

CONHECIMENTO, A PEDRA ANGULAR DO DESIGN DE TEL¹

N. Balacheff²
F. Bellemain³

RESUMO

Esse texto apresenta o argumento que conhecimento é a pedra angular do design de sistemas TEL. Numa primeira parte, apresentamos o que conhecimento significa na nossa abordagem, e introduzimos a noção de concepção. Depois, exploramos até onde a *problemática* da validação é central em nossa pesquisa. Para concluir, introduzimos uma caracterização de concepção que pode ajudar a abordar o problema do desenvolvimento de sistema TEL num nível teórico.

Palavras chave

Epistemologia, inteligência artificial, transposição informática, modelização de conhecimentos, modelização do aluno, interação pessoa-sistema, “technology enhanced learning” (TEL).

¹ TEL designa os ambientes “Technology Enhanced Learning” (aprendizagem ampliada pela tecnologia). O sentido de ampliada nesse contexto é próximo do seu sentido no caso da noção de “Realidade Ampliada” (Enhanced Reality). A Realidade Ampliada trata do uso das tecnologias para ampliar nossas capacidades humanas de perceber ou agir. Obviamente é um domínio de estudo imenso na medida que quase qualquer uso da tecnologia visa a aumentar nossas capacidades de perceber ou agir. No nosso contexto específico, TEL caracteriza os ambientes visando a aumentar as capacidades de aprendizagem do aprendiz. No resto do texto, usaremos o acrônimo TEL para designar esses ambientes.

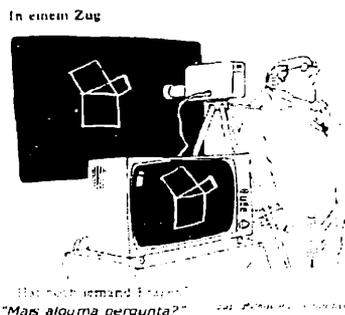
² CNRS. Equipe MeTAH. Laboratoire Leibniz-IMAG. Grenoble, France. Nicolas.Balacheff@imag.fr

³ Departamento de Expressão Gráfica. CAC-UFPE. Recife, PE. f.bellemain@terra.com.br

DO APRENDIZ AO CONHECIMENTO, PELA APRENDIZAGEM

A abordagem e a resolução das questões relativas à integração da tecnologia da informação e da comunicação (ICT) na educação foram inicialmente lideradas pela própria tecnologia e suas promessas. Todos sabemos o que aconteceu durante a segunda metade do último século, foram muitas expectativas, mas poucos sucessos. Uma das lições aprendidas nesse período é que o impulso tecnológico não é suficiente e que ele não garante, de jeito algum, o sucesso de um projeto educativo tecnológico, qualquer que seja o significado dado à palavra sucesso. Introduzir a mais avançada tecnologia, integrar na educação a mais sofisticada solução ICT, não é suficiente desde que se dedica uma atenção suficiente ao objetivo principal da educação: aprender (no sentido de conhecer). Ou seja, depois do impulso tecnológico inicial, o século 20 terminou-se sobre a determinação e utilização de princípios de design de TEL orientados por nossos conhecimentos do aprendiz e de como ele constrói seus conhecimentos. Retomando a terminologia utilizada por Rabardel (1995), depois uma de uma abordagem inicial tipicamente tecnocêntrica das questões da integração da tecnologia na educação, os criadores de ambiente TEL, voltaram para uma abordagem antropocêntrica dessas questões.

De fato, aprendizes mais que aprendiz deve ser no centro da nossa problemática. O uso do plural é necessário desde que a educação é um processo social assim como um processo de socialização. De um outro lado, o foco nos aprendizes tende a esconder outros usuários fundamentais, constitutivos de qualquer projeto educacional como professores, treinadores, instituições sob vários aspectos, e também parentes, ou mesmo a sociedade que norteia as decisões educativas. Essa diversidade de atores nos



projetos educacionais pode parecer tão ampla e heterogênea que, no final, ao considerá-los pode dificultar, em vez de ajudar, a resolver nosso problema de design de sistema TEL. Se isso é verdade numa abordagem superficial, observa-se que essa heterogeneidade não é tão profunda assim que se percebe que todos os atores de qualquer projeto educacional têm algo em comum: a aprendizagem. Qualquer que seja o tipo de usuário da educação, considerando o mais central, como o aprendiz, até o mais periférico, como a sociedade, a aprendizagem é o centro de interesse de todo projeto educacional. A aprendizagem, que ela seja considerada como produto ou como processo, é no centro de qualquer problemática de ICT na educação.

Poderíamos afirmar que o usuário de ICT na educação é a própria aprendizagem? Mesmo se essa afirmação parece estranha, de fato, podemos observar que são efetivamente as questões de aprendizagem que norteiam a pesquisa e inovação no nosso domínio. Porém estimamos que princípios de concepção de sistema TEL norteados somente pelas questões de aprendizagem em geral só podem produzir os mesmos resultados frustrantes que quando os sistemas são desenvolvidos guiados somente pelas questões tecnológicas. A razão para qual antecipamos essa frustração vem de que a aprendizagem não tem um significado bem definido a menos que sejamos claro sobre seu objetivo, ou seja: *conhecimento*. De fato, qualquer que seja a aprendizagem considerada, ela é necessariamente a aprendizagem de alguma coisa, e essa coisa tem um papel central nessa aprendizagem. Considerando a aprendizagem da matemática e da física, a aprendizagem da literatura e da cirurgia, a aprendizagem da química e da filosofia, parece óbvio que esses tópicos são drasticamente diferentes, isso do ponto de vista do senso comum, além de uma perspectiva cognitiva ou educacional. Isso ajuda a entender que não é aprendizagem que é central em nossa problemática, mas a aprendizagem de alguma coisa. Nossa pesquisa, nosso design e nossa inovação não são centrados no aprendiz, mas centrados na “aprendizagem de alguma coisa”.

Mesmo se isso pode parecer paradoxal, ou mesmo reacionário, para muitos leitores, consideramos que depois de sessenta anos

de pesquisas e desenvolvimentos no domínio da TEL, temos que voltar para a compreensão do que é conhecimento. A nosso ver, entender conhecimento é uma condição estratégica para a criação de TEL, tão de um ponto de vista teórico como numa perspectiva operacional. Agora, não consideramos que nosso programa de pesquisa é resolver um problema que é de fato no centro de mais de dois mil anos de filosofia e epistemologia: “o que é o conhecimento?”. Nosso objetivo é muito mais modesto, na medida em que estamos buscando uma caracterização pragmática do conhecimento a fim de assentar nossa compreensão do que deve ser um sistema TEL para melhor impulsionar o design e a implementação efetiva de tal sistema. Nesse contexto, a palavra pragmática é utilizada no sentido dado por Popper, sentido relevante no caso da nossa problemática. Mesmo se vamos, com certeza, deixar aberta a maioria das questões levantadas por esse conceito filosófico, ele garante uma coerência suficiente com o que conhecemos de ciências cognitivas e epistemologia.

Conhecimentos, como pedra angular da concepção de TEL será o foco desse artigo. Antes de qualquer coisa, queremos esclarecer que conhecimento, tal que o consideramos, não é uma entidade dada a priori, como isso pode aparecer em alguns textos onde o conhecimento é considerado como algo claro e definitivo.

SABER, CONHECIMENTO E CONCEPÇÕES CONHECIMENTO: UMA PROPRIEDADE EMERGENTE DA INTERAÇÃO

A natureza do conhecimento (procedural versus declarativo, formal versus pragmático, etc.), a forma como essa natureza pode ser contemplada no design e na implementação, a representação do conhecimento num objetivo computacional são questões que devem ser sempre abordadas na criação de sistema TEL. E essas questões são mais importantes ainda pela necessidade que temos de desenvolver uma visão do conhecimento compatível com as limitações e neces-

sidades computacionais, as teorias psicológicas da aprendizagem e as teorias educativas.

Vamos iniciar com uma idéia simples: o objetivo explícito de um ambiente TEL é permitir ao usuário aprender algum conhecimento como o resultado da sua interação com o artefato digital. Apesar de que “virtualidade” seja com freqüência usado em nossa área, ninguém vai recusar que esse artefato seja físico. Ele pode tomar a forma de um computador com o teclado, de uma tela com o mouse ou “trackpad”, a forma de um PDA ou um telefone, e com muita freqüência ele pode fornecer um acesso para recursos na web. Em todos casos, ambiente TEL é um dispositivo físico com qual interagimos, atuamos e através de que recebemos retroações. Ou seja, a interação é no centro do design de sistema para a aprendizagem e, por consequência, deve ficar no centro da nossa caracterização de conhecimento. Para progredir nessa direção, estamos tentando resumir na tabela seguinte o que constitua uma base inicial comum para caracterizar o conhecimento.

Princípios consensuais de caracterização de conhecimento:

- (i) O conhecimento não pode ser reduzido a um texto;
- (ii) A aprendizagem é um processo dinâmico;
- (iii) Os aprendizes não recebem passivamente conhecimentos, eles são construtores ativos de sentidos;
- (iv) Os erros são sintomas da natureza da compreensão do aprendiz.

Princípios de Vergnaud (1992):

- (v) O conhecimento tem sua origem na necessidade de resolver problemas;
- (vi) A eficiência na resolução de problemas é o critério de sobrevivência do conhecimento.

Tabela 1

É importante destacar que os princípios de Vergnaud evidenciam a existência de uma relação fundamental entre conhecimento e problema, e necessitam uma definição conjunta das duas noções.

De fato, as questões de língua têm um papel fundamental na compreensão e descrição dos conceitos. Por exemplo, expressar essas idéias a respeito do conhecimento em inglês levanta a dificuldade da tradição epistemológica que sustenta essa língua. Particularmente, a palavra "Knowledge" é associada tão para as construções intelectuais institucionalizadas pela sociedade que para as construções intelectuais produzidas pelo ser humano como resultado da resolução de problemas ou da execução de tarefas. As primeiras construções são, com frequência, consideradas como fixas e estáticas quando, o contrário, as segundas são claramente mutantes e dinâmicas. No nosso caso, o que chamamos de conhecimento corresponde com o segundo sentido: ele é fruto de construções dinâmicas. Quando o inglês propõe uma palavra para os dois tipos de construção, as línguas de origem latim oferecem duas palavras: "Saber" e "Conhecimento". A palavra Saber é reservada para a conotação estática das construções intelectuais evocadas, a palavra Conhecimento é mais associada ao dinamismo da compreensão e da construção de sentido. Para destacar essa distinção no caso da língua inglesa, propomos usar a palavra "knowing" enquanto nome como a contrapartida cognitiva de "knowledge".

No entanto, existe ainda uma dificuldade: considerando a perspectiva cognitiva, realizamos rapidamente que mesmo se referindo a um elemento bem delimitado de saber, o conhecimento associado é uma entidade complexa e multiface. O mais surpreendente é que, de fato, um indivíduo pode evidenciar diferentes conhecimentos, podendo ser às vezes contraditórios, em situações diferentes, dependendo do contexto e das circunstâncias, mesmo se essas situações podem parecer isomórficas para um especialista, ou seja, associadas o mesmo elemento de saber. No início dos anos oitenta, a palavra "misconception" era usada com frequência para

identificar a forma específica que o aprendiz associava diversas compreensões a um conceito específico. O mais incomodante na palavra “misconception” é que ela designa um conhecimento errado. Por isso, sugerimos o uso da palavra “concepção” para designar as diversas contextualizações de um conhecimento. Uma concepção pode, nesse sentido, ser certa ou errada,

Para resumir, usamos a palavra conhecimento numa perspectiva de aprendizagem e a palavra saber numa perspectiva de ensino, ou seja, uma perspectiva mais institucional. Para contemplar toda a complexidade de um conhecimento, nós o consideramos como um conjunto de contextualizações em diversas situações, e chamamos concepção cada uma dessas contextualizações.

Uma concepção tem todas as propriedades evocadas na tabela 1. Sua caracterização depende das especificidades do aprendiz, do ambiente dando o contexto da interação e do tipo de tarefa que justifica a aparição da concepção. Uma concepção não pode ser caracterizada só no discurso do aprendiz, nem nas características do ambiente, e menos ainda no discurso do professor, treinador ou designer que tem a intenção subjacente à situação que ele criou.

Então, temos a proposição de caracterização seguinte:

Um conhecimento é um conjunto de concepções. Cada concepção é caracterizada pelo equilíbrio dinâmico do ciclo ação/retroação de interação entre o sujeito conhecedor (S) e o meio específico (M) organizado por certas restrições.

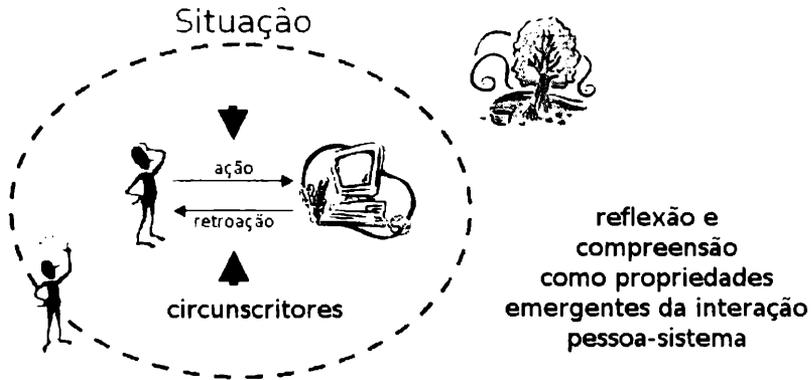


Figura 1

Antes de ir mais adiante, temos que situar a noção meio (milieu): Os métodos desenvolvidos pela didática tendem a orientar a organização da aprendizagem na criação de situações que favorecem a atividade do aluno, particularmente pela resolução de problemas. Essa atividade é em geral descrita como a interação do aluno com o meio: "L'élève apprend en s'adaptant à un milieu qui est facteur de contradictions, de difficultés, de déséquilibres, un peu comme le fait la société humaine. Ce savoir, fruit de l'adaptation de l'élève, se manifeste par des réponses nouvelles qui sont la preuve d'apprentissage" (BROUSSEAU, 1986, p. 48-49).

Na interação com o software, o aprendiz interage com as representações através de artefatos e deve compor com eles e com as retroações que o sistema produz para resolver os problemas e efetuar tarefas. A especificidade dos artefatos e representações com o computador influi sobre as estratégias e processos de resolução do aprendiz. Quando temos, enquanto autor da situação de aprendizagem, como agir sobre os artefatos para favorecer tal ou tal processo de resolução numa situação, os artefatos funcionam como variáveis de controle da situação. Mas, de forma geral, as especificidades dos artefatos e representações são associadas a "constraint" da situação com o computador. Pela variedade de

artefatos e representação que a ciência da computação permite desenvolver, temos com o computador a oportunidade de multiplicar os meios para o design de situações. Mas, em contrapartida, temos sempre o risco de uma contextualização importante das aquisições do aprendiz nos ciclos ação/retroação de interação entre o sujeito conhecedor (S) e os meios computadorizados específicos (M). Não queremos sair do tema desse artigo e vamos somente destacar que uma reflexão importante seria de situar, relativamente as nossas noções de concepção e conhecimento, os saberes fazeres adquiridos nas interações com o computador e a questão da contextualização das aquisições em meio computadorizado.

Precisamos, mais uma vez, de levantar uma questão de terminologia para determinar um termo português para o termo inglês de "constraint". Psicólogos usam em geral o termo circunscritores para designar os elementos que canalizam, obviamente sem o determinar completamente, o desenvolvimento: "o desenvolvimento é determinado na medida que sempre é guiado por algum conjunto de elementos que o organiza em alguma direção. É indeterminado porque dentro da orientação geral do desenvolvimento, a direção exata é impossível de ser prevista" (ROSSETTI-FERREIRA et al., 2004). Os circunscritores circunscrevem um espaço de ação e evolução possíveis do sujeito. Esse termo convém a nossa aceitação de "constraint".

Em nossa caracterização de conhecimento e concepção, pelo sujeito conhecendo, não estamos nos referindo ao indivíduo com toda a sua complexidade, mas ao indivíduo sobre a luz polarizada da aprendizagem; em outras palavras, o indivíduo é visto do ponto de vista da interação S/M observada do ponto de vista do objetivo de aprendizagem. Da mesma forma, o meio M não é todo o ambiente do indivíduo, mas somente sua parte significativa desse mesmo ponto de vista. M, no caso geral, pode ser um dispositivo físico, ou um indivíduo (inclusive ser o próprio sujeito), ou um corpo social, ou quase qualquer coisa. Os circunscritores determinam a economia específica do sistema.

A figura 1 evoca duas outras dimensões de situações de ensino ou treinamento. Mesmo se elas são tão importantes quanto as dimensões que decidimos tratar, não as explicitaremos nesse texto. Primeiro, a dimensão de aprendizagem esta ligada à existência a priori de um objeto a ensinar, segundo, a situação de aprendizagem é organizada com a proposta de estimular e sustentar o processo de aprendizagem. Essas duas dimensões são essenciais para a compreensão e modelização de qualquer situação educativa ou de treinamento, mas nos vamos nos concentrar sobre o sistema S/M e o computador, que concretiza o meio computadorizado (meio TEL) em relação com o conhecimento e a aprendizagem.

A visão de *concepção*, *conhecimento* e *conceito* apresentada sucintamente aqui, foi desenvolvida na estrutura do modelo *cK ϵ* que ele mesma esta em desenvolvimento há aproximadamente dez anos, sustentando vários dos nossos projetos (SOURY-LAVERGNE, 2003). Vamos usar essa estrutura *cK ϵ* para organizar a abordagem das questões tratadas nesse texto.

O objetivo da pesquisa e da inovação em sistema TEL é conceber e implementar um ambiente digital criando um meio M de tal forma que quando se observe um certo estado de equilíbrio no sistema S/M, é razoável pretender que o indivíduo aprendeu (sabe) alguns objetos de conhecimento.

TRANSPosição INFORMÁTICA E VALIDADE EPISTEMOLÓGICA

Uma vez um objeto de saber identificado como um objeto de ensino, uma seria de transformação adaptativas devem ser aplicadas para que ele seja efetivamente ensinado e aprendido, processo que é chamado de transposição didática (CHEVALLARD, 1985). Portanto, uma vez especificado o conteúdo a ensinar, outros processos vão provocar novas transformações, que podem ser o resultado do próprio ensino, como consequência de circunstanciais específicas, ou como consequência do próprio entendimento que o professor tem do

conteúdo a ser ensinado. Nesse quadro, um sistema TEL introduz uma nova fonte de transformação do saber; transformações que vamos explorar agora.

Vamos começar com uma analogia considerando a relação entre um livro e um filme (uma relação que estimamos como próxima daquela entre um livro didático e um *software* educativo). Porque o filme deve levar para a vida real as personagens, paisagens e a própria ação, muitas decisões são tomadas, decisões que podem introduzir eventos que não foram previstos pelo autor do livro, e, às vezes, nem previstas pelo próprio autor do filme (pense naquela árvore do lado esquerda da tela que só você percebeu). Roman Jakobson chamou transmutação “this motion of a text across other media”. No mesmo sentido, o sistema TEL introduz a transmutação do saber; agora, se trata de um tipo de transmutação computacional.

Prolongando a analogia anterior, se o livro e o filme diferem pela forma da mensagem que eles apresentam, eles, com frequência, diferem também pelo conteúdo da mensagem. De fato, podemos evidenciar pelo menos três elementos que intervêm no fato que as mensagens do livro e do filme sejam diferentes:

- o suporte material, fundamentalmente diferente entre o livro e o filme. Cada um dos suportes (papel ou filme) tem seus limites e suas contribuições relativamente à transmissão de uma mensagem, a modificando.
- os objetivos dos autores, diferentes entre o livro e o filme, mesmo quando se trata da mesma pessoa. Por exemplo, podemos imaginar que num livro, a mensagem política é central, quando na sua versão filmada, o romance é o elemento que se destaca.
- a natureza dos objetos das mensagens. Podemos, por exemplo, tentar imaginar as versões livro ou filme de um documentário sobre um animal ou das histórias de Gabriel Garcia Marques.

Da mesma forma, as transmutações subidas pelo saber nas suas representações computacionais podem ser caracterizadas:

- pelo suporte material disponível para representar os objetos de saber,
- pelos objetivos dos criadores/desenvolvedores de softwares,
- pela natureza dos saberes manipulados e suas estruturas.

Do ponto de vista do suporte material, a ciência da computação multiplica as linguagens e ferramentas permitindo representar e manipular os mais diversos saberes. Assim, mesmo se estamos ainda longe da concepção inicial (Newell e Simon) do computador simulando o funcionamento do cérebro humano, o computador mostra-se, através dessa evolução das linguagens e ferramentas, cada dia mais capaz de realizar tarefas e raciocínio tipicamente “humanos”. Os problemas nos quais temos um desempenho bem superior ao computador são aquelas onde utilizamos nossas múltiplas capacidades perceptivas para construir as significações e os símbolos necessários ao cálculo e à resolução do problema. Nessa construção de significações e símbolos, nossas competências podem ser identificadas em termos de reconhecimento de forma, determinação de analogias, interpretação do contexto, modelização ... Essas competências são difíceis de implementar num computador, mesmo se a ciência da computação tem na suas metas justamente de criar e desenvolver essas competências (por exemplo, o uso de rede neural para o reconhecimento de formas, “data mining” para criação de contexto, etc.). De um outro lado, quando se trata do cálculo simbólico, o computador tem, por sua vez, um melhor desempenho.

Essa problemática de interpretação de situações que diferencie ainda ser humano do computador pode parecer sair da nossa problemática de estudo das transmutações computacionais de um saber identificado. De um lado, temos a questão da representação dos

saberes, do outro temos a questão de uma forma de representar e automatizar as competências humanas. De fato, veremos mais para frente que a questão da representação computacional de um saber tem conseqüências sobre a interpretação das ações do aprendiz e as retroações do sistema a essas ações. De forma geral, as atividades humanas, e talvez mais ainda as atividades devendo produzir aprendizagens, não podendo se reduzir a um cálculo simbólico, o computador para fornecer retroações pertinentes deve oferecer a possibilidade ao sujeito de realizar essas atividades.

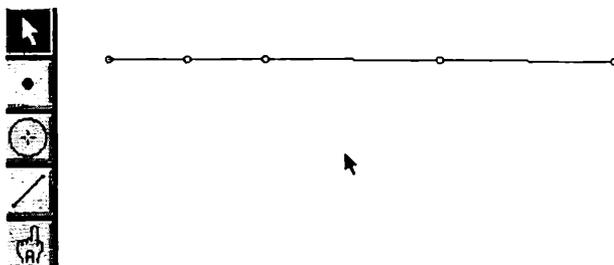
Mas, vamos evocar algumas das transmutações consecutivas à representação de um saber no suporte material do computador e, sobretudo, as características e limites das diversas formas de representação oferecidas pelo computador.

No caso de representações com os princípios da IA e do tratamento da informação, dois tipos de circunscritores clássicos e, com freqüência, evocados na literatura da ciência da computação, caracterizam as representações. Eles são a *granularity* (granularidade) e a *compilation* (compilação). A compilação de um saber e a granularidade ligam a capacidade dos sistemas em ser explorados e suas capacidades a gerar explicações. Desde as primeiras pesquisas sobre Tutores Inteligentes (ITS), as questões de granularidade e compilação apareceram como de especial importância numa perspectiva educativa (por exemplo, o trabalho em torno do projeto GUIDON).

Mesmo recebendo uma atenção menor na literatura, talvez porque são outras formas de representação que são usadas que aquelas que se apóiam sobre os princípios da IA e tratamento da informação, queremos apontar outros circunscritores nesse texto que, a nosso ver, são importantes na avaliação de sistema TEL. Particularmente, no caso de representações de saberes usando estruturas de dados, números e algoritmos de calculo, são as noções de completude e adequação que caracterizam as representações. Para ilustrar essas duas noções, propomos a leitura de Bellemain (2000), completando Balacheff (1999). Bellemain ilustra como dois softwares,

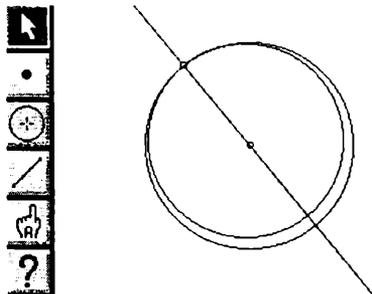
Cabri-géomètre e Geometer Sketchpad, tratam essas questões de forma diferente no caso da geometria:

“A completude: Na geometria dinâmica, a completude é atingida quando qualquer objeto que pode ser definido com as especificações pode ser representado com o registro de representação da geometria dinâmica.”



Construção da circunferência circunscrita a um triângulo “quase achatado” no Geometer’s SketchPad (JACKIW) não é desenhada, enquanto ela é definida geometricamente.

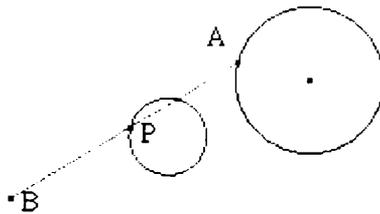
“A adequação: Um registro de representação é adequado se ele não permite a representação de objetos geométricos que não podem ser definidos no modelo.”



No mesmo software, uma circunferência circunscrita a três pontos próximos de uma circunferência não é confundida com essa circunferência inicial, enquanto ela deveria no ponto de vista da geometria.

Em paralelo com limites e circunscritores, o computador tem contribuições, entre outro, através da criação de novos registros de representação. E o caso, por exemplo, da geometria dinâmica que não se reduz à representação gráfica habitual dos objetos da geometria na tela do computador, mas funciona com um novo sistema de representação, gráfica ainda, dos objetos da geometria com suas especificidades e limites. Sem entrar em detalhes nas características originais do sistema de representação da geometria dinâmica (BELLEMAIN, 2001), vamos dar um exemplo de um funcionamento que mostra que na transmutação do saber geométrico para produzir a geometria dinâmica não somente necessita de ultrapassar os limites materiais dos sistemas de representação do computador, mas também exige a criação de regras de funcionamento que não são fornecidas pelo saber geométrico, nem pelas regras de funcionamento do sistema de representação gráfica habitual dos objetos geométricos. Obviamente, essas regras podem ter consequências sobre as aprendizagens consecutivas à interação com um software de geometria dinâmica.

Um exemplo característico é fornecido pelo comportamento de um ponto, que não tem outras propriedades geométricas que ser sobre uma reta: ponto P. Quando objetos da figura são manipulados e deslocados (por exemplo, o ponto A) provocando uma modificação da posição da reta, o fato de ser um ponto da reta não é suficiente para determinar sua nova posição de forma única. De fato, qualquer ponto da reta é aceitável e seria aceitável, de um ponto de vista geométrico, que sua nova posição seja escolhida aleatoriamente. Uma escolha aleatória não é o que os softwares de geometria implementam em geral. Para determinar a nova posição do ponto, uma propriedade, implícita para o usuário, é utilizada e tem conseqüências espaciais e geométricas: na maioria dos casos, o lugar geométrico desse ponto calculado pelo computador tem uma relação conhecida com o percurso do objeto deslocado (o ponto A sobre a circunferência), relação que não pode ser deduzida das especificações geométricas explicitadas da figura (BALACHEFF, 1993). A propriedade, implícita para o usuário, escolhida pelos desenvolvedores de softwares de geometria dinâmica satisfaz a duas exigências razoáveis a respeito das representações dinâmicas dos objetos geométricos: necessidade de conservar a impressão de continuidade do movimento dos objetos durante um deslocamento e a necessidade de poder, pelo movimento inverso, voltar às posições iniciais dos objetos.



O fato que existem implícitos no uso de representação gráfica não é novidade e a existência de implícitos no caso das representações gráficas computacionais não é surpreendente. Considerando, por exemplo, as representações com régua e compasso, Euclides, desde a primeira proposição do primeiro livro dos Elementos efetua e justifica uma construção utilizando implícitos do desenho, obviamente sem querer, desde que ele tem como meta de usar somente os axiomas e postulados enunciados. A existência de implícitos no uso

de representação gráfica é, de uma certa forma, inevitável e mesmo necessária para que elas cumpram suas funções de produção de significados, elaboração de conjecturas e emergência de modelizações.

Para ilustrar como as características dos saberes e sistemas de representação envolvidos podem influenciar suas transmutações computacionais, vamos continuar com um exemplo de geometria e, sobretudo, de geometria dinâmica. Softwares de geometria dinâmica implementam o princípio de manipulação direta na implementação das suas interfaces. A manipulação direta dos objetos de geometria na tela do computador é uma das marcas registradas dos softwares de geometria dinâmica. Portanto, para implementar esse princípio, são dois sistemas interconectados de representação dos objetos do saber geométrico que são necessárias: um gráfico (os pixels da tela) e um analítico (um sistema de coordenadas). A razão da necessidade desse duplo sistema de representação dos objetos é que não existe mecanismo de manipulação dos pixels da tela sem passar pelas coordenadas desses pixels. A rigor, podemos falar de três sistemas de representação: gráfico (os pixels representando os objetos), analítico (as coordenadas dos objetos) e simbólico (as especificações geométricas). De fato, para implementar o princípio de manipulação direta dos objetos geométricos, de uma certa forma, temos uma tripla transmutação do saber. Cada um desses sistemas tem características próprias que não existem nos outros dois, características que conduzem os desenvolvedores a completar cada sistema de representação das informações que não são disponíveis nos outros. Vamos tomar o exemplo da orientação: na geometria gráfica, problemas podem ser resolvidos sem que seja definida uma orientação dos objetos. Portanto, na representação analítica das mesmas retas, elas vão ter uma orientação, seja através do vetor diretor escolhido, seja através da ordem dos pontos de definição da reta. A orientação da representação analítica dos objetos é em geral escolhida em função das ações do usuário: a reta será orientada em função da ordem de seleção dos seus pontos de definição. Os casos para quais as intenções e manipulações do usuário no nível de uma representação são

interpretadas pelo software de geometria dinâmica para poder informar as outras representações são inúmeros. Existem exemplos clássicos sobre o gerenciamento dos pontos de interação de objetos que distinguem softwares como Cabri-géomètre ou Geometer's (Sketchpad) e que tem consequência importantes sobre as situações de uso desses softwares para a aprendizagem. Mesmo tendo muitos mecanismos desenvolvidos para poder interpretar as intenções do usuário e informar as representações internas, os softwares de geometria são ainda longes de ter as capacidades de reconhecimento de formas, por exemplo, que nos temos na manipulação de representações gráficas.

Para ilustrar o terceiro ponto da questão das intenções didáticas dos autores de softwares e suas influencias sobre as representações computacionais do saber, vamos considerar agora o caso das expressões algébricas como aquelas que manipulamos em álgebra elementar, por exemplo, $5x+2x(x-3)$. Essas expressões podem ser representadas a partir de lista de caracteres ou a partir de estruturas em árvore. A escolha de uma dessas representações determina o tipo de manipulação que pode ser feita na interface do sistema. Uma estrutura em lista, como no caso do PIXIE (SLEEMAN, 1987), permite transformações “erradas” como $5+3x \rightarrow 8x$, o que uma estrutura em árvore, como no caso do APLUSIX (NICAUD, 1991), não permite. É importante destacar que essas diferenças na representação da expressão nos dois sistemas resultam do fato que os objetivos de aprendizagem de PIXIE e APLUSIX são diferentes: PIXIE foca-se sobre o diagnóstico de regras erradas na manipulação elementar de expressões algébricas, enquanto APLUSIX foca-se sobre as estratégias de resolução de problemas como a fatorização. No final, os dois aspectos são importantes de um ponto de vista educativo. Assim, Nicaud resume as especificações de um tal ambiente da forma seguinte: (i) ele deve ser ligado a propriedades algébricas fortes mas (ii) ele deve permitir a produção de erros no nível de edição e raciocínio (o software devendo produzir retroações relevantes, do ponto de vista do aprendiz como da teoria, para esses erros).

criador/desenvolvedor inclui uma transposição didática que interage com a transposição informática (para isso, Nicaud propõe novos conceitos, e.g. *factored concepts* e *solved concepts*).

A escolha de um sistema de representação computacional determina o tipo de manipulação que podem ser disponibilizadas ao usuário e o tipo de retroações possíveis do sistema. Isso significa que as retroações do computador a respeito das ações do aprendiz podem ser diferentes entre um ambiente e um outro. Essas diferenças são conseqüências da resolução da equação complexa que deve adequar os saberes e suas especificidades, das características materiais do computador e das intenções didáticas dos autores. Somos tentados em afirmar que a transmutação da álgebra seria menos importante que a transmutação da geometria, a álgebra sendo uma linguagem simbólica.

Chamamos transposição informática o processo que lidera a especificação e a implementação de um modelo do saber (BALACHEFF, 1993, mas acreditamos que transmutação computacional teria sido uma melhor escolha, mas parecendo radical demais 1993). Uma grande parte desse processo trata das necessidades em acomodar-se às exigências de representações simbólica e computacional, e a transformação do saber associado. Reagindo para o que poderia ser visto como meras (apesar de complexa) limitações tecnológicas, podem-se sugerir especificações ou implementações alternativas para se livrar de todos esses problemas; mas tal sugestão esquece o fato que outras escolhas vão produzir outros efeitos inesperados. A questão não é de suprimi-los, desde que, mesmo computacional, se trata de representação e qualquer representação tem suas especificidades em relação aos objetos de saber representado. Mas é importante que conhecer essas características poder determinar suas conseqüências no caso de sistema TEL. No lugar de procurar uma solução impossível para evitar desvios entre representações e o que elas pretendem representar, um caminho é de delinear o domínio epistemológico de validade do modelo escolhido (BALACHEFF E SUTHERLAND, 1994).

Uma pesquisa essencial é de entender o processo da transposição informática, especialmente suas características intrínsecas (aquelas que não serão modificadas pelo processo computacional), e desenvolver quadros teóricos e metodologia para identificar o domínio epistemológico de validade dos TELs.

Um postulado fundamental do nosso domínio de pesquisa, provendo da dependência do saber e das suas representação da transmutação computacional do saber, é que o design de TEL é *dependente do domínio porque o conhecimento é dependente de representação*. Estamos reconhecendo, de fato, que o saber, como a aprendizagem, é um circunscritor do design de sistemas TEL. Vamos abordar brevemente esse ponto na próxima secção.

ESPECIFICIDADE DO SABER COMO CIRCUNSCRITOR DO DESIGN DE TEL

A caracterização do “milieu” para a aprendizagem da matemática, da cirurgia ou das línguas estrangeiras, é fundamentalmente diferente. Para ser conciso, podemos dizer que o “milieu” para a cirurgia é parte do mundo material (no caso o corpo humano), para línguas estrangeiras, ele envolve seres humanos, para a matemática é um sistema teórico. Embora essa observação apareça como óbvia, a maioria dos projetos de pesquisa in ICT afirmam que eles contribuem para a pesquisa em TEL num nível geral e pretendem ser independente da área de conhecimento. Apesar de que, de um ponto de vista metodológico, eles não desenvolveram nem argumentos, nem quadro teórico para mostrar a validade dessa afirmação. Um advogado do diabo poderia dizer que as pesquisas em ICT não se consideram como comprometidos com a coerência e a robustez computacional do software que eles produzem. Em geral, o fato de ser domínio independente é justificado pela necessidade de poder reutilizar os desenvolvimentos produzidos (software reusability).

Existe um movimento, associado a uma abordagem mais pragmática da integração da tecnologia na educação, que desenvolve

ambientes limitados, mas eficientes, mesmo se são delimitado por um domínio de conhecimento específico. Pode existir um risco de desenvolver pesquisas baseadas sobre design e desenvolvimentos Adhoc para atender as características de tópicos próximos demais. Mas esse risco pode ser controlado desde que o design dos ambientes desenvolvidos apóie-se sobre uma análise epistemológica aprofundada do domínio contemplado, uma documentação sólida das escolhas e decisões tomadas durante o desenvolvimento e uma visão clara das avaliações necessárias numa perspectiva de aprendizagem e ensino.

Os efeitos circunscritores do saber sobre o design de ambiente de aprendizagem são diretamente ligadas ao papel das interações, ou seja, do ciclo ação-retroação e da dependência da interação das representações internas da máquina ou na interface. Temos que insistir aqui que um processo de aprendizagem pode chegar a uma aprendizagem efetiva somente se o ciclo ação-retroação tem um resultado positivo. Isso não significa o sucesso da ação, mas o sucesso do conjunto ação-retroação: se M não produz retroações adequadas ou se S não dá sentido à retroação de M , o processo de aprendizagem não termina num resultado positivo. Esse comentário mostra a importância do papel do controle no processo de aprendizagem, e por trás do controle, o papel da validação. Isso pode culminar de numa problemática de prova explícita (aprendizagem que o ensino da matemática e das ciências visa). Podemos perceber aqui que saber, ou conhecimento em nossa terminologia, não pode ser separado da questão da sua validade, e conseqüentemente, da questão da possibilidade de provar (i.e. produzir uma argumentação coerente) sua validade (aqui, é de proposta que não fazemos referência a algo como "verdade").

Vamos pegar, com ilustração, o caso da física e da matemática. O critério de validade de um enunciado na matemática é interno a essa disciplina, ou seja, apóia-se sobre técnicas e uma tecnologia simbólica cuja forma mais acabada é a (quase) formal "prova matemática". Na física, a validade de um enunciado depende da relação entre os modelos teóricos e o campo experimental. O campo

experimental é o campo de validação da construção teórica [... e....] onde as informações são tiradas pela percepção direta de eventos ou pela medida (TIBERGHIEEN, 1992, p. 195). Esse campo é uma parte teoricamente organizada da realidade, mas deixa para a percepção - sob o controle da teoria - um papel central. Essa diferença entre matemática e física é crucial.

Tais diferenças podem ser encontradas entre todas as disciplinas, elas são a marca das suas especificidades, mas são também origem dos circunscritores que elas impõem sobre o design de situações de aprendizagem, e, então, sobre o design de TEL.

Propomos para a discussão um novo postulador fundador: o design de TEL é dependente do domínio porque a aprendizagem é dependente da validação. Esse postulador não é fácil de entender e mesmo a aceitar (objeções são com frequência devidas a uma incompreensão de "validação" e "controle", como consequência de suas conotações morais). Então, nossa compreensão de "validação", ou de "validade", é crucial para o design de ambiente TEL. Ela também determina nossa avaliação desses ambientes. Para entender melhor os ambientes TEL, devemos abordar como eles incorporam o aprendiz no funcionamento. Será esse último ponto, em conclusão que vamos considerar na seção seguinte.

INCORPORAR O APRENDIZ NO SISTEMA MODELAGEM COMPORTAMENTAL VERSUS MODELAGEM EPISTEMOLÓGICA

As etapas históricas e tecnológicas nesse domínio são bastante conhecidas, de sistema de regras a técnicas de aprendizagem de máquina. Mas devemos reconhecer que dificuldades importantes foram encontradas e resistem ainda aos esforços de pesquisa. Além disso, as funções do chamado modelo do aprendiz, como suas especificações, não são claras, como um cientista de ponto em IA e educação afirma: "the learner model is the central and yet most controversial component of intelligent systems" (SELF, 1990, p. 46).

Uma das origens da controversa é a respeito da incerteza da validade psicológica que esse modelo deveria ter. A consideração seguinte pode ajudar a clarificar esse ponto: se o ambiente apóia-se sobre diálogo e comunicação próxima da comunicação humana, um modelo válido do ponto de vista da psicologia seria necessário, sobretudo quando se trata de um ambiente reativo (como um micromundo), para tomar o usuário em conta seria necessário considerar a validade epistemológica da retroação e não sua validade psicológica em si. Portanto, a única questão é determinar se a forma como o aprendiz é considerado no design é adaptada à necessidade de administrar a interação em relação com o conteúdo a aprender.

O problema de tomar o aprendiz em conta tem duas faces. Primeiro, devemos ser capaz de caracterizar o tipo de evento que são relevantes para descrever seu comportamento, segundo, necessitamos de uma função, usualmente chamada diagnóstico, para associar alguns significados (formalizados) a esses comportamentos. A identificação de evento não é direta, é a consequência de uma organização da chamada realidade sob o controle da teoria e da tecnologia associada.

Uma vez que um modelo foi produzido, a primeira questão a levantar é aquela da sua validade. Nesse respeito, as modelagens comportamental e epistemológica são de uma complexidade bastante diferente. O modelo comportamental, quando implementado no mesmo ambiente TEL, deve permitir a criação a sua interface os mesmos eventos observáveis que aqueles observados inicialmente (o tipo de critério adotado pela teoria "repair"). No caso de um modelo epistemológico, é esperado que ele forneça uma imagem não somente do comportamento do aprendiz, mas também da sua racionalidade numa forma aceitável (pelo menos de uma perspectiva educacional).

No quadro que adotamos, isso significa ser capaz de entender o aprendiz em termo de "concepção" que podemos associar a seu estado de interação, como sujeito epistemológico, com o meio (milieu) concretizado pela maquina. O que significa que tomamos o sujeito em conta como parte do sistema, e não como um individuo isolado.

cK ϵ , UMA PONTE ENTRE A MODELAGEM DIDÁTICA E COMPUTACIONAL

Confrontando as ferramentas e os métodos disponíveis em ciência da computação com aqueles disponíveis na pesquisa em educação, podemos observar diferenças importantes entre eles tanto do ponto de vista dos objetivos quanto do da natureza. Uma ponte é necessária e é essa ponte que estamos tentando elaborar com o modelo cK ϵ já rapidamente evocado.

Para ser relevante, um modelo epistêmico deve considerar tanto o comportamento do aprendiz que sua racionalidade, quanto a "concepção" correspondente. Para isso, um modelo deve expressar as características-chaves do sistema S/M. Vergnaud mostrou que essas características são o operador (R, o esquema no sentido psicológico) e o sistema semiótico (L, sendo lingüístico, gráfica ou incorporado), os dois tendo o sentido completo pela existência de um conjunto (P) de problema garantindo a legitimidade da concepção. Esse tripé (P,R,L) caracteriza uma grande parte do modelo S/M, ele é completo quando explicitamos a estrutura (Σ) que permite o controle do S/M. Como já mencionado, nos dois lados, tão S que M, ferramentas são necessárias para avaliar ou julgar a relevância da ação ou da retroação.

Encapsulado num agente (ϵ), o quádruplo (P, R, L, Σ) fornece um quadro para contemplar o aprendiz num nível epistêmico. Dado um problema p , (R, L, Σ) permite o cálculo de comportamentos possíveis do sistema S/M no contexto da resolução de p , e revela as possíveis razões do comportamento explicitando os controles subjacentes. O conjunto do problema (P) para qual (R, L, Σ) orienta para uma solução correta (no sentido Σ) caracteriza o domínio de validade – a esfera da prática – da concepção correspondente. E a existência desse domínio de validade que nos permite considerar que a modelagem esteja num nível epistêmico (tabela 1, item vi). De fato, a caracterização é específica não somente para o aprendiz (o sujeito S) mas também para o ambiente TEL, que concretiza o meio (milieu) M, com qual o aprendiz interage; para entender nos seus termos

educacionais é a questão de um outro nível de interpretação das mesmas evidências.

Estamos acompanhando dois projetos nos quais the cK ϵ modelo é a ferramenta básica para modelar a forma estamos tomando o aprendiz em conta. Um deles, BAGHERA tem uma perspectiva tutorial, o outro, APLUSIX, tem uma perspectiva de micromundo forte, mas explora a possibilidade o modelo do aprendiz. Nos dois casos, o sistema semiótico disponível são aquelas do sistema de interface e dos comportamentos observáveis que podem ser descritos no nível de granularidade dos comandos disponíveis. Desses comportamentos são inferidos os operadores usados e o controle correspondendo. Esse artigo não é o lugar de entrar nos detalhes técnicos dessa abordagem, então, vamos focar sobre o principal benefício da abordagem cK ϵ e uma das lições que aprendemos.

A abordagem cK ϵ mostrou sua eficiência estabelecendo a necessária mediação entre educação e ciência da computação mostrando um quadro comum para discutir e analisar os processos de aprendizagem e design associados. Essa abordagem tem sentido no nível do saber e no nível da computação. Ela estimula uma discussão para um melhor entendimento de comportamento cuja definição parece menos óbvia que numa visão a priori. De fato, a questão chave que aparece é a da compilação de uma seqüência de comandos no chamado operador no sentido epistêmico.

No entanto, mais importante é a lição aprendida. cK ϵ permite destacar o maior problema de diagnóstico: enquanto os operadores podem ser descritos com seqüência de comandos, o controle são muito mais difícil de descrever ou caracterizar. Com freqüência, controles são deixados implícitos, apesar de que eles podem ser concretizados como no caso da seta vermelha do APLUSIX (mostrando que duas expressões não são equivalentes). No quadro da análise usualmente feita em educação, baseada na gravação das falas e comportamentos dos aprendizes quando efetuam uma tarefa ou resolvem problemas, o controle é associado a enunciados meta-cognitivos (julgamento, adequação da ação, decisão de sucesso o

fracasso, etc.). A técnica correspondente consiste na pesquisa de invariantes do contexto da ação (o que pode tomar a forma de <se contexto portanto ação>), usando, seja técnicas de aprendizagem máquina, seja teoria da emergência em sistema multi-agentes. Nos dois casos, a tarefa é difícil mas não fora de alcance, pelo menos é a conclusão de cada projeto, no qual as características do domínio de saber considerado são razoavelmente tomadas em conta (i.e. através de seu critério de validação intrínseco).

REPRESENTAÇÃO, INTERAÇÃO, VALIDAÇÃO

A remarca de conclusão é que um estudo crítico do problema de design de TEL convida a ir além nosso foco habitual sobre a representação do saber, e mesmo além da interação, para chegar ao ponto onde os dois convergem para suportar e legitimar aprendizagens: controle e validação. Poderia ser o caso mesmo que o valor de um ambiente de aprendizagem fica na sua capacidade em suportar a possibilidade do aprendiz em questionar a validade da sua própria atividade, e em suportar o controle do sistema do processo de aprendizagem. Nos dois casos, uma questão central é a questão da retroação que refere ao problema da validação. É através desse problema de validação que o saber impõe-se como o primeiro caráter da cena de design.

REFERENCIAS

BALACHEFF, N. La transposition informatique. In: ARTIGUE et al. (eds.). *20 ans de didactique des mathématiques en France*. Grenoble: La Pensée Sauvage, 1993.

BALACHEFF, N. *Cours de DEA EIAH*, Grenoble 1999-2000. Disponível em www.didactique.imag.fr/CoursEIAH/index.html, 1999.

BALACHEFF, N.; SUTHERLAND, R. Epistemological domain of validity of microworlds, the case of Logo and Cabri-géomètre. In: LEWIS, R. et al. (eds.). *Lessons from learning*. Amsterdam: North-Holland/Elsevier, 1994, p.137-150.

BELLEMAIN, F. A transposição informática na engenharia de softwares educativos. *I SIPEM*, 22 a 25 de novembro, Serra Negra (SP), 2000.

BELLEMAIN, F. *Geometria dinâmica: diferentes implementações, papel da manipulação direta e usos na aprendizagem*. 15º Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico e IV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design, 5-9 Novembro de 2001, São Paulo, Brasil, 2001.

BROUSSEAU, G. Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques, *Recherches en didactique des mathématiques*, 1986, 7.2, p. 33-115.

CHEVALLARD, Y. *La transposition didactique*. Grenoble: Editions La Pensée Sauvage, 1985.

JACKIW, N. *Geometer Sketchpad*. Key Curriculum Press,

NICAUD, Jean-François; XUAN, Anh Nguyen; SAIDI, Mustapha; AUBERTIN, Christian; WACH, Patrice. APLUSIX: a learning environment for acquiring problem solving abilities. Source Proceedings of the third COGNITIVA symposium at the crossroads

of artificial intelligence, cognitive science, and neuroscience table of contents, Madrid, Spain, Amsterdam, The Netherlands: Publisher North-Holland Publishing Co, 1991, p. 85 – 92.

RABARDEL, P. *Les hommes et les technologies, approche cognitive des instruments contemporains*. Paris: Armand Colin, 1995.

ROSSETTI-FERREIRA, M. C.; AMORIM, K. S.; SILVA, A. P. S.; CARVALHO, A. M. A. (orgs). *Rede de significações e o estudo do desenvolvimento humano*. Porto Alegre: ArtMed, 2004.

SELF, J. Theoretical Foundations for Intelligent Tutoring Systems. *Journal of Artificial Intelligence in Education*, 1990. 1(4) 3-14.

SLEEMAN, D. PIXIE: A shell for developing intelligent tutoring systems. In: LAWLER, R.; YAZDANI, M. (Eds.). *Artificial Intelligence in Education*. New Jersey: Ablex, 1987.

SOURY-LAVERGNE, S. (ed.). Baghera Assessment Project, designing an hybrid and emergent educational society. *Les Cahiers du laboratoire Leibniz*, 81, 2003.

TIBERGHIE, A. Analysis of Interfaces from the Points of View of Epistemology and Didactics. In: TIBERGHIE, A. et al. (eds.). *Intelligent Learning Environments and Knowledge Acquisition in Physics*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. p. 181-203.

VERGNAUD, G. Conceptual fields, Problem-Solving and Intelligent Computer Tools. In: DE CORTE, E. et al. (eds.). *Computer Based Learning Environments and Problem-Solving*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. p. 287-308.

