

Um Sistema Tutor Inteligente para o Ensino de Equilíbrio Rotacional no Ensino Médio

Leonardo Bordignon Sluzala¹, Seiji Isotani², Luiz Antonio Lima Rodrigues³

Resumo

O artigo aqui apresentado como requisito para a obtenção do título de Especialista em Computação Aplicada à Educação tem como objetivo descrever o desenvolvimento e avaliação de uma solução para o problema da falta de dicas e feedback em listas de exercícios de Equilíbrio Rotacional na disciplina de Física no Ensino Médio. Foi desenvolvido e avaliado por meio da abordagem de Design Science Research um Sistema Tutor Inteligente criado por meio da ferramenta Cognitive Tutoring Author Tools. Em seguida, o artefato foi avaliado por meio de questionário aberto respondido por três especialistas licenciados em Física, que o validaram como um instrumento útil para o ensino de procedimentos de Resolução de Problemas em Equilíbrio Rotacional em Física, mas com alguns pontos a serem melhorados.

1. Introdução

A Resolução de Problemas (RP), muito comum nas estratégias didáticas de ensino de matemática e ciências, é destaque principalmente no Ensino de Física. São inúmeros os trabalhos na literatura científica que têm como principal objeto de estudo a RP na aprendizagem de Física, com destaque para as revisões bibliográficas de Costa e Moreira (1997); Oliveira, Araújo e Veit (2017) e o artigo de Da Rosa e Ghiggi (2020). No entanto, na maioria dos casos, uma lista de exercícios sozinha submetida à exploração e ação do aluno não é capaz de auxiliar integralmente no aprendizado de um determinado tópico, sendo necessária a tutoria de um professor para intermediar, dar dicas e fornecer o *scaffolding* necessário à aprendizagem (ALFIERI, 2011).

¹ Pós-Graduando em Computação Aplicada à Educação, USP, <leonardosluzala@usp.br>.

² Professor Titular na área de Computação e Tecnologias Educacionais no Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, USP, <sisotani@icmc.usp.br>.

³ Doutorando do programa de Ciência da Computação e Matemática Computacional no Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, USP, <lalrodrigues@usp.br>.

Uma alternativa para este problema, conforme aponta Vanlehn (2011), pode ser a utilização da aprendizagem adaptativa -- como na tutoria individual de um professor para um aluno, que, apesar de oferecer uma eficácia muito grande se comparado a outros métodos, não é prático em um sistema de educação em larga escala. Contudo, o mesmo autor sugere que a utilização da tecnologia e, em especial, dos Sistemas Tutores Inteligentes (STIs) pode ser tão efetiva quanto a tutoria humana e que estes poderiam substituir tarefas de casa e atividades de resolução de exercícios em sala de aula. As meta-análises e revisões de literatura publicadas nos últimos 6 anos também sugerem que os STIs são ferramentas eficientes para auxiliar no processo de aprendizagem de diferentes conteúdos no ensino básico e superior (KULIK; FLETCHER, 2016; MA et al., 2014).

Apesar das pesquisas serem muito positivas, não foram encontrados registros na literatura científica de STIs voltados ao ensino de equilíbrio rotacional e equilíbrio de corpos rígidos no Ensino Médio em língua portuguesa. Visando contornar a falta de recursos como *dicas* e *feedback* no uso de listas de exercício de lápis e papel para resolução de problemas de Equilíbrio Rotacional e Estática dos Corpos Rígidos no Ensino Médio, foi desenvolvido na pesquisa aqui apresentada um Sistema Tutor Inteligente rastreador de padrões. A produção deste artefato como produto de uma pesquisa científica é legitimada pela abordagem de *Design Science Research*, que une o desenvolvimento de um artefato para resolver um problema prático à geração de conhecimento científico (PIMENTEL; SANTORO, 2020).

2. Fundamentação Teórica

De acordo com Nwana (1990), Sistemas Tutores Inteligentes são definidos como programas de computador que são projetados para incorporar Inteligência Artificial de forma a fornecer um tutor que, semelhante a um tutor humano, realiza comportamento inteligente, tendo conhecimento do que se está ensinando, quem está aprendendo e como deve ensinar. Um STI é capaz de interagir com um aluno através de uma interface adaptando a aprendizagem, oferecendo ajuda no passo-a-passo e personalizando o aprendizado de acordo com as necessidades do estudante, o diferenciando de uma lista de exercícios comum, que, de modo geral, não é capaz de fornecer estes elementos. Dentre as principais características que compõem um STI estão os laços externo e interno, este último, sendo o foco deste trabalho, explicado em mais detalhes na subseção seguinte.

2.1. Laço Interno

Enquanto o laço externo (*outer loop*) de um STI é o responsável por selecionar os problemas que serão exibidos para o usuário e sua ordem (baseado nos conhecimentos anteriores do discente), o laço interno (*inner loop*), por sua vez, tem a função de gerenciar os passos dentro dos problemas. Dentre os tipos mais comuns de laços internos estão aqueles que oferecem *feedback* mínimo, *feedback* específico para um passo incorreto, dicas para o próximo passo, avaliação do conhecimento e revisão da solução (VANLEHN, 2006).

O primeiro tipo, denominado de *feedback* mínimo constitui de modo mais geral em um simples apontamento de que o passo realizado pelo aluno não está correto, sem dar muitos

detalhes sobre quais erros podem ter sido feitos. O *feedback* mínimo pode acontecer de forma imediata, assim que um aluno realiza um passo equivocado; de maneira tardia, onde o estudante resolve o problema e recebe uma devolutiva após o submetê-lo; ou sob demanda, de acordo com a solicitação do aluno. O segundo tipo, específico para o passo incorreto, é fornecido por STIs que são capazes de determinar o que está incorreto em um procedimento realizado pelo estudante e fornecer a descrição do erro e dicas para resolver o passo corretamente. O *feedback* no formato de dicas para o próximo passo pode indicar, dentre outras coisas, o próximo passo correto mais próximo dos já feitos pelo aluno. A avaliação do conhecimento pode ser dividida em aferição (*assessment*) das competências do aluno e avaliação (*evaluation*) das competências do Sistema Tutor Inteligente. Por fim, a revisão da solução completa é um tipo de estratégia dentro do laço interno que age, geralmente, após a submissão da tarefa completa para apontar os erros durante os procedimentos do aluno. Seu foco é que o próprio exerça a habilidade de verificar seus passos, preparando-o para situações em que onde um sistema tutor não esteja presente (VANLEHN, 2006).

2.2. Resolução de Problemas no Ensino de Física

São vários os artigos que versam sobre o papel da Resolução de Problemas (RP) no Ensino de Física, alguns deles destacando que, tradicionalmente, o papel do aluno é passivo e restrito, limitando-se a observar o professor e reforçando a memorização, cópia e sem potencializar o aprendizado de maneira ativa (SOUZA; BASTOS; ANGOTTI, 2020). Enquanto para alguns professores a RP é entendida como o único critério para definir se um aluno compreendeu ou não um certo conceito, em outras abordagens a resolução de problemas é sacrificada em função de uma compreensão profunda do conceito (WILLIAM; GERACE; DUFRESNE, 2002). Nenhum dos extremos é adequado quando se quer no discente desenvolver habilidades que permitam uma resolução de problemas baseada tanto em análise quanto em compreensão conceitual, conforme apontam William, Gerace e Dufresne (2002).

Em pesquisa realizada com 14 professores de Física do Ensino Médio da rede pública e provada do Distrito Federal, Souza e Fávero (2003) constataram que a maioria dos sujeitos da pesquisa têm a visão do professor como mediador e tutor no processo de resolução de problemas, mas destaca a iniciativa ativa do aluno nesta tarefa. Definida a importância da resolução de problemas no Ensino de Física no geral, e, conseqüentemente, na aprendizagem de Equilíbrio Rotacional, cita-se abaixo alguns protocolos de RP úteis para fundamentar a criação do Sistema Tutor Inteligente proposto por este artigo.

Uma das abordagens, sugerida por Peduzzi (1997), para a resolução de problemas em física básica - e úteis à construção da composição dos laços internos do STI aqui desenvolvido - é constituída pelos doze passos descritos a seguir:

1. Ler o enunciado do problema com atenção, buscando à sua compreensão;
2. Representar a situação-problema por desenhos, gráficos ou diagramas para melhor visualizá-la;
3. Listar os dados (expressando as grandezas envolvidas em notação simbólica);
4. Listar a(s) grandeza(s) incógnita(s) (expressando-a(s) em notação simbólica);

5. Verificar se as unidades das grandezas envolvidas fazem parte de um mesmo sistema de unidades; em caso negativo, estar atento para as transformações necessárias;
6. Analisar qualitativamente a situação problema, elaborando as hipóteses necessárias;
7. Quantificar a situação-problema, escrevendo uma equação de definição, lei ou princípio em que esteja envolvida a grandeza incógnita e que seja adequada ao problema;
8. Situar e orientar o sistema de referência de forma a facilitar a resolução do problema;
9. Desenvolver o problema literalmente, fazendo as substituições numéricas apenas ao seu final ou ao final de cada etapa;
10. Analisar criticamente o resultado encontrado;
11. Registrar, por escrito, as partes ou pontos chave no processo de resolução do problema;
12. Considerar o problema como ponto de partida para o estudo de novas situações-problema.

Outros autores, como Reif, Larking e Brackett (1976), construíram em suas pesquisas quatro pilares fundamentais para a resolução de problemas:

1. Descrição: Listar explicitamente a informação fornecida e desejada. Desenhar um diagrama da solução. (O resultado deste passo deve ser a formulação clara do problema).
2. Planejamento: Selecionar as relações básicas pertinentes à resolução de problemas e delimitar como elas serão utilizadas (O resultado deste passo deve ser um plano específico para encontrar a solução).
3. Implementação: Executar o plano anterior realizando todos os cálculos necessários. (O resultado deste passo deve ser a solução do problema).
4. Checagem: Checar se cada um dos passos anteriores é válido e se a resposta final faz sentido. (O resultado deste passo deve ser a solução fidedigna do problema).

Para a construção do artefato foram utilizadas as duas propostas de protocolos acima com algumas adaptações, por apresentarem vantagens e serem uma escolha adequada para a RP de Equilíbrio Rotacional em um STI.

3. Trabalhos Relacionados

Embora já existam vários Sistemas Tutores Inteligentes voltados ao ensino de matemática para crianças e adolescentes em fase escolar – como o brasileiro PAT2MATH⁴ (SEFFRIN; RUBI; JAQUES, 2006), o ActiveMath (MELIS; SIEKMANN, 2004) e o Cognitive Tutor (RITTER et al., 2007) – e também alguns STIs dedicados ao ensino de Física no Ensino Superior – como o Andes (GERTNER; VANLEHN, 2000) e os famosos STIs que operam em linguagem natural, AutoTutor (GRAESSER et al., 2004) e Why2-Atlas (VANLEHN et al., 2002) – são raros os projetos que tratam do desenvolvimento de STIs para o ensino de Física no Ensino Médio. Trataremos nesta seção em comparar os

⁴Acesso ao STI PAT2MATH: <http://pat2math.unisinos.br/>

domínios e abordagens de três STIs para o ensino de física, o DeepTutor, Virtual Physics System (ViPS) e o ANDES, os dois primeiros com foco no Ensino Médio e este último no ensino superior com possibilidade de aplicação no Ensino Médio.

O DeepTutor é um Sistema Tutor Inteligente que opera em linguagem natural através de diálogo para a tutoria de tópicos de ciência, mais especificamente em física newtoniana, apesar de ter sido projetado para poder ser adaptável a outros domínios. Este STI promove um diálogo com os estudantes no qual seu principal objetivo é prover dicas para que os próprios alunos consigam encontrar a solução para os problemas, inspirado nos princípios socráticos de instrução e em teorias construtivistas da aprendizagem. O DeepTutor foi feito pelo *Institute for Education Sciences* e desenvolvido com uma interface HTML5, testado com quase 1 000 alunos de Ensino Médio que o acessaram utilizando aparelhos celulares e *tablets* (RUS, NIRAULA e BANJADE, 2015).

Também chamado de ViPS, o *Virtual Physics System* apresenta ao estudante uma simulação interativa e um ambiente de tutoria envolvendo polias. Na simulação, o estudante é capaz de manipular e selecionar elementos em uma interface do tipo 'arrastar e soltar' enquanto um módulo tutor tem o papel de analisar o desenvolvimento do estudante e apresentar problemas apropriados ao seu nível. O ViPS foi feito para ser utilizado por alunos de Ensino Fundamental II e seu módulo tutor tem princípios de atuação baseados na Zona de Desenvolvimento Proximal de Vygotsky, com sua arquitetura implementada em Java, o módulo de Conhecimento do Estudante faz uso de Redes Bayesianas e sua usabilidade foi validada mediante avaliações realizados com estudantes de engenharia e professores em formação da educação básica (MYNENI et al., 2013).

O Andes Tutoring System⁵ foi desenvolvido pela Universidade Estadual do Arizona e pela Universidade de Pittsburgh para ser utilizado no ensino superior para o apoio na instrução de diversos tópicos de Física. Uma de suas premissas era ser minimamente invasivo, sem demandar mudanças drásticas nos currículos, e servir como apoio em atividades de tarefa de casa, como problemas de lápis e papel. O Andes contém mais de 300 problemas que cobrem os tópicos fundamentais de um curso introdutório de física. Algumas de suas características distintas são a solicitação de definição de variáveis, vetores e sistemas de coordenadas em um problema pelo próprio aluno. O *feedback* utilizado é mínimo e imediato, apontando em vermelho os erros, mas com dicas mais detalhadas fornecidas somente se o aluno assim as solicitarem. Avaliações feitas por alunos de universidade sobre o uso do Andes sugerem que entre 40 e 50% dos estudantes gostaram de o utilizar e que, nas turmas de 2001, 2002 e 2003, quase 70% dos alunos aprovaram o Andes como uma ferramenta mais efetiva que outros sistemas de aprendizagem e distribuição de tarefas (GERTNER; VANLEHN, 2000; VANLEHN et al., 2005).

4. Metodologia

⁵Acesso ao STI Andes: <http://www.andestutor.org/>

Para dar o suporte adequado à pesquisa científica produzida e ao desenvolvimento tecnológico apresentado no artigo, utilizou-se da abordagem de *Design Science Research* (DSR) que, conforme aponta Pimentel e Santoro (2020), é adequada para o campo de estudos de Informática na Educação como subárea de Sistemas de Informação, realizando pesquisas e produzindo artefatos tecnológicos para utilização por alunos e professores em contexto educacional.

Diferentemente de uma pesquisa tradicional, no *Design Science Research*, além de gerar novo conhecimento científico, também é objetivo do pesquisador “resolver um problema prático num contexto específico por meio de um artefato” (PIMENTEL; SANTORO, 2020). Este paradigma da pesquisa científica se mostra muito útil para o objetivo deste trabalho e para legitimar a criação de um artefato a fim de resolver um problema e produzir conhecimento científico.

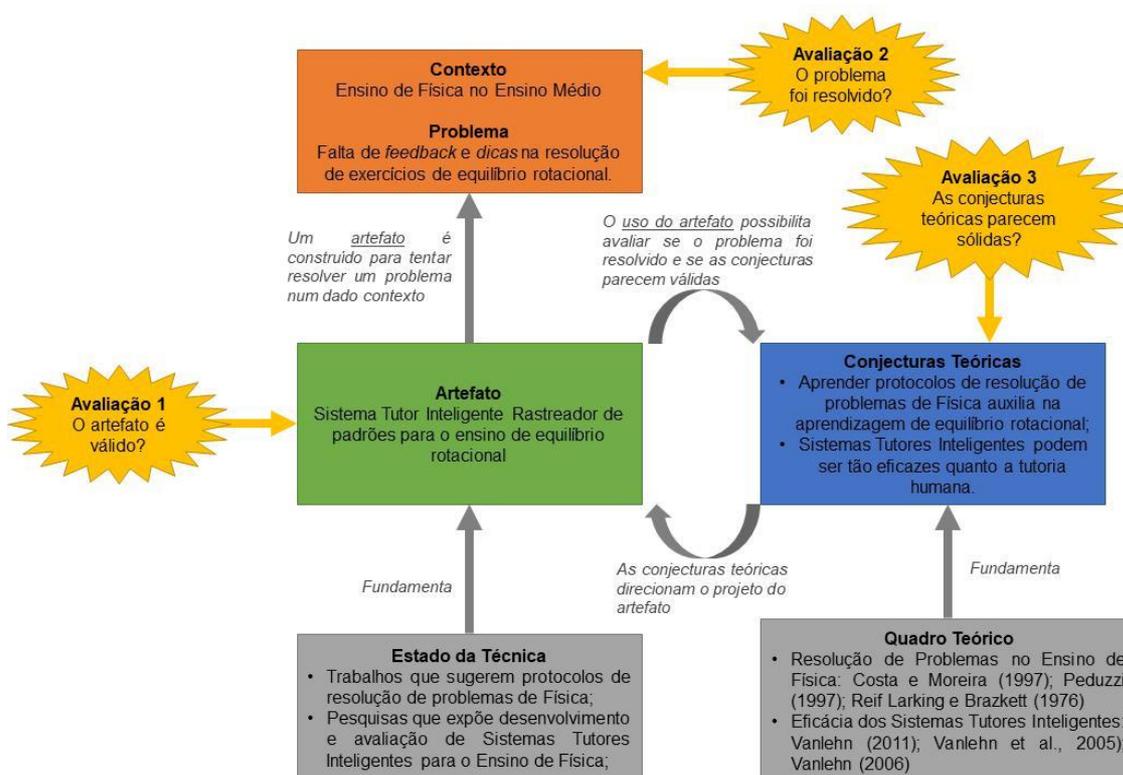


Figura 4.1 Mapeamento dos Elementos DSR desta pesquisa

Com o propósito de organizar a pesquisa, utilizou-se o mapa de Pimentel e Santoro (2020) para auxiliar a separar a pesquisa em abordagem teórica, artefato e contexto de aplicação, conforme a Figura 4.1. O principal problema de pesquisa, no retângulo laranja, se refere à falta ou demora no fornecimento de *feedback* e *dicas* em exercícios de “lápiz e papel” sobre Equilíbrio Rotacional - quando sem a presença de outra pessoa com conhecimento sobre o assunto, geralmente o professor.

De acordo com o INEP (2020), as classes de Ensino Médio no Brasil, incluindo escolas públicas e particulares, apresentam uma média de 29,6 alunos por turma. Diante do grande número de alunos e a impossibilidade de atendê-los durante os momentos de resolução de exercícios, uma das alternativas avaliadas para a tutoria eficiente foi a da

criação de um Sistema Tutor Inteligente rastreador de padrões para apoiar a aprendizagem de equilíbrio rotacional, exibida no retângulo verde da Figura 4.1. Essa escolha de artefato foi fundamentada por uma leitura e pesquisa de protocolos de RP em Física, em especial no Ensino Médio, e sobre projetos e publicações que traziam STIs no Ensino de Física, conforme exibido no quadro cinza Estado da Técnica, na Figura 4.1 e relatado na seção 3.

Duas conjecturas teóricas, em destaque no retângulo azul da Figura 4.1, foram classificadas como afirmações importantes para o direcionamento adequado no desenvolvimento do artefato da pesquisa: Aprender protocolos de resolução de problemas de Física auxilia na aprendizagem de Equilíbrio Rotacional e Estática do Corpo Extenso; e Sistemas Tutores Inteligentes podem ser tão eficazes quanto a tutoria humana. Através delas, e embasadas pelo quadro teórico cujos trabalhos são explicados na seção 2 deste artigo, foi dado o primeiro passo para assegurar que o desenvolvimento de um STI poderia ser válido para a resolução do problema de pesquisa.

5. Desenvolvimento⁶

Se, de certa forma, Sistemas Tutores Inteligentes podem ser tão eficientes quanto tutores humanos (VANLEHN, 2011), por outro lado, são raramente utilizados na prática devido à complexidade em sua produção e ao tempo necessário para seu desenvolvimento, conforme aponta Alevén et al. (2006a). Uma saída para uma produção mais rápida de STIs é o uso de ferramentas de autoria, como o *Cognitive Tutor Authoring Tools* (CTAT) que permite acelerar o processo de criação dos Sistemas Tutores pelo desenvolvimento fácil de Tutores Rastreadores de Padrão, onde o autor demonstra os comportamentos corretos e incorretos, que são registrados pelo CTAT e podem ser empregados para o desenvolvimento de um STI (ALEVEN et al., 2006a).

Uma das principais vantagens do uso do CTAT é o fato de que não é preciso conhecer uma linguagem de programação, facilitando a autoria de STIs por parte de pesquisadores de áreas não diretamente ligadas à computação. O primeiro passo é a utilização de um ambiente de aprendizado ou a criação de uma Interface Gráfica do Usuário totalmente nova e do zero, que pode ser feita utilizando o CTAT HTML Editor (um editor gráfico para a interface do estudante) que gera um ou por meio de qualquer ferramenta de preferência do desenvolvedor. Depois, o autor do STI deve mostrar exemplos de comportamentos corretos e incorretos para cada um dos problemas aos quais os estudantes serão tutorados, estes comportamentos são então gravados pelo CTAT em um Grafo de Comportamento, uma espécie de fluxograma com os passos e conexões. Uma das etapas mais importantes é a demonstração dos erros mais comuns no Grafo de Comportamento, que, depois, podem ser tutorados através de dicas específicas configuradas pelo autor. Os Sistemas Tutores Inteligentes rastreadores de padrão do

⁶Acesso aos arquivos completos do STI Equilíbrio Rotacional (interface HTML e grafo de comportamento):
<https://drive.google.com/drive/folders/16awt82hL0siRrq7yjpIQj5zfC2DEq1bV?usp=sharing>

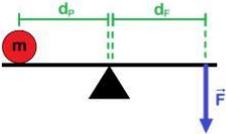
CTAT são capazes de fornecer dicas quando solicitado pelo estudante, além de oferecer *feedback* (tanto negativo quanto positivo) para guiar o aluno (ALEVEN et al., 2006b).

5.1. Interface Gráfica do Usuário

Após as leituras dos trabalhos relacionados, que culminaram na decisão de desenvolver um Sistema Tutor Inteligente rastreador de padrões que abranja o domínio do ensino de equilíbrio rotacional, deu-se início ao desenvolvimento da interface gráfica do Sistema Tutor Inteligente utilizando o CTAT HTML Editor, uma ferramenta capaz de oferecer edição da interface HTML e inclusão dos componentes do CTAT sem necessidade de utilizar programação em código (CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, c2015).

EQUILÍBRIO DE CORPOS RÍGIDOS

%(enunciadoproblema)%



Etapa 1 - Leia o enunciado, observe a imagem e obtenha os dados do problema e suas unidades.

m =

g =

d_p =

d_f =

- Conversão de Unidades
- Monta Equações
- Sistema Internacional
- Coleta de Dados
- Matemática básica

Tem dúvida em algum passo? Clique no botão '?' - Hint para receber dicas a qualquer momento.

Etapa 2 - Converta as unidades dos dados em unidades do Sistema Internacional.

m =

g =

d_p =

d_f =

Etapa 3 - Calcule a força-peso exercida pela massa m.

P = m g

P = ·

P =

Etapa 4 - Utilize a equação do Equilíbrio Rotacional (Torque Resultante) para determinar a Força F.

$0 = M_1 + M_2$ $M = F d$

Utilize a convenção:
tendência de rotação anti-horária → torque positivo;
tendência de rotação horária → torque negativo.

$0 = (\text{?} \cdot \text{ }) + (\text{?} \cdot F \cdot \text{ })$

$0 = (\text{ }) + (\text{ } \cdot F)$

F =

F =

F =

Figura 5.1 Interface Gráfica do Usuário feita no CTAT HTML Editor

A construção da interface gráfica, exposta por completo na Figura 5.1, levou em conta os 12 passos de Peduzzi (1997) e as orientações de Reif, Larking e Brackett (1976) para a resolução de um problema de física, mas com alguns passos omitidos ou sendo condensados em uma única etapa devido à própria adaptação dos protocolos para a interface de um STI.

Etapa 1 - Leia o enunciado, observe a imagem e obtenha os dados do problema e suas unidades.

m =

g =

d_p =

d_f =

Figura 5.2 Destaque da Etapa 1 do Sistema Tutor Inteligente proposto

Na etapa 1, como observado na Figura 5.2, o aluno é orientado a ler o enunciado com atenção e observar a imagem. Após essa ação, solicita-se que este obtenha os dados do problema, digitando-os nas caixas de texto, e suas unidades como exibido no enunciado, selecionando entre algumas unidades de medida listadas na caixa de seleção. Todos os

problemas desenvolvidos nesse STI são problemas de equilíbrio de corpos rígidos onde há a ação de duas forças sobre uma barra de massa desprezível, uma delas causada pela força peso de um corpo, e outra por uma força incógnita ao qual se deseja descobrir o valor. Convém notar que a utilização da mesma imagem na interface para todos os enunciados é feita por causa da similaridade entre os diferentes problemas. A etapa 1 aqui descrita está em consonância com os passos 1, 2 e 3 sugeridos por Peduzzi (1997) e ao pilar fundamental de RP denominado de Descrição por Reif, Larking e Brackett (1976).

Etapa 2 - Converta as unidades dos dados em unidades do Sistema Internacional.			
m =	<input type="text"/>		<input type="text"/>
g =	<input type="text"/>		<input type="text"/>
d _P =	<input type="text"/>		<input type="text"/>
d _F =	<input type="text"/>		<input type="text"/>

Figura 5.3 Destaque da Etapa 2 do Sistema Tutor Inteligente proposto

Na etapa 2, conforme apontado na Figura 5.3, é solicitado que o aluno converta os dados do enunciado de suas unidades para as unidades de medida do Sistema Internacional, novamente inserindo os números nas caixas e selecionando uma dentre as unidades listadas na caixa de combinação. O passo 5 sugerido por Peduzzi (1997), assim como a etapa 2 do STI apresentado, reforça a importância de se conferir se as grandezas estão no mesmo sistema de unidades e realizar as transformações adequadas.

Etapa 3 - Calcule a força-peso exercida pela massa m.	
$P = m g$	
P =	<input type="text"/> · <input type="text"/>
P =	<input type="text"/> <input type="text"/>

Figura 5.4 Destaque da Etapa 3 do Sistema Tutor Inteligente proposto

Em seguida, solicita-se ao aluno que calcule a força (peso) que o objeto de massa m aplica sobre o sistema utilizando a equação fornecida, de acordo com o exposto na Figura 5.4. Ao usuário, cabe listar as grandezas já no Sistema Internacional na ordem solicitada e, na linha posterior, multiplicá-las e inserir o resultado na caixa de texto. Também é requerido que escolha, dentre as opções disponíveis em uma caixa de combinação, a unidade de medida mais adequada.

Etapa 4 - Utilize a equação do Equilíbrio Rotacional (Torque Resultante) para determinar a Força F.	
$0 = M_1 + M_2$	$M = F d$
Utilize a convenção: tendência de rotação anti-horária → torque positivo; tendência de rotação horária → torque negativo.	
$0 = ($	<input type="text"/> <input type="text"/> $·$ <input type="text"/> $) + ($
$0 = ($	<input type="text"/> $) + ($
	<input type="text"/> F
	$F =$ <input type="text"/>
	$F =$ <input type="text"/>
	$F =$ <input type="text"/> <input type="text"/>

Figura 5.5 Destaque da Etapa 4 do Sistema Tutor Inteligente proposto

Por fim, na quarta etapa, é desenvolvido o resultado do problema a partir das equações de torque e equilíbrio rotacional. Na primeira linha com campos disponíveis para inserir a informação, o aluno encontra uma caixa de combinação onde deve selecionar o sinal do torque realizado pela força peso calculada no item anterior. O aluno deve selecionar entre positivo e negativo conforme a convenção exibida pela interface e inserir a força peso, já calculada na etapa anterior, e a distância do ponto de aplicação desta ao ponto de rotação do sistema. Na mesma linha deve novamente selecionar o sinal e, desta vez, digitar a distância do ponto de aplicação da força incógnita F ao ponto de rotação. Na linha de baixo, a resolução continua com a inserção dos resultados das multiplicações e incorporação dos sinais nas respostas. Os dois passos seguintes envolvem apenas álgebra básica e isolamento da incógnita na equação para que, no passo final, o aluno insira o resultado da divisão na caixa de texto e escolha a unidade adequada na caixa de combinação. Esta última etapa, mais complexa e demandando mais passos está consoante com a estratégia da Implementação (REIF; LARKING; BRACKETT, 1976) e com o passo 9 de Peduzzi (1997).

5.2. Feedback

Os estudos de STIs sugerem três tipos de abordagem baseadas no momento de se fornecer *feedback*: imediato, tardio ou sob demanda (VANLEHN, 2006). Para o STI Equilíbrio Rotacional, foi escolhido que esse seja fornecido de imediato para o estudante, evitando a propagação de erros dentro da resolução de um problema. Um aprendiz é capaz de identificar uma resposta incorreta quando o dado inserido pelo usuário muda a cor da sua fonte para vermelho ou quando a caixa de combinação recebe um contorno vermelho e o aprendiz recebe uma mensagem de erro conforme mostrado na Figura 5.6.

The screenshot shows the interface for 'Etapa 1 - Leia o enunciado, observe a imagem e obtenha os dados do problema e suas unidades.' It includes input fields for mass (m), distance (d_p), gravity (g), and distance (d_F). A progress bar on the right indicates the current step is 'Coleta de Dados'. A feedback message is displayed: 'Este não é o valor da distância entre o ponto de aplicação da força peso e o ponto de apoio fornecida pelo enunciado. Leia-o novamente. Caso precise, clique no botão 'Hint' (Dica).' Below the message are buttons for 'Hint' (with a question mark icon) and 'Done' (with a checkmark icon). Navigation buttons 'Previous' and 'Next' are also visible.

Figura 5.6 Destaque de um feedback imediato para uma entrada incorreta de d_F .

Com relação ao modo de fornecer *feedback*, optou-se pelo *feedback* mínimo nos passos onde não se conseguia identificar a razão clara do erro (Figura 5.6), onde então o aluno recebe uma mensagem genérica solicitando que refaça o passo com atenção e clique no botão 'Hint' (Dica) caso precise de ajuda. Em alguns passos em que os erros mais comuns

eram claros e bem conhecidos utilizou-se o *feedback* específico de erro e o aprendiz receberia uma mensagem expondo claramente o porquê sua entrada não condiz com a resposta correta para um determinado passo (Figura 5.7).

Etapa 1 - Leia o enunciado, observe a imagem e obtenha os dados do problema e suas unidades.

m = d_p =

g = m/s d_F =

Conversão de Unidades
Monta Equações
Sistema Internacional
Coleta de Dados
Matemática básica

Tem dúvida em algum passo? Clique no botão '?' - Hint para receber dicas a qualquer momento.

Cuidado! Metros por segundo (m/s) é uma unidade de medida de velocidade, não de aceleração.

? Hint

✓ Done

Previous Next

Etapa 4 -

0 = ([

0 = ([

Figura 5.7 Destaque de um feedback específico de erro para uma entrada incorreta.

Além dos *feedbacks* de erro, também está presente no STI desenvolvido um feedback positivo, representado pela resposta inserida em cor verde ou quando a escolha na caixa de combinação recebe um contorno verde, estes acompanhados de mensagens positivas de reforço como “Ótimo”, “Perfeito” e “Isto mesmo!” exibidas no campo de texto do *widget* de dicas.

5.3. Dicas

Durante a resolução de uma lista de exercícios, os aprendizes frequentemente ficam presos em um problema e necessitam de auxílio de um tutor para prosseguir para o próximo passo. Em Sistemas Tutores Inteligentes, a ajuda é fornecida através do sistema de dicas. De acordo com Vanlehn (2006), há três questões importantes quando se pensa no desenvolvimento de dicas para os próximos passos: quando o tutor deve dar uma dica sobre o próximo passo; qual passo o tutor deve sugerir; e como o tutor pode dar dicas para maximizar o aprendizado.

Um consenso adotado por desenvolvedores no fornecimento de dicas para o próximo passo de tutores computacionais, é que estes devem interferir o mínimo possível na experiência do aprendiz, dado que uma interrupção contínua e desnecessária pode impedir o desenvolvimento de habilidades cognitivas de detecção e correção dos próprios erros dos alunos (BURTON; BROWN, 1979). Por este motivo, optou-se que o STI desenvolvido apresentasse as dicas para o próximo passo somente quando o aluno voluntariamente as solicitasse, através de um clique no botão “? – Hint”.

A maneira mais usual de mostrar dicas para um mesmo passo em um Sistema Tutor Inteligente é através de uma sequência, na qual dicas são exibidas em ordem crescente de granularidade conforme o aprendiz as necessita em sua resolução (VANLEHN, 2006). A

sequência de dicas utilizada no STI aqui desenvolvido segue a mesma ordem e categorização utilizada no tutor Andes (VANLEHN et al., 2005; VANLEHN, 2006):

- *Point*: menciona as condições do problema e chama a atenção do aluno para o componente de conhecimento necessário para a resolução do passo;
- *Teach*: descreve brevemente o componente de conhecimento e mostra ao estudante como aplicá-lo;
- *Bottom-Out*: exibe explicitamente o passo a ser realizado;

A tabela abaixo descreve a sequência de dicas do estado 12 para o estado 13 no STI Equilíbrio Rotacional para o passo de converter a distância de aplicação da força-peso para o Sistema Internacional de unidades, no que foi denominado de Etapa 2 na interface gráfica do usuário.

Tabela 5.1 Dicas do STI Equilíbrio Rotacional do estado 12 para o estado 13

Sequência	Granularidade	Dica	Categoria
1	Baixa	Converta a distância d_p do enunciado na unidade padrão do Sistema Internacional. Caso a distância do enunciado já esteja na unidade do SI, apenas digite o seu valor.	<i>Point</i>
2	Média	Um metro equivale a cem centímetros ou mil milímetros. Utilize esta informação para converter a distância, se necessário.	<i>Teach</i>
3	Alta	Por favor, insira o valor ' $\%(distanciapesosi)\%$ ' no campo em destaque.	<i>Bottom-out</i>

5.4. Habilidades

De acordo com Vanlehn (2006), um componente de conhecimento (*knowledge component*) pode ser definido como um “princípio, conceito, regra, procedimento, fato associação ou qualquer fragmento de informação específica para uma tarefa”. Um dos objetivos da construção de um STI é que aconteça na mente do aprendiz um evento de aprendizagem, que é a aplicação de um componente de conhecimento feita pelo estudante enquanto este tenta completar uma tarefa (VANLEHN, 2006).

Em uma tentativa de detectar os eventos de aprendizagem e a aplicação dos componentes de conhecimento, foi utilizada a ferramenta *skills* (habilidades) do CTAT. Para a resolução dos problemas no STI Equilíbrio Rotacional, definiu-se quatro habilidades principais que estariam presentes em diferentes passos:

- Coleta de dados: mede a capacidade do aprendiz de localizar e coletar um dado do enunciado, copiando-o no campo necessário;
- Conversão: estima a aptidão do estudante em converter dados de um sistema de unidades para o Sistema Internacional;
- Sistema Internacional: identifica se o estudante tem conhecimento sobre as unidades do Sistema Internacional e suas respectivas grandezas;
- Monta equações: avalia se o aprendiz identifica a equação necessária para resolver o problema e é capaz de substituir os dados nas variáveis da equação;

- Matemática Básica: estabelece se o estudante consegue utilizar a álgebra e a matemática básica para resolver problemas e encontrar respostas com uma equação.

5.5. Massificação de Problemas

Para facilitar a criação de problemas para Sistemas Tutor Inteligentes rastreadores de padrão, o CTAT disponibiliza a função de *mass production* (produção em massa ou massificação), no qual problemas e variáveis podem ser descritos em uma planilha e o programa do CTAT gera, para cada problema, um grafo de comportamento diferente (CARNEGIE MELON UNIVERSITY, c2015). Esta estratégia é útil quando se quer criar vários problemas com estrutura semelhante na mesma interface, o que está ao encontro do que se propõe no artefato descrito neste trabalho.

Durante a criação do problema-base que serviria de modelo para a produção em massa dos outros problemas, verificou-se a necessidade de utilizar 15 variáveis que assumiam valores diferentes para cada problema, dependendo do enunciado e de quais os valores os dados do problema e a solução final iriam assumir. Criando um problema-base e variáveis, é possível utilizar a massificação para produzir vários problemas diferentes que são baseados no mesmo tipo de estrutura de resolução, no caso desta pesquisa, sete problemas para a mesma interface.⁷

6. Avaliação

Apesar da pesquisa em DSR não pressupor um método de avaliação específico, já que é responsabilidade do pesquisador escolher a metodologia mais adequada, a existência da(s) avaliação(ões) é altamente recomendada como parte do ciclo de desenvolvimento do artefato (PIMENTEL; FILIPO; SANTORO, 2020). Com base na revisão de pesquisas em DSR expostas na seção Metodologia deste artigo, devido ao curto tempo de desenvolvimento e à pandemia de Covid-19 - que adiou calendários escolares do país e do mundo - optou-se pelo formato de avaliação de especialistas (três professores licenciados em Física) através de questionário eletrônico aberto, enviado por e-mail aos respondentes⁸. Este questionário foi cunhado partindo de questões mais gerais para mais específicas dentro de um mesmo bloco de avaliação, o que permitiria ao especialista discorrer sobre a pergunta e ao pesquisador obter uma quantidade relevante de informações, mesmo com poucos indivíduos envolvidos na pesquisa.

O quadro sugerido por Pimentel e Santoro (2020) para orientar a abordagem de uma pesquisa em DSR sugere três avaliações diferentes para o artefato com base em sua validade, resolução do problema e solidez das conjecturas. Para que o instrumento do questionário aberto fosse alinhado a estas três avaliações, propôs-se que houvesse perguntas divididas em três seções correspondentes às três avaliações sugeridas por Pimentel e Santoro (2020). Os especialistas selecionados tiveram a tarefa de acessar o

⁷Acesso à tabela de problemas do STI Equilíbrio Rotacional:
<https://drive.google.com/file/d/1eOfYbwgltpxJVus-p5dopZEGOf4Pszxc/view?usp=sharing>

⁸Acesso ao questionário da pesquisa:
<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSff-PdA6inqODhDzaPrG6bWnXaED7RpWmbhf1SMYp-ZyURHg/viewform>

STI Equilíbrio Rotacional, explorando suas dicas, *feedbacks* de erro, passos e etapas da RP. Depois disso, os professores nomeados aqui como especialista 1 (E1), especialista 2 (E2) e especialista 3 (E3) foram convidados a responder ao questionário aberto contendo os seguintes itens:

Avaliação 1 - O artefato é válido?

1. Comente se os enunciados das questões estão claros e fáceis de compreender. Caso necessário, cite os problemas individualmente.
2. De que maneira todos os problemas apresentados e suas resoluções estão ou não no domínio (conteúdo) do equilíbrio rotacional e equilíbrio dos corpos rígidos?
3. Por quais razões os procedimentos e passos (etapas) de resolução do problema são ou não adequados e corretos?

Avaliação 2 – O problema foi resolvido?

4. De que forma você avalia o funcionamento do *feedback* do Sistema Tutor Inteligente Equilíbrio Rotacional e sua função de apontar erros e aprovar acertos?
5. Por quais motivos as dicas fornecidas pelo Sistema Tutor Inteligente Equilíbrio Rotacional são úteis ou não para a resolução de todos os problemas?
6. Elenque as razões pelas quais as dicas fornecidas pelo Sistema Tutor Inteligente Equilíbrio Rotacional são (ou não) claras e de fácil compreensão.

Avaliação 3 – As conjecturas teóricas parecem sólidas?

7. Por quais motivos o Sistema Tutor Inteligente Equilíbrio Rotacional seria ou não útil ao aprendizado do aluno?
8. De que maneira a aprendizagem dos protocolos de resolução de problemas de Física por meio do Sistema Tutor Inteligente auxilia ou não na aprendizagem de equilíbrio rotacional?
9. Por que você consideraria (ou não) que este Sistema Tutor Inteligente pode ser tão eficaz quanto a tutoria humana nos problemas em que ele foi construído?
10. Que tipo de aplicações você prevê como professor para o Sistema Tutor Inteligente Equilíbrio Rotacional em sala de aula ou fora dela (ex.: tarefa de casa, aula de resolução de problemas, introdução a um tópico, etc.)?

7. Resultados e Discussão

Em cada seção (avaliação), as respostas⁹ dos questionários foram analisadas segundo as orientações de análise temática proposta por Braun e Clarke (2006). Primeiramente, foi realizada uma extensa leitura e os extratos das respostas foram cuidadosamente categorizados em unidades chamadas de códigos, que sintetizavam algumas das visões expostas na fala dos respondentes, conforme as orientações de Braun e Clarke (2006). Depois, os códigos e os extratos foram listados e rearranjados em categorias maiores, denominadas de temas, e revisadas até que estivessem com coerência e homogeneidade dentro do mesmo tema e heterogeneidade e distinção entre extratos de temas diferentes

⁹Acesso à transcrição respostas do formulário sem identificação de respondentes:
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1AmwsXUu_u9OEbPr0jXFfVGN47FtnF21SMSuUTWz1qHU/e/dit?usp=sharing

(SOUZA, 2019). Para a Avaliação 1, foram elencados dois temas; para a Avaliação 2, três; e para a Avaliação 3, quatro temas de discussão e análise.

7.1. O artefato é válido? (Avaliação 1)

A proposta é adequada e os procedimentos são claros

A maioria dos especialistas, quando questionados da adequação dos enunciados e conteúdos ao que se propunha no STI, responderam positivamente, com algumas ressalvas. Em especial, quanto ao domínio (conteúdo) em que o STI foi construído, não houve dúvidas nas respostas: “*Os problemas apresentados estão incluídos no tema mencionado, certamente*” (E2) e “*Estão dentro do conteúdo.*” (E3). Além disso, os especialistas 1 e 2, em suas falas, ressaltaram que os passos de resolução são concisos, e sem muitos rodeios: “*A sequência de passos está em número adequado*” (E1) e “*Acredito que os passos são aqueles realmente necessários para a resolução dos problemas apresentados*” (E2). Também foi citado pelo especialista 2 o fato de que o STI permite que os estudantes reforcem e revisem conceitos relacionados: “*A questão do sinal do momento da força, trabalha com a troca de unidades e reforça a álgebra elementar, entre outras coisas.*” (E2).

Os procedimentos podem ser melhorados

Embora houvesse vários pontos positivos no STI em relação ao conteúdo, os especialistas apontaram erros de notação e várias sugestões de melhoria. Foi trazido como um problema a repetição excessiva da conversão de unidades no Sistema Internacional na etapa 2, quando não necessário: “*Em algumas situações torna-se repetitivo a inserção de dados cujas unidades não precisam ser colocadas no SI [...]*” (E2). Ainda sobre a etapa 2, foi sugerido uma mudança na ordem dos problemas, de modo que não se induza ao “[...] aluno a pensar que em todos os exercícios basta repetir na etapa 2 o que foi escrito na etapa 1” (E1). Também foi sugerido que a descrição da etapa 2 seja modificada de forma a não “*levar a crer que sempre será necessário fazer a troca de unidades*” (E1). Um ponto muito importante notado pelo especialista 2 é a falta de problemas que fazem uso, além das duas forças no sistema em equilíbrio, do peso da própria barra – o que é comum em algumas questões de livros didáticos de Física.

O especialista 1 apontou também que há um equívoco de notação na maneira como está apresentado o torque: “*Dizer que $0 = M_1 + M_2$ é um erro pois, segundo a expressão $M = F d$, entende-se que M é o módulo*” (E1) e que seria “[...] *problemático assumir que o torque seja uma grandeza escalar, quando não o é*” (E1). Como sugestões para contornar este problema, foi proposto que se escrevesse o torque com a notação vetorial na equação da etapa 4 ou que se escrevesse “[...] *$M = F d \sin \theta$ e colocar no desenho que $\theta = 90^\circ$* ” (E1). Na etapa 4, há um campo a ser completado com a força-peso e a distância em que ela é aplicada dentro da equação do equilíbrio rotacional, ponto que foi apontado como problemático por não favorecer a propriedade comutativa da multiplicação: “*Como saber se devo fazer P vezes d_P ou d_P vezes P ? A princípio ambos estariam certos*” (E1). Ainda, na etapa 4, foi sugerido que os “*sinais de cada um dos torques (ficassem) fora dos*

parênteses” (E1) para evitar a confusão no tipo de entrada que o aluno deve inserir nos campos.

7.2. O problema foi resolvido? (Avaliação 2)

As dicas e feedbacks fornecem devolutivas adequadas

Os especialistas respondentes foram unânimes em como as dicas e feedbacks, que não estão presentes em listas de exercícios tradicionais, são adequadas e úteis ao aluno no STI desenvolvido – fundamentando que o problema de pesquisa (falta de feedback e dicas) foi resolvido: “*Achei os feedbacks em número suficiente e úteis*” (E1); “[*as dicas*] *São claras porque são mostradas em cada etapa da resolução de problemas*” (E2); “*Linguagem objetiva e clara*” (E3); “[...] *a forma que o feedback é apresentado é bastante profícua*” (E2). Além disso, o especialista 2 reforçou que as dicas são elementos que oferecem o *scaffolding* necessário para que o aluno seja guiado na resolução correta dos problemas: “*As dicas são úteis porque direcionam o aluno no caminho certo para a resolução do problema*” (E2).

O feedback imediato dá suporte ao estudante

Um tópico bastante comentado pelos especialistas é como o feedback imediato oferece suporte para orientar o estudante em sua resolução através de uma devolutiva em tempo real: “*Acredito ser uma boa forma do discente já descobrir que o mesmo está errando nos passos iniciais ou não dos problemas que precisam ser resolvidos*” (E2); “*O feedback e o acompanhamento do passo-a-passo da resolução são interessantes, visto que os alunos terão retorno em tempo real do que fazem*” (E3). Entende-se então que, diferente de uma sala de aula, onde o aluno precisa aguardar que o professor verifique e corrija sua resposta, ao utilizar o STI, o usuário pode ter o *feedback* em tempo real e de forma automática, sem ser necessária a espera por um tutor, que tem que atender a uma classe inteira de vários alunos em um mesmo período.

Sobre as informações visuais no STI

Um apontamento recorrente dos especialistas foi de como o uso das cores no feedback foi uma escolha simples, útil e que chama a atenção necessário ao aluno nos erros e pontos de atenção: “*O funcionamento do feedback é bem simples, com a coloração vermelha quando errado e verde quando está certo*” (E2); “[...] *em particular o sistema de cores, vermelho para apontar erro, verde para acerto e amarelo para chamar a atenção para um ponto específico a ser observado*” (E1). Entretanto, um ponto a se melhorar, citado pelo especialista 1, é o excesso de informações na tela, que pode confundir um usuário menos atento ao invés de ajudar e fornecer um cansaço visual ao estudante: “*O que eu notei é que, tendo bastante coisas para observar na tela do STI, eu acredito que o estudante ficaria cansado rapidamente, não sei ao certo se ele conseguiria aguentar fazer sete exercícios destes em sequência*” (E1).

7.3. As conjecturas teóricas parecem sólidas? (Avaliação 3)

O STI apoia a aprendizagem de protocolos de RP

Dentre os pontos positivos que apoiam as conjecturas teóricas dessa pesquisa, está presente na fala dos respondentes o fato que o STI é capaz de apoiar a aprendizagem de resolução de problemas ao dividir em passos e direcionar o aluno para uma solução do problema: “[...] o passo-a-passo que o sistema tutor apresenta ao aluno acerca da maneira correta que ele deve resolver o problema é de suma importância para seu aprendizado” (E2); “Eu acho que é útil para aquele estudante que não sabe por onde começar a resolução de um problema” (E1); “Com o sistema tutor, o ato de ‘pular etapas’ é obstruído” (E2). Uma situação interessante é que, em uma das falas do especialista 2, é citado que o uso do STI é capaz ainda de acelerar o processo de resolução de problemas: “[...] com o auxílio do sistema tutor [...] consegui resolver os últimos problemas de forma célere. Isso mostra que os protocolos de resolução auxiliam a entender de que maneira o discente deve se portar para resolver cada problema” (E2).

Todos os especialistas afirmaram que o STI poderia ser utilizado para situações onde não há a presença do professor para apoiar a aprendizagem, como nas tarefas de casa que o aluno deve fazer após o horário escolar, mas sempre colocando em evidência que este não substituiria o professor em sala de aula: “Eu usaria [o STI] mais nas tarefas de casa, deixando as atividades realizadas em sala de aula como momentos para tentar entender as reais dificuldades dos estudantes através de uma interação mais humana” (E1); “[Prevejo uma aplicação do STI] Possivelmente, como tarefa complementar” (E3). “Esse sistema pode ser útil para uma aula de resolução de problemas sem a ajuda do docente.” (E2). Em uma das frases, o especialista 2 dá a entender que seu uso pode poupar tempo e melhorar a eficiência da ação docente em sala, mantendo as atividades de ensino e explicação em sala e passando as etapas de RP e fixação como atividades de casa: “O professor poderá ministrar seu conteúdo em sala de aula e pedir aos alunos para resolverem as atividades (preferencialmente em casa) com a ajuda do sistema tutor” (E2).

A aprendizagem é mecânica e repetitiva

A maior crítica dos especialistas quanto à maneira que o STI tutoria a resolução de problemas reside no fato de que apenas uma sequência bem definida de passos é permitida para os alunos, tornando a aprendizagem mecânica e repetitiva, conforme explícito na fala do especialista 3 “[o STI] É útil [para o aprendizado]. Porém, a estrutura didática pensada remete a uma aprendizagem por repetição, pedagogia mecânica. Vejo isso como problemático” (E3). O especialista 1 também sugeriu que a exposição dos alunos a somente uma única linha de pensamento poderiam ser menos interessantes que deixar os estudantes mais livres para explorar diferentes protocolos de RP em diferentes tipos de exercícios: “[...] o que me preocupa é que ele [o STI] inevitavelmente padroniza a linha de raciocínio dos alunos” (E1); “[...] meu receio é que estudantes com maior destreza na resolução de problemas possam se sentir tolhidos e excessivamente direcionados através de uma linha de raciocínio previamente estabelecida pelo professor” (E1).

Tutoria humana versus tutoria pela máquina

Em várias respostas repete-se entre os diferentes profissionais que, apesar do STI mostrar-se útil para alguns tipos de abordagem, a tutoria humana seria mais eficaz que o STI –

ficando implícito que, pela fala dos especialistas, os STIs, ou ao menos o STI Equilíbrio Rotacional, ainda não seriam tão efetivos quanto a tutoria humana, diferentemente do que sugeriu-se na segunda conjectura teórica: “*É difícil prever todas as linhas de raciocínio dos estudantes e pôr todas elas dentro de um sistema tutor inteligente*” (E1); “*A interação humana, [...] promovendo a criatividade e considerando o erro como parte da construção processual dos saberes é, para mim, bem mais eficaz [que o STI]*” (E3); “*Eu diria que o sistema tutor inteligente por si só não consegue detectar as necessidades individuais de cada aluno. A tutoria humana tem a capacidade de fazer isso [...]*” (E1). Embora, de forma alguma, pretende-se substituir o professor pela máquina (o Sistema Tutor Inteligente), como aponta Vanlehn (2011), a fala dos especialistas mostra que o STI Equilíbrio Rotacional ainda não personaliza suficientemente o aprendizado e não fornece dicas e feedbacks tão complexos e adaptáveis como a tutoria humana.

Sugestões para melhoria do STI

Nas frases dos respondentes, foi possível separar um material codificado que dava algumas sugestões para aperfeiçoar o STI Equilíbrio Rotacional, dentre elas, envolver os princípios físicos do problema, ao invés de somente dicas e tarefas relacionadas ao equacionamento do problema: “*Em vez de dar dicas sobre a álgebra elementar a ser observada, falar sobre os princípios envolvidos. [...] O STI poderia, através de dicas sucessivas, ajudar os estudantes a delimitar os princípios físicos necessários*” (E1). Uma melhoria sugerida pelo especialista 2 indica melhorar a diversidade de estilos de problemas no STI: “*Ponto negativo: existem diversos problemas distintos no âmbito da física do equilíbrio rotacional. Sendo assim, o ‘simulador’ [STI], precisaria fornecer formas diferentes para resolver outras situações [...]*” (E2). Ainda, em um raciocínio semelhante, a sugestão de fazer o STI ficar aberto a mais possibilidades de inserção de dados e à ação do aluno também compôs o corpus de respostas: “*Por que eu tenho que fazer $M_1 \times d_P$ e não posso fazer $d_P \times M_1$, por exemplo? O sistema pode induzir o estudante a pensar desta forma, única e exclusivamente pela maneira que o sistema foi montado*” (E1); “*Acho vantajoso pensar numa abordagem que dê espaço à criatividade do aluno, tornando-o mais protagonista de seu aprendizado*” (E3).

8. Conclusão

Se por um lado, o STI aqui desenvolvido não agradou totalmente os especialistas em alguns pontos -- como quanto à diversidade de problemas, soluções e excessivo foco na álgebra -- por outro, o STI Equilíbrio Rotacional ainda assim foi considerado como muito útil ao propósito que foi criado, fornecendo dicas e *feedbacks* que foram aprovados como instrumentos que providenciam o *scaffolding* necessário para a resolução de problemas em Equilíbrio Rotacional em Física pelos discentes de Ensino Médio, cumprindo o objetivo da pesquisa de criação de um artefato que solucionasse a ausência dos elementos acima citados.

Evidentemente, o protótipo relatado nessa pesquisa pode ser melhorado, conforme as sugestões das falas dos especialistas, e, inclusive, ser levado novamente à avaliação,

retornando ao ciclo de design do *Design Science Research*. Dentre as principais melhorias a serem implementadas em um trabalho futuro estão:

- A inclusão da determinação dos princípios físicos na resolução dos problemas através de questões abertas, o que também ajudaria a diminuir o aspecto mecânico e comportamentalista do STI;
- O adequado tratamento vetorial ao torque e força nos problemas e etapas de resolução;
- A implementação de problemas com características mais distintas, que, por exemplo façam o uso do peso da barra ou que solicitem ao aluno a determinação do ponto de aplicação da força, ao invés do módulo da força aplicada;
- A omissão de elementos desnecessários na resolução de uma determinada etapa e o uso de diferentes ilustrações de acordo com o problema solicitado pelo STI, tornando seu uso mais agradável e simples ao estudante.
- Avaliações qualitativas do artefato por uma amostra maior de professores e pesquisadores da área do Ensino de Física e a sistematização de uma avaliação quantitativa com alunos do Ensino Médio sobre a efetividade do STI desenvolvido em comparação com a instrução sem o uso da ferramenta;

Referências

ALEVEN, Vincent et al. The cognitive tutor authoring tools (CTAT): preliminary evaluation of efficiency gains. In: **International Conference on Intelligent Tutoring Systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006a. p. 61-70.

ALEVEN, Vincent et al. Rapid authoring of intelligent tutors for real-world and experimental use. In: **Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'06)**. IEEE, 2006b. p. 847-851.

ALFIERI, Louis et al. Does discovery-based instruction enhance learning?. **Journal of educational psychology**, v. 103, n. 1, p. 1, 2011.

ALKHATLAN, Ali; KALITA, Jugal. Intelligent tutoring systems: A comprehensive historical survey with recent developments. **arXiv preprint arXiv:1812.09628**, 2018.

BRAUN, Virginia; CLARKE, Victoria. Using thematic analysis in psychology. **Qualitative research in psychology**, v. 3, n. 2, p. 77-101, 2006.

BURTON, Richard R.; BROWN, John Seely. An investigation of computer coaching for informal learning activities. **International journal of man-machine studies**, v. 11, n. 1, p. 5-24, 1979.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. **Cognitive Tutor Authoring Tools**, c2015. Disponível em: <http://ctat.pact.cs.cmu.edu/>. Acesso em: jul. 2020.

COSTA, Sayonara Salvador Cabral da; MOREIRA, Marco Antonio. Resolução de problemas II: propostas de metodologias didáticas. **Investigações em ensino de ciências**. Porto Alegre. Vol. 2, n. 1 (jan./abr. 1997), p. 5-26, 1997.

CUSTÓDIO, José Francisco; CLEMENT, Luiz; FERREIRA, Gabriela Kaiana. Crenças de professores de física do ensino médio sobre atividades didáticas de resolução de problemas. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 11, n. 1, 2012.

DA ROSA, Cleci T. Werner; GHIGGI, Caroline Maria. Monitoramento e controle metacognitivo na resolução de problemas em física: análise de um estudo comparativo. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, Florianópolis, v. 10, n. 2, p. 105-125, nov. 2017. ISSN 1982-5153. Disponível

em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/alexandria/article/view/45629>>. Acesso em: 26 set. 2020.

doi:<https://doi.org/10.5007/1982-5153.2017v10n2p105>.

GERTNER, Abigail S.; VANLEHN, Kurt. Andes: A coached problem solving environment for physics. In: **International conference on intelligent tutoring systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. p. 133-142.

GRAESSER, Arthur C. et al. AutoTutor: A tutor with dialogue in natural language. **Behavior Research Methods, Instruments, & Computers**, v. 36, n. 2, p. 180-192, 2004.

HEVNER, Alan R. et al. Design science in information systems research. **MIS quarterly**, p. 75-105, 2004.

INEP. **Média de Alunos por Turma - Brasil, Regiões Geográficas e Unidades da Federação – 2019**. Disponível em: <http://portal.inep.gov.br/web/guest/indicadores-educacionais>. Acesso em: 19 jul. 2020.

JQUES, Patrícia A. et al. Computação afetiva aplicada à educação: Dotando sistemas tutores inteligentes de habilidades sociais. In: **Anais do Workshop de Desafios da Computação Aplicada à Educação**. 2012. p. 50-59.

KULIK, James A.; FLETCHER, J. D. Effectiveness of intelligent tutoring systems: a meta-analytic review. **Review of educational research**, v. 86, n. 1, p. 42-78, 2016.

MA, Wenting et al. Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis. **Journal of educational psychology**, v. 106, n. 4, p. 901, 2014.

MELIS, Erica; SIEKMANN, Jörg. Activemath: An intelligent tutoring system for mathematics.

In: **International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. p. 91-101.

MYNENI, Lakshman S. et al. An interactive and intelligent learning system for physics education. **IEEE Transactions on learning technologies**, v. 6, n. 3, p. 228-239, 2013.

NWANA, Hyacinth S. Intelligent tutoring systems: an overview. **Artificial Intelligence Review**, v. 4, n. 4, p. 251-277, 1990.

OLIVEIRA, Vagner; ARAUJO, Ives Solano; VEIT, Eliane Angela. Resolução de problemas abertos no ensino de física: uma revisão da literatura. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 39, n. 3, e3402, 2017. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172017000300502&lng=en&nrm=iso>. access on 26 Sept. 2020. Epub Mar 06, 2017. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0269>.

PEDUZZI, Luiz OQ. Sobre a resolução de problemas no ensino da física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 14, n. 3, p. 229-253, 1997.

PEDUZZI, Luiz OQ; PEDUZZI, Sônia Silveira. Sobre o papel da resolução literal de problemas no ensino da Física: exemplos em Mecânica. Pietrocola (org.), **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa abordagem integradora**, INEP, Editora da UFSC, SC, 2001.

PIMENTEL, Mariano; FILIPPO, Denise; SANTORO, Flávia Maria. **Design Science Research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação**. In: JQUES, Patrícia Augustin; PIMENTEL, Mariano; SIQUEIRA, Sean; BITTENCOURT, Ig. (Org.) Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Concepção de Pesquisa. Porto Alegre: SBC, 2020. (Série Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação, v. 1) Disponível em: <<https://metodologia.ceie-br.org/livro-1/>>.

REIF, Fredrick; LARKIN, Jill H.; BRACKETT, George C. Teaching general learning and problem-solving skills. **American Journal of Physics**, v. 44, n. 3, p. 212-217, 1976.

RITTER, Steven et al. Cognitive Tutor: Applied research in mathematics education. **Psychonomic bulletin & review**, v. 14, n. 2, p. 249-255, 2007.

RUS, Vasile; NIRLAULA, Nobal; BANJADE, Rajendra. DeepTutor: an effective, online intelligent tutoring system that promotes deep learning. In: **Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence**. 2015.

SANTOS, Thiago Marcondes; PIMENTEL, Mariano; FILIPPO, Denise. Tapetes Musicais Inteligentes: Computação Ubíqua para apoiar a Educação Musical. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 24, n. 02, p. 123, 2016.

SEFFRIN, Henrique; RUBI, Geiseane; JAQUES, Patrícia. O Modelo Cognitivo do Sistema Tutor Inteligente PAT2Math. **Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE)**, [S.l.], out. 2012. ISSN 2316-6533. Disponível em: <<https://www.br-ie.org/pub/index.php/sbie/article/view/1571/1336>>. Acesso em: 13 jun. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5753/cbie.sbie.2011.%p>.

SOUZA, C. M. S. G. DE; FÁVERO, M. H. Concepções de professores de física sobre resolução de problemas e o ensino da física. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 3, n. 1, 27 nov. 2003.

SOUZA, Luciana Karine de. Pesquisa com análise qualitativa de dados: conhecendo a Análise Temática. **Arq. bras. psicol.**, Rio de Janeiro, v. 71, n. 2, p. 51-67, 2019. Disponível em <http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1809-52672019000200005&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 04 out. 2020. <http://dx.doi.org/10.36482/1809-5267.ARB2019v71i2p.51-67>.

SOUZA, Carlos Alberto; BASTOS, Fábio da Purificação de; ANGOTTI, João André Pérez. Resolução de problemas de física mediada por tecnologias. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 25, n. 2, p. 310-339, ago. 2008. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2008v25n2p310/5637>>. Acesso em: 23 jul. 2020. doi:<https://doi.org/10.5007/2175-7941.2008v25n2p310>.

VANLEHN, Kurt. The behavior of tutoring systems. **International journal of artificial intelligence in education**, v. 16, n. 3, p. 227-265, 2006.

VANLEHN, Kurt. The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems. **Educational Psychologist**, v. 46, n. 4, p. 197-221, 2011.

VANLEHN, Kurt et al. The architecture of Why2-Atlas: A coach for qualitative physics essay writing. In: **International Conference on Intelligent Tutoring Systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. p. 158-167.

VANLEHN, Kurt et al. The Andes physics tutoring system: Lessons learned. **International Journal of Artificial Intelligence in Education**, v. 15, n. 3, p. 147-204, 2005.

WILLIAM, J. Leonard; GERACE, William J.; DUFRESNE, Robert J. Resolución de problemas basada en el análisis. Hacer del análisis y del razonamiento el foco de la enseñanza de la física. **Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas**, p. 387-400, 2002.