentes), dotado de regras de conversão entre registros diferentes. A Figura 2 apresenta um esquema dessas definições do ponto de vista de sua geração a partir de um conteúdo ou significado inicial, quase sempre uma representação “mental” prévia, que será, ao longo do aprendizado, transformada em "conceito".

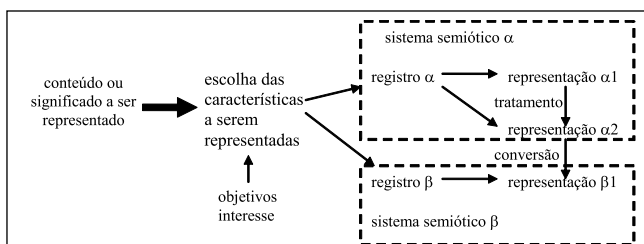


Figura 2 - Representações semióticas de um conteúdo

Na figura, os símbolos logo após os títulos indicam que a representação $\alpha 1$ é uma representação no registro α dentro do sistema semiótico α ; $\alpha 2$ é outra representação no mesmo registro e dentro do mesmo sistema; $\beta 1$ é uma representação no registro β dentro do sistema semiótico β , e assim por diante. Podem existir outras representações nos mesmos registros ou, ainda, outros registros.

O mesmo conteúdo pode ser representado sob diferentes registros, cada um deles admitindo diferentes representações. Por exemplo, um sistema dinâmico linear pode ser representado por diferentes equações de estado relacionadas por mudanças de coordenadas (tratamentos), ou por uma função de transferência (novo registro), ou por uma grande quantidade de diagramas de blocos; todos relacionados entre si (conversões). Outro exemplo mais complexo, a ser estudado adiante, é a modelagem de um sistema de controle linear, que pode usar diferentes registros como diagramas de blocos e diagramas de fluxo de sinais, equações de estado, ou um conjunto de funções de transferência.

Por que usar diferentes registros? Tradicionalmente, passa-se a outro registro para:

- facilitar cálculos (e.g., o uso da transformada de Laplace – levando a funções de transferência – para resolver equações diferenciais ordinárias lineares);
- fazer emergir ou facilitar a construção de novos conceitos (no mesmo exemplo, os conceitos de amplificação estacionária, pólos e zeros);
- facilitar a compreensão do problema (os diagramas de blocos facilitam a compreensão da interligação de sistemas físicos);
- fazer apelo a diferentes campos cognitivos ou a diferentes intuições, iluminando ou trazendo à tona aspectos do conceito diferentes (isto é, olhando-o de novos pontos de vista).

Registros diferentes oferecem ou correspondem a mudanças de ponto de vista, resultado de diferentes formas de construção do conceito. Seguramente, alteram o conteúdo cognitivo do conceito, ou, de forma menos técnica, alteram o campo intuitivo a ele relacionado e/ou o relacionam a diferentes teorias e formas de compreensão. O exemplo clássico relacionando o trinômio de segundo grau ao gráfico da função associada (uma parábola) ilustra essa afirmação: o registro algébrico e o registro geométrico fazem apelo a intuições diferentes, isto é, cada um deles remete a um campo cognitivo diferente: um à álgebra embutida nas descrições polinomiais e a contas com números reais e a sua relação de ordem; outro, a desenhos geométricos, onde a variação das funções utiliza mecanismos cognitivos diversos. No entanto, o conceito final é o mesmo, vindo a ser construído e depois intuído (isto é, internalizado pelo aluno), pouco a pouco, recobrando os diferentes registros (e pontos de vista) e relacionando-os – ou melhor, integrando-os.

Dado um diagrama de blocos, este pode ser transformado em outro diagrama equivalente, na busca de novas informações sobre o sistema modelado – transformações essas regidas por simples regras algébricas. O mesmo pode ser feito quanto às equações de estado, onde o tratamento mais frequente é a mudança de coordenadas do espaço de estado, usada para obter representações que esclareçam os pontos de interesse para o projeto de controladores (passar de uma representação inicial a uma diagonal, ou a uma forma canônica).

A relação entre representações do mesmo objeto em registros diferentes é o que Duval chama de "conversão" entre registros. A relação entre diferentes representações num mesmo registro é o que Duval chama de "tratamento". As conversões de um para outro registro (de equações polinômicas para os gráficos das funções associadas, de diagramas de blocos para equações de estado) são mais complexas que a aplicação de algumas regras algébricas, exigindo – ou construindo, em seu uso didático – um maior domínio dos conceitos envolvidos e/ou uma visão mais completa (integrando diferentes pontos de vista) do conteúdo em estudo.

O uso didático da teoria de Duval parte do princípio de que o aluno pode não ter se apropriado completamente do conteúdo representado, podendo operar ("tratar", *cf* Duval) uma representação como um jogo, sem perceber claramente os significados dos termos. "Tudo se passa como se a compreensão que a grande maioria dos alunos tivesse do conteúdo ficasse limitada à forma da representação utilizada" (DUVAL, 1995, p.19).

O uso de uma representação apropriada permite evitar a remissão contínua dos símbolos a seus significados, economizando o trabalho de pensamento através do tratamento meramente simbólico – e esta é uma das principais funções pragmáticas de uma representação, sob a hipótese do domínio do conteúdo associado, transformando o raciocínio num "cálculo". Mas, ao mesmo tempo, uma única representação reduz o conceito a um cálculo simbólico.

A observação de Duval mostra ser necessário o uso de mudanças de registro (conversões entre registros) para sair do jogo associado às representações, sair do "cálculo" para a "compreensão". Ao mesmo tempo, permite verificar a incompletude do aprendizado do conteúdo, conduzindo o professor a uma nova explicação e/ou gerando desconforto no aluno, o que permitirá/tornará necessária uma reestruturação do que foi aprendido e, daí, um aprofundamento ou completamento do conceito. Em outras palavras, a Figura 2 assinala o lugar de uma atividade pedagógica (o tratamento entre diferentes registros) que permite retomar as relações indicadas em sentido inverso (da representação ao conteúdo ou significado), de forma a completar a construção do conceito.

Se considerarmos, com Duval (2003) e Machado (2003), que:

- a) só se tem acesso a conceitos através de suas representações semióticas;
- b) não podemos confundir um objeto (ou um conceito) e sua representação;
- c) o aluno toma contato com conceitos necessariamente através de suas representações;
- d) o aluno, para construir e tornar intuitivo o conceito de forma completa, precisa variar as representações e os diferentes campos cognitivos a elas associados;⁵
- e) as conversões entre registros são irreduzíveis a tratamentos entre representações concluímos pela necessidade de apresentar os conceitos sob diversas representações e registros, operando os tratamentos e conversões que os relacionam e enfrentando as dificuldades que aí são encontradas.

A seta em negrito no diagrama da Figura 2 assinala uma etapa comumente chamada de "abstração". Mas não só a identificação e escolha das características relevantes (donde a abstração das restantes) recebem este nome. Aparece aqui uma noção mais refinada de abstração: o conteúdo comum a um conjunto de diferentes representações sob diferentes registros, estabilizado em alguma representação "mental". A abstração leva, de conjuntos de representações semióticas dentro do mesmo registro e suas regras de tratamento, a estruturas de nível mais alto, compostas pelos registros e suas regras de conversão. O resultado desse nível de abstração é o conceito ou conteúdo em estudo, que pode vir a ser aprofundado em níveis superiores de compreensão, ou mesmo relacionado a outros conceitos (formando "teorias"). Chega-se aos níveis sucessivos de abstração descritos por Piaget (1977) como "abstração reflexionante".

MODELOS E PROBLEMAS

Um "modelo" ou "representação pragmática"⁶ é uma representação dentro de um sistema semiótico cujos elementos permitem expressar formalmente um problema de engenharia, com seus objetivos, restrições e interesses subjacentes. A alteração do problema (por exemplo, aumentando a precisão exigida, ou a consideração de novas necessidades) pode levar à mudança do modelo, isto é, o objeto concreto permanece o mesmo, mas sua representação muda de acordo com o interesse que define o problema.

Um exemplo é o modelo econômico utilizado pelo Banco Central brasileiro entre 1990 e 2005, que não leva em consideração o bem-estar da população. O objetivo principal é a capacidade de pagamento em médio prazo dos juros dos empréstimos governamentais. Caso o bem-estar da população ou objetivos de longo prazo venham a ser considerados

de interesse, muda o problema e será preciso mudar o modelo utilizado. Esses diferentes modelos são encontráveis em obras de macroeconomia, expressos num registro misto (equações e linguagem técnica) próprio aos economistas.

O caráter intermediário do modelo entre o conceito/teoria e o objeto/problema fica claro na Figura 3, obtida por reunião das Figuras 1 e 2. A dificuldade da modelagem aparece porque é preciso operar simultaneamente com os dois lados da questão: a relação teoria-modelo e a relação problema/objeto-modelo. Na Figura 3, nem os sistemas semióticos nem mudanças de teoria foram representados. O objeto concreto é o mesmo, mas, variando os interesses, varia-se o modelo, podendo ou não haver variação dos conceitos correspondentes.

Como na Figura 2, os modelos $I\alpha 1$ e $I\beta 1$ representam o Problema I em registros diferentes, observando-se que podem ser construídos outros modelos num mesmo registro, digamos modelos $I\alpha 1$ e $I\alpha 2$, ou modelos $I\beta 1$, $I\beta 2$ e $I\beta 3$, por exemplo. Uma modificação do problema original dará origem a novos modelos $II\alpha 1$ e $II\alpha 2$ (num mesmo registro α), ou $II\beta 1$, $II\beta 2$ etc. em outro registro. A relação existente entre os problemas (só houve uma modificação) leva à existência de relações entre os modelos. Daí a seta com duas pontas na Figura 3 portando o título "modificação de problema".

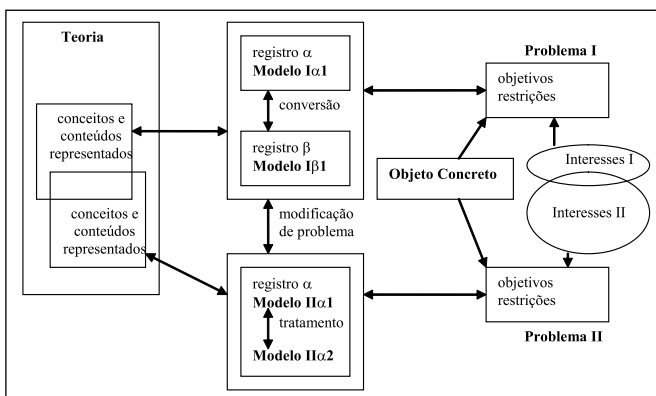


Figura 3 - Modelos ou representações pragmáticas.

Nesse sentido, sem mudar o registro da representação, o modelo pode vir a ser modificado porque foram mudadas as hipóteses de modelagem. Por exemplo:

- foram adotadas (ou rejeitadas) hipóteses de simplificação, como passar de um modelo local no espaço (ou no tempo) a um modelo global, ou não considerar determinados efeitos por se admitir serem pouco importantes (como o bem-estar da população no exemplo econômico visto acima);
- passou-se a exigir maior (ou menor) precisão, a ponto de ser necessário mudar a teoria ou colocar (ou retirar) determinados efeitos, como desconsiderar as perdas elétricas nas escovas do rotor, ou passar a considerar os efeitos relativísticos na trajetória de uma estrela dupla;

- passou-se a considerar novas propriedades ou face-tas, articulando submodelos entre si e enriquecendo a compreensão do problema, como considerar que a perda de torque num ventilador (gerada pelo atrito da hélice com o ar) não é constante, mas proporcional ao quadrado da velocidade de rotação (o que torna o problema muito mais complexo, pois adiciona uma realimentação não-linear ao modelo original).

Em qualquer uma dessas situações ocorre mudança do problema original, revelando um deslocamento do interesse, o que pode exigir novos conceitos ou o abandono de outros anteriormente utilizados. O exemplo econômico descrito anteriormente permite explicar as conclusões diferentes a que chegam as distintas escolas econômicas, pois usam modelos diferentes, determinados a partir das assunções ideológicas, apesar de parte dos modelos (e dos conceitos correspondentes) ser comum.

Modelos, como representações em registros semióticos, podem ser transformados por tratamento (mudar a base do espaço de estado de um modelo linear), por conversão (passar da função de transferência a uma equação de estado). Porém, mais que isso, mudanças no problema de engenharia podem conduzir a mudanças de modelos, situação mais complexa que o tratamento, pois exige compreender a relação das hipóteses de modelagem com a representação utilizada, ou até uma mudança de teoria. Por exemplo, a consideração de efeitos quânticos na instrumentação eletrônica ou em modelos bioquímicos.

Por outro lado, problemas diferentes, sobre objetos concretos diferentes, podem levar a um mesmo modelo. Essa é a razão de haver tantas teorias organizadas em torno de modelos-tipo, como "sistemas lineares", servindo à resolução de problemas diversos dotados da mesma estrutura lógica. Uma das principais competências exigidas de um engenheiro hoje em dia é a de reconhecer o modelo-tipo associado a um problema de engenharia, como citado nas listas de competências das principais associações profissionais e escolas modernas.⁷

Apareceram, assim, duas novas classes de variações com interesse pedagógico: a variação de objetos concretos (e problemas associados) levando a um mesmo modelo, e a variação de problemas em torno de um objeto concreto exigindo modelos diferentes.

Podemos agora preparar uma lista semelhante à apresentada na seção anterior, nos seguintes termos:

- só se compreendem objetos físicos ou organizacionais através de modelos (deixando a intuição na categoria de modelos mentais inconscientes);
- não podemos confundir objetos físicos e seus modelos;
- o aluno conceitualiza as propriedades de um objeto ou problema através de modelos;
- as conversões entre registros são irredutíveis a tratamentos, e as mudanças de modelo (como visto acima) são irredutíveis a conversões;

- e) a operação de modelagem depende da capacidade de aplicar o mesmo modelo a objetos e problemas diferentes, reconhecendo a relação abstrata construída através do modelo comum, isto é, o mesmo conceito aplicado a questões práticas diferentes;
- f) a relação de modelagem é dependente do problema específico e dos interesses subjacentes.

Concluimos pela necessidade de apresentar os modelos relacionados a diferentes objetos e problemas, destacando suas relações, e modelar problemas diferentes que considerem o mesmo objeto físico ou organizacional, reconhecendo a variação das hipóteses de modelagem. Aparece, assim, um caminho mais completo para a abstração: diferentes problemas exigindo o mesmo modelo, além de diferentes representações e registros para o mesmo conceito.

A questão pedagógica é que explorar/utilizar um dos lados da Figura 3 parece exigir previamente o domínio do outro lado. De um lado o *paradoxo da compreensão em matemática* (DUVAL, 2003, p. 21): o aluno só tem acesso ao conceito pela representação, mas não se podem confundir os dois. De outro lado, o *paradoxo da compreensão da relação da modelagem*: o aluno só compreende o objeto físico e raciocina sobre ele a partir do modelo, mas não pode confundir os dois. Juntando os dois, o *paradoxo da construção do modelo*: o aluno forma os conceitos abstratos a partir do trabalho com modelos e representações, mas só pode escolher para objetos físicos se já conhece os conceitos teóricos embutidos. Por onde começar?

Felizmente, o aluno não precisa aprender tudo de uma vez, ao mesmo tempo. A competência e a compreensão dos processos aqui estudados devem ser feitas aos poucos, por retoques sucessivos, talvez começando de situações em que o conceito ou o objeto a ser modelado admite uma representação icônica ou intuitiva, como ocorre com a geometria ou em modelos combinatórios mais simples; depois, buscar novos objetos e problemas usando o mesmo modelo ou variantes simples, trabalhando a relação de modelagem.

Conhecidos alguns modelos simples e seus conceitos, devem-se agregá-los em estruturas mais complexas, ou modificá-los por alteração das hipóteses, explorando os conceitos emergentes na nova situação e a relação de modelagem, agora mais complexa; ou, ainda, complexificar o modelo, abandonando algumas das hipóteses simplificadoras e agregando componentes antes desprezados. A história da ciência e da técnica mostra essa dialética constante entre o desenvolvimento do modelo e a construção do conceito. Esse assunto será tratado em outros trabalhos, mesmo porque permite uma abordagem histórica e uma abordagem experimental – neste caso reduzindo-se o estudo a um tema específico de alguma disciplina técnico-científica.

INCONGRUÊNCIA DE REGISTROS E DE MODELOS

A análise pedagógica proposta por Duval⁸ explora a conversão entre registros e as dificuldades aí encontradas e busca meios para solucioná-las de forma a facilitar a construção conceitual. Estendendo essa questão ao problema de modelagem, identificamos oito classes de incongruências na conversão entre registros ou entre modelos. As quatro primeiras são as mesmas propostas e estudadas em profundidade em Duval (1995), com exemplos da matemática básica e da geometria, relacionando os registros da língua da escola, das imagens, e das equações algébricas.

1. Alguma unidade semântica simples de um dos modelos não possui uma unidade semântica simples correspondente no outro modelo. Exemplo típico é a condição inicial de um sistema descrito por equações lineares diferenciais ou a diferenças, que desaparece na descrição por função de transferência.

2. Alguma unidade semântica simples de um modelo está relacionada a mais de uma unidade semântica no outro modelo. Este caso é comum na relação entre modelos formais ou por imagens e modelos lingüísticos. Por exemplo, o desenho de uma árvore sob o sol pode ser descrito como “árvore abaixo do sol” ou “sol acima da árvore” (DUVAL, 2005, p. 47). Clarck e Chase (1972) e Machado (2003) relatam experiências mostrando que o tempo de conversão da imagem para a frase é substancialmente maior que o tempo de conversão contrária, pois a incongruência (que dificulta a conversão) só ocorre no primeiro caso.

3. As unidades semânticas correlatas nos dois modelos estão arranjadas em ordem diferente frente a antinomias formais (antes/depois, dentro/fora, maior/menor etc.). No exemplo anterior, a passagem de “árvore abaixo do sol” para “sol acima da árvore” ilustra essa incongruência. Mas o exemplo mais interessante é a inversão de ordem entre o cálculo e a representação gráfica de uma função, ou, no caso de nosso interesse, de um diagrama de blocos. Assim, na Figura 4, as setas percorrem o diagrama num sentido, ilustrando a causalidade do mecanismo, mas a transformação do diagrama em equação exige que este seja lido em sentido contrário ao das setas. Afinal, resolver uma equação é o problema inverso de calcular o valor de uma função num dado ponto de seu domínio.

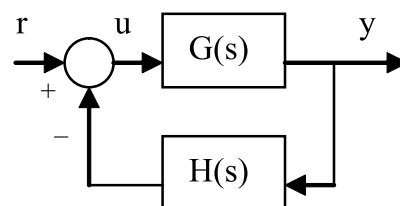


Figura 4 - Um diagrama de blocos

Analisando o exemplo da Figura 4, o erro mais comum nas primeiras provas em disciplinas de modelagem ou de controle é a montagem da equação a ser usada para o cálculo da relação entre $\hat{r}(s)$ e $\hat{y}(s)$ seguindo a direção das setas do diagrama. Um caso extremo (muito comum) é o equacionamento do diagrama da Figura 4 na seguinte forma:

$$\hat{r}(s) = G(s)\hat{y}(s) - H(s)\hat{y}(s)$$

$$\Rightarrow \hat{y}(s) = [G(s) - H(s)]^{-1}\hat{r}(s)$$

quando o correto é ler o diagrama na direção contrária à das setas:

$$\hat{y}(s) = G(s)[\hat{r}(s) - H(s)\hat{y}(s)]$$

$$\Rightarrow \hat{y}(s) = [I + G(s)H(s)]^{-1}G(s)\hat{r}(s)$$

conforme o uso habitual da representação gráfica de funções.

4. Duas unidades semânticas diferentes passam a ter símbolos diferentes, mas que se confundem no tratamento. Um exemplo característico é, no cálculo acima, a confusão entre $\hat{u}(s)$, a transformada de Laplace do sinal $u(t)$, e a função de transferência do sistema, $G(s)$, ambas funções racionais. Frequentemente aparecem nos cálculos dos alunos expressões como

$$\hat{y}(s) = \frac{G(s)\hat{r}(s)}{1 + G(s)H(s)},$$

que conduzem a erros conceituais e de cálculo ao longo do desenvolvimento dos argumentos. A notar que muitos dos livros sobre circuitos elétricos ou sobre controles e servomecanismos definem a função de transferência como a razão entre dois sinais:

$$G(s) = \frac{\hat{y}(s)}{\hat{u}(s)},$$

ou, ainda, omitindo o sinal da transformada,

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)}.$$

Essa definição mistura categorias conceituais e enseja este tipo de incongruência, reduzindo o conceito ao procedimento de cálculo.

5. Uma unidade semântica tem seu estatuto alterado, exigindo representações auxiliares para ser corretamente relacionada à unidade semântica correspondente no outro modelo. Um caso simples é exposto em Duval (2005): a região especificada por “abscissas e ordenadas têm o mesmo sinal” no registro da língua é descrita por “ $xy \geq 0$ ” no registro algébrico. A passagem de uma representação a outra exige uma etapa dedutiva, embora as duas expressões refiram-se às mesmas entidades, abscissas e ordenadas.

Um exemplo mais complexo é o sistema descrito por uma equação diferencial linear (o sistema, visto como uma relação entre entradas e saídas, é, de fato, a solução da equação diferencial) relacionado ao sistema descrito por sua função de Green ou por sua função de transferência. A relação passa por três representações intermediárias: a solução da equação (isto é, um algoritmo que permite calcular a saída do sistema a partir da entrada e das condições iniciais, resolvendo a equação diferencial); a fórmula da saída usando um operador de convolução, e, então, usar o núcleo deste operador ou sua transformada de Laplace como representantes indiretos do sistema (supondo condições iniciais nulas):

$$\dot{y}(t) = -2y(t) + u(t) \Rightarrow y(t)$$

$$\Rightarrow y(t) = \int_0^t e^{-2(t-\tau)}u(\tau)d\tau$$

$$\Rightarrow G(t) = e^{-2t}$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{1}{s + 2}.$$

Note-se a mudança de estatuto, onde o núcleo de um operador passa a representar o sistema em si (isto é, o operador resultante da resolução da equação). Essa incongruência tem sido a principal dificuldade para a compreensão do conceito de “sistema”, visto como um “transformador de sinais”,⁹ para os alunos da disciplina Sinais e Sistemas, mesmo que já tenham estudado equações diferenciais lineares nas disciplinas de cálculo.

6. Um dos modelos admite hipóteses simplificadoras em relação ao outro, não alterando seu significado, mas alterando seu tratamento. Caso típico é o de desprezar não-linearidades de menor influência (muito comum no caso de sistemas interligados).

Um exemplo é, na modelagem de geradores eólicos, passar a carga de uma condição dependente da velocidade de rotação a outra condição onde esta é constante e fixa. Outro exemplo aparece no modelo usado para controlar motores CC: a carga constante é modelada por uma perda constante de torque, o que simplifica o problema mas não corresponde à intuição física (OGATA, 1997).

Essas simplificações só são válidas enquanto não afetam a resposta do sistema de forma a tornar ineficazes os controladores projetados – o que só pode ser verificado após o seu projeto e depende dos objetivos do problema de controle. Essas questões pragmáticas nunca são discutidas com os alunos.

7. Um dos modelos introduz hipóteses simplificadoras que alteram o seu alcance. É o caso da linearização de sistemas em torno de um ponto de operação, passando de um modelo global a um modelo local.

8. Alterações no modelo atingindo partes essenciais da representação, usadas para sua construção, justificação e cálculo. Por exemplo, a passagem do modelo lagrangeano a um modelo causal entrada-saída, onde só a forma do sinal interessa, quebrando-se, eventualmente, o balanço de energia (isto é, parte da energia fornecida ao sistema deixa de ser contabilizada). Se a noção de “fonte ideal” já é problemática (uma fonte que não altera a saída quando a carga aplicada é mudada), a questão fica especialmente difícil ao se conectarem dois sistemas em série. A dificuldade aparece com clareza em Ogata (1997) ao ser apresentada a noção de carregamento (*loading*). No exemplo de Ogata, dois circuitos elétricos RC, mostrados na Figura 5, são conectados fazendo $u_2(t) = y_1(t)$.

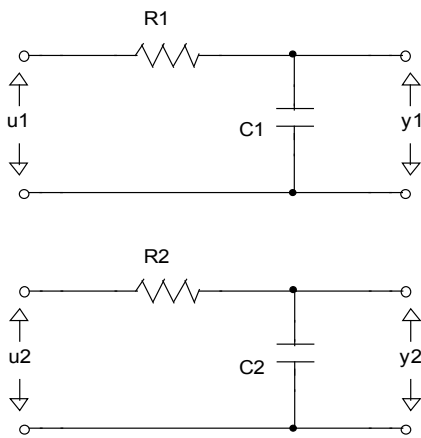


Figura 5 - Circuitos RC.

As funções de transferência de cada um dos circuitos são dadas por

$$G_1(s) = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s}, \quad G_2(s) = \frac{1}{1 + R_2 C_2 s}$$

e a função de transferência do sistema obtido interligando os circuitos por $u_2(t) = y_1(t)$ é

$$G(s) = \frac{1}{(1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s) + R_1 C_2 s}.$$

É possível perceber que $G(s) \neq G_1(s)G_2(s)$, ao contrário do que seria esperado do cálculo da função de transferência de sistemas lineares em série. Fisicamente, nessa ligação o segundo circuito “carrega” o primeiro como consequência da conservação da potência, isto é, os circuitos interligados não podem ser separados como dois sistemas independentes para o cálculo da função de transferência de sua interligação. Ogata sugere sempre colocar um amplificador usando transistores ou válvulas entre as duas partes interligadas, pois “suas impedâncias de entrada sendo muito altas, podem ser supostas infinitas, eliminando o carregamento”.

A incongruência é a incompatibilidade entre o modelo físico da teoria dos circuitos lineares e o mo-

delo de processamento de sinais (que interliga as funções de transferência de cada parte). O segundo modelo, que representa apenas a relação entre sinais, exige um componente a mais (o amplificador eletrônico: elemento não-linear que introduz potência no sistema de forma adaptada, mas não contabilizada) e uma aproximação – assunto que não é sequer mencionado na maior parte dos livros didáticos da área! É essa passagem de grafos de ligação para grafos de fluxo de sinal e diagramas de bloco que praticamente corta as relações entre a física estudada pelos alunos e os modelos utilizados nas áreas de processamento de sinais e de controle e automação (OGATA, 1997).¹⁰

9. Alteração da teoria usada para deduzir o modelo. Exemplo: passar a considerar efeitos relativísticos ou quânticos num equipamento anteriormente descrito de forma clássica. Muda-se a seção da biblioteca a ser consultada...

Essas incongruências marcam o lugar de obstáculos pedagógicos a serem enfrentados diretamente, se desejamos que os alunos adquiram competência no seu uso, podendo mobilizá-los como objetos e meios de pensamento (não apenas como peças de um jogo sem sentido), isto é, *marcam lugares preferenciais do trabalho pedagógico*. A próxima seção discutirá como fazê-lo.

Os quatro primeiros tipos de incongruências são relativos ao caráter funcional e à direcionalidade da relação semiótica e correspondem aos já estudados por Duval (1995).

O quinto tipo assinala uma mudança no foco da representação, associada a uma mudança no interesse que governa o seu uso. Por exemplo, alunos de cálculo procuram resolver a equação diferencial dadas as funções de entrada (o termo forçante), encontrando uma função que a verifique, enquanto alunos de sinais e sistemas procuram operadores que transformam a entrada, de forma a garantir características de sua saída. O foco passa do resultado da equação ao operador que a calcula. Em estatística, essa incongruência aparece ao passar o interesse da estimativa ao estimador. A notar que, apesar da mudança de foco, há uma correspondência completa entre as estruturas dos modelos – mudou mais a pergunta que o objeto e sua representação.

O sexto, sétimo e oitavo tipos de incongruências estão associados ao uso de modelos como representações pragmáticas, onde o interesse principal não é descrever com a máxima precisão o objeto, mas apenas utilizá-lo para resolver um problema. Neste caso, busca-se o modelo mais simples que permita essa resolução dentro das restrições do problema (precisão, por exemplo). Esses tipos de incongruências assinalam mudanças de interesse que geram mudanças profundas na representação, deixando de existir uma correspondência completa entre as estruturas.

O nono tipo difere do oitavo porque o núcleo central da teoria utilizada é alterado – corresponde às mudanças de paradigma no sentido kuhniiano,¹¹ como ocorre ao passarmos da mecânica clássica para a relativística.

As incongruências entre modelos não devem ser confundidas com a perda da “equivalência funcional” ou a perda da “equivalência computacional”, discutidas em Larkin e Simon (1987) e Duval (1995, p. 51). Essas questões aparecem na hora de identificar parâmetros dos modelos ou na sua simulação e/ou cálculo de respostas. Aqui tratamos da formação do conceito e da apropriação cognitiva dos modelos e da capacidade de sua mobilização para pensamento e compreensão. Por exemplo, o aluno que usa programas de simulação, como o Simulink[®], que representam sistemas por caixas a serem preenchidas por suas funções de transferência, já deve ter construído os conceitos devidos, senão estará apenas operando um jogo formal cheio de “f(s)” e “g(s)”.¹²

SUGESTÕES PEDAGÓGICAS

Um ponto a ser inicialmente sublinhado é a passagem de modelos físicos a modelos pragmáticos na engenharia. Os primeiros destinam-se a descrever e explicar fenômenos; os segundos estão comprometidos com a resolução do problema a que estão relacionados.

Outro tipo de modelo descrevendo e explicando relações é o modelo lógico, onde diagramas são utilizados por matemáticos para encaminhar demonstrações, fazer contagens e descrever possibilidades (modelos combinatórios) ou organizar o raciocínio. Nos cursos de engenharia, modelos lógicos e modelos físicos precedem os modelos pragmáticos, embora, ainda hoje, pouca atenção seja dada aos primeiros, que são, no entanto, os mais simples e os que mais facilitam discutir a relação de modelagem.

Uma sugestão pedagógica importante aparece no último parágrafo da quarta seção, após a apresentação do paradoxo da construção do modelo. Representações e modelos costumam ser construídos a partir de outros, adicionando ou alterando partes. As primeiras representações e modelos estudadas usam situações em que um dos lados da Figura 3 é intuitivo ou diretamente icônico: imagens, diagramas lógicos repetindo processos de cálculo etc., como ocorre em problemas de geometria plana ou em problemas de combinatórios. Essa é a razão que leva as disciplinas que usam modelagem nos cursos de engenharia a começarem apresentando seus objetos com modelos icônicos, onde cada componente do sistema é representado por um desenho quase realista. Depois, estudam-se as relações entre os componentes, modelando-os a partir de suas geometrias ou de algum conhecimento prévio de física, abstraindo

pouco a pouco a realidade concreta rumo ao modelo completo e rumo aos conceitos emergentes.

Outras sugestões pedagógicas decorrem do que já foi dito. De acordo com Duval, “a discriminação das unidades significantes próprias a cada registro deve ser objeto de uma aprendizagem específica” (DUVAL, 1995, p. 77). Assim, muito cuidado deve ser tomado com a escolha dos símbolos, evitando incongruências irrelevantes. Por exemplo, separar sistemas de sinais por símbolos diferentes, como $g(s)$ e $\hat{u}(s)$. Outro conselho é o de manter os mesmos significados sob os mesmos símbolos durante o tratamento (ver incongruência 4). Para aquele autor, “freqüentemente, é a discriminação das unidades significantes que falta” (p. 76). No entanto, alterar a simbologia ao passar de um problema para outro pode ser interessante, evitando que o aluno tome a representação pelo conceito e limite-se ao cálculo formal.

Nesse sentido, Duval recomenda “explorar todas as variações possíveis de uma representação em um registro fazendo prever, ou observar, as variações concomitantes da representação em um outro registro” (p. 78). Essa é uma condição de abstração para a construção efetiva do conceito.

Repetindo a recomendação na direção da modelagem, é adequado, do ponto de vista pedagógico, explorar variações do problema a ser resolvido que não alterem o modelo e também variações do problema que o alterem, de forma a cobrir os diversos tipos de incongruência acima apontados e tornar explícita e consciente a relação de modelagem.

Da mesma forma, é pertinente considerar problemas diferentes que conduzam ao mesmo modelo. Esse é o objetivo da discussão sobre “tipos de modelos” encontrada em livros da área de controle e automação (OGATA, 1997) e assunto central da técnica de modelagem por grafos de ligação (KARNOPP; ROSENBERG, 1975). Neste campo, é especialmente relevante a questão apresentada acima para ilustrar a oitava incongruência.

Em geral, é importante enfrentar as incongruências diretamente: procurá-las e resolvê-las. Como já mostrado, elas são o *lugar preferencial da atividade pedagógica*. Isso implica não separar completamente representações diferentes do mesmo objeto em disciplinas diferentes – como ocorre com os modelos físicos e modelos pragmáticos (referidos a problemas de engenharia) ao longo do curso de engenharia.

UM TESTE PRELIMINAR

Na disciplina ELE1814 - Controles e Servomecanismos, ministrada na PUC-Rio, aplicamos a metodologia a partir de projetos, conforme apresentada em da Silveira (2001, 2003), nos quatro períodos 2003.2, 2004.1, 2004.2 e 2005.1 (o número depois

do ponto indica o semestre). Cabe lembrar que os trabalhos são voltados à verificação da competência de projetar controladores explicitando os princípios da técnica e interpretando os resultados no contexto apresentado no enunciado do trabalho.

A cada semestre os alunos realizaram três projetos, havendo similaridades estruturais, mas não igualdade de projetos em dois semestres consecutivos. No dois últimos, reorganizamos a seqüência de perguntas de forma a expor, exigir e discutir com clareza as diferentes transposições e conversões, recuperando-as do problema original até os conceitos envolvidos, fixando a invariância dos conceitos frente às mudanças das representações. Por outro lado, estudamos variações dos problemas originais que alteravam parte das representações, buscando tornar claro o que mudava e por quê. Essa discussão exigiu muito tempo, pois fez emergir explicitamente todas as dificuldades de compreensão já relatadas nos artigos citados neste artigo, tornando-as um lugar preferencial do trabalho didático.

Sendo essas as únicas alterações metodológicas implementadas entre os dois primeiros semestres e os dois últimos e as turmas envolvidas compartilhando os mesmos descritores sociais, os resultados obtidos podem ser comparados. São eles: semestre 2003.2: (6,9;2,6), semestre 2004.1: (6,9;2,5), semestre 2004.2: (7,7;1,0), semestre 2005.1: (8,0;1,2), onde o primeiro número é a média final da turma e o segundo número, a sua variância. Nota-se uma melhora nos semestres em que foi ensaiada uma metodologia baseada na discussão aqui apresentada.

O mesmo teste em sala versando sobre o material do primeiro terço da disciplina foi aplicado nos dois últimos semestres, aproveitando que todos os alunos de 2005.1 eram novos. Em 2004.2 o teste foi aplicado antes da exploração das transposições e conversões, embora toda a teoria já tivesse sido exposta em detalhes, seguindo de perto o material exposto em Chen (1993). Em 2005.1 foi usada a mesma estratégia geral, mas o teste só foi aplicado depois da exploração das transposições e conversões (provocada pela exposição do tema do primeiro projeto). Considerando que as amostras de alunos eram semelhantes, a diferença das notas médias revela a vantagem da estratégia: passou-se de 5,5 a 8,5 (as variâncias passando de 0,7 a 1,4).

Cabe observar que nos dois semestres os alunos puderam realizar uma segunda versão do teste, sempre depois da exploração das transições e conversões. Escolhi a maior nota obtida, de forma a que a alteração da posição do teste não afetasse essencialmente a média final.

Este teste preliminar nos encoraja a considerar a análise semiótica aqui apresentada na preparação da estratégia didática a ser empregada em cursos de engenharia. Estudos analíticos mais precisos devem ser feitos sobre problemas típicos,

afetando a questão das transposições e tratamentos e sua relação com a formação de conceitos e o domínio da modelagem, talvez repetindo o tipo de estudo apresentado em Machado (2003). Esse será o tema de trabalhos futuros.

CONCLUSÕES

Freqüentemente, professores fogem do lugar do trabalho pedagógico, onde está o problema a ser enfrentado. Não mudam de registro e não discutem a relação de modelagem. Limitam o aprendizado do aluno ao tratamento de uma única representação, o que o capacita essencialmente a um jogo algébrico sem referentes e descontextualizado: nem o sentido oferecido pelo conceito (a compreensão), nem o sentido oferecido pela referência ao mundo concreto e a seus problemas.

O mote deste trabalho é variar registros, modelos e problemas, explorar conversões e mudanças e buscar e enfrentar as incongruências – relacionando representações e modelos a conceitos e problemas concretos, de forma a favorecer a abstração construtora dos conceitos e gerar a capacitação no uso dessas ferramentas.

Em conclusão, para cada área do conhecimento e para cada nível de aprendizado há um trabalho a ser feito, construindo tipologias de problemas e de modelos, identificando incongruências e buscando os melhores caminhos para resolvê-los através da atividade do aluno, que deve ser o sujeito do próprio aprendizado.

AGRADECIMENTOS

Entre as análises semióticas apresentadas em da Silveira (2003) e este trabalho houve a sugestão fundamental da professora Helena Cury, que me apresentou ao trabalho de Raymond Duval, que já desenvolvera a linguagem que me faltava. O autor também agradece a colaboração de um dos revisores, que muito ajudou a melhorar o texto e precisar sua linguagem e sua mensagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACHELARD, G. *O novo espírito científico*. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1968.
- BASMADJIAN, D. *The art of modeling in science and engineering*. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC, 1999.
- BUNGE, M. *Teoria e realidade*. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- _____. *Dicionário de filosofia*. São Paulo: Perspectivas, 2002.
- CHEN, C. T. *Analog and digital control system design*:

transfer-function, state-space, and algebraic methods. Fort Worth: Saunders College Publishing, 1993.

CLARCK, H. H.; CHASE, W. G. On the process of comparing sentences against pictures. *Cognitive Psychology*, v. 3, p. 472-517, 1972.

DA SILVEIRA, M. A. Conceitos, sentido e competências: aplicando o ensino concorrente. *Revista Brasileira de Ensino de Engenharia* (ABENGE), v. 20, n. 2, p. 15-25, dez. 2001.

_____. Planificação de conteúdos e de problemas: um ensaio sobre a didática do conceito de estabilidade. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 22, n. 1, p. 33-48, 2003.

_____. Sobre representações pragmáticas. In: JAHN, A. P. et al. (Org.). *História e tecnologia no ensino da matemática*, Rio de Janeiro, RJ: IME-UERJ, 2005. v. 2. CD-ROM.

DUVAL, R. *Sémiosis et pensée humaine*. Berna, Suíça: Peter Lang, 1995.

_____. Registros de representações semióticas e funcionamento cognitivo da compreensão em matemática. In: MACHADO, S. D. A. (Org.). *Aprendizagem em matemática*. Campinas, SP: Papirus, 2003.

GORDON, G. *System simulation*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1969.

HABERMAS, J. *Connaissance et Intérêt*. Paris, França: Gallimard, 1976.

HOUAISS, A. *Dicionário Houaiss da língua portuguesa*. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

JAPIASSU, H.; MARCONDES, D. *Dicionário básico de filosofia*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991.

KARNOPP, D.; ROSENBERG, R. C. *System dynamics: a unified approach*. New York: Wiley, 1975.

KUHN, T. *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion, 1992.

_____. *A tensão essencial*. Lisboa: Edições 70, 1989.

LARKIN, J. H.; SIMON, H. A. Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, v. 11, p. 65-99, 1987.

MACHADO, S. D. A. (Org.). *Aprendizagem em matemática*. Campinas, SP: Papirus, 2003.

OGATA, K. *Modern control engineering*, 3rd edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

PIAGET, J. *Abstração reflexionante*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1977.

VYGOTSKY, L. *Pensée et langage*. Paris, França: Sociales, 1985.

NOTAS

- ² Esta afirmação pode ser apoiada na teoria psicológica de constituição da linguagem e de sistemas simbólicos exposta em Vygotsky (1934), ou na epistemologia de Habermas (1976). Estes dois autores mostram que mesmo os modelos construídos apenas para compreensão ou por curiosidade atendem a algum interesse, contradizendo uma pretensa “ciência desinteressada”.
- ³ Ver, entre outras, Gordon (1969), Karnopp e Rosenberg (1975), Ogata (1997) e Basmadjian (1999).
- ⁴ Neste caso diremos que são condições ideológicas, principalmente se os valores estiverem escondidos por efeitos do discurso utilizado.
- ⁵ Acréscimo do autor à proposição inicial de Duval.
- ⁶ Conforme da Silveira (2005).
- ⁷ Ver as listas do Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET), <http://www.abet.org>, da Société Européenne pour la Formation des Ingénieurs (SEFI), <http://www.ntb.ch/SEFI>, da Associação Brasileira para o Ensino de Engenharia (ABENGE), <http://www.abenge.org.br>, e as Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Engenharia (Parecer CNE/CNS 1362/2001 e Resolução CNE/CNS 11/2002), em <http://www.mec.gov.br/Sesu/diretriz.htm>.
- ⁸ Ver Machado (2003).
- ⁹ Isto é, um “filtro”, na linguagem da eletrônica.
- ¹⁰ O livro texto de Ogata é um dos melhores nessa área e o que mais cuidadosamente introduz a modelagem física dos sistemas de controle, sendo um dos raros a tratar explicitamente o problema. Por isso foi usado como exemplo.
- ¹¹ Thomas Kuhn (1989).
- ¹² Ver (da Silveira, 2001).

DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR



Marcos Azevedo da Silveira

Bacharel em Matemática (1974, PUC-Rio), Mestre em Engenharia Elétrica (1976, PUC-Rio) e Docteur d'État na especialidade Automação (1981, Un. Paul Sbatier, Toulouse). É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio desde 1975. Pesquisador na área de Matemática Aplicada a Controle e Automação, desde 1994 tem também se dedicado à educação em engenharia. Foi um dos organizadores do programa REENGE, da habilitação Controle e Automação na PUC-Rio, e de diversos outros projetos e eventos na área de educação em engenharia, em particular do CIEEE2005, assunto do presente artigo. Mais recentemente, recebeu o prêmio Pierre Lucie pela contribuição no assunto e publicou o livro *A formação do engenheiro inovador*.

