

Marcelo Fernando Rauber

**SISTEMA TUTOR INTELIGENTE APLICADO AO ENSINO DE
CIÊNCIAS: UMA PROPOSTA DE ARQUITETURA.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Educação Científica e Tecnológica.
Orientadora: Dra. Tatiana da Silva

Florianópolis - SC
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rauber, Marcelo Fernando
Sistema Tutor Inteligente aplicado ao Ensino de
Ciências : uma proposta de arquitetura. / Marcelo Fernando
Rauber ; orientador, Tatiana da Silva - Florianópolis, SC,
2016.
158 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas.
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.

Inclui referências

1. Educação Científica e Tecnológica. 2. Individualidades
de Aprendizagem. 3. Ensino de Física. 4. Sistemas Tutores
Inteligentes. 5. Teoria da Carga Cognitiva. I. Silva,
Tatiana da. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica.
III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
 CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
 CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO
 CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
 CURSO DE MESTRADO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

“Sistema Tutor Inteligente aplicado ao ensino de ciências: uma proposta de arquitetura”

Dissertação submetida ao Colegiado do Curso de Mestrado em Educação Científica e Tecnológica em cumprimento parcial para a obtenção do título de Mestre em Educação Científica e Tecnológica

APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA em 26 de fevereiro de 2016


Tatiana da Silva (Orientadora – CFM/UFSC)


André Fabiano de Moraes (Examinador – IFC/Camboriú)

José Francisco Custódio Filho (Examinador – CFM/UFSC)

Paulo José Sena dos Santos (Examinador – CFM/UFSC)

Frederico Firmo de Souza Cruz (Suplente – CFM/UFSC)


 Carlos Alberto Marques
 Coordenador do PPGECT


 Marcelo Fernando Rauber
 Florianópolis, Santa Catarina, 2016

À Aline Isabel Rauber (*in memoriam*),
minha irmã, enfermeira, que nos
deixou no percurso deste trabalho,
vítima aos 28 anos de câncer de
mama. “Tenhas a certeza de que tua
alegria, tranquilidade e força ao longo
dos três anos de batalha e até o fim,
são marcas fortes que deixas em todos
que te eram próximos e serve de
inspiração”.

Igualmente aos meus queridos pais, a
minha amada esposa Rosana e ao
nosso filho Artur Miguel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma muito especial a minha família, minha esposa Rosana, meu filho Artur, pai, mãe e irmãs, que sempre ao meu lado me deram carinho e amor, que usei como combustível para o desenvolvimento deste mestrado. Muito obrigado pela sua compreensão.

Agradeço a minha orientadora, Dra. Tatiana da Silva, por ter me ajudado a trilhar este caminho. Sua paciência e dedicação foram fundamentais e exemplares para o enfrentamento dos desafios encontrados ao longo do mestrado e meu desenvolvimento pessoal.

Aos membros da banca, que cuidadosamente analisaram este trabalho.

E àqueles, que direta ou indiretamente, contribuíram.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

A inclusão de recursos computacionais na educação pode propiciar uma adequação do material didático ao nível de conhecimento dos estudantes e às individualidades de aprendizagem. Nessa perspectiva, os Sistemas Tutores Inteligentes (STI) são excelentes candidatos, pois permitem tratar os alunos de forma individualizada e flexível. Apesar dos avanços obtidos no campo da ciência da computação, ainda são pouco conhecidos no ensino de ciências no Brasil. É apresentada uma reflexão da Teoria da Carga Cognitiva (TCC), que pode instruir muitos dos processos educacionais, e, seus efeitos são analisados minuciosamente. A multidisciplinaridade do processo de aprendizagem, apoiado em uma moderna teoria da cognição humana, a TCC, embasam esta proposta de arquitetura para um STI e de sua aplicabilidade no ensino de ciências, escolhendo como tema a Óptica Geométrica, para demonstrar sua aplicabilidade e como é promissora.

Palavras chave: Individualidades de Aprendizagem. Ensino de Física. Sistemas Tutores Inteligentes. Teoria da Carga Cognitiva. Óptica Geométrica.

ABSTRACT

The inclusion of computational resources in education can provide an adaptation of the teaching materials to the level of students' knowledge and learning individuals. From this perspective, the Intelligent Tutoring Systems (ITS) are excellent candidates as they allow treating students individually and flexibly. Despite the advances made in the field of computer science, they are still little known in science teaching in Brazil. It is presented a reflection of Cognitive Load Theory (CLT), which can instruct many of the educational process, and its effects are analyzed thoroughly. The multidisciplinary approach of the learning process, supported by a modern theory of human cognition, CLT, underlie this proposed architecture for an STI and its applicability in the teaching of science, choosing as its theme the Geometrical Optics, to demonstrate its applicability and how its promising.

Keywords: Learning Individuality. Physical Education. Intelligent Tutoring Systems. Cognitive Load Theory. Geometrical Optics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interação entre os módulos de um STI.....	29
Figura 2: Interação entre agentes do STI PAT2Math.....	39
Figura 3: Arquitetura de O HALYEN.....	43
Figura 4: Arquitetura do STI-PBL.....	46
Figura 5: Interface do <i>Thermo-tutor</i> : STI aplicado no ensino de ciclos termodinâmicos fechados.....	51
Figura 6: Definição de um estado no diagrama do <i>Thermo-Tutor</i>	51
Figura 7: Definição de uma transição no diagrama do <i>Thermo-Tutor</i>	52
Figura 8: A interface do usuário no STI Andes.....	55
Figura 9: Interface para plotagem de pontos.....	58
Figura 10: Representação da Teoria da Carga Cognitiva.....	64
Figura 11: Carga cognitiva e capacidade da memória de trabalho.....	67
Figura 12: Um exemplo de problema convencional de geometria.....	81
Figura 13: Um exemplo resolvido de um problema de probabilidade..	82
Figura 14: Um exemplo com divisão de atenção.....	84
Figura 15: Um exemplo com integração de texto/solução e gráficos....	85
Figura 16: Exemplo de um diagrama de Caso de Uso.....	101
Figura 17: Diagrama de Casos de Uso para o STI proposto.....	106
Figura 18: Casos de uso do Modelo da base de domínio.....	108
Figura 19: O Modelo de estudante.....	109
Figura 20: O Modelo de interface.....	112
Figura 21: Protótipo de um exemplo da tela principal do STI.....	114
Figura 22: Representação dos estados de ânimo.....	118
Figura 23: Casos de uso do Tutor Cognitivo.....	120
Figura 24: Casos de uso do Tutor Motivacional.....	125
Figura 25: Uma representação da estrutura conceitual de óptica geométrica.....	131
Figura 26: Representação da entrevista de Goldberg e McDermott.....	132
Figura 27: Um exemplo de apresentação de conteúdo para alunos novatos.....	133

Figura 28: Exemplo de atividade parcialmente resolvida: para alunos intermediários.....	134
Figura 29: Exemplo de ajuda em atividade parcialmente resolvida: para alunos intermediários.....	136
Figura 30: Exemplo de atividade: aluno experiente.....	137
Figura 31: Diagrama de raios de luz criado por alunos para justificar que metade da imagem desaparecerá.....	138
Figura 32: Exemplo de atividade com ajuda: aluno experiente.....	139
Figura 33: Exemplo de atividade com ajuda: aluno experiente.....	140

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Totalização dos resultados encontrados agrupados de acordo com a qualificação dos periódicos.....	32
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Publicações selecionadas.....	33
Tabela 2: Sumarização dos efeitos da TCC	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: <i>Expertise</i> dos alunos, materiais e ajuda/orientação.....	121
--------------------------------------------------------------------------	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA - Agente Pedagógico Animados
AGI - Agente de Interface
AGT - Agente Tutor
AGMA - Agente de Modelo de Aluno
AGBD - Agente de Base de Domínio
CAI - Instrução Assistida por Computador
CAPES - Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior
CPN - Redes de Petri Coloridas
ENPEC - Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências
EPEF - Encontro de Pesquisa em Ensino de Física
HA - Hipermídia Adaptativa
HTML - *Hyper Text Markup Language*
IA - Inteligência Artificial
ISSN - *International Standard Serial Number*
ISO - *International Organization for Standardization*
LDB - Lei de Diretrizes e Bases da educação
OMG - *Object Management Group*
PCN+ - Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais
SNEF - Simpósio Nacional de Ensino de Física
SMA - Sistema Multi Agente
STI - Sistema Tutor Inteligente
TCC - Teoria da Carga Cognitiva
TCD - Teoria da Codificação Dual
TDIC - Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação
UML - *Unified Modeling Language*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Justificativa.....	23
1.2 Problema de pesquisa.....	26
1.3 Objetivo geral.....	26
1.4 Objetivos específicos.....	26
1.5 Hipótese.....	26
2 OS SISTEMAS Tutores INTELIGENTES.....	27
2.1 Um estado da arte em Sistemas Tutores Inteligentes.....	30
2.1.1 O caminho percorrido.....	30
2.1.2 Os resultados.....	32
2.1.3 Detalhamento dos resultados obtidos.....	34
2.1.4 Sumarização dos resultados.....	47
2.2 STI no ensino de Ciências.....	49
3 TEORIA DA CARGA COGNITIVA.....	61
3.1 Uma visão geral.....	62
3.2 A carga cognitiva.....	66
3.3 O Princípio do armazenamento de informações.....	69
3.4 O Princípio de empréstimo e reorganização.....	71
3.5 O Princípio da aleatoriedade como Gênese.....	72
3.6 O Princípio dos limites estreitos de mudança.....	74
3.7 O Princípio da organização ambiental e Vinculação.....	75
3.8 Medidas de carga cognitiva.....	76
3.9 Os efeitos da teoria da carga cognitiva.....	79
4 PERCURSO METODOLÓGICO.....	99
5 UMA PROPOSTA DE ARQUITETURA PARA UM SISTEMA TUTOR INTELIGENTE.....	105
6 UMA PROPOSTA DE APLICABILIDADE: ÓPTICA GEOMÉTRICA.....	127
6.1 Exemplificando a arquitetura proposta.....	130

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	143
REFERÊNCIAS.....	149

1 INTRODUÇÃO

O ensino e a aprendizagem de ciências necessitam da exploração de diferentes representações do conteúdo estudado (BODEMER e PLOETZNER, 2002; BODEMER et al., 2004), auxílio à visualização de fenômenos (GILBERT, 2005; VAVRA et al., 2011), adequação a diferentes ritmos de aprendizagem (MITROVIC et al., 2011; KALYUGA, 2011) e de uma participação ativa do aluno.

Neste contexto, a informática, em especial a utilização de computadores e a infraestrutura fornecida pela Internet, podem ser grandes aliados, por possibilitarem ambientes instrucionais dinâmicos, capazes de se adequar a diferentes características dos aprendizes, bem como, estarem virtualmente disponíveis a qualquer hora e lugar.

Desde a década de 50 há o desenvolvimento de *softwares* educacionais chamados de CAI - Instruções Assistidas por Computador. Conforme Jesus (2009), os CAI apenas apresentam os conteúdos, não motivando ou instigando o aluno no seu aprendizado. Nesse contexto o aluno é quem precisa se adaptar ao sistema e não o sistema às características individuais do aluno. Diversos enfoques foram investigados a este respeito, e, ao longo do tempo houve a identificação de deficiências e sugestões de possíveis soluções. Esses estudos, levando-se em consideração os trabalhos na área de educação e o desenvolvimento tecnológico na ciência da computação, compõem uma área conhecida como *Informática na Educação* (POZZEBON, FIGO e BITTENCOURT, 2004).

Essa evolução da ciência da computação propiciou a inclusão de Inteligência Artificial (IA) aos estudos de CAI, originando os Sistemas Tutores Inteligentes (STI), os quais objetivam em primeiro lugar fornecer uma instrução adaptada ao aluno, tanto no conteúdo quanto na forma, superando desta maneira alguns problemas cruciais dos CAI já comentados anteriormente. Assim, os STI deveriam apresentar um comportamento mais próximo possível do que seria a instrução de um aluno por um professor humano. Porém, a realidade ainda está muito distante deste propósito (GIRAFFA, 1999).

Numa tentativa de aproximação de tal propósito, a Teoria da Carga Cognitiva (TCC) pode ser utilizada para nortear e auxiliar na escolha de muitas das características para um processo educacional efetivo, inclusive àquele apoiado pela utilização de recursos computacionais. De acordo com Sweller (2008) para determinar as

condições mais favoráveis ao aprendizado, devemos aprofundar os estudos da cognição humana. Uma vez estabelecidos os mecanismos de funcionamento da cognição humana e suas características particulares, temos condições de projetar ambientes de aprendizagem que levem em consideração a arquitetura cognitiva humana, buscando torná-los mais adequados ao aprendizado.

Para isso contamos com o desenho didático que fornece uma estrutura de apresentação do conjunto de conteúdos e situações de aprendizagem, visando potencializar a comunicação e todo processo de aprendizagem (SANTOS e SILVA, 2009). Segundo Sá e Silva (2013), ao tratar do desenho didático interativo para educação *online* e suas implicações para a prática docente, ele deve romper a pedagogia da transmissão. O desafio é como o docente promove a comunicação a partir de seus pressupostos pedagógicos e a reconfigura em conjunto com seus discentes na perspectiva dos fundamentos da interatividade.

Os mesmos autores chamam atenção à estruturação dos conteúdos e das atividades para que busquem a ruptura com a linearidade do livro didático e das apostilas eletrônicas, de modo a não subutilizar o paradigma computacional próprio do ambiente *online* de aprendizagem. Por exemplo, não basta colocar uma cópia de um livro em um ambiente *online*. A complexidade é tamanha, que Santos e Silva (2009) nos trazem que o desenvolvimento do desenho didático é uma atividade interdisciplinar e que desejavelmente conta com os seguintes especialistas como integrantes de sua equipe de produção: conteudista, *web roteirista*, *web designer*, programador e *designer* didático.

Assim, a proposição de uma arquitetura para um STI que se adapte as individualidades de aprendizagem no ensino de ciências, pode ter um enfoque multidisciplinar e considerar aspectos cognitivos, através do conjunto de princípios e efeitos da TCC.

Desta forma, na seção de justificativa deste projeto será abordada a relevância da compreensão de ciências e desafios do seu processo de aprendizagem, bem como a integração com STI e Teoria da Carga Cognitiva (TCC). Na seção de problema de pesquisa e objetivos, apresentar-se-á a delimitação do trabalho a ser desenvolvido. Nos capítulos de referenciais teóricos serão aprofundados e detalhados os STIs e a TCC. No capítulo de metodologia será apresentada a proposta de atuação para a proposição de uma arquitetura de STI. Por fim, um capítulo com uma proposta de arquitetura para um STI e outro com uma proposta de aplicabilidade dessa arquitetura ao ensino de ciências, mais especificamente, no ensino de ótica geométrica.

1.1 Justificativa

Atualmente, a Lei 9.394/96 de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) não aborda de forma clara e específica a utilização de recursos de informática na educação. Ao estabelecer as diretrizes para o ensino médio, em especial o artigo 36 da LDB, aponta que deve ser destacada a educação tecnológica básica, a compreensão da ciência, bem como a adoção de metodologias de ensino e de avaliação que estimulem a iniciativa dos estudantes. Com relação às instituições de ensino superior, no artigo 43 são estabelecidas suas finalidades, nas quais apesar de serem autônomas em vários aspectos, percebe-se o incentivo ao desenvolvimento e difusão do conhecimento científico, tecnológico e cultural em benefício da sociedade (BRASIL, 1996).

Os avanços tecnológicos dos últimos tempos trouxeram e integraram o computador para nossas vidas, seja no contexto social, profissional, familiar e às vezes escolar. Em contrapartida, os trabalhos de pesquisadores como Santos et al. (2011) observam que o ensino ainda se mantém de modo tradicional em nossas escolas, o que gera insatisfação por parte dos alunos e, em consequência, também dos professores e da sociedade, pois acabam sentindo os resultados desse sentimento de insatisfação. Ainda conforme os mesmos autores, o mundo científico-tecnológico em que estamos inseridos exige do cidadão conhecimentos mais apurados de ciências, e, o domínio do conhecimento científico é a alavanca para o desenvolvimento de um país. Além disso, permite o entendimento da sua própria vida e do mundo que o cerca.

O trabalho publicado por um grupo de estudos da Academia Brasileira de Ciências (2008), que trata do ensino de ciências, ressalta a necessidade imperiosa de melhorar o ensino básico no Brasil e, em particular, o de ciências. Se adequado, deve estimular o raciocínio lógico e a curiosidade, ajudar a formar cidadãos mais aptos a enfrentar os desafios da sociedade contemporânea e fortalecer a democracia, dando à população em geral melhores condições para participar dos debates cada vez mais sofisticados sobre temas científicos que afetam nosso cotidiano. Em Chaves et al. (2004), a Academia Brasileira de Ciências propõe um ciclo básico comum em ciências para cursos superiores, que aborde disciplinas de cálculo, física, química e biologia, e ainda, disciplinas básicas à formação de todos os alunos, como português, história do Brasil e ciência da computação.

Conforme Mitrovic et al. (2011), há estudos em educação que têm mostrado que o melhor ambiente de aprendizagem é “um-para-um” com um professor especialista e um aluno. No entanto, a situação atual do ensino está muito aquém deste ideal. Mesmo nas instituições mais bem financiadas, a relação aluno-professor não é suficiente para tornar isso possível. Os professores são, portanto, obrigados a adequar seu ensino a salas com muitos alunos, e ainda tentar adequar o conteúdo a maioria dos discentes. Isso pode levar estudantes com alto desempenho a aborrecer-se e frustrar-se com a lentidão e falta de desafio, logo, não conseguem atingir o seu melhor. E por outro lado, estudantes com desempenho baixo acham difícil o trabalho e não recebem o nível de atenção desejável.

A utilização de recursos de informática tem potencial para contribuir e melhorar este quadro. Há um grande número de pesquisadores empenhados em melhorar e repensar a Informática na Educação, como Selwyn (2014). Muitos estudos abordam STIs. Conceitualmente os STIs, enquanto ferramenta de aprendizagem multidisciplinar (JESUS, 2009), permitem a modelagem das características do aprendiz e a flexibilização do comportamento do sistema (POZZEBON et al., 2004). Segundo Jesus (2009), o aluno passa a ser o centro do processo de ensino aprendizagem, atuando de forma ativa no processo, além de tornar relevante seu conhecimento atual e suas características de aprendiz. Ambientes computacionais contemporâneos permitem o desenvolvimento e utilização de sistemas com interações complexas, utilizando-se de recursos audiovisuais.

Harrer e Devedzic (2002) de sua parte apontam que a complexidade de um STI torna o seu efetivo desenvolvimento o maior desafio. Jesus (2009) nos traz que a construção de um STI aborda um variado leque de conhecimentos, oriundos da Ciência da Computação, Pedagogia e Psicologia, além da área de conhecimento onde efetivamente é aplicado. Na Ciência da Computação, particularmente a inteligência artificial, oferece desafios para implementação de STIs. Assim, a compreensão, proposição e análise de uma arquitetura de STI embasada em uma moderna teoria de aprendizagem, bem como uma proposta para sua aplicação no ensino de ciências, pode contribuir para futuras implementações de STI.

Neste sentido, a TCC foi desenvolvida para fornecer diretrizes destinadas a contribuir para a apresentação de informações de uma forma que incentiva o aprendiz e que otimizam o desempenho intelectual. Ela pressupõe uma memória de trabalho limitada do

aprendiz (formada por subcomponentes parcialmente independentes para lidar com material auditivo/verbal e visual 2D ou 3D) e uma memória de longa duração ilimitada (SWELLER, 1988; SWELLER et al., 1998; SWELLER, AYRES e KALYUGA, 2011).

Quando se trata de ensino de física são comuns os relatos sobre as dificuldades relacionadas à apreensão de conceitos básicos, particularmente, por se tratarem de assuntos com alto grau de abstração e de visão espacial que requerem formas de pensar pouco habituais para os estudantes (SILVA e BARROSO, 2008).

A interação com imagens, *softwares* de simulação em ambientes virtuais, o uso de objetos digitais de aprendizagem e de ambientes hipermídia, vêm apresentando boa receptividade por parte dos alunos e têm demonstrado potenciais condições de melhorias na aprendizagem (LACERDA, 2013).

Conforme Sweller, Ayres e Kalyuga (2011), a TCC apresenta fortemente seus efeitos quando aplicada a aprendizagem de materiais instrucionais com demanda elevada de carga cognitiva, em especial quando há muitos elementos que devem ser simultaneamente considerados.

Assim, percebe-se o potencial de integração da TCC e de STI, e para evidenciar o potencial desta integração propõe-se sua aplicação à física, em especial a óptica geométrica, que serão objetos desta pesquisa.

A atuação do autor deste trabalho na área educacional e sua formação em Ciência da Computação também foram fatores motivadores para este projeto, com a perspectiva de poder contribuir com a multidisciplinaridade inerente à proposição de um STI.

1.2 Problema de pesquisa

Quais as características relevantes e desejáveis em uma arquitetura de um Sistema Tutor Inteligente de tal forma que atue como um facilitador do processo de aprendizagem de ciências?

1.3 Objetivo geral

Elaborar um desenho didático de uma arquitetura computacional para um Sistema Tutor Inteligente que atue como facilitador do processo de aprendizagem de ciências.

1.4 Objetivos específicos

- Entender as potencialidades e limitações do uso de STI;
- Evidenciar procedimentos instrucionais facilitadores do processo de aprendizagem;
- Propor uma modelagem de uma arquitetura para um Sistema Tutor Inteligente;
- Propor a aplicação da arquitetura a um conteúdo de ciências.

1.5 Hipótese

É possível definir uma arquitetura apoiada e guiada por computador para um Sistema Tutor Inteligente que permita adequar as estratégias de ensino às necessidades de aprendizagem de cada estudante, através da combinação dinâmica e coerente das informações relacionadas ao aluno, ao conteúdo e aos aspectos pedagógicos envolvidos, ao se ancorar nos princípios e efeitos da TCC.

2 OS SISTEMAS TUTORES INTELIGENTES

Neste capítulo serão abordados os Sistemas Tutores Inteligentes (STI), fornecendo inicialmente uma visão geral, e na sequência, uma revisão do estado da arte desses sistemas.

Sistemas Tutores Inteligentes são programas computacionais desenvolvidos e dedicados ao ensino, que se utilizam de técnicas de Inteligência Artificial (IA). O objetivo maior de um STI é fornecer uma instrução adaptada ao aluno, tanto no conteúdo quanto na forma, superando desta maneira alguns problemas cruciais dos CAIs e amplia as possibilidades de um ensino/aprendizagem centrado no aluno e no seu “perfil” ou ritmo de aprendizagem.

Os CAIs surgiram na década de 50, e são baseados no modelo educacional comportamentalista, no qual o professor é a figura central do processo ensino aprendizagem e o aluno é uma figura passiva. Isso leva a algumas deficiências segundo Jesus (2009): a) o aluno não é ativo no processo de ensino-aprendizagem, pois é controlado pelo software; b) não há uma preocupação com o processo de aprendizado e raciocínio do aluno; c) são utilizados artifícios de reforço como notas e elogios. Na busca da superação das deficiências identificadas nos CAI surgem os STIs.

Os STI são investigados por diversos autores, dentre os quais podem ser citados: Jesus (2009), Raabe (2005), Giraffa (1999), Giraffa e Viccari (1999), San Pedro, Baker e Rodrigo (2014), Rissoli, Giraffa e Martins (2006) e Mayer (2014). De acordo com Rissoli, Giraffa e Martins (2006) STIs possuem a capacidade de ensinar e aprender. Desta forma permitem adequar as estratégias de ensino às necessidades de aprendizagem de cada estudante, através da combinação dinâmica e coerente das informações relacionadas ao aluno, ao conteúdo e aos aspectos pedagógicos envolvidos.

Assim, os STI deveriam apresentar o comportamento mais próximo possível, do que seria a instrução de um aluno por um professor humano. Porém, a realidade está muito distante deste propósito (GIRAFFA, 1999).

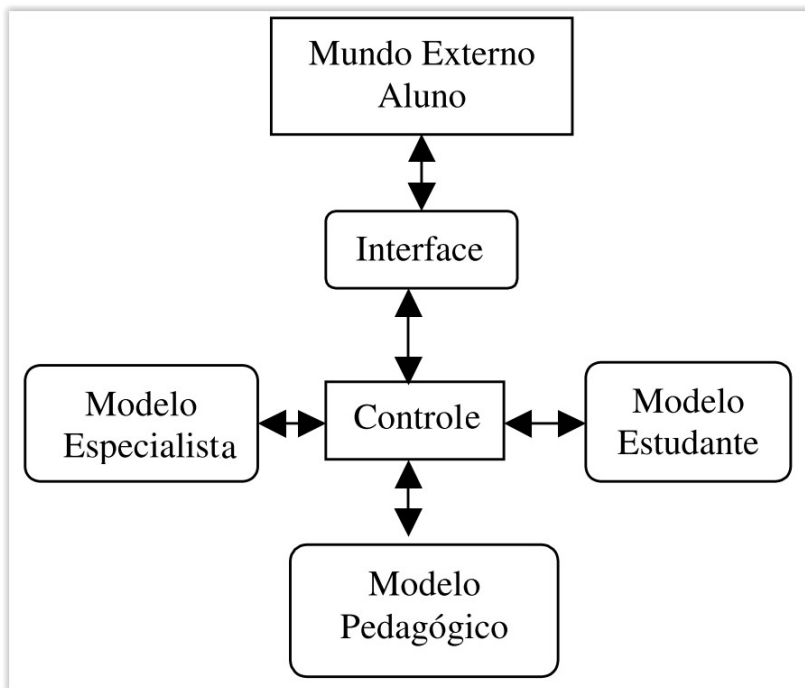
Segundo Jesus (2009), a ciência cognitiva deve integrar a concepção de um STI. Teorias modernas de aprendizagem podem fornecer subsídios valiosos para definir os modelos de estudante, pedagógico e interface de um STI. A ciência cognitiva é formada por diferentes áreas do conhecimento, com objetivo de estudar o processo de

aquisição do conhecimento. As disciplinas que fazem parte desta ciência são: psicologia, filosofia, linguística, antropologia, neurociência e inteligência artificial. Nesse sentido, busca-se empregar a TCC de Sweller, Ayres e Kalyuga (2011), a qual será utilizada como referencial teórico neste trabalho.

Segundo Raabe (2005), a arquitetura tradicional de um STI é composta por três componentes principais: o modelo de aluno, a base de domínio e o modelo do tutor. Cada um desses armazena informações e as combina dinamicamente com a finalidade de adaptar o ambiente computadorizado às necessidades particulares do aluno em determinado instante do processo de aprendizagem.

A interação entre os módulos de um STI, pode ser observada através da Figura 1. Os módulos podem ser assim descritos (JESUS, 2009):

- Modelo do Especialista: é o módulo do conhecimento, contém as informações de um determinado domínio que representa o conhecimento de um especialista;
- Modelo de Estudante: Deve conter o conhecimento e o comportamento de aprendizado do aluno. Fundamentais para o tutor decidir seu posicionamento frente ao processo de ensino-aprendizagem;
- Modelo Pedagógico: módulo do tutor, responsável pela estrutura didático pedagógica dos STI.
- Modelo de Interface: realiza a comunicação entre o sistema e o estudante.

Figura 1: Interação entre os módulos de um STI.

Fonte: Adaptado de Jesus (2009)

De posse desta arquitetura tradicional de um STI, é relevante conhecer o que os demais colegas pesquisadores têm desenvolvido nesta área. Com tal objetivo em mente, foram conduzidos dois levantamentos bibliográficos apresentados nas seções a seguir. O primeiro apresenta uma revisão do estado da arte em se tratando de STIs, o qual conforme aponta Ferreira (2002), busca mapear e discutir a produção acadêmica em determinada área de conhecimento (aqui STIs), com a intenção de identificar aspectos e dimensões que são privilegiadas e destacadas, em determinado recorte local e temporal. Em um segundo momento, amplia-se o levantamento já realizado objetivando exemplificar a utilização de STIs no ensino de ciências com uma perspectiva internacional.

2.1 UM ESTADO DA ARTE EM SISTEMAS Tutores INTELIGENTES

Esta seção apresenta uma revisão do estado da arte de sistemas tutores inteligentes. Iniciaremos detalhando a sua forma de elaboração. Em seguida apresentaremos os resultados encontrados. O presente estudo do estado da arte em STI gerou um artigo, apresentado no X ENPEC realizado em novembro de 2015 (RAUBER e SILVA, 2015).

2.1.1 O caminho percorrido

O objetivo desta pesquisa bibliográfica é o de evidenciar a produção acadêmica referente a inserção de STIs, em especial, aqueles empregados ao ensino de ciências no contexto de publicações brasileiras. A partir deste objetivo principal, foram elaboradas questões norteadoras para a análise das publicações encontradas, na perspectiva de estabelecer qual é o estado da arte e a inserção destes sistemas no ensino de ciências para, futuramente, se propor uma arquitetura de um STI. São elas: O estudo apresenta uma ferramenta STI funcional? Qual a proposta de aplicação deste STI? A que grupo de indivíduos o STI é dedicado e a qual área do conhecimento? Há resultados empíricos de seu uso? É explicitada a dinâmica de seu uso? É apresentada a arquitetura do STI? Qual é? Qual o modelo de estudante, de especialista e pedagógico? Como a interface foi concebida? Quais os cuidados elencados na sua elaboração? De que forma o conhecimento a ser estudado foi representado?

A seleção de publicações foi feita entre setembro e novembro de 2014, considerando-se eventos e periódicos nacionais, disponíveis online e que são relevantes para o ensino de ciências, em especial a física. Os eventos nacionais analisados foram: Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF) e o Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC). E para a escolha dos periódicos nacionais, se estabeleceu três critérios a serem satisfeitos simultaneamente: a) A identificação que o periódico estava incluso na área de ENSINO ou EDUCAÇÃO; b) A classificação que o periódico obteve junto ao Qualis¹ 2012 (vigente em 2014) como sendo A1, A2, B1 ou B2; c) A identificação, através do nome do

¹ <http://qualis.capes.gov.br/>

periódico, de que se trata de uma publicação em língua portuguesa. Como a listagem fornecida pelo Qualis não tem o endereço eletrônico, onde o periódico é publicado, foi realizada a busca no portal de periódicos da CAPES² pelo respectivo ISSN. Seguindo este procedimento, periódicos não encontrados ou sem mecanismo de busca não foram consultados.

Para cada evento e periódico, procurou-se pelo termo “Sistema Tutor Inteligente”, utilizando-se variações dos três radicais das palavras, usando o plural, singular e o “sinônimo”, agente, que já foi identificado na literatura.

Um agente pode ser definido como um programa de *software* que auxilia o usuário na realização de alguma atividade, dotados de inteligência e autonomia. A autonomia, aqui, significa que cada agente possui uma existência própria, atuando sem o auxílio de outros seres humanos ou agentes, com controle sobre suas ações e seu estado interno. Um Sistema Multiagente (SMA) é caracterizado quando existem vários agentes interagindo num mesmo ambiente, com a intenção de alcançar um objetivo em comum (MARCHI et al., 2009).

O processo de seleção qualitativo das publicações se deu em duas etapas. Primeiro, através da cuidadosa leitura do título, resumo e palavras chaves do trabalho, foram classificados de acordo com critérios de inclusão (I) e exclusão (E) estabelecidos: (I) O trabalho apresenta um sistema tutor inteligente; (I) Apresenta uma proposta para um sistema tutor inteligente; (I) Apresenta uma proposta para uma parte de um STI; (I) Apresenta desafios encontrados em um ambiente de ensino baseado em STI; (E) Não foram redigidos na língua portuguesa ou inglesa; (E) Relatórios técnicos, documentos que estão disponíveis na forma de resumos ou apresentações e também revisões de literatura secundárias (ou seja, revisões e mapeamentos sistemáticos da literatura); (E) Não apresentem versões completas disponíveis ou que não sejam gratuitas; (E) Não apresentam relação com sistemas educacionais baseados em STI; (E) Foram publicados antes de 2009.

No segundo momento, passou-se à leitura e análise integral de cada artigo selecionado. Como forma de avaliá-los quanto a qualidade, somente foram consideradas publicações que apresentam uma descrição completa e detalhada da abordagem utilizada/proposta. Isso foi feito para permitir que fosse possível extrair informações necessárias para responder às questões de pesquisa elencadas neste trabalho.

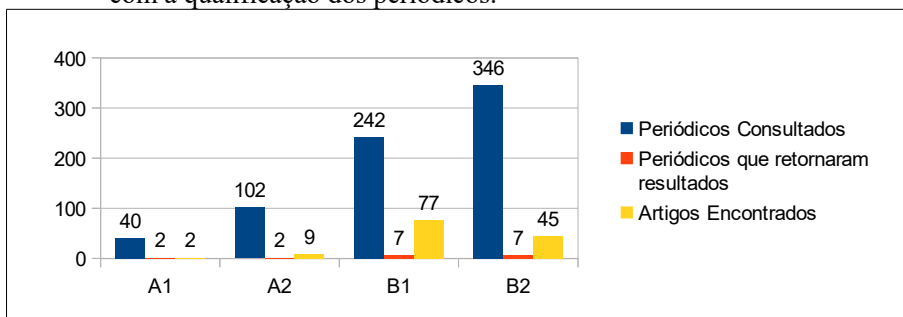
2 <http://www.periodicos.capes.gov.br/>

2.1.2 Os resultados

O levantamento feito nos três eventos considerados SNEF, EPEF e ENPEC de 2009 até 2014 não retornou publicações que satisfizessem os critérios estabelecidos. A busca foi realizada através de pesquisa nos descritores dos títulos das publicações.

O universo de periódicos investigados, por sua vez, foi igual a 730, sendo encontrados resultados em 18 deles e um total de 133 artigos. O Gráfico 1 detalha os resultados quantitativos por classificação do Qualis.

Gráfico 1 – Totalização dos resultados encontrados agrupados de acordo com a qualificação dos periódicos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Aplicados os critérios de seleção estabelecidos na primeira etapa de avaliação da qualidade/pertinência dos artigos, doze publicações atenderam os critérios estabelecidos, sendo seis em periódicos classificados como B1 e seis em periódicos classificados como B2. Na Tabela 1 é possível observar a listagem dos artigos selecionados e analisados no segundo momento.

Tabela 1: Publicações selecionadas.

Continua.

Periódico	STI Funcional?	Área de aplicação	Título / Autores
Renote – Novas Tecnologias na Educação	Não	Sistemas de informações gerenciais	<i>Small talks</i> como estratégias para conversação tutorial em um assistente de conhecimento Autores: Medeiros, Moser e Santos. Ano: 2013
	Sim: PAT2Math	Matemática	Avaliação de usabilidade do Sistema Tutor Inteligente PAT2Math Autores: Morais e Jaques, Ano: 2013
	Sim: agente tutor e companheiro	Coleta seletiva de lixo	Agentes Pedagógicos Emocionais atuando em um Ambiente Virtual de Aprendizagem Autores: Frozza, Silva e Schreiber, Ano: 2011
	Não	-	O uso da webcam na educação Autores: Amorim e Bercht, Ano: 2009
	Não	Chat – museu Zoobotânico	Um Sistema Multiagente para Identificar Falhas na Conversação no Bate-papo da CV-Muzar Autores: Marchi, Rabello, Alban, Bordignon e Passerino, Ano: 2009
	Sim: PAT2Math	Matemática	Implementando o Agente de Base de Domínio do Sistema Tutor Inteligente PAT2Math Autores: Mello, Carlotto, Rubi, Seffrin e Jaques, Ano: 2009
RBIE - Revista Brasileira de Informática na Educação	Não	-	Uma Abordagem Automática para Personalização do Processo de Ensino Baseada em Estilos de Aprendizagem em Sistemas Adaptativos e Inteligentes para Educação a Distância Autores: Silva e Dorça, Ano: 2014

Tabela 1: Publicações selecionadas.

Conclusão.

Periódico	STI Funcional?	Área de aplicação	Título / Autores
RBIE - Revista Brasileira de Informática na Educação	Sim: HALYEN	Ensino de Programa- ção	Integração de uma Metodologia de Ensino Presencial de Programação com um Sistema Tutor Inteligente Autores: González e Tamariz, Ano: 2014
	Sim: PAT2Math	Matemática	Utilizando Agentes Pedagógicos Animados como uma abordagem não restritiva ao <i>Gaming The System</i> Autores: Nunes e Jaques, Ano: 2014
	Não	Ensino de Programa- ção	Uma Linha de Produto de Software baseada na Web Semântica para Sistemas Tutores Inteligentes Autores: Silva, Costa e Bittencourt, Ano: 2012
	Não	Matemática	Modelos para a Construção de Sistemas Multiagentes: Um Estudo de Caso em Sistemas Tutores Inteligentes Autores: Silva, Bittencourt e Costa, Ano: 2011
	Não	-	Especificação e Verificação Formal de um modelo de STI-PBL por Redes de Petri Coloridas Autores: Ramos e Oliveira, Ano: 2009

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.3 Detalhamento dos resultados obtidos

A seguir serão apresentados os trabalhos analisados e os dados extraídos. Optou-se por apresentá-los sequencialmente (na ordem da Tabela 1) e ao tratarem de mesmos assuntos, agrupá-los.

O trabalho de Medeiros, Moser e Santos (2013) apresenta um protótipo de STI, em fase de desenvolvimento e testes, com uma

ontologia³ parcial do domínio de conhecimento referente à área de Sistemas de Informações Gerenciais.

A dinâmica de uso do sistema se dá através de um *chat* escrito, no qual o aluno interage diretamente com uma máquina provida de IA. O modelo de comunicação é baseado na conversação tutorial integrada à conversação por *small talks*. Estudadas na área da linguística, *small talks* são pequenas falas que tem a função de manter o canal de comunicação aberto entre os interlocutores, facilitando a interatividade através de falas e temas que são comuns em uma conversação humana. São sugeridos doze segmentos de *small talks* em fases tais como abertura e fechamento da conversação, manutenção de ritmo e controle para a gestão do aprendizado.

Com relação a arquitetura deste STI, os autores expõem que todo o processo de tutoramento é realizado através de conversa em linguagem natural no *chat*, em que as respostas fornecidas automaticamente são oriundas de agentes que analisam uma base com perguntas e respostas relativas ao tema abordado. Quando uma pergunta não tem resposta direta, é realizada uma busca probabilística através da comparação e análise sintática com os dados do modelo de especialista. Esta nova pergunta pode ser armazenada, considerando-se os dados probabilísticos e o retorno do usuário (informa que está satisfeito com a resposta), possibilitando ao STI adaptar-se a diversos contextos de conversação.

A respeito da interface propriamente dita, os autores não dispensaram maiores atenções. Mas o autor relata a importância do sistema parecer “inteligente” para que o aluno não o subestime. Não é detalhado de que forma o conhecimento a ser transmitido foi representado e não há dados empíricos.

A publicação de Marchi et al. (2009) propõe um Sistema Multiagente (SMA), que está em fase de projeto. Aplicado à comunidade virtual do Museu Zoológico Augusto Ruschi (Muzar), se propõe a identificar falhas no uso de marcadores verbais nos *chats* (ou salas de bate-papo) disponibilizados pelos Muzar à comunidade. A comunicação entre indivíduos, a grosso modo, pode ser dividida em

3 Ontologia, no contexto deste trabalho, segue a definição que lhe é dada em Ciência da Computação, que pode ser definida como “uma especificação explícita de uma conceitualização”. “O processo de conceitualização implica em definir um corpo de conhecimento, representado formalmente, que seja baseado nos seguintes elementos: objetos, entidades, relações entre objetos e entre conceitos. Formalmente, para especificar uma conceitualização são necessários axiomas lógicos que restringem as possíveis interpretações dos termos definidos. Pragmaticamente, uma ontologia comum define o vocabulário com o qual perguntas e respostas serão trocadas entre agentes.” Nozawa et al. (2008)

turnos (agrupamento de mensagens para transmitir uma informação) e os marcadores verbais identificam os turnos. São exemplos de marcadores verbais: “olha”, “veja”, “bom”, “acha?”, “né?”, “ta”, “agora que já conversamos sobre isso, podemos falar sobre o tempo”.

Um sistema multiagente é composto por vários agentes. Um agente é um *software* que auxilia o usuário em uma tarefa/atividade, sendo dotado de inteligência e autonomia. Com o propósito de monitorar em tempo real a utilização dos *chats*, os agentes que compõem o sistema podem interferir na interface de conversação para aconselhar ou advertir o participante. Para isso, propõem um agente para resolução de problemas simples, como falta de saudações; outro para verificações mais complexas como ausência de marcadores de início e final de turno; um agente que fará intervenções no *chat*, como se fosse uma pessoa que está monitorando, como o uso de palavras inadequadas, falta de uso de marcadores ou se o usuário ficar um tempo considerável sem interagir; e um que se caracterize pelo aprendizado do sistema, como, por exemplo, identificar e cadastrar novos marcadores.

Os autores Morais e Jaques (2013), apresentam o PAT2Math (*Personal Affective Tutor to Math*) que é um STI funcional voltado para o ensino de álgebra elementar (equações do primeiro e segundo graus com uma incógnita) para alunos do ensino fundamental. Possui um sistema especialista, baseado em regras de produção, que contém conhecimento necessário para corrigir cada passo da resolução de uma equação algébrica, fornecendo *feedback* imediato ao aprendiz. É composto ainda pelo PATequation, um editor inteligente, no qual o aluno pode resolver uma determinada equação passo a passo da maneira que lhe for mais adequada, recebendo correções a cada resposta. O estudo avaliou a usabilidade da interface gráfica através de uma avaliação heurística, que consiste de critérios que foram elencados e avaliados em uma escala Likert por especialistas em desenvolvimento de *software*. Entendem por usabilidade a aceitabilidade do usuário com o sistema, permitindo a execução de tarefas de forma segura, simples, clara e efetiva. Depois de avaliadas as heurísticas, muitas das deficiências eram provocadas pelas limitações da tecnologia empregada na interface, sendo proposta uma nova com utilização de HTML5.

Com relação à arquitetura o PAT2Math segue o modelo de arquitetura tradicional de um STI. O modelo de base de domínio é formado por um sistema especialista que contém as regras que podem ser aplicadas na resolução de equações. Não é detalhado de que forma o conhecimento a ser transmitido foi representado. A interface ainda

apresenta um agente pedagógico animado, que é responsável por fornecer dicas e *feedbacks* através de mensagens e comportamentos físicos.

Interessante observar que o trabalho em questão se preocupa, ainda que de forma superficial e não explícita, em tratar de um aspecto da TCC em um dos doze quesitos avaliados na interface:

“Heurística 6: Minimizar a carga de memória - reconhecer em vez de relembrar. É importante que o fluxo de utilização do sistema seja simples, evitando que o usuário tenha que decorar processos de execução. O usuário deve reconhecer esses processos para não armazenar em sua memória de trabalho informações inúteis. Baseado em princípios psicológicos, a sobrecarga na memória de trabalho pode prejudicar a aprendizagem do aluno”.

Um segundo estudo que tem como base o PAT2Math foi encontrado, no qual Nunes e Jaques (2014) abordam o tema *Gaming the System*. Esse que ocorre quando aluno tenta “burlar” o meio de estudo proposto pelo tutor a fim de tirar vantagem momentânea, como avançar nos estudos ou resolver mais problemas. Esse procedimento por parte do aluno tem influência negativa no seu aprendizado. Pode se manifestar de duas maneiras: através de pedidos sistemáticos de ajuda ou de tentativas sucessivas de responder ao problema com respostas aleatórias (normalmente quando há questões de múltipla escolha). A literatura aponta duas soluções não restritivas: uma motivacional e outra rígida/crítica.

Para tentar minimizar o efeito de *Gaming the System*, os autores implementam um Agente Pedagógico Animado (APA), e apresentam indicativos em revisão de literatura de que um APA propicia a aproximação do aluno com o STI, trazendo diversos ganhos pedagógicos e motivacionais para o aluno.

Com relação à arquitetura, normalmente estes são divididos em duas partes: corpo (visual em tela, representado por um personagem animado com características que representam seres humanos, com possibilidade de movimentação corporal, expressões faciais e expressões de sentimentos) e mente (interage com usuário, empático, social e inteligente, geralmente através de frases escritas). Com relação a

interface, foi enfatizada e revisada a literatura para identificar as funcionalidades e características do APA desenvolvido.

Tomaram por definição que o comportamento relativo ao *Gaming the System* está evidenciado quando o aluno pede duas dicas ou mais em sequência, sem nenhuma outra interação com o tutor e foi implementado no módulo que controla a interface do STI. Quanto mais vezes for evidenciado o comportamento, maior a probabilidade do APA expor frases a fim de evitá-lo. Foram realizados testes com 37 alunos, divididos em 3 grupos, que usaram o sistema por 50 minutos: i) sem nenhum agente; ii) APA com estratégia amigável de interação; iii) APA com comportamento mais rígido e desconfiado.

A análise realizada foi quantitativa e considerou 3 critérios: ocorrência de *Gaming the System*, dicas solicitadas e equações completadas. Foi proposto a técnica de análise de variância (ANOVA). Em nenhum dos critérios, o resultado foi estatisticamente relevante. Mas os números totais informam indícios: a) *Gaming the System*: foi menor no grupo iii, seguido do ii e depois i; b) dicas solicitadas: foi menor no grupo iii, seguido do i e depois ii; c) equações completadas: foi menor no grupo iii, seguido do ii e depois i. Apesar de não ser estatisticamente relevante, os autores concluíram que a personalidade e abordagem do agente animado em relação ao aluno parecem influenciar o comportamento dele.

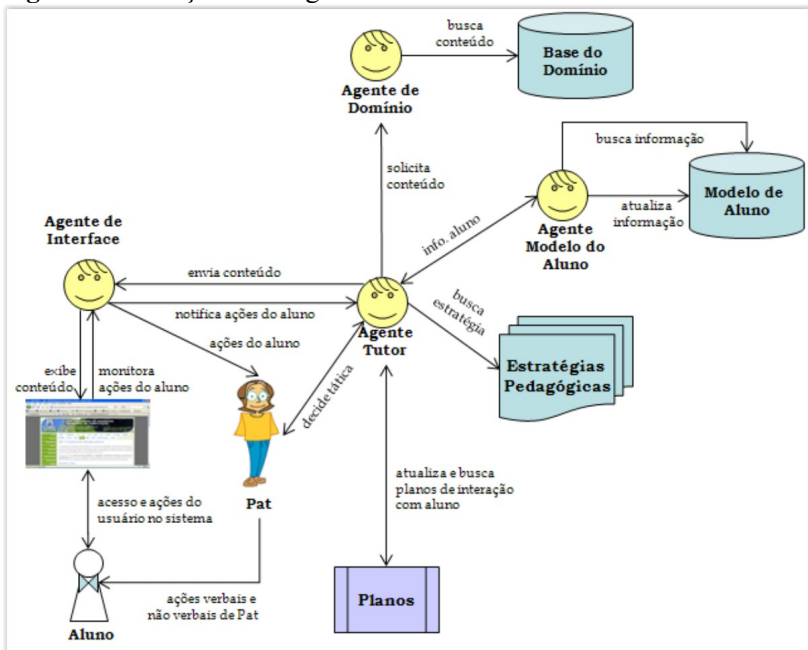
Um terceiro estudo que aborda o STI denominado PAT2Math é o trabalho de Mello et al. (2009), que tem seu enfoque no projeto da arquitetura da Base de Domínio. Não apresenta resultados empíricos de seu uso, mas o resultado de entrevista a 5 professores que atuam com o público-alvo e tiveram contato com um protótipo do sistema. E estes teceram recomendações ao mesmo, como: ser errado usar uma linguagem simplificada, a importância da possibilidade de se explorar livremente a ferramenta e da comunicação entre o tutor com o aluno, como por exemplo, propiciar uma reflexão para encontrar o erro cometido.

Com relação à arquitetura do STI, foi concebido através de multiagentes, onde cada módulo da arquitetura tradicional é implementado como um agente. Além destes, ainda há um agente denominado “Pat” que considerará aspectos de afetividade na interação entre o tutor e o aluno. A interação entre os agentes pode ser observada na Figura 2. Concorrentemente, as mesmas informações sobre ações do aluno repassadas pelo Agente de Interface para o Agente Tutor, também são enviadas ao agente pedagógico animado emocional Pat. Baseada

nessa informação, Pat decide a melhor tática pedagógica afetiva a aplicar e interage com o Agente Tutor para verificar se essa entra em conflito com a tática de competência decidida pelo último. Em caso positivo, os agentes negociam uma nova estratégia. Caso contrário, Pat apresenta também sua tática pedagógica afetiva. Não foram detalhadas características do projeto de interface.

O conteúdo a ser ensinado é mantido em um banco de dados incluindo álgebra e metainformações. A parte referente à álgebra é armazenada em um formato de dados capaz de armazenar conteúdos escritos, como teorias, exemplos e exercícios. Já as metainformações são necessárias para estabelecer uma lógica entre os diversos elementos tal como relacionamentos entre os conteúdos e pré-requisitos de um determinado tópico.

Figura 2: Interação entre agentes do STI PAT2Math



Fonte: Mello et al. (2009).

O AGBD fornece suporte em alto nível para busca de tópicos sobre determinado assunto. Pretende-se que para um mesmo conteúdo,

que esteja presente na base de dados, haja formatos diferentes (vídeos, animações, explicações), com diversos enfoques e perspectivas (ex., há diversas explicações sobre o mesmo assunto), para que o agente tutor possa ter um comportamento diferenciado para cada aluno, buscando determinar o melhor para cada.

O trabalho de Frozza, Silva e Schreiber (2011) apresenta um STI focado em aspectos emocionais. Não é dada ênfase no conteúdo trabalhado, mas sim na forma que é trabalhado. O ambiente virtual de aprendizagem desenvolvido é um sistema tutor inteligente, com a atuação de dois agentes pedagógicos: um tutor e outro companheiro, baseado em estilos cognitivos para adaptação às características de aprendizagem dos estudantes. Ambos expressam emoções através de agentes animados com expressões faciais/corporais. Também, interagem com o usuário através de balões de texto informativo e com perguntas. A ideia é que, ao perceber situações que acontecem no ambiente, o agente reaja com a realização de alguma ação. Essa percepção se dá através de interação do usuário com a interface gráfica do STI. A dinâmica de uso do sistema parece aberta, estando o usuário livre para navegar em todos os conteúdos disponibilizados.

Com relação à arquitetura do STI, foram mapeados alguns casos de uso (*Use Cases*), que junto às regras de produção definem as emoções a serem expressas pelos agentes pedagógicos. A IA é percebida por regras de produção (Se ... Então...). Não apresenta empiria, apesar de apresentar figuras relacionadas a um protótipo.

Neste trabalho não aparece preocupação com o desenvolvimento da interface, exceto o desprezado nas expressões faciais dos agentes e mapeamento de interações que disparam os agentes a uma nova expressão emocional. Não apresenta nenhuma ontologia, ou seja, a forma como o conhecimento a ser transmitido foi representado.

O trabalho “O Uso de *WebCam* na Educação” de Amorim e Bercht (2009) não apresenta um STI, no entanto traz reflexões e apontamentos de grande valia para o desenvolvimento de sistemas (STIs, agentes pedagógicos e Hiperídia Adaptativa (HA)) que se utilizam de computação afetiva, que é um ramo da IA que estuda as emoções. Baseia-se no fato de que estados afetivos podem contribuir com a aprendizagem, e na possibilidade de utilizar a *WebCam* como um meio eficiente, eficaz e não invasivo para a captura de imagens e posterior processamento para diversas finalidades como: a) Segurança, para identificação do indivíduo a realizar determinada atividade; b) Auxílio a portadores de diversas necessidades especiais (simular o uso

do *mouse* com os olhos, leitor braille ou computação dirigida por gestos); c) HA, onde é capturada alguma característica do usuário e integrado a hipermídia que é exibida.

Os autores apontam ainda que o sensoriamento é a maneira como um sistema reconhece fatos e crenças, os quais serão utilizados para a tomada de decisões. Obviamente, quanto melhor o sensoriamento, melhor o potencial de tomada de decisão pelo sistema. Apresenta formas de sensoriamento que se destacam: pela voz, os observáveis comportamentais (ações do usuário na interface, consideradas relevantes pelo projetista do sistema), as expressões faciais e sinais fisiológicos (batimentos cardíacos, eletromiograma, tensão muscular, respiração, condutividade da pele...).

Há evidências, conforme os autores, de que mesmo em diversas culturas há expressões faciais emocionais que são universais. Estas são as que representam alegria, tristeza, fúria, medo, surpresa e nojo. A detecção e inferência de emoções advindas da *WebCam* não são tarefas triviais, envolvendo visão computacional e IA. Ocorre através de algumas etapas intermediárias, onde métodos de visão computacional são utilizados para detectar as faces e a seguir as características faciais (como por exemplo, os pontos associados às sobrancelhas, olhos e boca). De posse desses, pode ser inferida a emoção utilizando-se técnicas de IA, como redes neurais previamente treinadas.

O trabalho de Silva e Dorça (2014) apresenta uma proposta para determinar o Estilo de Aprendizagem de forma automática para ser aplicada a uma Hiperídia Adaptativa (HA). Esta proposta tem grande potencial de ser transposta para um STI como parte de um modelo de estudante. Apresenta uma nova abordagem para a personalização automática do processo de ensino em sistemas adaptativos e inteligentes para educação a distância, levando em conta os estilos de aprendizagem dos estudantes e valida esta proposta através de simulações computacionais.

O modelo de estilo de aprendizagem utilizado é o de Felder e Silverman *apud* Silva e Dorça (2014), composto por quatro dimensões: processamento, percepção, entrada e organização. Cada uma destas dimensões apresenta dois estilos contrários, que definem o aluno. Através da aplicação de um questionário documentado na literatura (*Index os Learning Styles Questionnaire* – ILQS), um perfil inicial é definido para o aluno. Não de forma determinística, mas sim baseado numa distribuição de probabilidades. Com base neste perfil, propõe-se a geração dinâmica de uma página *web*, de acordo com uma estrutura

básica definida e a utilização dos objetos de aprendizagem que se enquadram no perfil. Havendo mais de um, são definidos de forma estocástica.

Ainda este perfil de aluno é atualizado de forma dinâmica e automática. Cada seção de aprendizagem apresenta estilos de aprendizagem. Sempre que um aluno apresenta desempenho insatisfatório, esses estilos são decrementados no modelo de estudante. E de forma contrária, os estilos ausentes são incrementados, reforçando-se a preferência por esses. São apresentados algoritmos em pseudocódigos, isto é, uma linguagem de alto nível de abstração, para realizar as tarefas ora descritas.

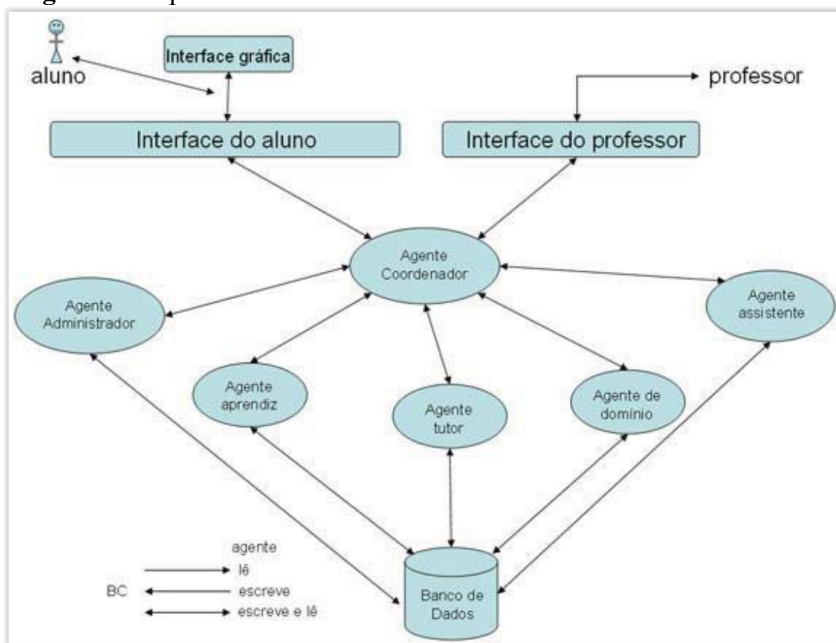
Para a simulação foram utilizados perfis fictícios de alunos, onde os autores justificaram o seu uso, pois se faz necessário conhecer o comportamento e funcionamento destes novos sistemas antes de testá-los com estudantes reais, já que estes testes são mais complexos, custosos e demorados. Abstraída a complexidade relacionada à avaliação de desempenho do estudante, desenvolveu-se um modelo para o aluno e simulou-se a atualização dos estilos de aprendizagem probabilísticos. Os resultados da simulação foram positivos e promissores, levando os autores a vislumbrarem testes com alunos reais.

O trabalho de González e Tamariz (2014) apresenta uma ferramenta denominada O HALYEN, um STI proposto para auxiliar o ensino presencial de algoritmos/programação de computadores a alunos iniciantes, em especial o desenvolvimento de lógica. Não são apresentados resultados empíricos de seu uso, mas descrita uma fase do desenvolvimento que envolveu testes/avaliações com 33 alunos para determinação do funcionamento de estratégias internas ao sistema.

A dinâmica de seu uso se dá de forma intercalada a atividades em sala de aula. Primeiro, o aluno responde ao questionário MSQ (Motivated Strategies for Learning Questionnaire) no próprio sistema, após, intercala a resolução de jogos com a exposição em sala da solução. Há três níveis de jogos (fácil, médio e difícil), sendo que entre cada nível é prevista uma dinâmica em sala de aula. Determinado o perfil inicial do aluno (que pode ser Orientado a Aprendizagem (OA) ou Orientado ao Desempenho (OD)) durante as atividades o sistema infere o comportamento emocional e determina as ações pedagógicas a serem usadas (exemplos, assistente a dúvidas ou mensagens de encorajamento).

Na arquitetura do O HALYEN é utilizado um sistema de multiagentes, representada na Figura 3.

Figura 3: Arquitetura de O HALYEN.



Fonte: González e Tamariz (2014)

Nessa arquitetura, o agente aprendiz, tem seu foco no modelo de emoções e no modelo cognitivo. Este agente interage com as bases desses modelos, de forma a obter/gravar informações referentes ao(s) aluno(s) e seus respectivos perfis e estados emocionais. O agente tutor interage com os agentes de domínio e aprendiz, sendo que, baseado nas informações recebidas, este avalia a melhor estratégia de ensino para aprimorar ou manter o estado emocional e nível de aprendizagem do aluno. O agente de domínio acessa a base de dados do modelo cognitivo, de forma a fornecer subsídios ao agente tutor, para que este faça a melhor escolha no que diz respeito à estratégia de ensino. O agente assistente tem como objetivo integrar o ambiente Assistentes Inteligentes de Ensino (ITAs - *Intelligent Teaching Assistant systems*), desta forma auxilia os estudantes e assiste ao professor em suas tarefas. Inicialmente, foi disponibilizado o assistente de dúvidas aos alunos. O aluno pode pedir ajuda através da formulação de dúvidas em linguagem natural (português) e este assistente retorna a melhor resposta a partir de uma base de respostas por matéria, preenchidas previamente pelos professores especialistas. Este é ativado quando o aluno pede assistência

ou quando o agente tutor achar necessário em algum ponto do processo de ensino/aprendizagem. O agente coordenador recebe as requisições do ambiente e as encaminha para o agente capacitado para resolvê-las. A troca de informações entre os agentes permite que o aluno receba um conteúdo instrucional adaptado a sua necessidade por meio da interface do aluno. A interface do professor permite a interação entre o professor e as funcionalidades atribuídas a ele.

A inferência de emoções é baseada nas propostas descritas em Jaques e Vicari (2007) e Adamatti e Bazzan (2003) *apud* González e Tamariz (2014). A emoção considerada é que se manifesta com maior valor de intensidade acima de um limiar mínimo, que foi definido na fase de coleta de dados (ou treinamento). Para isso foram inseridas telas de interação, que coletam a emoção sentida no momento da ocorrência de um evento identificado (que os autores consideraram como hipóteses, num total de 7, como ganhar ou perder um jogo, pedir ajuda, entre outros) e o nível de intensidade da mesma (Escala *Likert* de 1 a 5). A partir desta coleta de dados, que define muitas das ações a serem realizadas, o STI está disponível para uso dos demais usuários.

O estudo de Silva, Costa e Bittencourt (2012) apresenta uma proposta de arquitetura para o desenvolvimento de STIs em larga escala e o reuso. Esta arquitetura tem enfoque em características do campo da Ciência da Computação para seu desenvolvimento. O método de ensino é baseado na resolução de problemas. Propõe-se a atender o desenvolvimento de STIs para diferentes domínios, tanto para o ensino presencial quanto a distância. Foi definido 4 conjuntos de ontologias e apresentada uma descrição sumária das mesmas, bem como, um conjunto de características desejáveis:

- Definir Curriculum para Estudante Interagir: importante do ponto de vista de personalização, pois cada estudante pode ter níveis de conhecimento diferentes;
- Definir estratégia baseada em Teoria de Aprendizagem: Cada estudante pode se adequar a estratégias pedagógicas diferentes de formas diferentes. No entanto, foi definido que o tutor só teria uma única estratégia pedagógica, na qual a mesma seria utilizada indistintamente por todos os alunos;
- Enviar recurso avaliativo: determinar o nível do aluno;
- Resolver problema: mesmo depois de vários mecanismos de ajuda, o sistema pode ajudar a resolver problemas.
- Tutorar: responsável por recomendar adequadamente recursos educacionais aos estudantes. Este procedimento é realizado

levando-se em consideração tanto o currículo do estudante, quanto a estratégia pedagógica que o mesmo foi submetido.

Uma avaliação da proposta foi realizada baseada em métricas de similaridade, variabilidade e reutilização da linha de produtos. Para fins de testes, levou em conta o investimento em dois domínios: programação e física, mas sendo descrito apenas o primeiro. Como resultado da avaliação das métricas verificou-se a adequação da mesma.

Em outro trabalho Silva, Bittencourt e Costa (2011) apresentam a construção de dois modelos: modelo de especificação e modelo de verificação. Este trabalho se encontra em estágio inicial e conta com grande formalismo matemático. O estudo de caso foi construído com base no Mathema, um STI no domínio da matemática, considerado um modelo para construção de STI, o qual se divide em duas visões: interna (unidades pedagógicas, conjunto de problemas e unidades de suporte) e externa (define o contexto, profundidade e lateralidade), que particionam o domínio de conhecimento.

No modelo de especificação, os autores expõem a utilização da metodologia GAIA, um conjunto de terminologias e abstrações aplicadas à modelagem de sistemas multiagentes. Esta visa prover uma especificação tecnologicamente neutra e apresenta três etapas: fase de análise (coletar e especificar artefatos), fase arquitetural (definir a estrutura organizacional, completando a fase anterior) e fase de projeto (definir os agentes que farão parte do sistema).

Quanto ao modelo de verificação, os autores utilizaram Redes de Petri, que são uma ferramenta de modelagem tanto gráfica quanto matemática que pode ser aplicada a muitos sistemas. Possibilita a modelagem sintática e semântica. Ele apresenta a formalização do modelo, que se percebe bastante teórico/matemático. Como está em fase inicial, os modelos apontam um direcionamento interessante na construção e verificação de sistemas complexos.

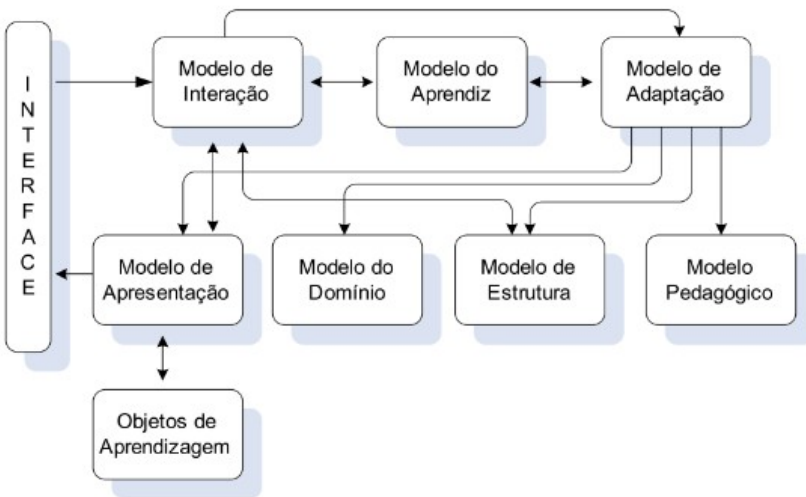
O trabalho de Ramos e Oliveira (2009), apresenta uma abordagem de modelagem por Redes Petri Coloridas (CPN) para especificação e verificação formal de um projeto de STI que utiliza aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) como estratégia pedagógica.

A arquitetura proposta pelos autores para o STI-PBL pode ser observada na Figura 4. Nesta arquitetura proposta foram adicionados cinco elementos à arquitetura clássica de STI, conforme proposto por

Jacinto e Oliveira (2008) *apud* Ramos e Oliveira (2009). Os elementos desta arquitetura têm a seguinte função:

O modelo de interação representa a descrição dos possíveis comportamentos do aprendiz. O modelo de estrutura específica como os conceitos do domínio estão agrupados dentro de unidades semânticas. O modelo de adaptação contém uma base de regras, axiomas, e heurísticas para a tomada de decisão. O modelo de apresentação é responsável por compor a informação a ser apresentada ao aprendiz com base nas decisões do modelo de adaptação.

Figura 4: Arquitetura do STI-PBL



Fonte: Ramos e Oliveira (2009).

Destaca ainda que na arquitetura clássica o modelo pedagógico deve decidir o que ensinar. Mas a separação proposta permite comparar as ações do aprendiz com as ações conhecidas do modelo Especialista, e através do Modelo de Adaptação, inferir se o aluno está no caminho correto para a solução ou não.

Através dos diagramas de Caso de Uso e de Estados e Interação, foi criado um formalismo matemático para modelagem e verificação do

STI, com o uso de CPN com o método de árvore de alcançabilidade, que consiste em analisar o estado da CPN em dado momento e as transições de estados que resultam na configuração atual. Das verificações, dotadas de grande formalismo matemático, constatou-se que o aprendiz tem acesso a todos os estados do STI-PBL e com dois aprendizes iniciando a seção de estudos juntos, há pontos em que podem cooperar, já que resolveriam a mesma etapa do problema, podendo o sistema recomendar a cooperação.

2.1.4 Sumarização dos resultados

Observa-se que as publicações se concentram em dois periódicos voltados para “novas tecnologias” ou informática, ambos na educação, e que os trabalhos são oriundos da área da Ciência da Computação e aplicados a outras áreas. Assim, apenas um STI específico foi encontrado para a área de matemática. O espectro de explicações possíveis para essa ausência no ensino de ciências e em específico da física no Brasil é amplo. No entanto, esses sistemas têm um enorme potencial para o ensino e a aprendizagem de ciências viabilizando sua flexibilização, autonomia do aluno, adequação ao seu ritmo de aprendizagem e nível de conhecimento. Na literatura selecionada identificam-se alguns estudos que abordam STIs e vários com propostas promissoras para seu desenvolvimento. Ainda há preocupação da comunidade acadêmica envolvida na busca por ferramentas computacionais mais eficientes para auxiliar o processo de ensino aprendizagem.

Nos estudos selecionados, nota-se que apenas três STI funcionais foram utilizados para condução de experimentos: a) PAT2Math, em dois trabalhos os questionamentos centrais foram aspectos de usabilidade (MORAIS e JAQUES, 2013; NUNES e JAQUES, 2014) e em outro (MELLO et al., 2009) como representar computacionalmente o que será ensinado, isto é, a base de domínio; b) O HALYEN, apresentado por González e Tamariz (2014), que é voltado para o ensino de programação; c) E um com agente tutor e companheiro, sem nome, de Frozza, Silva e Schreiber (2011).

Quanto à aplicabilidade dos STIs, percebe-se sua inclusão com as mais variadas propostas: ensino fundamental, superior, presencial e a distância.

Quanto às arquiteturas, percebe-se que utilizam ou derivam do modelo clássico de STIs. Ainda que as características apresentadas têm enfoque no desenvolvimento computacional das ferramentas de STI. Estas são implementadas ou têm proposta de implementação com agentes.

É proposto que se atente para aspectos emocionais da interação entre o aluno e o STI. Estes aspectos são de suma relevância ao processo de aprendizado. A detecção de aspectos afetivos de estado de ânimo do aluno pode se dar pela sua interação com o STI de forma direta (o STI questiona o usuário sobre seu estado de ânimo) ou indireta (se o aluno está resolvendo um problema e volta à explanação do conteúdo, ele pode estar passando por uma dificuldade, o que se pode inferir um aumento de seu desânimo), através de testes prévios que avaliam o aluno ou da detecção direta por meio da face do aluno com uso de *WebCam*.

Observa-se ainda como um fator positivo a utilização de Agentes Animados humanizados, com expressões faciais/corporais, falas curtas, dotados de inteligência, com intuito de motivar o aluno e/ou tornar-se um companheiro do aluno no uso do sistema, aumentando a sua empatia com o STI e consequentemente melhorando o seu aprendizado.

Como a proposta do STI é fornecer ajuda personalizada aos alunos, é recomendado o cuidado com o processo de *Gaming the System*, que consiste em o aluno abordar o STI, não com o propósito que foi concebido, mas considerá-lo um jogo, e assim tentar burlar ou tirar proveito de seus mecanismos para avançar as “fases” do estudo, sem realmente ocorrer o aprendizado. Uma proposta para minimizar este processo é a utilização de Agentes Animados dotados da capacidade de identificá-lo, e apresentar mensagens ao aluno de que o está percebendo.

A proposta de Hipermídia Adaptada, baseada em estilos de aprendizagem, parece bem promissora. Foi definida uma estrutura básica para apresentação de conteúdos, e dentro desta, partes variáveis, em que serão apresentados Objetos de Aprendizagem melhor adaptados ao estilo de aprendizagem do aluno.

O desenvolvimento de STI é um processo complexo, naturalmente multidisciplinar, o que torna o seu desenvolvimento de alto custo. Com o objetivo de validar modelos de STI, estes podem ser representados/validados matematicamente, com grande formalismo, utilizando-se de Redes de Petri.

Um dos estudos mostrou preocupação explícita com a interface do STI. Para tal, baseando-se em padrões da Interação Humano-computador, foi definido um conjunto de critérios, e a partir destas, especialistas em desenvolvimento de *software* avaliaram a interface do PAT2Math.

Quanto à forma de representação do conhecimento é observada a importância da definição de ontologias, apesar dos estudos não apresentarem a ontologia efetivamente utilizada.

Sobre a condução da busca, alguns periódicos apresentam problemas com o ISSN, já que o que consta no Qualis, em vários casos, não é encontrado na base de periódicos da CAPES. Alguns periódicos e eventos não apresentam mecanismo de busca. Estes dois aspectos são importantes para efetiva divulgação do conhecimento científico. Bem como, o grande número de artigos recebidos não relacionados ao tema. Na grande maioria, não foi possível identificar o motivo dos mecanismos de busca retornarem tais artigos, pois estão completamente fora do contexto, assim, entende-se que são erros desses sistemas.

A utilização da TCC não foi encontrada nas publicações selecionadas como dando suporte à definição de um STI. Foi encontrada de forma modesta, ainda que não explícita, na definição de um dos critérios na avaliação de interface do PAT2Math. A TCC tem grande potencial de aplicabilidade e integração na concepção de STIs, como descrito por Mayer (2014) e Sweller, Ayres e Kalyuga (2011), pois visa fornecer subsídios para obtenção de um processo educacional efetivo.

2.2 STI NO ENSINO DE CIÊNCIAS

O objetivo desta seção é apresentar o resultado de uma revisão exploratória em periódicos internacionais a fim de exemplificar a utilização de STIs no ensino de ciências, em especial na Física. Consultou-se o portal de periódicos da Capes, IEEE e Springer entre os meses de setembro e outubro de 2015. Para a seleção das publicações procurou-se pelo termo “*Intelligent Tutoring System*”. Ainda considerou-se como requisito estarem disponíveis *on-line*, de forma gratuita e publicados após 2009. Devido ao grande número de resultados, em um segundo momento, passou-se a análise do título e resumo, a fim de selecionar publicações que apresentassem um STI

funcional e aplicado na área de ensino de Ciências. Os resultados considerados são apresentados a seguir.

A pesquisa apresentada por Mitrovic et al. (2011) que trata do ensino de ciclos termodinâmicos fechados. Como muitos outros temas no ensino de ciências requer do estudante muita prática após o entendimento do modelo teórico. Nessa pesquisa os autores apresentam um STI denominado *Thermo-Tutor*, que apresenta ao aluno problemas relativos a ciclos termodinâmicos e auxilia a sua resolução. Durante a tentativa de resolução, ou a qualquer momento, o aluno pode pedir a verificação da solução, recebendo respostas customizadas. Os autores ressaltam ainda que o STI não foi desenvolvido pensando em substituir parte ou uma disciplina, mas sim atuar como complementar.

É analisado o que o aluno desenvolveu, se houverem erros ou a resposta está incompleta, é apresentada um retorno/*feedback* coerente com o erro cometido. Em caso de erro, na primeira submissão/avaliação da resposta, é dada uma mensagem geral de que há erros. O nível de detalhamento aumenta a cada tentativa incorreta e/ou incompleta. Na segunda submissão/avaliação da resposta, é informado o local do erro e a descrição do que deve ser feito para corrigi-lo. Na terceira, são dados mais detalhes do erro propriamente dito. A progressão automática de mensagens para aí, mas o aluno pode selecionar mais dois níveis de ajuda: todos os erros cometidos e a solução. A Figura 5 apresenta a interface do STI *Thermo-Tutor*.

Os autores apontam que o desenvolvimento da interface foi pensado de modo a tornar o trabalho o mais parecido possível se a resposta fosse dada no papel, facilitando a transposição dos conhecimentos. Nesta imagem, estão destacadas em vermelho algumas regiões da interface: a área 1 é onde é apresentado o problema a ser resolvido; a área 2 é onde o auxílio ao usuário é apresentado; a área 3 é destinada a representação gráfica do problema, e, abaixo, o cálculo de incógnitas.

A dinâmica de utilização se dá pela seleção de um problema (na parte superior da interface apresentada na Figura 5) seguida da solução desse problema pelo aluno, conforme apontado pelos autores. Para tal o aluno deve primeiro montar corretamente o diagrama e em seguida calcular as incógnitas desconhecidas. A qualquer momento o aluno pode pedir para que sua solução seja avaliada, e assim, a exemplo do que ocorreria com um humano, o sistema devolve “dicas” do que está faltando.

Figura 5: Interface do *Thermo-tutor*: STI aplicado no ensino de ciclos termodinâmicos fechados.

The screenshot shows the Thermo-tutor interface. At the top, there are menu options: "Select one...", "Next Problem", "Give Me a Problem", "Help", "Change ITS", and "Exit ITS". The main problem text reads: "Draw the described thermodynamic cycle. 2 moles of nitrogen initially at 1,000,000 Pascals and 600 K (state 1) are expanded adiabatically to 100,000 Pascals (state 2). The gas is then heated via an isochoric process to 600 K (state 3). Finally the gas is isothermally compressed back to the original state 1." Three red circles with numbers 1, 2, and 3 are overlaid on the interface: 1 is on the problem text, 2 is on the feedback text, and 3 is on the solution workspace toolbar.

The "Solution workspace" includes a P-V diagram with a cycle consisting of three states (1, 2, 3) and three processes (1-2, 2-3, 3-1). Below the diagram is a table with the following data:

Transition	Work	Heat	Delta U	Symbol	Value	State	Temperature	Volume	Pressure
1-2	$\int C_V$	20.785				1	600 K		1000000 Pa
2-3		$\int C_p$	29.099			2			100000 Pa
3-1		R	8.314			3	600 K		
	γ		1.4						
	n		2.0						

Below the table, there are fields for "State 2: Temperature" and "Adiabatic Equations". The formula for T2 is shown as $T_2 = T_1 \gamma^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$. The solution field shows $T_2 =$ followed by a dropdown menu. A green checkmark is visible in the bottom right corner of the workspace.

Fonte: Mitrovic et al. (2011).

Para montar o diagrama, segundo os autores, o aluno deve analisar o problema, definir todos os estados (Figura 6) e as transições entre os estados (Figura 7).

Figura 6: Definição de um estado no diagrama do *Thermo-Tutor*.

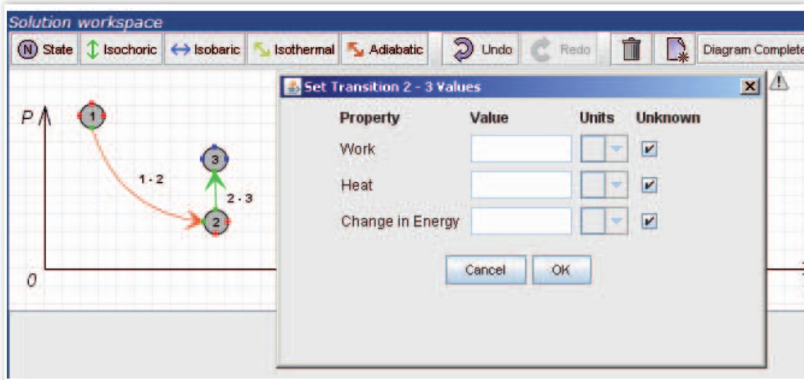
The screenshot shows the "Solution workspace" with a P-V diagram. A "Set Values" dialog box is open, allowing the user to define a state. The dialog box has the following fields:

Property	Value	Units	Unknown
Label	3		
Pressure			<input checked="" type="checkbox"/>
Volume			<input checked="" type="checkbox"/>
Temperature	600		<input type="checkbox"/>

The P-V diagram shows a cycle with three states (1, 2, 3) and three processes (1-2, 2-3, 3-1). The states are represented by blue circles with numbers 1, 2, and 3. The processes are represented by red arrows with labels 1-2, 2-3, and 3-1.

Fonte: Mitrovic et al. (2011).

Figura 7: Definição de uma transição no diagrama do *Thermo-Tutor*.



Fonte: Mitrovic et al. (2011).

Para definir uma transição, os autores citam que o aluno deve selecionar qual o tipo de transição, clicar e segurar sobre o estado inicial e arrastar para o estado final. Caso haja um erro no desenho que o aluno está fazendo, ele é lembrado imediatamente de como cada transição funciona. Por exemplo, “Isobárica” deve manter a mesma pressão, assim, os estados inicial e final devem estar paralelos ao eixo do volume V . Se o desenho está correto, lhe é permitido informar os dados (explícitos e implícitos) extraídos do enunciado do problema e o que é desconhecido. O aluno deve solicitar a avaliação do diagrama após terminá-lo, e se estiver correto, inicia-se a segunda fase, de cálculo das incógnitas (valores desconhecidos).

Visando auxiliar o cálculo de incógnitas, segundo os autores, é apresentada uma lista com todos os valores conhecidos (parte inferior da área 3 da Figura 5), conhecidos e a serem calculados. Após, o sistema pede ao aluno para que defina os valores constantes a serem utilizados em várias fórmulas (são apresentadas as opções e o aluno deve clicar sobre a que deseja utilizar, e o quadro se preenche onde for pertinente).

Os autores ainda citam que se a resolução fosse feita no papel, ele iria passo a passo, calculando os valores desconhecidos com fórmulas específicas. Muitos desses cálculos envolvem expoentes e logaritmos, e, é difícil de criar uma interface para que sejam informados utilizando-se teclado e mouse. Assim, para facilitar esse processo, no *Thermo-tutor* foi criada uma interface que segue a seguinte sequência: a) Selecionar a variável; b) Selecionar o grupo de variáveis; c) Selecionar a fórmula

específica; d) Se necessário, rearranjar a fórmula a partir dos valores conhecidos; e) Preencher os valores das variáveis na equação e especificar as unidades de medida dos resultados; f) Calcular o valor final da incógnita. É exibido um campo para cada um dos valores necessários na fórmula selecionada para que sejam digitados (parte inferior da área 3 da Figura 5).

No âmbito de um estudo de caso o *Thermo-Tutor* foi utilizado por vinte e dois alunos voluntários do curso de Química em Engenharia de Processos da Universidade de Canterbury, Austrália. Segundo os autores, após uma breve explicação de como o sistema funciona, os alunos podiam usar o sistema livremente por cinquenta minutos. A análise da aprendizagem foi realizada em função das restrições. Por exemplo, a restrição que mais foi aprendida, onze vezes, foi a de número 60: “Calculando incógnitas. Pressão desconhecida. O conhecimento de quais os valores utilizar quando resolver esta equação”. *Thermo-Tutor*, como outros, guarda informações das restrições que cada aluno utilizou e o *status* dessa restrição (satisfeita ou violada) ao longo do tempo. Com o uso desse STI, a taxa de erro geral cai de 7,5% para 3,5% na nona oportunidade de usar uma restrição, demonstrando um aumento da aprendizagem. Ao considerar o questionário respondido pelos alunos após a utilização do sistema, os autores enxergam um bom potencial da sua utilização.

A pesquisa de Huertas e Juárez-Ramírez (2013) apresenta os resultados do processo de avaliação ao longo de dois anos. Buscam um STI com uma simulação interativa para melhorar a curva de aprendizagem de tópicos da dinâmica de veículos. No estado atual da pesquisa, desenvolveram um primeiro protótipo, que será parte do modelo de domínio de um STI. Avaliaram a acurácia de funcionamento desse módulo, comparando parâmetros como tempo, velocidade e distância, entre veículos reais e que foram simulados, chegando a 96,8%. Também relatam que o módulo foi disponibilizado na internet e com a contribuição de usuários foram realizadas muitas melhorias.

O trabalho de VanLehn et al. (2010) apresenta o Andes, um STI aplicado ao ensino de física, utilizado em turmas da Academia Naval dos Estados Unidos (USNA). Os autores ponderam que dado um problema, as soluções apontadas por distintos instrutores diferem, onde alguns preferem a resolução matemática ante outros que preferem soluções descritivas, tornando explícitos os princípios físicos envolvidos. Ambos devem estar corretos, já que atuam com alunos diferentes, com objetivos diferentes ou estão sendo preparados para

posteriores atividades distintas. Neste contexto aberto, é que está inserido o Andes.

Os mesmos autores descrevem a dinâmica de uso da versão 2.0: o problema é apresentado e o aluno deve desenhar os vetores e eixos coordenados, definir variáveis e escrever as equações.

Desde a versão 2.0 do Andes, os autores citam que foi projetado para ser o mais próximo do que seria a solução utilizando-se de papel e lápis, mas há algumas diferenças significativas. O Andes propicia *feedbacks* imediatos. Os dados informados pelos alunos aparecem na cor verde se estão corretos e vermelha se incorretos, mecanismo este chamado "flag feedback" (ANDERSON et al., 1992 apud VANLEHN et al. (2010)).

As variáveis devem ser definidas precisamente antes do uso em equações, entre valores escalares e vetores (ex. para um vetor deve ser dado um nome, a qual corpo ele está associado, o intervalo de tempo ou angulação). Isto leva a uma precisa definição semântica das quantidades, o que os autores e colaboradores acreditam fortemente que acelera o aprendizado, apesar de restringir sua liberdade de ações de certa maneira.

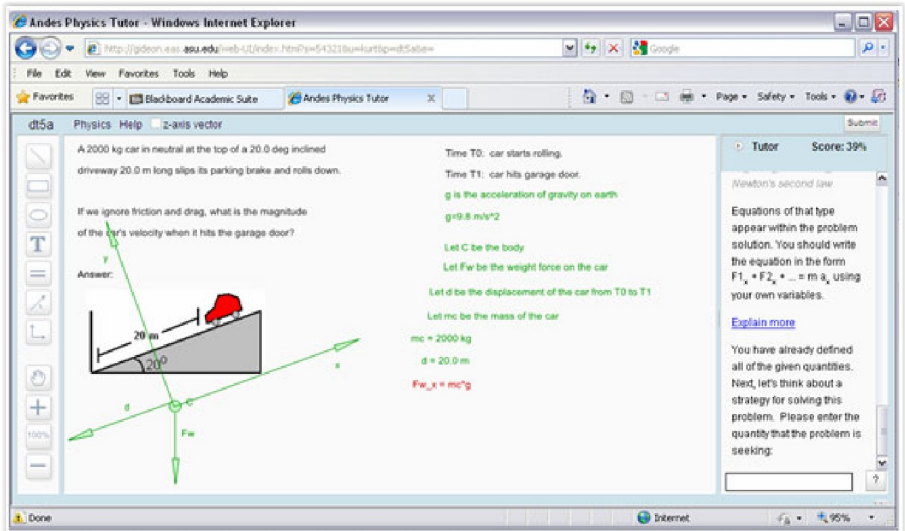
Na versão atual, Andes3, tentou-se tornar a interface de definição de variáveis um pouco mais amigável (veja Figura 8). Apesar de ainda ser uma etapa indispensável, o aprendiz pode digitar, em tradução livre: "Considere d o deslocamento" e o Sistema Andes verifica se há uma única definição que combine, como por exemplo "Considere d o deslocamento do carro de T_0 até T_1 ", sugerindo-a ao usuário. Caso seja uma definição ambígua, ela é exibida em vermelho e o usuário deve explicitá-la.

O STI Andes contém ainda um pacote matemático, que possibilita ao aluno indicar qual variável ele deseja resolver, e o STI Andes tenta resolver o sistema de equações. Em caso de sucesso, é exibido o nome da variável e o seu valor. Esta funcionalidade pode ser desativada pelo instrutor.

Ele proporciona diferentes tipos de ajuda. Uma mensagem é apresentada quando detecta um erro que provavelmente é um deslize. Por exemplo, utilizar uma equação com uma variável que não foi previamente definida (normalmente, um erro tipográfico) ou não informar a unidade de um número dimensional. Se o erro não for reconhecido como um deslize, a cor desta entrada é apresentada em vermelho. Ao selecionar uma entrada em vermelho, o aluno pode clicar no botão de ajuda, o que os autores chamam em tradução livre "Ajuda

para o que está errado". Caso o estudante não tenha certeza do próximo passo, pode pedir uma dica, o que os autores chamam em tradução livre "Ajuda para o próximo passo".

Figura 8: A interface do usuário no STI Andes.



Fonte: VanLehn et al. (2010).

Esses dois últimos tipos de ajuda geram uma sequência de dicas, normalmente três. Nesses casos, ao pedir ajuda, a primeira da lista é exibida. Se nenhuma alteração for feita e nova ajuda for solicitada, a próxima é exibida. Por exemplo, considerando o problema exposto na Figura 8, ao solicitar ajuda para equação em vermelho

$Fw_x = -Fs \cdot \cos(20^\circ)$, a seguinte sequência de dicas será exibida (tradução minha):

Verifique sua trigonometria.

Se você está tentando calcular a componente de um vetor ao longo de um eixo, aqui está uma fórmula geral que funcionará sempre: Considere θ_v ser o ângulo como você se move sentido anti-horário a partir da horizontal ao vetor. Deixe θ_x

ser a rotação do eixo X em relação à horizontal.

Então:

$$V_x = V \cdot \cos(\theta_V - \theta_x) \quad e$$

$$V_y = V \cdot \sin(\theta_V - \theta_x)$$

Substitua $\cos(20^\circ)$ por $\sin(20^\circ)$.

Esta estrutura de três dicas é comum em muitas sequências deste tipo. Ela é composta de dicas *pointing*, *teaching* e *bottom-out*. A primeira leva a atenção do estudante ao local do erro. Se ele tiver conhecimentos apropriados e o erro for devido a descuidos, ele deve ser capaz de corrigir o erro. O segundo tipo de dicas afirma uma parte relevante do conhecimento, através de um texto curto, pois os alunos tendem a não ler dicas longas (ANDERSON et al., 1995; NICAUD et al., 1999 apud VanLehn et al. (2010)). Em outro experimento, os autores substituíram essas dicas por conteúdos multimídia ou diálogos em linguagem natural, o que em laboratório, levou a aumentos significativos da aprendizagem. O terceiro tipo de dica diz ao aluno exatamente o que deve ser feito. Mas normalmente os alunos abusam dessa função, levando a "*gamming the system*". Para desencorajar o seu uso, é usada uma função de pontuação detalhada a seguir.

Os autores apresentam sua preocupação em estruturar a aprendizagem, já que na interface do Andes os alunos têm liberdade de fazer qualquer etapa, o que pode deixá-los atrapalhados (sem saber o que fazer) ou podem desenvolver hábitos negativos durante a resolução de problemas.

No caso de aluno pedir "ajuda para o próximo passo", se assume que ele está perdido, possivelmente tendo extraído alguns dados do problema, mas provavelmente sem um plano de resolução coerente. Para esses alunos, instrutores experientes escreveram sequências de dicas que identificam o maior princípio envolvido para um problema e a primeira etapa para aplicá-lo. Ao pedir mais ajuda, o aluno será guiado para os subobjetivos do plano de resolução dos instrutores.

Com relação aos hábitos negativos, os autores citam que os alunos costumam prender-se aos valores numéricos prematuramente, já que muitos instrutores preferem que eles relacionem todas as fórmulas necessárias, para posteriormente ater-se aos números e resolver as

equações. Outro hábito negativo refere-se ao "*gaming the system*". Para tal, Andes apresenta continuamente um escore, no canto inferior esquerdo. Alunos ganham pontos realizando as etapas sem a ajuda, e perdem quando "*gaming the system*" ou ao realizar hábitos negativos. Já foi observado em sala de aula que os alunos prestam muita atenção neste índice, talvez até demais. Ressaltam ainda que esse índice não estima as habilidades dos estudantes em física.

Nas primeiras versões do sistema, conforme os mesmos autores, esse índice foi usado como modelo de estudante, mas os instrutores da USNA não o usavam como classificação. Mais tarde, viu-se como interessante que todos os alunos resolvessem os mesmos problemas como "dever de casa". Assim, não tendo uso para a classificação das habilidades dos estudantes, subsequentes versões do Andes não incluem o modelo de estudante.

Com relação à avaliação do Andes, os autores apontam que ele foi utilizado como parte do curso normal de física da USNA. Este curso tem múltiplas seções, sendo cada uma com um diferente instrutor. Os professores de algumas dessas seções utilizam-no para que os alunos realizem suas "tarefas de casa". Outros professores não o utilizam e os seus alunos foram tomados como grupo de controle. Os autores ainda ressaltam que todos os alunos têm o mesmo livro texto e realizaram as mesmas avaliações, além, de serem altamente motivados e bem preparados academicamente.

São realizados dois tipos de avaliações, uma aproximadamente mensal, com duração de uma hora (com aproximadamente quatro questões a serem resolvidas) e outra realizada no final do curso, com duração de três horas (aproximadamente cinquenta questões de múltipla escolha).

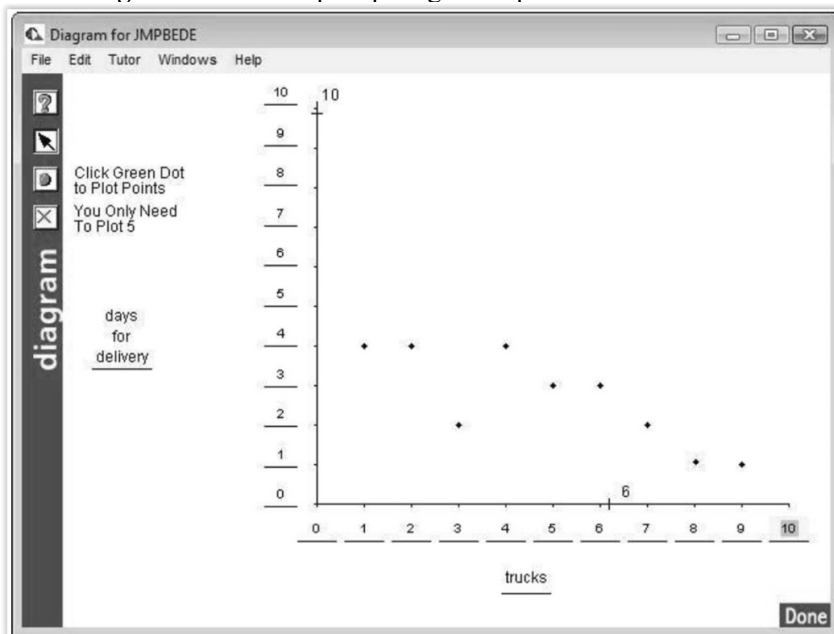
Em ambas as avaliações, o desempenho dos alunos que utilizaram o Andes foi melhor. Os autores apontam (p. 434) que na avaliação mensal com duração de uma hora, entre os anos de 2000 e 2003, a diferença entre o desempenho dos alunos que utilizaram o Andes para o grupo de controle foi de 0,61 ($p < 0.0001$) (BABBIE, 1999 e ZHU, 2016). Já na avaliação final do ano de 2003 (p. 439), apontam uma diferença de desempenho entre alunos que utilizaram o Andes para o grupo de controle foi de 0,25 ($p = 0.028$).

Ao discutirem os resultados, os autores apontam que o exame final abrange todo o curso e o Andes não. Em 2003, ano que os dados foram avaliados, cobria aproximadamente 70% curso. Além disso, apontam para diferenças no formato dos exames. Na avaliação final, os

alunos apenas selecionam a sua resposta, enquanto nas avaliações mensais os alunos apresentam todo o trabalho de resolução, permitindo a exposição da compreensão conceitual mais diretamente.

Em outro estudo, San Pedro, Baker e Rodrigo (2014), apresentam uma investigação entre o estado afetivo do aluno e a ocorrência de erros por descuidos durante a utilização do STI denominado Scatterplot Tutor, que tem foco na matemática. Definem o erro por descuido como sendo a ação do aluno informar uma resposta errada quando já apresenta a habilidade necessária para a resolução. Nesse sistema, é apresentado um cenário problema ao aluno que deve solucioná-lo. O aluno deve identificar as variáveis que representam os eixos do plano cartesiano, a escala e plotar pontos ao longo dos eixos, para finalmente interpretar os resultados (veja Figura 9). Este STI fornece dicas contextuais para guiar o aluno, além de avaliar a correção, informando se está correta a solução ou mensagens com o erro. Os autores também citam que o nível de *expertise* do aprendiz em diferentes categorias de habilidades é monitorado e apresentado em forma de gráfico de barras, mas não cita quais são essas habilidades.

Figura 9: Interface para plotagem de pontos.



Fonte: San Pedro et al. (2014).

Neste mesmo estudo, para levantamento dos dados dos descuidos dos alunos foram analisados os *logs*⁴ gerados pelo STI em conjunto com uma ferramenta de mineração de dados desenvolvida especificamente para identificar automaticamente quando há um descuido. Já para a coleta dos dados referentes aos estados afetivos dos alunos foi utilizado o protocolo quantitativo BROMP (OCUMPAUGH et al. 2012 apud SAN PEDRO, BAKER E RODRIGO, 2014). Assim, dois observadores experientes observam e codificam o estado afetivo dos alunos durante o uso do STI, considerando o contexto de trabalho, ações, expressões faciais, linguagem corporal entre outros. Cada observação durou até 20 segundos e cada aluno foi observado 24 vezes com intervalo de 180 segundos entre observações. O esquema de codificação conteve 7 categorias: tédio, confusão, alegria, concentração engajada, frustração, surpresa, e não classificado em nenhuma das anteriores.

Os mesmos autores relatam como resultados que quanto mais confuso ou entediado o estudante está, menor a probabilidade dos erros serem de descuido. Uma análise ao longo do tempo sugere que os alunos confusos e entediados têm menor aprendizagem global. Assim, seus erros parecem originar-se de uma verdadeira falta de conhecimento em vez de descuido. Ainda os autores relatam que quanto maior a concentração engajada, maior a probabilidade de erros por descuido. Esta constatação implica que um aluno altamente engajado pode, paradoxalmente, tornar-se excessivamente confiante ou impulsivo, levando a erros mais descuidados.

4 Em computação, *log* de dados é uma expressão utilizada para descrever o processo de registro de eventos relevantes num sistema computacional.

3 TEORIA DA CARGA COGNITIVA

Segundo Andrade-Lotero (2012), os principais expoentes das teorias das ciências cognitivas são: John Sweller, quem inicialmente implementou a teoria da carga cognitiva (TCC), Fred Pass, Joroen Van Merriënborder e Richard E. Mayer. Este último integrou a TCC à Teoria da Codificação Dual (TCD) e as aplicou a multimídia, chamando esta de Teoria de Aprendizagem Multimídia. Em essência, a TCC e a TCD pretendem fornecer subsídios para a elaboração de material instrucional de acordo com um modelo de arquitetura cognitiva humana.

O trabalho de Suwara e Plazowski (2012) aborda algumas limitações da ciência cognitiva como um todo, e traz uma crítica visando auxiliar o processo de torná-la uma ciência de fato. Discute o escopo, assunto (*subject*) e método, chegando a apontar os sete pecados capitais da ciência cognitiva. A pesquisa nessa área é realizada por um conglomerado bem distinto, formado por biólogos, cientistas da computação, fisiologistas ou neurocientistas, linguistas, psicólogos e filósofos, cada qual traz e aplica os métodos de sua área de origem.

Com relação ao escopo/assunto da ciência cognitiva, os autores citados acima, apontam ser bem maior que o cérebro em si. A origem desta parte do corpo humano é remota e não compreendida completamente sob a ótica da evolução, e sua interação com o ambiente, tanto fisicamente quanto culturalmente, é o cerne desta ciência, mas não o único fator que merece estudo. Assim, torna-se difícil estabelecer as fronteiras da pesquisa nesta área.

Uma grande dificuldade apontada pelos mesmos autores refere-se ao método a ser utilizado nas pesquisas em ciência cognitiva. Como as pesquisas têm origens de distintas áreas, logo, os métodos também o são; desde observação empírica até a observação da mente em ação, o que pode ser conseguindo através da visualização introspectiva em primeira pessoa. Muitos esforços já estão sendo feitos para desenvolver esse método. Ainda temos problemas morais a serem considerados, já que, por exemplo, um fisiologista ao estudar o cérebro, não pode modificar suas estruturas, visando clarificar a validação de determinadas teorias sobre seu funcionamento.

O trabalho de Andrade-Lotero (2012) também aponta algumas críticas em relação à TCC. Por exemplo, os desenhos metodológicos utilizados para a obtenção de dados em alguns experimentos, apoiando-se com aplicações multimídia, utilizadas em um curto período de tempo

por alunos novatos, seguido de uma avaliação de aprendizagem pobre. Dever-se-ia considerar os objetivos da aprendizagem, quais tarefas foram apresentadas, para que tipo de pessoas e quais as condições que a aplicação multimídia funciona. Destacam ainda, que o conceito de aprendizagem deve ir além de memorização e automação de processos, e deve propiciar a reflexão e compreensão profunda.

O trabalho do autor ainda aponta que o aspecto mais conflitante da TCC é a medição da carga cognitiva, que normalmente é baseada em escalas de esforço mental, que talvez se mostram limitadas para os desenhos instrucionais mais complexos que se tem hoje. Ressaltam ainda que tais instrumentos de medição da carga cognitiva ainda devem ser aperfeiçoados, permitindo a medição individual de cada tipo de carga cognitiva (intrínseca, estranha e pertinente).

Para a condução dos estudos desta dissertação, optou-se por adotar a Teoria da Carga Cognitiva como um norteador teórico, em especial os trabalhos mais recentes de John Sweller. Alguns dos aspectos motivadores da sua escolha foram a sua contemporaneidade, o grande número de estudos empíricos e publicações que a corroboram, a detalhada apresentação de uma série de técnicas (efeitos) relevantes para a instrução (inclusive a baseada em tecnologia) e a sua adequação às crenças deste autor.

3.1 UMA VISÃO GERAL

De acordo com Sweller (2008) para determinar as condições para propícias para melhorar o aprendizado, nós devemos aprofundar os estudos da cognição humana. Uma vez estabelecido um modelo para os seus mecanismos e suas características particulares, estamos em condições de projetar ambientes de aprendizagem que o leve em consideração.

A Teoria da Carga Cognitiva pode ser utilizada para determinar muitas das características de um processo educacional efetivo. Ela se destina a fornecer uma hierarquia sistematicamente organizada oriunda de razões evolutivas e biológicas do processo cognitivo humano (SWELLER, 2008).

A analogia e a consideração de aspectos evolucionários podem ser facilmente percebidas na obra de Sweller (2004) e Sweller, Ayres e

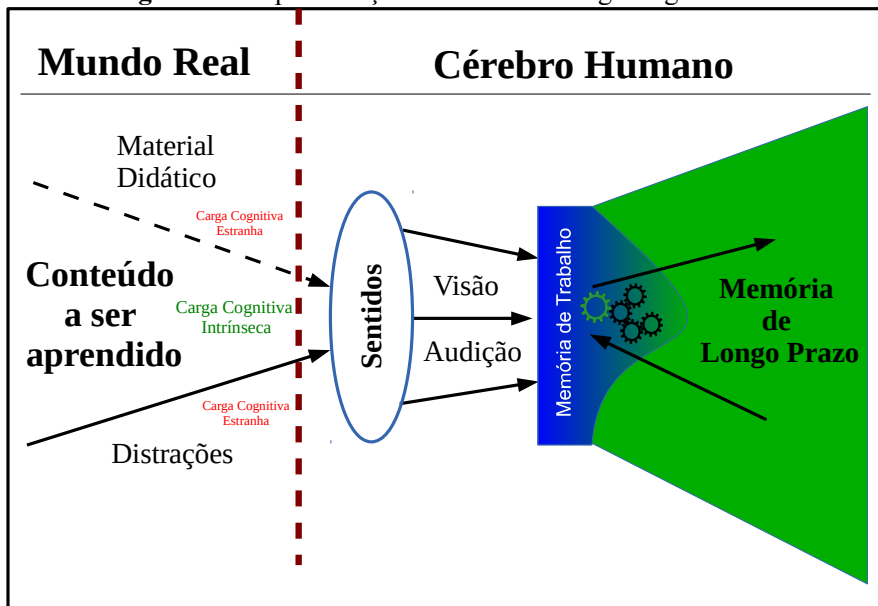
Kalyuga (2011). O processo cognitivo humano é comparado a um sistema de processamento de informações natural, onde cada organismo, inserido em seu meio natural, depende do processamento de informações para sobrevivência. Este processamento varia em complexidade e sofisticação, onde o ser humano está no topo.

O processo de cognição humana envolve assimilar, processar e usar a informação/conhecimento, chamado de processamento natural de informações. Em Sweller (2008) são apresentadas as características de um sistema de processamento natural de informações que incluem: (1) um grande depósito de informação, (2) processos para perpetuar o armazenamento de informação pela sua transferência de uma entidade para outra, (3) procedimentos para alterar o armazenamento, criando novas informações, (4) procedimentos para assegurar que as mudanças no armazenamento não destruam sua eficácia, e (5) procedimentos para relacionar informações armazenadas com o mundo externo.

A TCC pressupõe a existência de duas memórias: uma memória de trabalho limitada do aprendiz (formada por subcomponentes parcialmente independentes para lidar com material auditivo/verbal e visual 2D ou 3D) e uma memória de longa duração ilimitada (SWELLER, MERRIENBOER e PASS, 1998). A Figura 10, apresenta um esquema para facilitar o entendimento da TCC, tendo em vista o processo de aquisição de conhecimento.

O objetivo final do processo educacional é ter o conhecimento disponível na memória de longo prazo, conforme indicado pelos autores já mencionados. Para tal, deve ser processado pela memória de trabalho. O aspecto central da TCC é a memória de trabalho, pois tem capacidade limitada e realiza a interação entre os estímulos provenientes do ambiente e o conhecimento na memória de longo prazo.

Figura 10: Representação da Teoria da Carga Cognitiva.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A memória de trabalho pode ser comparada a consciência (SWELLER, MERRIENBOER e PASS, 1998). Tudo o que os seres humanos têm consciência e que pode ser observado/monitorado está na memória de trabalho. Todas as outras atividades cognitivas, permanecem escondidas até serem trazidas à memória de trabalho. Para a informação ser fixada na memória de longo prazo, obrigatoriamente deve ser trabalhada na memória de trabalho, cuja capacidade é limitada.

Segundo Miller (1956) apud Sweller, Merriënboer e Paas (1998), apenas sete mais ou menos dois, isto é, de 5 a 9 itens ou elementos de informação podem ser mantidos na memória de trabalho simultaneamente. Sweller, Ayres e Kalyuga (2011, p.65, tradução nossa) nos trazem que *“um elemento de informação é algo que precisa ser aprendido ou transformado, ou algo que já se aprendeu ou já foi processado”*. Ao considerar a necessidade de organizar e processar a informação, provavelmente apenas dois ou três elementos de informação podem ser trabalhados concomitantemente na memória de trabalho. E se houver interação entre esses elementos simultaneamente, esse número deverá ser ainda menor.

O trabalho de Souza (2010) ilustra a limitação da memória de trabalho através de cálculos matemáticos, facilmente observáveis ao tentarmos realizar mentalmente somas, como no exemplo abaixo:

(1) Calcule:

$$\begin{array}{r} 14 \\ +69 \\ \hline \end{array}$$

(2) Calcule:

$$\begin{array}{r} 258963 \\ 625148 \\ +951477 \\ \hline \end{array}$$

Ao realizarem-se mentalmente os cálculos, a questão “1” pode ser facilmente resolvida e ter seu resultado armazenado na memória de trabalho. Embora a questão “2” seja relativamente fácil de ser resolvida mentalmente, através da soma de cada algarismo, será difícil recordar ao final, o valor do resultado.

A memória de trabalho precisa ser capaz de lidar com toda a carga cognitiva que lhe é imposta. Caso não consiga, acarretará em prejuízo ao processo de aprendizagem. Podem ser classificadas em duas fontes que determinam a efetividade do processo instrucional: (1) a carga cognitiva estranha que pode ser gerada por modelos/materiais educacionais inadequados, e deve ser reduzida, e, (2) carga cognitiva intrínseca que está associada à complexidade inerente do conteúdo que está sendo estudado. Há ainda uma terceira carga, chamada pertinente, mas de natureza distinta, que é inerente ao processamento inevitável para alteração de esquemas na memória de longo prazo (SWELLER, AYRES e KALYUGA, 2011).

Uma vez aprendido, o conhecimento está na memória de longo prazo. A carga intrínseca pode ser diminuída, na medida em que a aprendizagem efetivamente ocorre, já que permite a utilização da memória de longo prazo em conjunto com a memória de trabalho. A atuação conjunta de ambas as memórias, consomem uma carga mínima na memória de trabalho (SWELLER, 2008). Novas informações, oriundas dos sentidos e não organizadas impõe uma carga alta na memória de trabalho.

A memória de longo prazo não é diretamente consciente ao ser humano (SWELLER, MERRIENBOER e PASS, 1998) e sua

capacidade, parece ser ilimitada. O acesso ao seu conteúdo e funcionamento é feito através da memória de trabalho. A informação armazenada não consiste apenas de pequenos e isolados fatos, mas pode incluir grandes e complexas interações e procedimentos. Assim, a capacidade intelectual dos seres humanos provê do conhecimento já armazenado, e não da habilidade de compreender longas e complexas estruturas diretamente na memória de trabalho.

Através de tentativa e erro, realizando testes e validando resultados, o conhecimento pode ser construído. Mas normalmente, a informação que interessa ser ensinada já foi prévia e cuidadosamente organizada e estruturada por muitas gerações (SWELLER, 2008).

Nas próximas seções serão aprofundadas as discussões sobre a TCC. A carga cognitiva exerce um papel central por isso será analisada na próxima seção.

3.2 A CARGA COGNITIVA

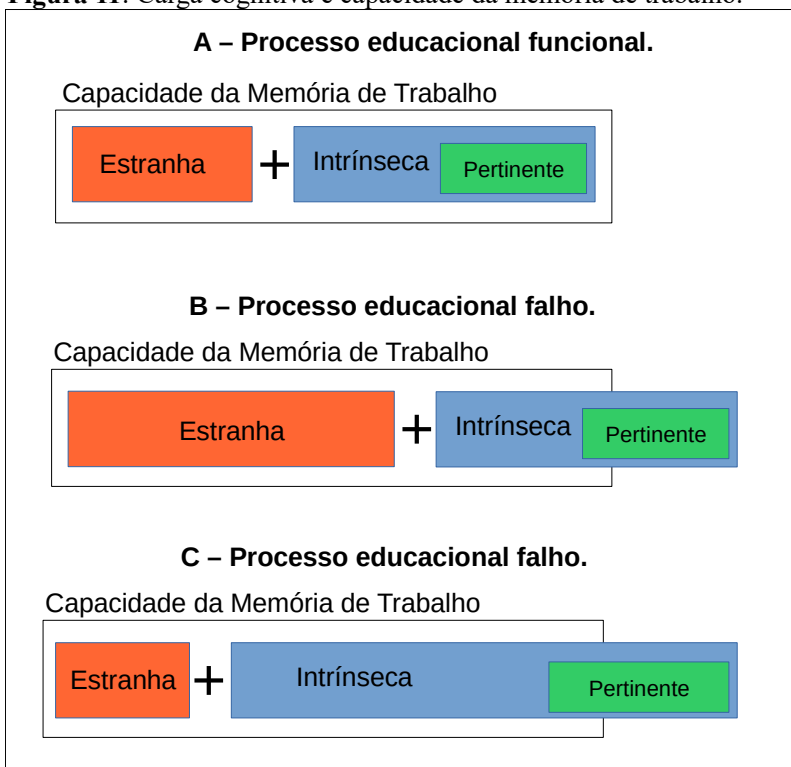
Segundo Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) a carga cognitiva refere-se à demanda de trabalho imposta à memória de trabalho. Na mesma obra, os autores categorizam a carga cognitiva de maneira ligeiramente diferente de publicações anteriores (SWELLER, MERRIENBOER e PASS, 1998; SWELLER, 1988, 2004, 2008), e utilizar-se-á a sua definição mais recente, que a divide em dois grupos, a carga cognitiva: intrínseca (*intrinsic*) e estranha (*extrinsic*). Ambas devem ser somadas e não ultrapassar a capacidade da memória de trabalho, sob pena de prejudicar o aprendizado. São definidas como: a) carga cognitiva intrínseca refere-se à utilização de recursos da memória de trabalho que têm sua origem da natureza intrínseca das informações, as quais os aprendizes precisam adquirir para atingir os objetivos de aprendizagem independentemente dos processos instrucionais usados; b) carga cognitiva estranha, como a utilização dos recursos da memória de trabalho em decorrência da maneira que a informação é apresentada, ou pelos processos educacionais a serem utilizados pelos alunos.

É possível ainda encontrar na literatura, como em Sweller (2008) a referência à carga cognitiva pertinente (*Germane Cognitive Load*), referindo-se a carga que efetivamente dá origem ao aprendizado. No entanto Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) dizem que é inapropriada a

classificação como uma terceira categoria, pois enquanto as cargas cognitivas intrínseca e estranha tem sua origem na natureza e estrutura dos materiais educacionais, a carga cognitiva pertinente está ligada a carga cognitiva intrínseca e ao processamento necessário e inevitável para alterar os esquemas na memória de longo prazo.

A partir do que foi apresentado até aqui, segundo os autores, percebe-se uma das razões para o processo instrucional talvez falhar, ao menos em parte, se a soma das cargas cognitivas ultrapassar a capacidade da memória de trabalho, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Carga cognitiva e capacidade da memória de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se os recursos da memória de trabalho estiverem alocados a cargas estranhas e/ou intrínsecas (Figura 11, itens B e C), podem não

sobrar recursos para serem usados com uma carga pertinente, a qual é o que efetiva as alterações nos esquemas da memória de longo prazo. Ressaltam ainda que “*Os alunos podem sequer começar a aprender, porque todo o conjunto de recursos de memória de trabalho são necessários para lidar com os processos de ensino utilizados.*” (p. 58, tradução nossa).

Um aspecto interessante e relevante identificado pelos autores anteriormente citados, é que os níveis de carga cognitiva, tanto intrínseca quanto estranha, são definidos pela interatividade de elementos. Os autores (p. 58, tradução nossa) definem:

Elementos interagindo são definidos como elementos que devem ser processados simultaneamente na memória de trabalho, porque eles estão relacionados logicamente. Um elemento é algo que precisa ser aprendido ou transformado, ou algo que já se aprendeu ou já foi processado. Elementos, pelas suas características, são esquemas. A maioria dos esquemas consistem de sub-esquemas ou sub-elementos. Antes de um esquema ser adquirido, esses sub-elementos devem ser tratadas como elementos individuais na memória de trabalho. Depois de terem sido incorporados a um esquema, esse pode ser tratado como um único elemento na memória de trabalho.

Os autores ainda definem que uma carga cognitiva intrínseca baixa não deve ser associada a uma tarefa fácil de ser realizada. Muitas tarefas com baixa carga cognitiva intrínseca são difíceis, como, por exemplo, aprender uma segunda língua, no qual há muitos termos de vocabulário a serem aprendidos. Mas a dificuldade, nesse caso deriva da quantidade de diferentes elementos que devem ser aprendidos, e não da dificuldade associada a cada elemento.

Segundo ainda estes autores a carga cognitiva intrínseca associada a uma informação a princípio é fixa, porém pode ser alterada, alterado-se a natureza da tarefa ou a experiência do aprendiz. Se determinado material apresenta uma carga cognitiva intrínseca alta, é crítico diminuir a carga cognitiva estranha. Este é o foco principal da TCC.

No intuito de continuar a caracterizar a TCC, passa-se a discutir os seus cinco princípios, que Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) nos apresentam como sendo oriundos de sistemas naturais de processamento de informações: o armazenamento de informações; o empréstimo e reorganização; a aleatoriedade como gênese; os estreitos limites de mudança; e a organização ambiental e vinculação. Esses serão analisados em detalhes nas próximas seções.

3.3 O PRINCÍPIO DO ARMAZENAMENTO DE INFORMAÇÕES

A obra de Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) apresenta uma categorização de conhecimento preocupada na forma com que o indivíduo o adquire. São apresentadas duas categorias: conhecimento biologicamente primário e conhecimento biologicamente secundário. Segundo os autores, a importância desta distinção está no fato do conhecimento biologicamente secundário poder ser ensinado e aprendido e o conhecimento biologicamente primário poder ser aprendido, contudo não é ensinável, pois normalmente se faz sem um processo de ensino específico.

Conhecimento biologicamente primário inclui o reconhecimento de faces, a fala, o uso de estratégias gerais para a resolução de problemas e a adequação a interações sociais básicas. Este é a base para muitos aspectos da cognição humana, pois permite o armazenamento fácil, rápido e automático de muitas categorias de informação na memória de longo prazo.

Conhecimento biologicamente secundário inclui atividades sociais mais recentes em nossa cultura (sob um aspecto evolucionário) como a leitura, escrita ou qualquer um dos outros tópicos em que processos instrucionais estão envolvidos. A aquisição deste conhecimento requer grande suporte. Cada tópico a ser ensinado, desde o processo de cozinhar até elementos do currículo da área de física, consiste fortemente de conhecimento biologicamente secundário. E é nesta categoria, de conhecimento biologicamente secundário, que a TCC tem seu enfoque.

O armazenamento de informações na memória de longo prazo tem sua origem, em grande parte, provavelmente em conhecimentos primários, os quais nos permitem realizar coisas triviais do dia a dia,

mas que ao serem analisadas são extremamente complexas. Como por exemplo, a complexidade pode ser observada ao se tentar fazer um computador imitar o comportamento humano, como movimentar um braço mecânico ou reconhecer vozes. Isso porque temos uma quantidade enorme de informações já armazenadas que nos permitem esse tipo de tarefas, e fazer com que um computador tenha as mesmas habilidades é algo extremamente difícil.

Apesar da maior parte de informações que temos armazenadas, provavelmente, ser oriunda de conhecimentos biologicamente primários, ainda temos uma quantidade imensurável de memória de longo prazo para o conhecimento biologicamente secundário.

A função da memória de longo prazo é muito mais do que nos permitir recuperar informações de eventos passados. Ela é central na cognição humana, sendo essencial em todos os processos cognitivos superiores. A experiência é totalmente dependente da memória de longo prazo, pois é nela que é mantida a informação.

Devido à importância do armazenamento de informações na memória de longo prazo é importante entender como esse ocorre. A teoria de esquemas de Piaget (1928 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) e Bartlett (1932 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) fornece uma explicação. Em seus estudos, os referidos autores, descobriram dois efeitos: de que fatos totalmente estranhos às pessoas tendem a desaparecer, e, que descrições de eventos que são familiares tendem a ser enfatizados. Segundo Chi, Glasser e Rees (1982 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011, p. 28, tradução nossa) a definição de um esquema é dada por:

Um esquema pode ser definido como um construto cognitivo que nos permite classificar múltiplos elementos de informação em um simples elemento de acordo com a maneira em que múltiplos elementos são usados.

A resolução de problemas oriunda de esquemas semelhantes tendem a ser resolvidos de uma mesma maneira. Assim esquemas mantidos na memória de longo prazo podem tornar fácil a resolução de problemas complexos, porém pode tornar problemas simples muito difíceis se um esquema errôneo for assumido para a resolução.

A automação também tem um papel fundamental. Como por exemplo, com relação à nossa habilidade de leitura. Quando se aprende a ler considera-se isoladamente cada letra, minuciosamente processada. Com um pouco mais de prática, passa-se a reconhecer sílabas e palavras, e depois, palavras familiares são lidas sem nenhum controle consciente do processo. Isso demonstra que a aquisição de novos esquemas deve ser processada conscientemente e com esforço considerável. Com a prática, esquemas podem ser utilizados com menos processamento consciente, isto é, usados de forma automática e sem esforço.

Uma implicação instrucional deste princípio é que o propósito da instrução é aumentar o conhecimento armazenado na memória de longo prazo.

3.4 O PRINCÍPIO DE EMPRÉSTIMO E REORGANIZAÇÃO

Um dos pontos críticos para quem está preocupado com o processo instrucional é a maneira como um novo conhecimento, ou um novo esquema, é armazenado na memória de longo prazo. Analogamente aos sistemas naturais de processamento de informação, há duas formas: o princípio do empréstimo e reorganização, e a criação de nova informação através do princípio da aleatoriedade.

Quase todo conhecimento secundário armazenado na memória de longo prazo é “emprestado” de outra pessoa. A habilidade de receber conhecimento e transmitir conhecimento está relacionada a uma habilidade biologicamente primária: a comunicação. Para tal, existem vários processos e a imitação é central a várias de nossas atividades.

Imitar outras pessoas, apesar da complexidade envolvida não é algo que precise ser ensinado, assim, caracteriza-se como uma habilidade biologicamente primária. A imitação é utilizada tanto para aquisição de conhecimento biologicamente primário quanto secundário. Quando um instrutor demonstra algo novo e complexo a estudantes está confiando na capacidade de imitação do ser humano. Assume-se que ao demonstrar algo aos estudantes, estes assimilam o conhecimento associado à demonstração. Um processo de imitação. *“O ato de imitação empresta informação da memória de longo prazo de um instrutor para ser armazenado na memória de longo prazo do aprendiz.”*

O processo de imitação não é perfeito ou exato. É necessário um processo de reorganização, no qual a informação existente na memória de longo prazo deva ser combinada com a nova informação, assim modificando um esquema. Inevitavelmente, esse processo envolve alguma aleatoriedade, pois não é possível determinar os esquemas já existentes na memória de longo prazo e a forma que eles serão reorganizados. Essa transformação dos esquemas pode ter efeitos negativos, neutros ou positivos. Em caso de negativos, a informação terá de ser mais transformada ou descartada para a aprendizagem significativa ocorrer. Em casos neutros ou positivos, a informação é armazenada na memória de longo prazo. Eventualmente, equívocos também podem ser armazenados na memória de longo prazo se estes não estiverem claros como sendo equívocos.

A imitação não é a única maneira de se obter conhecimentos aprendidos com outras pessoas. Ela é básica, e o processo de aprender a partir da audição e da leitura deriva da imitação. Ao ler ou ouvir uma pessoa falar, a intenção é a aquisição do conhecimento secundário armazenado na memória de longo prazo de outrem. Da mesma forma, ao estudar com diagramas ou animações, o que estamos fazendo é transferência de conhecimento secundário da memória de longo prazo de um instrutor para a do aprendiz.

A implicação instrucional deste princípio apontada por Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) é questionadora e intrigante. Se este princípio é válido, deve-se fornecer ao aprendiz o máximo de informação relevante que se é capaz. Não há razões para reter alguma informação baseando-se em teorias construtivistas, de descoberta ou aprendizagem baseada em problemas. O fornecimento de informações durante a resolução de problemas é benéfico, entretanto fornecer essa informação de forma direta e explícita é ainda melhor.

3.5 O PRINCÍPIO DA ALEATORIEDADE COMO GÊNESE

O princípio do empréstimo e reorganização apresenta como a informação é transmitida, enquanto o princípio da aleatoriedade como gênese descreve o mecanismo que ela inicialmente é criada.

Sob o aspecto da evolução biológica dos organismos, uma mutação aleatória sem teste de efetividade é inútil. Uma mutação é

efetiva, pois cada aspecto dessa tem sua efetividade testada no meio. A origem da mutação é completamente aleatória, mas a sua perpetuação através dos genes é testada no meio e transmitida aos descendentes.

Da mesma forma, a cognição humana, frente à resolução de um problema, trabalha com geração aleatória de possibilidades e teste de efetividade. É possível ter uma perspectiva ao considerar uma pessoa a resolver um novo problema sem ter conhecimentos prévios relevantes ou ajuda. A única possibilidade é a tentativa de movimentos aleatórios, seguidos de testes de efetividade, que podem ser apenas mentais ou realizados fisicamente. Existindo algum movimento prévio relevante, este pode ser usado para reduzir o número de movimentos aleatórios e os seus testes, mas uma vez exauridos, as tentativas aleatórias e testes de efetividade são tudo que resta.

Como consequência da aleatoriedade como gênese as tentativas em que os testes mostram-se ineficazes são descartadas. As etapas que nos aproximam do objetivo, podem ser consideradas e se tornam conhecimento, possibilita-se assim, uma geração mais limitada de tentativas para continuar a solução. Esses movimentos efetivos podem ser armazenados na memória de longo prazo, tornando-se conhecimento.

Sweller e Ayres e Kalyuga (2011) ainda tratam a criatividade como sendo oriunda do princípio de geração aleatória. Para além da analogia com a evolução natural, argumenta que a criatividade, por definição é um movimento ao desconhecido. A criação de um novo conceito ou procedimento é algo que não está contido na memória de longo prazo do indivíduo. Sem ser através da geração aleatória e teste de efetividade não há outro mecanismo que descreva a origem da criatividade. O mesmo autor argumenta que há diferença entre diferentes indivíduos quanto a sua criatividade, pois os conhecimentos prévios armazenados na memória de longo prazo são distintos.

Como consequência instrucional, os autores apontam que o procedimento de geração aleatória e teste se configuram mais como sendo uma habilidade biologicamente primária que secundária, assim, a utilização de métodos educacionais que se embasam neste são deveras limitados, pois naturalmente o ser humano faz uso deste procedimento.

3.6 O PRINCÍPIO DOS LIMITES ESTREITOS DE MUDANÇA

Informação gerada por aleatoriedade não está organizada e há limites para a quantidade desse tipo de informação que um sistema de processamento consegue lidar. Matematicamente é perceptível, pois ao considerar um elemento como algo que tem de ser processado, se o sistema tiver de lidar com três elementos interagentes, ter-se-á seis permutações possíveis. Ao passo que com dez elementos, ter-se-á $10! = 3.628.800$ permutações, o que gera uma dificuldade considerável.

No sistema cognitivo humano, as novas informações são tratadas na memória de trabalho. Apenas está-se consciente do que há na memória de trabalho. Apesar da quantidade de informação armazenada na memória de longo prazo ser enorme, tem-se consciência de apenas uma pequena parte dessas informações, as quais foram transferidas para a memória de trabalho em um determinado momento.

Toda informação nova, antes de ser armazenada na memória de longo prazo, deve ser processada pela memória de trabalho. Ao utilizar o modelo de arquitetura proposto por Atkinson e Shiffrin's (1968 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011), a informação proveniente do ambiente primeiro é brevemente processada por módulos do sistema sensorial, dependendo de sua modalidade, visual ou auditiva. Uma parte dessas informações é passada à memória de trabalho, onde é processada em conjunto com informações mantidas na memória de longo prazo. Se a informação processada está sendo retida por algum tempo, precisa ser armazenada na memória de longo prazo, estando disponível para ser utilizada em um futuro processamento.

Sob a perspectiva instrucional há duas características fundamentais da memória de trabalho: ao lidar com informações novas, ela é muito limitada em capacidade e em duração. A capacidade exata de elementos ou esquemas que podem ser processados por ela ainda é tema de pesquisas, e varia dependendo das condições dos testes. Miller (1956 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) sugeriu como sendo de 7 ± 2 elementos, já Cowan (2001 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) entendeu que um número mais real seria de quatro elementos. O essencial, é que ela é deveras limitada em sua capacidade de armazenar informações.

Em um contexto normal de ensino, a memória de trabalho é utilizada para processar itens que requerem organização, combinação e manipulação de muitas maneiras. É sugerido que não mais de dois ou

três itens de nova informação sejam processados ao mesmo tempo, sob pena de ultrapassar a capacidade da memória de trabalho o que não resultaria em um aprendizado. Isso, pois um pequeno incremento na quantidade de elementos eleva grandemente a quantidade de combinações de elementos que a memória de trabalho tem de lidar.

Com relação às limitações temporais, segundo Peterson e Peterson (1959 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) na memória de trabalho, uma informação nova é mantida por apenas alguns segundos antes de começar a ser perdida, e depois de 20 segundos toda a informação é perdida. Se constantemente lembrar-se um novo material, ele é atualizado e pode ser mantido indefinidamente na memória de trabalho. Essas limitações aplicam-se informações novas provenientes do ambiente. Para as informações provenientes da memória de longo prazo, a memória de trabalho tem características totalmente diferentes que serão discutidas na próxima seção, no princípio da organização ambiental e vinculação.

A memória de trabalho é diretamente dependente da modalidade em que a informação é apresentada, isto é, auditiva ou visual. A sua divisão em módulos é mais compreensível, onde cada módulo ou processador é responsável pelo tratamento de uma modalidade de informação. Esses módulos são parcialmente independentes (individualmente com as características já discutidas).

3.7 O PRINCÍPIO DA ORGANIZAÇÃO AMBIENTAL E VINCULAÇÃO

A memória de trabalho é a estrutura central tanto para o princípio dos limites estreitos de mudança quanto para o princípio da organização ambiental e vinculação. A informação armazenada na memória de longo prazo é utilizada para coordenar as atividades com o ambiente e é bem diferente daquela vinda do ambiente. É organizada e não é aleatória e pode ser tratada de forma bem diferente. A quantidade de informação organizada proveniente da memória de longo prazo para a memória de trabalho não tem um limite conhecido tanto em capacidade quanto em duração.

Em suma, segundo Sweller, Ayres e Kalyuga (2011, p. 46, tradução nossa) o princípio da organização ambiental e vinculação:

“permite que a informação organizada possa ser transferida a partir da memória de longo prazo para a memória de trabalho, a fim de que essa informação possa ser usada pela memória de trabalho para coordenar a atividade de uma maneira apropriada para um determinado ambiente.”

Desta forma, a informação mantida na memória de longo prazo permanece dormente até que seja ativada a partir de estímulos do ambiente que levam a memória de trabalho a determinar quais os esquemas a serem usados. Por exemplo, ao deparar-se com uma equação $a / c = b$, onde objetiva-se encontrar a , essa equação age como um estímulo disparando o esquema que indica a ação a ser tomada.

A implicação instrucional deste princípio é grande do ponto de vista educacional, pois de acordo com os estímulos que são apresentados, podem-se selecionar os esquemas da memória de longo prazo a serem utilizados na memória de trabalho, processados e derivar significados.

A partir dos princípios discutidos e do papel central da memória de trabalho para a TCC, há estudos que buscam mensurar a carga cognitiva frente a atividades de aprendizagem, os quais se discutem na próxima seção.

3.8 MEDIDAS DE CARGA COGNITIVA

Ao longo dos últimos 30 anos, segundo Sweller, Ayres e Kalyuga (2011), pesquisadores utilizaram diferentes estratégias para medir a carga cognitiva.

Segundo os autores, a utilização de métodos indiretos está relacionada aos primórdios do desenvolvimento da TCC. Em um dos métodos, com a utilização de modelos computacionais, foi demonstrado que uma estratégia de aprendizagem que exigia considerável busca de solução de problemas levou a resultados inferiores de aprendizagem do que uma estratégia que empregou muito menos busca na solução de problemas. Outra estratégia focava no tempo de instrução variando-se a

carga cognitiva, como resultado, o seu aumento influenciou negativamente o tempo de aprendizado e a precisão do que foi aprendido. Ainda, usaram taxas de erro para identificar diferenças na carga cognitiva, como resultados obtiveram que há mais erros nos pontos onde devem ser tomadas decisões baseando-se nas variáveis do problema.

Na busca por medidas mais diretas da carga cognitiva, a partir de Paas (1992 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) chegou-se a medidas subjetivas. Estas proveem um indicador da carga cognitiva, após a realização da tarefa. Ao medir o esforço mental ou a dificuldade Paas, Tuovinen, Tabbers, and van Gerven (2003 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) utilizaram uma escala Likert de 9 pontos (1 é baixo esforço mental até 9 muito alto esforço mental), onde os resultados dos alunos (que avaliaram seu próprio esforço mental) coincide com as hipóteses de que um *design* instrucional que impõe uma carga cognitiva menor teve resultados de aprendizagem de qualidade superior. Destacam que é importante perceber a diferença, ainda que correlacionada, entre perguntar ao aluno quão difícil ele achou a tarefa ou quanto esforço foi investido para completar a tarefa.

A avaliação da eficiência é um bom indicador de aquisição de esquemas e automação. Paas e van Merriënboer (1993 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) combinaram o esforço mental e indicadores de desempenho na tarefa para chegar a uma medida de eficiência, que leva em consideração os resultados padronizados das tarefas e o resultado padronizado do esforço mental.

Tarefas secundárias também podem ser utilizadas para mensurar a carga cognitiva, apesar de menos utilizadas que as medidas subjetivas (SWELLER, AYRES e KALYUGA, 2011). Requer que os estudantes realizem uma tarefa secundária ao mesmo tempo em que se instruem (tarefa principal). Se a carga cognitiva imposta pela tarefa principal for alta, a tarefa secundária terá desempenho ruim. São apresentadas diferentes maneiras de conceber a tarefa secundária. Como ao ouvir um som, o aluno pressiona um pedal, e é avaliado o tempo que ele leva para pressionar o pedal. Ou lembrar-se de um número de 2 dígitos, sendo avaliada a acurácia. E de outro modo, acima da apresentação instrucional, é mantida uma letra. Os alunos deveriam monitorar a mudança de cor desta letra. Neste momento, pressionam uma tecla específica, e é avaliado quantas vezes foi percebida a mudança de cor.

Os autores apontam também a perspectiva da utilização de medidas psicológicas para determinação da carga cognitiva. Como

exemplos pode-se citar pesquisas que utilizaram de: a) análise espectral da frequência cardíaca; b) análise da pupila, já que a dilatação desta aumenta com o incremento da carga de memória, mas há limitações com relação a pessoas idosas; c) Eletroencefalograma (EGC) permite determinar vários tipos de carga: instantânea, picos, média, acumulada, total; d) monitoramento dos olhos, seguindo o seu movimento, mostram evidências de que pode ser usado para medir flutuações na carga cognitiva instantânea, na qual de forma geral, longa fixação dos olhos corresponde mais processamento cognitivo, bem como identifica onde o aluno foca a atenção e o quão duradouro é; e) Outro indicador é a complexidade da linguagem, já que há evidências de que quando a dificuldade de uma tarefa aumenta, a densidade léxica da fala diminui, isto é, quando as tarefas se tornam mais complexas, os padrões de conversa mudam, tornando-se menos densos. Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) ponderam que todos estes são estudos realizados, contudo não há como prever quais dessas técnicas terão resultados sólidos. No passado, medidas psicológicas mostraram-se insuficientemente precisas para determinar a carga cognitiva de materiais instrucionais. Resta ver quando isso ocorrerá no futuro.

É relevante distinguir entre os diferentes tipos de carga cognitiva, conforme apontam os autores. Uma vez utilizada toda capacidade cognitiva, torna-se interessante distinguir entre as diferentes categorias de carga cognitiva, sendo que na última década, houve grande interesse dos pesquisadores em medidas individuais de tipos de carga cognitiva.

Os mesmos autores apresentam que a carga cognitiva total é a soma de carga intrínseca, mais a estranha. Mantendo uma constante e variando-se a outra, e tendo como resultado a carga cognitiva total subjetiva, determina-se a que variou. Concluem ainda que a escala subjetiva de esforço mental ou dificuldade é que foi mais utilizada em pesquisas na área e foi empregada com muito sucesso, em que Paas (1992 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) forneceu uma contribuição valiosa.

Uma escala muito utilizada (apesar de nem sempre em sua totalidade) relatada por Sweller, Ayres e Kalyuga (2011), é a NASA-TLX (*Task Load Index*). Ela consiste de seis subescalas que medem diferentes fatores associados à conclusão de uma tarefa: demanda mental, demanda física, demanda temporal, desempenho, esforço e frustração.

As escalas de esforço mental ou dificuldade vêm sendo utilizadas com sucesso, como no estudo de Cierniak et al. (2009b, apud Sweller,

Ayres e Kalyuga, 2011, p. 84, tradução nossa) em que utilizou questionamentos como “*O conteúdo era difícil para você? Quanto difícil foi para você aprender com o material? Quanto você se concentrou durante a aprendizagem?*”. A cada questão está vinculada uma intencionalidade de distinguir entre os diferentes tipos de carga cognitiva. A primeira pergunta vinculada ao conteúdo faz referência à carga cognitiva intrínseca, a segunda vinculada ao material, à carga cognitiva estranha e na terceira pergunta argumenta que a concentração está ligada a carga cognitiva pertinente. Foram encontradas correspondências significativas entre as medidas de carga cognitiva e os dados de desempenho.

Com a utilização do princípio de empréstimo a teoria da carga cognitiva gerou uma série de técnicas relevantes para instrução baseada em tecnologia (SWELLER, 2008), chamados de efeitos, os quais são discutidos na sequência, com base em Sweller, Ayres e Kalyuga (2011).

3.9 OS EFEITOS DA TEORIA DA CARGA COGNITIVA

Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) relacionam uma série de efeitos advindos da TCC. Em publicações anteriores como Sweller et al. (1998), Sweller (1988, 2004, 2008) e até mesmo Mayer (2014) há referência a alguns destes mesmos itens, mas referindo-se a eles como princípios.

Em Sweller, Ayres e Kalyuga (2011, p. 88, tradução minha) encontramos o propósito dos efeitos:

“um efeito é uma demonstração experimental que um procedimento instrucional, baseado nos princípios da teoria da carga cognitiva, que facilita a aprendizagem ou a resolução de problemas em comparação com um procedimento mais tradicional.”

Diversas pesquisas apresentam essas demonstrações. Esses experimentos, segundo os autores, podem ser sofisticados, mas em geral, são conduzidos em duas fases controladas: a) a fase de

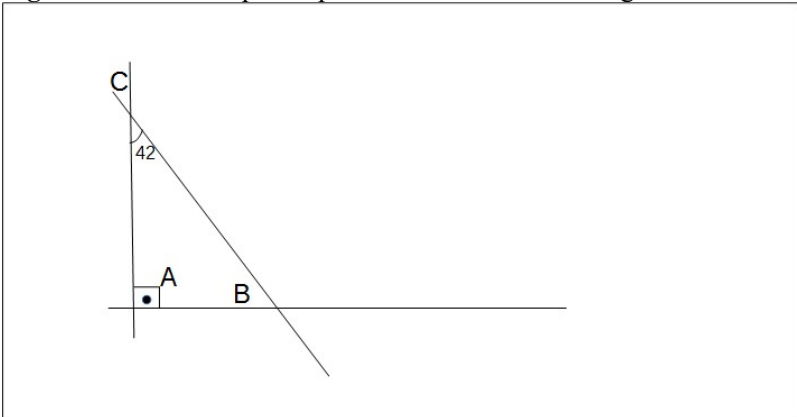
aprendizado, em dois grupos, com os membros alocados de forma aleatória, sendo o primeiro grupo ensinado com uma metodologia tradicional e o segundo com um procedimento/metodologia experimental; b) em um segundo momento, todos os aprendizes passam por um mesmo teste, visando verificar se há alguma diferença de aprendizado. Se a análise estatística comprovar diferenças, está demonstrado o efeito. Na sequência discutir-se-á detalhadamente cada um dos efeitos.

O efeito sem objetivo específico ocorre quando um problema convencional com um objetivo específico é substituído por um problema sem um objetivo específico, levando os alunos a um aprendizado superior.

A título de exemplo, pode-se pegar um problema de geometria, no qual se solicita ao aluno para calcular os ângulos ABC de um triângulo, como ilustrado na Figura 12. Muda-se a pergunta para algo mais genérico, como “calcule o valor de tantos ângulos quantos você consiga”. Para a resolução clássica, o estudante deve considerar o objetivo, as diferenças entre o que foi dado e o objetivo, e os operadores que permitem reduzir essas diferenças. Cada um desses elementos interage, resultando em um nível elevado de interatividade de elementos e por definição uma grande carga cognitiva. Na abordagem sem um objetivo específico, leva o aluno a considerar o que foi dado e um possível movimento.

Como condição de aplicabilidade do efeito sem objetivo específico, traz-se que a referência a um objetivo é crítica durante a resolução de um problema, mas não durante a aprendizagem. É efetivo por reduzir o processamento associado a meios-fins (*means-ends*) nas estratégias de resolução de problemas. Ainda facilita a regra de indução e a aquisição de conhecimento esquemático, pois o foco está mais localizado nas relações em um estado de um problema particular em vez de um objetivo. O autor ressalta ainda que é mais efetiva em problemas de transformação, com um número limitado de possíveis movimentos.

Figura 12: Um exemplo de problema convencional de geometria.



Fonte: elaborado pelo autor.

A implicação instrucional que os autores apresentam é que esse efeito é uma maneira muito efetiva para resolver problemas. A resolução convencional de problemas, especialmente para alunos novatos, deve ser evitada devido à carga cognitiva estranha criada por estratégias de resolução como análise de meios-fins. Uma vantagem é a facilidade de adaptação de problemas convencionais, com instruções simples, como: “encontre todos os valores desconhecidos que você consiga”.

Outro efeito é o efeito de exemplo trabalhado e de problemas a completar. Um exemplo trabalhado provê um passo a passo para solucionar o problema. De forma similar, um problema a completar é um exemplo resolvido com uma solução parcial, no qual o aluno é solicitado a resolver algumas etapas chaves. Ocorre quando aprendizes que examinaram exemplos resolvidos têm melhor resultado em subseqüentes testes que outros aprendizes que resolveram problema equivalente. É uma forma eficiente de prover esquemas de resolução de problemas para serem armazenados na memória de longo prazo. Uma vez armazenado, podem ser usados para resolver problemas relacionados. Impõe relativamente pouca carga na memória de trabalho quando comparado à análise de meio-fim.

Nas pesquisas, a maioria apresenta um exemplo resolvido seguido de um problema similar para o aluno resolver, este modelo foi estabelecido por Cooper e Sweller, (1985 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011). Não há uma definição precisa. A maioria dos exemplos

inclui a descrição de um problema e um procedimento para resolvê-lo. Um exemplo resolvido pode ser observado na Figura 13.

Figura 13: Um exemplo resolvido de um problema de probabilidade.

Problema	De uma caixa contendo 3 bolas vermelhas e duas bolas brancas, duas bolas são aleatoriamente retiradas. As bolas escolhidas não são colocadas de volta na caixa. Qual a probabilidade da bola vermelha ser a primeira bola a ser retirada e a bola branca ser a segunda?
Primeiro passo resolvido	Número total de bolas: 5 Número de bolas vermelhas: 3 Probabilidade de a bola vermelha ser retirada primeiro $3/6 = 0,6$
Segundo passo resolvido	Número total de bolas após a primeira retirada: 4(2 vermelhas e 2 brancas) Probabilidade de a bola branca ser retirada em segundo lugar $2/4 = 0,5$
Terceiro passo resolvido	Probabilidade de a bola vermelha ser retirada em primeiro lugar e a bola branca ser retirada em segundo lugar é $3/5 \times 1/2 = 3/10$ ou 0,3 Resposta: A probabilidade de a bola vermelha ser retirada em primeiro lugar e a bola branca ser retirada em segundo lugar é de $3/10$ ou 0,3

Fonte: Souza (2010).

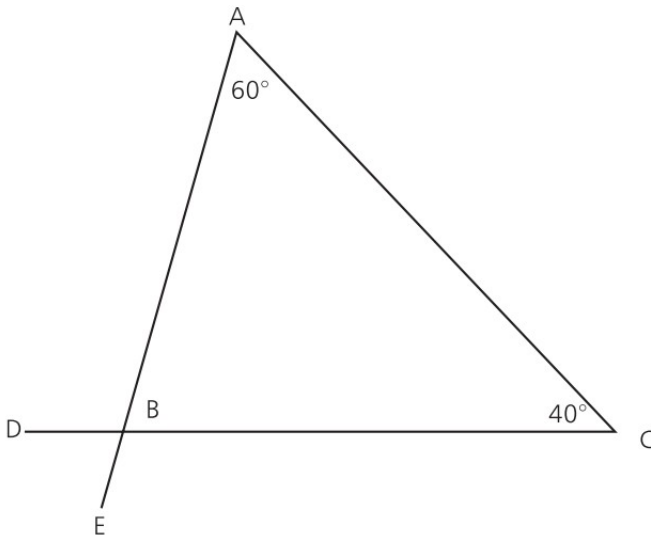
Ao tratar das condições de aplicabilidade, os autores Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) mostram que há muita evidência, em especial para estudantes novatos em uma determinada área, que é mais eficiente trabalhar com exemplos resolvidos do que com resolução de exercícios. São efetivos, pois diminuem a carga estranha, não por serem exemplos resolvidos simplesmente. Um exemplo mal estruturado não será mais eficiente que resolver o mesmo. Todos os efeitos discutidos adiante estão preocupados com a maneira em que a instrução deve ser apresentada a categorias especiais de alunos, distinguidos pelo seu grau de experiência com determinado assunto.

A principal implicação instrucional, segundo os autores, é que a resolução de problemas por novatos em um domínio cria uma carga cognitiva estranha que é prejudicial ao aprendizado. Sugere ser usado um processo sistemático de uso de exemplos resolvidos, incluindo uma estratégia de alternância, como resolução de exercícios similares, ou enfraquecimento de orientação (efeito que será discutido adiante). Tudo isso antes de apresentar um conjunto de exercícios sem ajuda.

Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) relatam que o efeito de divisão de atenção originou-se dos exemplos trabalhados, já que alguns se mostraram ineficazes, pois seu próprio formato impõe uma pesada carga

cognitiva estranha, pois em alguns formatos dividem a atenção do aprendiz, ora para o exemplo e ora para a atividade a ser resolvida. A divisão de atenção ocorre quando os alunos são obrigados a dividir sua atenção entre pelo menos duas fontes de informação que foram separados espacialmente ou temporalmente. Busca-se integrar as fontes de informação, o que geralmente leva a um aprendizado mais efetivo, pois impõe uma menor carga cognitiva estranha. Se as fontes de informação estão divididas, é necessário manter as informações da primeira na memória de trabalho, procurar a segunda, atentar-se a ela e processar a interação entre as fontes que são elementos interagindo. O efeito de divisão de atenção só ocorre quando as duas ou mais fontes de informação devem ser processados em conjunto, a fim de compreender a informação que está sendo apresentada.

Um exemplo pode ser um diagrama cujas descrições do seu funcionamento, ou de partes deste, estão posicionadas bem próximas às partes que a representam. Andrade-Lotero (2012) traz um exemplo de divisão de atenção, apresentado na Figura 14, em que apresenta a solução separada do diagrama. Bem como um exemplo que integra o texto/solução ao diagrama, que pode ser observado na Figura 15.

Figura 14: Um exemplo com divisão de atenção.

Na figura acima, encontre o valor do ângulo BDE.

Solução:

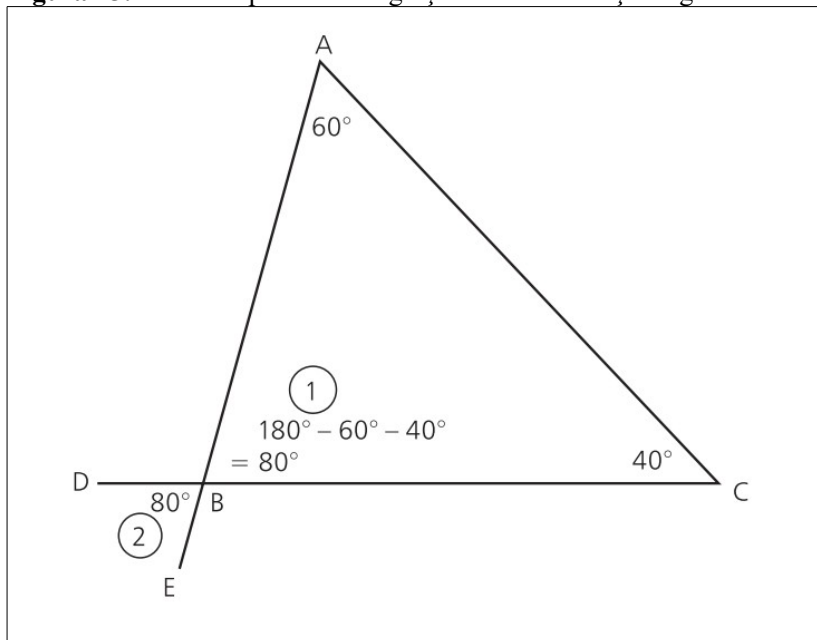
$$\begin{aligned} \hat{\text{Ângulo}} \text{ ABC} &= 180^\circ - \hat{\text{Ângulo}} \text{ BAC} - \hat{\text{Ângulo}} \text{ BCA} \text{ (Soma dos ângulos} \\ &\quad \text{internos é } 180^\circ) \\ &= 180^\circ - 60^\circ - 40^\circ \\ &= 80^\circ \\ \hat{\text{Ângulo}} \text{ BDE} &= \hat{\text{Ângulo}} \text{ ABC} \text{ (ângulos opostos verticalmente são iguais)} \\ &= 80^\circ \end{aligned}$$

Fonte: Adaptado de Andrade-Lotero (2012).

É interessante ainda destacar o experimento de Sweller et al. (1990 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011), que explorou diagramas e suas explicações escritas, nas quais em vez de notas abaixo do diagrama, uni-las e apresentá-las em posição relevante do diagrama. Assim, maior carga cognitiva fica disponível para aquisição do esquema que é pertinente para aprendizagem, em vez de cargas cognitivas estranhas, que neste caso seria para busca e integração dos elementos. Proporciona menos tempo necessário para fase de estudos iniciais, menos tempo para estudar os exemplos resolvidos e menos tempo para resolver os problemas. Em outro experimento, com aprendizes de

automação industrial, o grupo com material integrado, teve melhor desempenho e menos tempo de aquisição do conhecimento.

Figura 15: Um exemplo com integração de texto/solução e gráficos.



Fonte: Adaptado de Andrade-Lotero (2012).

Muitas pesquisas se utilizam de materiais multimídia, e segundo os autores Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) ao utilizar um computador como meio ou fim de atividade de aprendizagem, alguns cuidados devem ser tomados. Se o aprendiz não tiver experiência na utilização de computadores, primeiro deve aprender a operá-lo, o que diminuirá a carga cognitiva ao ser apresentado ao tópico específico a ser aprendido. Ao se aprender a operar um *software*, uma ferramenta CAD, por exemplo, a utilização de um manual e a interação simultânea com o computador se mostrou aquém da utilização de um manual modificado com diagramas e textos integrados, com utilização do computador após ter visto todo o manual (CHANDLER e SWELLER, 1996 apud SWELLER, AYRES e KALYUGA, 2011). Em um experimento semelhante, demonstraram não haver diferença em usar manuais em

papel ou na tela do computador, mas a integração física é sempre superior.

Conforme os autores, a condição de aplicabilidade primordial do efeito de divisão de atenção é que cada fonte de informação seja essencial e não redundante. É mais provável que ocorra com materiais com grande interatividade de elementos. Afeta muitas áreas de estudo e combinações de texto, figuras, diagramas, gráficos e maquinários.

Os autores apresentam como implicações instrucionais de diferentes fontes de informação que devem ser consideradas simultaneamente para o entendimento e aprendizagem devem ser as mais integradas possíveis. Querer que os alunos integrem informações separadas espacialmente ou temporalmente é prejudicial ao aprendizado. Por exemplo, texto escrito deve ser posicionado próximo ao que ele se refere, e, falas devem estar sincronizadas com a representação visual.

O efeito modalidade está intimamente ligado ao efeito de divisão de atenção. Descreve uma forma alternativa de lidar com a divisão de atenção através da utilização de canais visuais e auditivos. Somente se obtém se as duas fontes de informação não forem inteligíveis separadamente. Se a fala apenas redescreve o diagrama, não se obterá o efeito. A partir do modelo proposto de arquitetura cognitiva (os princípios discutidos anteriormente) e considerando-se o modelo evolutivo, é provável que se aprenda a falar ouvindo e olhando objetos. Assim, esse processo pode ser classificado como biologicamente primário, resultando em uma vantagem sobre o modelo apenas visual (leitura) onde se usa conhecimento biologicamente secundário. Se a utilização de duas modalidades se encaixa como uma habilidade biologicamente primária, ela vai automaticamente reduzir a carga da memória de trabalho, levando a uma vantagem.

Como exemplo apresentado pelo mesmo autor, em vez de apresentar um diagrama e texto escrito, melhor seria apresentar um diagrama e texto falado, usando assim dois canais. No entanto, a troca de texto escrito por falado requer algumas considerações. Enquanto a memória de trabalho é muitas vezes tratada como se fosse uma estrutura unitária, na verdade, inclui vários processadores que correspondem à modalidade na qual a informação a ser processada é apresentada. De acordo com as teorias mais comuns, há dois processadores, parcialmente independentes, para lidar com informações visuais e auditivas. Será assumido que ambos têm capacidade e duração limitadas. Assim, se a carga pode ser dividida entre os processadores, a carga sobre um único processador será menor. O texto escrito é decodificado no canal

auditivo, e para chegar até ele deve ser lido, passando pelo canal visual. Assim grandes níveis de interatividade de elementos estão envolvidos em integrar e processar essas informações. Isso sobrecarrega o canal visual, especialmente se estiver aliado a fontes de informação separadas espacialmente.

Assim, segundo os autores, se um material instrucional consistir em um diagrama e texto, se o texto for falado, ele pode ser imediatamente processado pelo canal auditivo, sem usar o canal visual que fica exclusivamente para o diagrama. Não é uma simples adição das capacidades, pois estes processadores são parcialmente independentes.

Ao se referir às condições de aplicabilidade do efeito modalidade, os autores afirmam que usar instruções audiovisuais não é garantia que o aprendizado ocorra. O importante é que elas reduzam a carga cognitiva estranha. Ainda, elenca uma série de condições para obtenção do efeito: a) Como é o caso para o efeito de divisão de atenção, informação esquemática e textual deve referir-se uma a outra e ser ininteligível separadamente; b) A interatividade de elementos deve ser elevada. Se for baixa, nem o efeito modalidade nem qualquer outro efeito da carga cognitiva podem ser obtidos; c) o texto auditivo deve ser limitado. Caso seja demorado e complexo deve ser apresentado por escrito, não de forma falada. Texto longo, que não pode ser retido e processado na memória de trabalho impedirá um efeito modalidade e pode gerar um efeito modalidade reversa; d) Se os diagramas são muito complexos, conservação ou de sinalização nos diagramas pode ser necessária para que os alunos possam se concentrar nas partes da apresentação visual a ser referido pela informação auditiva. O efeito reverso de experiência (que será discutido adiante) também pode limitar esse efeito

O efeito de redundância ocorre quando múltiplas fontes de informação podem ser entendidas separadamente sem a necessidade de integração mental. De acordo com os autores, para a TCC, informações adicionais não necessárias para a aprendizagem são classificadas como redundantes. A forma mais comum de redundância ocorre quando a mesma informação é apresentada em diferentes modalidades. Não há classificações da redundância, pois elas causam as mesmas consequências negativas sob o aspecto cognitivo e podem ser eliminadas da mesma forma, por exemplo, ocultando a informação redundante. O efeito de redundância ocorre quando informação com material redundante resulta em menor aprendizado que a mesma informação sem o material redundante. Desta forma, a redundância deve ser omitida dos materiais, prevenindo o aumento da carga cognitiva estranha inerente

aos alunos focarem sua atenção à redundância na tentativa de integrá-la com o material essencial.

Outro exemplo, um texto escrito ou falado que simplesmente redescreve um diagrama que pode ser entendido sem esse texto, ou, textos supérfluos à compreensão, não são benéficos à aprendizagem e muitas vezes causam uma carga cognitiva estranha.

Um ponto a ser considerado, que os mesmos autores destacaram, é o trabalho de Mayer e Moreno (2003), que indica um efeito reverso de redundância. Em sua pesquisa, esses autores não utilizaram diagramas visuais, apenas texto escrito e a narração equivalente, que produziu melhores resultados de aprendizagem. Esta apresentação de texto escrito simultaneamente com sua narração foi em segmentos pequenos, com pausas entre eles. Isso permitiu aos alunos consolidar o modelo mental parcial a partir do segmento antes de ir ao próximo. Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) argumentam que se o texto for logicamente completo e particionado em pequenos segmentos, com pausa, a apresentação simultânea de narração e escrita, não apenas elimina os efeitos negativos, mas proporciona aprendizado.

Os autores apontam como condições de aplicabilidade que diferentes fontes de informação devem ser inteligíveis independentemente, sem a necessidade de integração mental e processamento simultâneo e que a interatividade de elementos do material deve ser alta. O nível de experiência dos aprendizes pode influenciar (discutido adiante no efeito reverso de experiência).

Ainda cita vários exemplos de aplicação, como uma apresentação de *slides* com muito texto, faz-se necessário relacionar o texto com a narração do autor e muitas vezes ainda há elementos gráficos, que podem sobrecarregar a memória de trabalho. O ideal é colocar o texto essencial e explicar detalhadamente cada tópico. Outro exemplo em mapas, direção de ruas, gráficos de torta e outros diagramas, se são autoexplicativos, a inclusão de texto ou fala pode distrair o aluno, gerando carga cognitiva estranha. Outro exemplo é que muitos manuais instruindo o uso de *software* ou *hardware*, ou dispositivos técnicos incluem ilustrações ou impressões de tela, ou desenhos do equipamento e pedem para entrar com dados ou digitar comandos no equipamento. E os próprios dispositivos, também vêm com instruções. Essa redundância de informações contribui para uma maior carga cognitiva estranha. Como visto anteriormente, fazendo a leitura apenas do manual, sem interagir com o equipamento temporariamente, deve resolver o problema, ou, apresentar toda a informação em tela. Depois de adquirir

algum conhecimento, aí sim o aprendiz será capaz de lidar com altos níveis de carga cognitiva, pois a capacidade da memória de trabalho cresce significativamente ao lidar com informação familiar.

Ainda conforme os mesmos autores, em áreas onde componentes motores ou coordenação motora espacial é fundamental (como digitação), extensa prática com o equipamento real desde o início da aprendizagem continua sendo essencial.

O efeito reverso de experiência teve sua origem a partir de estudos realizados sobre o efeito de redundância. O efeito reverso de experiência baseia-se na combinação de materiais e aprendizes, onde para alunos novatos em uma área, informações adicionais são essenciais para o aprendizado, enquanto que para alunos mais experientes, esses mesmos materiais podem ser redundantes. Como por exemplo, apresentar um diagrama com uma explicação textual pode ser indispensável para alunos novatos. Contudo para alunos experientes, pode tornar-se redundante, elevando desnecessariamente a carga cognitiva no processo de aprendizagem. Sob o aspecto da arquitetura cognitiva humana, isso se deve pelo papel central que o conhecimento armazenado na memória de longo prazo exerce. Se uma informação já foi adquirida, portanto armazenada na memória de longo prazo, apresentá-la novamente (como, por exemplo, um texto que explica um diagrama compreensível) aumenta a carga cognitiva estranha, o que pode ser prejudicial ao aprendizado. O que leva à compreensão de que técnicas e procedimentos que visam o aprendizado de alunos novatos podem não ser tão efetivos quando estes obtiverem maior experiência em determinada área. Este efeito está relacionado e deve ser considerado em conjunto com a maioria dos demais já abordados.

Com relação à aplicabilidade deste efeito, os autores informam que como em outros, este se baseia na carga cognitiva estranha. Para observar sua aplicação, os níveis de carga cognitiva intrínseca (ou a interatividades entre os elementos) devem ser elevados.

Os autores apontam que a principal implicação instrucional é a necessidade de adaptar os métodos instrucionais à medida que o aluno evolui na aprendizagem. Apesar dos referidos autores não apontarem, STIs, pela sua natureza, podem ser utilizados para satisfazer esta característica!

Eles propõem a utilização de materiais e técnicas adequados, e categoriza em três níveis os alunos de acordo com o grau de conhecimento em determinado assunto: a) novatos: o material instrucional deve ser detalhado, direto e preferencialmente integrado ou

utilizando-se do efeito modalidade; b) intermediários: uma combinação de instrução direta e prática de resolução de problemas com ajuda reduzida; c) avançados: resolução de problemas com ajuda mínima. Alterações no conhecimento do aluno devem ser dinamicamente monitoradas e técnicas e procedimentos adequados devem ser usados. Novamente, apesar de os referidos autores não apontarem, STIs, pela sua natureza, podem atuar aqui.

Citam ainda que recentes estudos de métodos rápidos de avaliação de diagnóstico apresentam medidas em tempo real da experiência do aprendiz, capazes de adaptar o material instrumental ao seu nível de experiência.

Eles tratam do efeito de enfraquecimento de orientação, o qual se baseia na diferença entre novatos e experientes em determinada área de conhecimento. Segundo o efeito de enfraquecimento de orientação, a ajuda e ou orientação fornecida aos alunos deve diminuir conforme sua experiência aumenta. Exemplos resolvidos, e outras formas de orientação, importantes para novatos, podem ser redundantes (e assim aumentando a carga cognitiva estranha) conforme o nível de *expertise* aumenta. Ainda recomendam que para alunos novatos sejam usados exemplos resolvidos, e que, lista de exercícios seja utilizada com alunos avançados. A transição de um para outro, isto é, para alunos com conhecimentos intermediários, propõe a utilização de exercícios parcialmente resolvidos.

Muito comum, segundo os autores, é apresentar um exemplo seguido de exercícios para serem resolvidos. O enfraquecimento de orientação pode ser obtido, apresentando-se um exemplo seguido de uma atividade parcialmente resolvida, deixando a última etapa em aberto, para o aluno completar. Depois as duas últimas etapas, e posteriormente as três últimas...

Ao tratar do enfraquecimento de orientação, Sweller, Ayres e Kalyuga (2011, p. 176, tradução minha) aborda a utilização de STIs e expõe:

Integrando tutores cognitivos inteligentes com a aprendizagem baseada em exemplo com enfraquecimento de orientação poderia ser uma abordagem de ensino eficaz para desenvolver as habilidades dos alunos.

Apresentam o experimento de Renkl et al. (2007 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011), realizado com dois grupos. O primeiro utilizou um tutor com resolução de problemas e o segundo com enfraquecimento de orientação, aplicados à geometria de círculos. Os resultados não apresentaram diferença na aquisição de conhecimento e teste de transferência. Mas, o segundo grupo teve menor tempo de instrução e maior eficiência. Conduziu ainda um segundo experimento, com o sistema tutor modificado, com melhor introdução ao tema e seções individuais de aprendizagem. O segundo grupo teve melhor desempenho nos testes de conhecimento, menor tempo de instrução e maior eficiência. Ainda nas explanações realizadas por esse segundo grupo, observou-se o raciocínio baseado em princípios, ao passo que o primeiro grupo, expressou-se de maneira mais superficial, baseando-se em procedimentos.

O experimento de Salden et al. (2010 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011), foi aplicado a alunos de um curso superior com problemas relacionados à geometria. O objetivo era enfraquecer a orientação baseando-se na performance de resolução de problemas. Foram criados três grupos, um utilizando resolução de problemas, um com enfraquecimento de orientação fixo e o terceiro com enfraquecimento de orientação adaptado ao aluno. O terceiro grupo obteve os melhores resultados em testes de desempenho tanto imediatos quanto após uma semana da instrução.

Em uma série de estudos, segundo Sweller, Ayres e Kalyuga (2011), é apresentada a utilização de uma técnica denominada *first-step*, que consiste em apresentar um problema parcialmente resolvido ou em aberto, e solicitar ao estudante qual o próximo passo na resolução. Um aluno experiente descreveria a solução diretamente em um passo bem a frente, enquanto um aluno novato descreve passos isolados, simples ou aleatórios. Uma variação é a utilização/apresentação de alternativas para os alunos, incluindo possibilidades como “não sei”.

O estudo de Kalyuga e Sweller (2004 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011), utilizou-se de um tutor inteligente que apresentava uma transição gradual de exemplos trabalhados até a resolução de problemas sem orientação, aplicado a equações algébricas. A determinação do estágio inicial do estudante foi feita através de *first-step*. Ao final de cada uma das três fases, utilizando-se de um teste diagnóstico, mais material poderia ser apresentado. Para alunos novatos foram apresentados exemplos resolvidos e solicitada a resolução de um problema similar. Para alunos intermediários, foram utilizados

problemas incompletos, e solicitados a terminar. Com a evolução, menos instruções foram fornecidas. E o estágio final, para alunos avançados, envolvia a resolução de exercícios sem ajuda. Resultou em significativos ganhos de conhecimento.

Outra possibilidade desenvolvida pelos mesmos autores, é a de combinar medidas de carga cognitiva com um ranqueamento da dificuldade das tarefas. Assume-se que a experiência é associada não somente a resultados positivos em testes de performance mas também a baixos níveis de carga cognitiva, pois o conhecimento armazenado na memória de longo prazo reduz a demanda da memória de trabalho, conforme o princípio da organização ambiental e vinculação.

A principal condição de aplicabilidade apontada pelos autores para o efeito de enfraquecimento de orientação é que haja uma alta carga cognitiva intrínseca e que é uma consequência direta do efeito reverso de experiência. A maior implicação instrucional é a necessidade de dinamicamente alterar métodos instrucionais e níveis de orientação de acordo com a experiência do aluno durante uma seção de aprendizagem. Para alunos novatos recomenda um suporte instrucional detalhado. Para intermediários, uma combinação de orientação externa direta de resolução de problemas. Para avançados, a prática de resolução de problemas.

Os autores abordam o efeito de imaginação. Imaginar é a reprodução mental de um procedimento ou conceito. Diferente de outros efeitos abordados não busca alterar os materiais apresentados, mas encoraja os alunos a ter um processo mental apropriado. O efeito de imaginação ocorre quando ao imaginar um conceito ou procedimento resulta em melhor aprendizado do que estudar o mesmo procedimento ou conceito. É observado apenas em alunos com maior conhecimento no tema a ser abordado/estudado.

O efeito de autoexplicação teve o seu desenvolvimento iniciado e pesquisado fora do contexto da TCC. No entanto, os autores dizem que ele está relacionado ao efeito de imaginação, pois normalmente envolve imaginar um procedimento ou processo, e junto a isso, relacioná-los a princípios conhecidos da área em estudo.

Um exemplo citado é o experimento de Atkinson et al. (1994 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011), no qual são usados computadores e uma estratégia de comandos/perguntas ao ensinar Teoremas de Probabilidade. A um grupo foi pedido que se autoexplicasse cada etapa de solução e para identificarem o princípio envolvido (uma lista prévia foi fornecida). Esse se saiu muito melhor que o grupo de controle.

Como condição de aplicabilidade do efeito de imaginação e de autoexplicação, o autor pondera por um elevado nível de interatividade de elementos e que é mais efetiva para alunos com relativamente alto nível de conhecimento a priori sobre o tema a ser aprendido.

Em relação às implicações instrucionais, os autores apontam que uma vez que o aluno tenha suficiente nível de conhecimento para imaginar conceitos e procedimentos complexos, ele deve ser encorajado a fazê-lo. Autoexplicações podem facilitar a aquisição de conhecimento e entendimento. Encorajar os alunos a fazê-lo, especialmente quando usar exemplos resolvidos. Esses métodos são tidos como prática de algo, assim, fortalecendo os esquemas mantidos na memória de longo prazo.

O efeito de interatividade de elementos pode ser observado em um material instrucional, o qual tem muitos elementos interagindo que são essenciais e que devem ser simultaneamente processados pela memória de trabalho para serem compreendidos, e posteriormente armazenados na memória de longo prazo como esquemas. Uma vez aprendido, esse pode ser utilizado em processamentos futuros da memória de trabalho como sendo um único elemento, conforme o princípio da organização ambiental e vinculação. O desafio é como ensinar novos “conteúdos” complexos e com alta interatividade de elementos que apresentam uma demanda de processamento maior que a capacidade da memória de trabalho.

Relacionado a este desafio, os autores apresentam que a carga cognitiva total consiste da carga cognitiva estranha, mais a carga cognitiva intrínseca. A carga cognitiva intrínseca é determinada pelo nível de interatividade de elementos de informação essencial. E justamente a carga cognitiva intrínseca alta é a base de grande parte dos demais efeitos estudados.

O autor passa a mapear a interatividade entre elementos e os outros efeitos já abordados. Sweller e Chandler (1994, 1996 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) testaram os efeitos de divisão de atenção e redundância, associados à aprendizagem de aplicativos computacionais usando manuais e computadores. Foram encontrados melhores resultados, eliminando-se o *hardware* durante o período inicial de instrução, e, substituindo-o por diagramas que integram explicações textuais e diagramas no manual. O *hardware* em si é redundante.

Aumentos nos níveis de interatividade de elementos aumentam a dificuldade de compreensão. Se o número de elementos excede a capacidade da memória de trabalho, o material não pode ser entendido até que alguns dos elementos sejam incorporados a esquemas que

podem então ser considerados como um único elemento. Marcus et al. (1996 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) apresenta um estudo com alunos de escola primária lidando com problemas de resistores elétricos. Um grupo usou diagramas e outro texto descritivo para os problemas. Como resultado obteve-se que com um grande número de elementos interagindo, há uma maior carga cognitiva e foi mais difícil de entender. O uso de diagramas reduziu a carga cognitiva e melhorou o entendimento, comparado ao grupo com texto.

Tindall-Ford, Chandler e Sweller (1997 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) encontraram fortes efeitos em favor do formato de modalidade (*dual-modality*) quando diagramas ou tabelas são apresentados incluindo-se a narração do texto comparado ao texto escrito usado isoladamente. Este efeito foi obtido somente para materiais com alto nível de interatividade de elementos.

O nível de interatividade de elementos é dependente do nível de experiência. Quando o nível de experiência aumenta, a interação entre elementos pode ser incorporada a esquemas e pode ser tratada como um elemento simples. Kalyuga, Chandler, e Sweller (2001 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) utilizaram exemplos trabalhados na construção de equações para circuitos de relés. Ao lidarem com tarefas/circuitos com alto nível de interatividade de elementos, o efeito reverso de experiência foi observado.

A principal condição de aplicabilidade apresentada é que este efeito está baseado na interação entre os efeitos da carga cognitiva e fatores específicos, neste caso a interatividade de elementos está associada com a carga cognitiva intrínseca. Uma consideração óbvia é o nível de experiência do aprendiz. O mesmo material pode ter alta interatividade entre elementos para um novato, porém baixa para um aprendiz mais experiente, isso porque para o experiente a interação entre os elementos já está incorporada a esquemas na memória de longo prazo, reduzindo a demanda da memória de trabalho. Também, a carga cognitiva intrínseca não deve exceder a capacidade da memória de trabalho.

Como implicação instrucional, os mesmos autores explanam que o efeito de interatividade de elementos está centrado na capacidade da memória de trabalho. Se a carga cognitiva intrínseca é baixa, pode haver um bom nível de carga cognitiva estranha com a qual o aprendiz poderá ocorrer. Mas se a carga cognitiva intrínseca é alta, uma técnica cognitiva adequada deve ser aplicada, como visto nos efeitos anteriores.

A complexidade é definida através da interatividade de elementos e da carga cognitiva intrínseca. Informações a serem ensinadas com grande interatividade de elementos representam a categoria de maior interesse para a teoria da carga cognitiva. A carga estranha pode ser trabalhada através do *design* instrucional, onde subsidiado por um efeito apropriado pode ser reduzida. Já a intrínseca somente pode ser reduzida/aumentada ao alterar-se o que será ensinado, ou ao alterar o próprio conhecimento do aprendiz.

A otimização da carga cognitiva intrínseca é de suma importância. São apresentados pelos mesmos autores estudos, em que ela foi reduzida e aumentada. A redução da carga cognitiva, em geral, segue uma sequência na qual parte-se de um processo simples para um complexo, com várias denominações para descrever este método como: pré-treinamento, foco em subobjetivos e a separação de procedimentos de conceitos. O aumento da carga cognitiva intrínseca foi acompanhado pelo incremento da variabilidade dos exemplos.

Apresentam os autores que a carga cognitiva é dependente do conhecimento do aprendiz. Para aprendizes com pouco conhecimento em determinada área, a utilização de estratégias e tarefas, partindo-se de “uma parte para o todo” ou exemplos trabalhados, são benéficas. Isso, pois a carga cognitiva em uma primeira atividade é reduzida, com menor interatividade de elementos, possibilitando o entendimento e a fixação de esquemas parciais. Aprendizes com um conhecimento maior podem lidar com um maior número de elementos interagindo sem impor uma carga elevada à memória de trabalho. Se a interatividade de elementos é baixa, o aprendizado pode ser facilitado aumentando a carga cognitiva através de um aumento da variabilidade de exemplos. Com exemplos variados, a interatividade de elementos e a carga cognitiva podem vir a utilizar toda a memória de trabalho, levando a um incremento da aprendizagem.

Abordam ainda dois efeitos que estão em fase inicial de investigação e carecem de maiores detalhamentos: a informação transiente e a memória de trabalho coletiva.

O efeito da informação transiente é definido pelos autores como sendo a perda de aprendizagem, devido a informação desaparecer antes de o aprendiz ter tempo para adequadamente processar, ou criar uma ligação entre a memória de longo prazo e a informação. Além desta transiência, deve ainda conter muita informação e alta interatividade de elementos.

A tecnologia moderna leva o sujeito a produzir informação transiente. Os autores apontam dois grandes grupos, o primeiro relacionado ao efeito de modalidade, no qual se transforma texto escrito em falado, e o segundo, a informação gráfica estática transformada em informação animada. Em favor da informação animada, há estudos que recomendam que haja forte correspondência entre a estrutura e o conteúdo da animação, e, que a animação deve ser facilmente percebida e entendida. Mas estes, não garantem a superioridade de animações. Outros estudos apontam que diagramas estáticos levam a uma aprendizagem mais ativa. Em uma sequência de diagramas estáticos, os estudantes devem mentalmente integrar a informação para criar uma representação da dinâmica do processo.

Um caso especial refere-se a animações com movimentos humanos. Os autores corroboram com outros autores da área de que a imitação de movimentos humanos e suas habilidades motoras é uma tarefa biologicamente primária, desta forma resultando em uma menor sobrecarga da memória de trabalho e facilitando o seu aprendizado.

A principal implicação instrucional, segundo os autores, refere-se à cautela de se utilizar de recursos tecnológicos, através da qual pode ser introduzida a transiência da informação, em especial através da fala e de animações.

O efeito da memória de trabalho coletiva, de acordo com os autores, ocorre quando aprendizes obtêm melhor resultado no aprendizado através de trabalho colaborativo comparado ao estudo individual. Conforme a revisão de literatura de Kirschner, Paas, e Kirschner (2009 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) apresentam que o valor da aprendizagem colaborativa é inconclusivo. Encontraram resultados que apontam que estudantes se tornam ativamente engajados no processo, favorecendo habilidades metacognitivas. Em contra ponto, outros estudos apontam a aprendizagem colaborativa como ineficiente, ao considerar os recursos investidos, bem como, levam alguns alunos a se tornarem dependentes de colegas, aproveitando-se deles, com pouco envolvimento pessoal na colaboração.

Esse efeito é indicado para tarefas com altos índices de interatividade de elementos (SWELLER AYRES e KALYUGA, 2001). Mas o custo imposto pelas transações associadas à aprendizagem colaborativa devem ser consideradas em comparação à aprendizagem individual. A implicação instrucional é que a memória coletiva de trabalho pode ser usada para distribuir a carga cognitiva quando

solicitado ao aprendiz a realização de tarefas complexas, e sob condições apropriadas, pode-se melhorar a aprendizagem.

Na Tabela 2 fornecem-se um breve sumário destes efeitos da TCC.

Tabela 2: Sumarização dos efeitos da TCC.

Efeito	Descrição
Sem objetivo específico	Um problema é apresentado sem um objetivo específico.
Exemplo trabalhado e de problemas a completar	Atividades resolvidas ou parcialmente resolvidas.
Divisão de atenção	Refere-se a forma de apresentação do material, o qual deve ser o mais integrado possível.
Modalidade	Busca valer-se dos canais visuais e auditivos para facilitar a aprendizagem.
Redundância	Fontes de informação que exploram canais diferentes são apresentadas simultaneamente, mas podem ser entendidas separadamente.
Reverso de experiência	Baseia-se na combinação de materiais e aprendizes, onde informações essenciais para um novato podem ser redundantes para um aluno com maior <i>expertise</i> .
Enfraquecimento de orientação	A ajuda ou orientação a alunos deve diminuir conforme sua experiência aumenta.
Imaginação e Autoexplicação	Reprodução mental de um conceito ou procedimento, podendo relacioná-lo a um princípio da área em estudo.
Interatividade de elementos	O aprendizado de materiais muito complexos pode ser facilitado pela forma de sua apresentação ou aumentando a experiência do aluno.
Informação transiente	Perda de aprendizagem devido a informação desaparecer da memória de trabalho antes de criar um vínculo com a memória de longo prazo.
Memória de trabalho coletiva	Quando aprendizes obtêm melhor resultado no aprendizado através de trabalho colaborativo em detrimento a estudar sozinho.

Fonte: Adaptado de Sweller, Ayres e Kalyuga (2011).

4 PERCURSO METODOLÓGICO

Para elaboração desta dissertação, inicialmente, foram conduzidas duas etapas simultâneas: uma análise profunda do referencial sobre a TCC e uma revisão do estado da arte, em se tratando de sistemas tutores inteligentes, com o objetivo de evidenciar a produção acadêmica referente à inserção de STIs. Em especial, aqueles empregados ao ensino de ciências, no contexto de publicações brasileiras e internacionais. O resultado de ambos e a explicitação da metodologia utilizada para a revisão do estado da arte em STI pôde ser observado nos capítulos anteriores desta dissertação.

Estas duas etapas, bem como a formação em Ciência da Computação e a experiência profissional do autor em análise de sistemas, servem de base para a proposição de uma arquitetura para um STI. Com os resultados da revisão do estado da arte em STI podem ser destacados dois aspectos: a) a ausência de estudos voltados à educação científica e tecnológica; b) não se identificou nenhum STI que foi desenvolvido ou projetado a partir do referencial da TCC. Apenas um trabalho apresentou referência a algum aspecto dessa teoria, nesse caso a memória de trabalho, em um dos doze critérios de avaliação da interface de um STI, entretanto não se aprofundou em qualquer sentido na sua utilização (MORAIS e JAQUES, 2013). O referencial teórico apresenta, ainda, duas investigações promissoras com a utilização de STIs, os trabalhos de Renkl et al. (2007 apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) e Salden et al. (2010, apud Sweller, Ayres e Kalyuga, 2011) apresentados anteriormente, ao considerarem a utilização do efeito de enfraquecimento de orientação. Não foram apresentadas características das arquiteturas utilizadas. No entanto, a arquitetura que está sendo proposta nesta dissertação busca integrar vários outros efeitos e princípios da TCC a um STI, os quais serão discutidos no próximo capítulo.

Para elaborar uma proposta de arquitetura, utilizar-se-á os efeitos/princípios da TCC e os resultados das investigações do estado arte em STI.

O processo de desenvolvimento de *software* é uma tarefa complexa. O seu sucesso depende de uma série de fatores que ocorrem durante todo o processo. A literatura especializada aponta vários modelos como: em cascata, prototipagem, evolucionário, baseado em

componentes, *extremme programing* e processo unificado. A maioria destas propõe utilizar a linguagem UML (*Unified Modeling Language*).

A obra de Pressman (2011) mostra que na década de 90 Grady Booch, Jim Rumbaugh e Ivar Jacobson desenvolveram a UML com ajuda da comunidade de desenvolvimento de *software*. A UML 1.0 foi apresentada ao OMG (*Object Management Group*) em 1997, que é uma associação sem fins lucrativos dedicada a manter especificações para a indústria de computadores. O padrão atual⁵ é a UML 2.4 e agora também é um padrão ISO (*International Organization for Standardization*).

Esta é uma linguagem padrão utilizada na área de análise de sistemas que define uma série de artefatos que ajuda na tarefa de modelar e documentar os sistemas orientados a objetos. Pressman (1995) aponta que os modelos utilizados no processo de desenvolvimento de *software* devem ser capazes de modelar as informações, as funções e subfunções do sistema bem como seu comportamento. A UML define vários diagramas, com propósitos distintos. Desde diagramas simples, que permitem ao usuário verificar se as funcionalidades que deseja estão contempladas no projeto de *software* a ser desenvolvido, até diagramas extremamente técnicos, os quais definem e documentam detalhes de implementação, destinados à equipe de desenvolvimento do *software*.

Com o propósito de documentar e apresentar uma proposta de arquitetura utiliza-se um artefato da linguagem UML, que é o Diagrama de Casos de Uso. Este também foi utilizado nos estudos de Ramos e Oliveira (2009) e Frozza, Silva e Schreiber (2011), discutidos nos referenciais teóricos ao tratar de STIs. Ribeiro (2015) explica que é um diagrama extremamente simples e útil, destacando três aspectos: a) auxiliam na definição de requisitos; b) facilita a comunicação com os clientes: devido à sua simplicidade, não exige conhecimentos técnicos, o que auxilia o pessoal técnico na comunicação com os clientes; c) possibilita a geração de casos de teste a partir da junção de diferentes cenários para um mesmo caso de uso.

O diagrama de casos de uso é um diagrama a ser utilizado nas fases iniciais de concepção e análise do projeto de desenvolvimento de um *software*. É um diagrama simples, de fácil compreensão, que auxilia a comunicação entre analista e cliente. Pressman (2011) diz que o diagrama de casos de uso documenta o que o sistema faz de um ponto de vista do usuário. Descreve as principais funcionalidades do sistema e a interação dessas funcionalidades com os seus usuários. Não é intenção

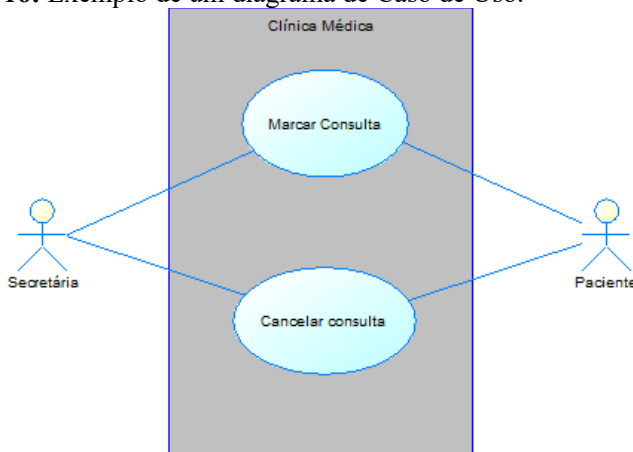
⁵Conforme: <http://www.omg.org/spec/UML/>

do diagrama de casos de uso o aprofundamento em detalhes técnicos que definem como o sistema faz. Normalmente é composto por quatro elementos: a) Cenário: descreve de forma textual uma sequência de eventos que ocorrem na interação com o sistema; b) Ator: Indica um usuário do sistema, pode ser humano ou outro sistema (representado por um boneco, por exemplo); c) Caso de uso: Simboliza uma grande funcionalidade do sistema (são as elipses com um rótulo significativo, normalmente há vários); d) Comunicação: é o que liga um ator a um caso de uso ou entre os casos de uso (as linhas e setas).

A documentação dos casos de uso, segundo Paula Filho (2011), deve compreender uma descrição de sua funcionalidade. O comportamento de determinado caso de uso pode ser descrito de várias maneiras, por exemplo, com descrições textuais. Pressman (2011) apresenta que a maior contribuição dos casos de uso para o processo de desenvolvimento de software é a descrição textual de cada caso de uso e não o diagrama geral de caso de uso. Por meio destas descrições que se pode formar uma ideia clara dos objetivos de um sistema.

Para exemplificar, podemos usar um cenário de uma clínica médica onde há um sistema para controlar a marcação das consultas. As consultas podem ser marcadas e canceladas tanto pelo cliente quanto pela secretária da clínica. O diagrama de caso de uso desse cenário pode ser observado na Figura 16.

Figura 16: Exemplo de um diagrama de Caso de Uso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para compor a arquitetura proposta, em especial a inteligência do STI, faz-se necessário identificar os problemas ou erros cometidos pelos alunos no processo de aprendizagem de um tema específico, relacionando causas e soluções. Para a realização desta etapa espera-se a identificação destes problemas na literatura especializada publicada sobre o tema a ser abordado.

Uma vez proposta a nova arquitetura, serão desenvolvidos alguns materiais instrucionais a fim de exemplificar e demonstrar a sua utilização. Para isto, a partir dela e considerando-se um processo de desenho didático, faz-se necessário: a) identificar as unidades de conteúdo; b) propor apresentações para as mesmas; c) propor dados para o modelo de estudante; d) Simular as interações de um estudante com o STI.

Conforme Filatro (2008) o desenho didático pode ser definido como:

A ação intencional e sistemática de ensino que envolve o planejamento, o desenvolvimento e a aplicação de métodos, técnicas, atividades, materiais, eventos e produtos educacionais em situações didáticas específicas, a fim de promover, a partir dos princípios de aprendizagem e instrução conhecidos, a aprendizagem humana.

A autora aponta que este processo, enquanto conjunto de atividades, envolvem etapas de análise, *design*, desenvolvimento, implementação e avaliação, discutidas a seguir.

A fase de análise consiste em entender um problema educacional e projetar uma solução. No contexto da presente proposta de arquitetura de STI parte-se da TCC e do estado da arte em STIs. Contribuem ainda para a identificação das dificuldades apresentadas pelo público-alvo em relação ao tema proposto.

A fase de *design* busca planejar a situação didática propriamente dita, com o mapeamento e sequenciamento dos conteúdos, definição de estratégias e atividades de aprendizagem, a seleção de mídias e ferramentas. No contexto da presente proposta a fase de *design* é contemplada no detalhamento da arquitetura propriamente dita e da proposta de aplicabilidade.

A fase de desenvolvimento, que em geral consome a maior parte

do tempo e orçamento de um projeto instrucional, compreende a produção e/ou adaptação de materiais didáticos (impressos ou virtuais), a parametrização de ambientes (como por exemplo o Moodle) e a preparação de suportes pedagógico, tecnológico e administrativo. No contexto da presente proposta de arquitetura de STI um grande esforço será empreendido para a exemplificação de materiais didáticos a serem utilizados com a arquitetura proposta. Considerando que tal ferramenta de STI não existe, as atividades de parametrização de ambientes e preparação de suportes, bem como as etapas subsequentes que propõe o desenho didático não podem ser alcançadas.

A fase de implementação é a situação didática em si, quando ocorre a aplicação do desenho didático proposto. Na fase de avaliação buscam-se considerações sobre sua efetividade, com ênfase nos resultados de aprendizagem dos alunos (inclui o diagnóstico prévio do conhecimento dos alunos).

A fim de subsidiar a fase de desenvolvimento da proposta de aplicabilidade serão utilizados *storyboards* em conjunto com uma análise descritiva detalhada. Filatro (2008) apresenta que no aprendizado eletrônico *storyboards* podem ser usados para detalhadamente especificar os conteúdos de um curso, incluindo imagens, textos, sons, orientações de atividades e a sequência em que serão exibidos no produto final. Corroboram com essa proposta os autores Amaral, Oliveira e Bartholo (2010) ao sugerir a sua utilização para o desenvolvimento de objetos de aprendizagem. Os autores caracterizam os *storyboards* como sendo um dos pontos centrais para o fluxo de colaboração entre equipes multidisciplinares, envolvendo equipe pedagógica, de *design* e técnica. Sua elaboração ajuda a visualizar o produto final que será produzido, potencialmente reduzindo frustrações, erros e tempo de produção. O *storyboard* se destina a determinar o conteúdo que será apresentado em cada uma das páginas (protótipos de tela) e criar vínculos simples que permitam sua navegação.

Assim, de forma congruente à metodologia apresentada, no próximo capítulo será discutida a proposta de arquitetura propriamente dita bem como detalhadas suas características.

5 UMA PROPOSTA DE ARQUITETURA PARA UM SISTEMA TUTOR INTELIGENTE

O presente capítulo tem por objetivo apresentar uma proposta de arquitetura para um Sistema Tutor Inteligente, a qual será organizada na forma de um diagrama de Casos de Uso. Cada um será analisado detalhadamente e caracterizado. Para este propósito, conforme descrito na seção do percurso metodológico, parte-se do estudo da TCC e do estado da arte em STIs, os quais subsidiam a busca pela resposta ao problema desta pesquisa (seção 1.2).

Diante do exposto, a Figura 17 apresenta o diagrama de Casos de Uso pensado para o cenário proposto, que pode ser assim definido:

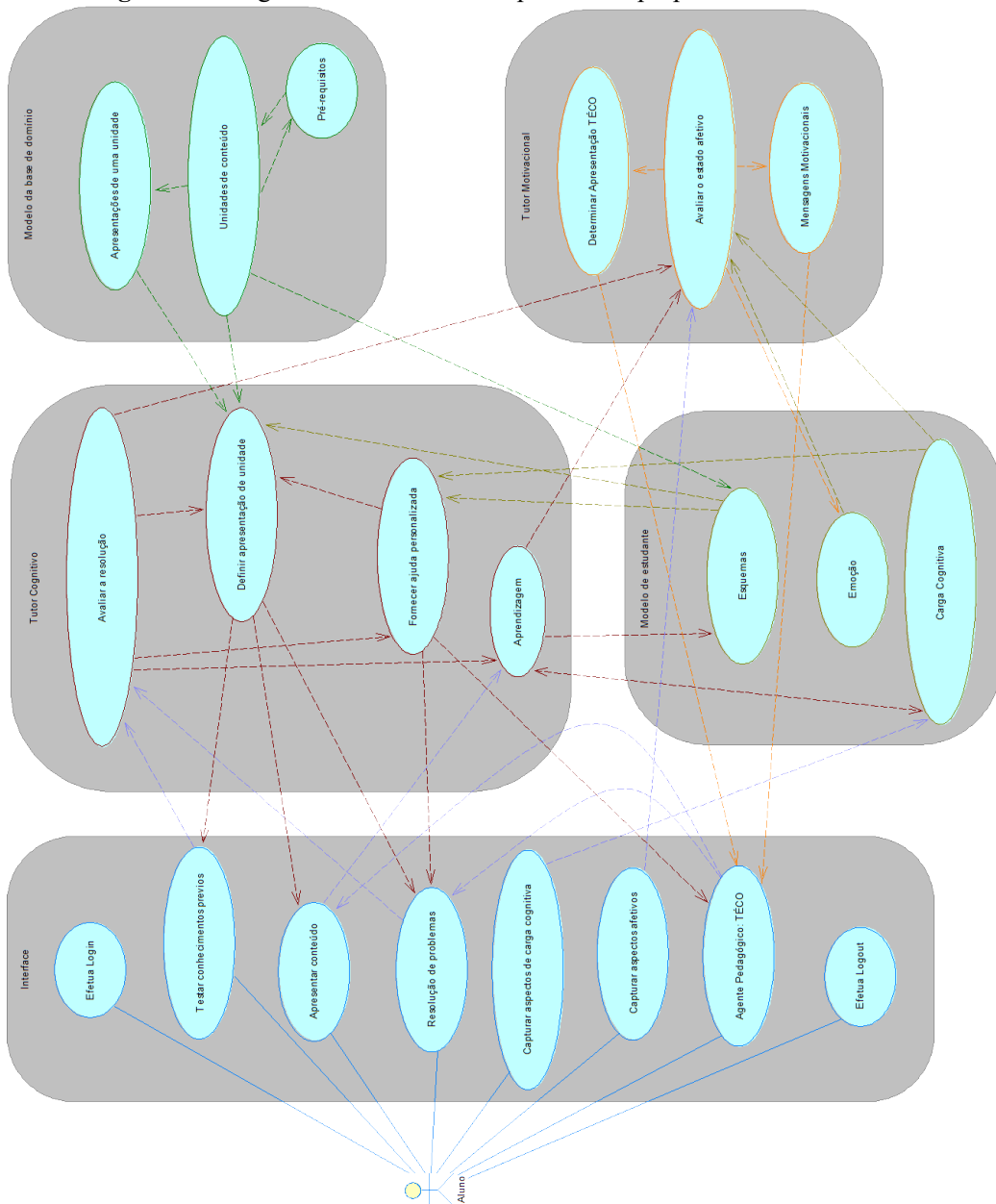
“O público-alvo são alunos do primeiro ano do ensino médio. Estes estão familiarizados a utilizar e interagir com aplicações genéricas a computadores pessoais. A utilização do STI é prevista com a utilização de um computador por aluno, onde além de equipamentos usuais (teclado, mouse, monitor) propõe-se usar fones de ouvido e webcam. Cada aluno atuará diretamente com o STI.

Na perspectiva pensada neste trabalho, de propor o desenho didático para uma arquitetura para um STI, a ideia não é a de isolamento do aluno e de ausência de interação com professores e colegas. A sua inserção é pensada para um momento pedagógico específico dentro de um contexto metodológico que pressupõe a colaboração e a interação entre pessoas do cenário educacional.

A proposta de aplicação tem como foco a área de domínio da física: óptica geométrica, proporcionando ao aluno momentos que visam à aprendizagem ou revisão destes conteúdos. Estes serão adaptados às características individuais dos alunos buscando atender aos princípios e efeitos da TCC, bem como, as características de um STI (ambos detalhados nas seções anteriores).

Os resultados de todo processo de interação deverão ser armazenados para análise futura, tais como todas as avaliações, as unidades de conteúdos apresentados, exercícios resolvidos, pontos onde houve dificuldades, as intervenções, bem como os dados do modelo de estudante. Todos estes com sua variação ao longo do tempo.”

Figura 17: Diagrama de Casos de Uso para o STI proposto.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os retângulos na cor cinza apenas agrupam os casos de uso conforme o modelo de arquitetura tradicional de STI. Cada qual poderia ser implementado através de agentes e é necessária a apresentação de suas principais funcionalidades. Ainda há existência de um agente pedagógico, controlado por dois tutores, o motivacional e o cognitivo.

Observa-se mesmo assim, a complexidade de interação entre os casos de uso. As setas pontilhadas são ligações estendidas, que podem ser interpretadas como fluxo de informações. Passar-se-á a analisar individualmente os seus requisitos funcionais. Para fins de organização e facilitar o entendimento, serão apresentados em conjunto aqueles de cada agrupamento do modelo de arquitetura tradicional de STI e será detalhada a sua relação ou comunicação entre distintos agrupamentos. A ordem de apresentação será: primeiro os do modelo da base de domínio, seguido daqueles do modelo de estudante, interface, tutor cognitivo e tutor motivacional.

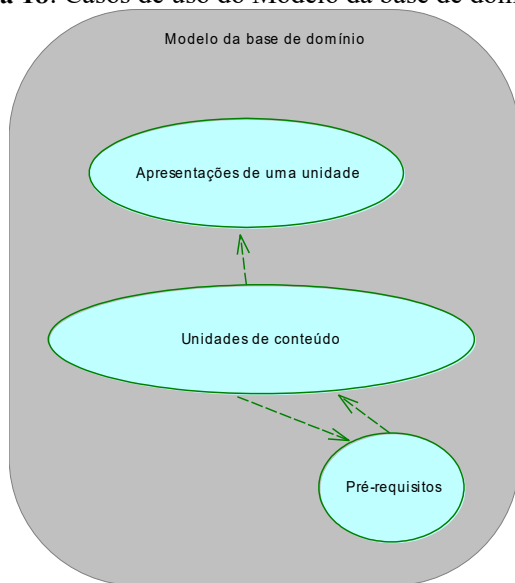
De acordo com o que foi discutido no referencial teórico, há estudos que incluem aspectos motivacionais, por isso, a utilização e aproveitamento do tutor motivacional apresentam grande potencial, mas não será aprofundado neste trabalho, que tem por objetivo maior o tutor cognitivo. Limita-se a apresentar os resultados identificados para o tutor motivacional encontrados durante os estudos conduzidos com a finalidade de elaboração do tutor cognitivo. A efetiva utilização do tutor motivacional carece de maiores estudos.

Os casos de uso do modelo da base de domínio (Figura 18) referem-se a como estará estruturado o conhecimento a ser transmitido aos alunos, visando atender ao princípio do empréstimo e reorganização.

As “Unidades de conteúdo” representam os tópicos a serem ensinados propriamente ditos. A granularidade destes propõe-se que seja bem pequena, pois influenciará todo o trabalho dos tutores inteligentes.

Já em “pré-requisitos” se espera indicar a forma como o conhecimento “normalmente” é construído. Se houver esquemas que podem ser adquiridos previamente, eles serão definidos através da ordem das unidades de conteúdo. Se algum tópico apresenta dependência a outro, este será definido através dos pré-requisitos. O intuito não é o de bloquear acesso a certos conteúdos, mas o de organizar o processo de ensino, estruturando-o de forma lógica e compreensível.

Figura 18: Casos de uso do Modelo da base de domínio



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a organização dos pré-requisitos e das unidades de conteúdo é recomendável que seja realizado de acordo com as recomendações de especialistas ou de acordo com publicações relevantes, discutidas adiante na proposta de aplicabilidade.

Definidas as unidades de conteúdo, é possível elaborar distintas apresentações de um mesmo conteúdo, que podem envolver uma ou mais unidades. O caso de uso “apresentações de uma unidade” refere-se às várias apresentações que estão a ela relacionadas. Estarão classificadas em dois grandes grupos: apresentação de conteúdo e resolução de problemas. A primeira inclui um simples texto, um texto narrado, uma figura ou diagrama (potencialmente com uma explicação narrativa), um exemplo, um problema resolvido. A segunda consiste de atividades a serem realizadas pelos alunos, como uma questão de múltipla escolha, a apresentação simultânea de um exemplo e um exercício similar, um exercício parcialmente resolvido, um problema em aberto, um vídeo, uma simulação e outros.

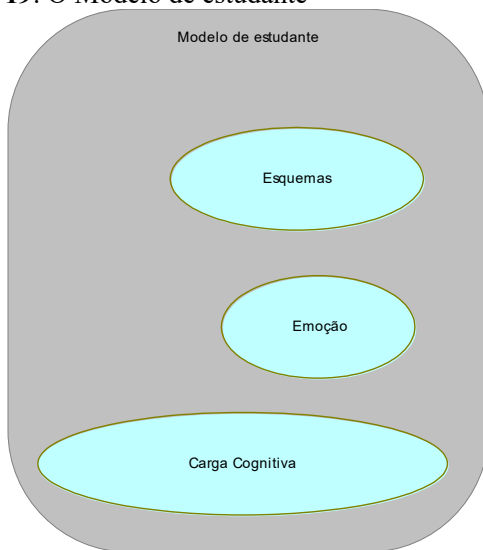
Como exemplo, o livro didático que é normalmente visto como eficiente no processo de ensino. O objetivo é o de extrair os conteúdos e a forma como são apresentados, organizando-os nas menores unidades

de conteúdo possível, e é claro, tornando-os acessíveis e utilizáveis pelo STI.

No entanto, não nos restringimos a esse exemplo. Potencialmente melhor seria considerar as distintas explicações fornecidas por um professor especialista a alunos com distintas dificuldades, e transformá-las em material instrucional, o que pode levar a um aprendizado mais eficiente e flexível a diferentes níveis de conhecimento.

Outro aspecto a ser considerado na elaboração dos materiais instrucionais que compõe a apresentação de uma unidade são os vários efeitos da TCC discutidos anteriormente, como efeito sem objetivo específico, exemplo trabalhado, problemas a completar, divisão de atenção, modalidade, redundância, imaginação e autoexplicação. Não obstante e considerando a individualidade de um aluno, em especial a sua *expertise*, nem todos os efeitos podem ser atingidos apenas através da apresentação do material, como o efeito de enfraquecimento de orientação, reverso de experiência e interatividade de elementos. Mas considerando-os desde essa fase e com as demais interações e casos de uso a serem discutidos posteriormente e que compõem a arquitetura do STI proposto, espera-se atingir bons resultados de aprendizagem.

Figura 19: O Modelo de estudante



Fonte: elaborado pelo autor.

No modelo de estudante (Figura 19) têm-se às informações individuais que serão mantidas para cada um dos estudantes. Essas informações são a base para que o STI tome decisões de forma personalizada a cada estudante.

Nesse contexto, o caso de uso “esquemas” é usado para representar e manter quais esquemas relevantes no contexto do STI foram adquiridos pelo aluno. A relação desses esquemas é gerada a partir das unidades de conteúdo. No modelo proposto e para fins de funcionamento interno do STI, aqui estará mapeado o conhecimento adquirido por cada um dos estudantes. Para cada unidade de conteúdo, o nível de experiência do aluno será mapeado. Será utilizada a categorização de experiência proposta por Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) em três níveis: novato, intermediário e experiente. Cada um desses níveis será subdividido em três níveis internos. Têm-se dois objetivos com isso: a) permitir uma maior fixação do esquema pertinente a determinada unidade de conteúdo, pois serão trabalhadas diferentes apresentações do conteúdo; b) evitar que por sorte, como ao chutar uma resposta, o aluno venha a ser considerado proficiente em determinada unidade de conteúdo.

De forma análoga, o caso de uso “Emoção” é usado para representar e manter o estado emocional do aluno. O objetivo em trabalhar com a sua emoção é verificar se está apto e motivado a determinada atividade e realizar ações de modo a encorajá-lo a estudar. Como apontado por Frozza, Silva e Schreiber (2011) e González e Tamariz (2014) para a inferência de emoções dos estudantes pode dar-se através de comportamento observável, isto é, através das interações entre o usuário e a interface. Uma proposta que González e Tamariz (2014) apresentam é a utilização do modelo OOC (Othony, Clore e Collins) amplamente utilizado em aplicações para o ensino a distância, ambientes de simulações de agentes com emoções.

Já o caso de uso “carga cognitiva” representa e mantém a carga cognitiva apresentada por um aluno em determinado momento. Percebe-se que uma maneira de representá-la é através de uma escala Likert de 9 pontos, como apresentado no referencial teórico, na seção 3.8 que trata da medida da carga cognitiva.

É ainda responsável por determinar a efetiva carga cognitiva do aluno a partir do caso de uso “Captura aspectos de carga cognitiva” junto à interface do STI e dos resultados de aprendizagem do tutor cognitivo. Cada um destes discutido detalhadamente a seguir ao se abordar os respectivos casos de uso. Os aspectos de carga cognitiva

capturados automaticamente agirão diretamente sobre os dados da carga cognitiva do modelo de estudante. A captura subjetiva, sempre que for utilizada, acarretará alteração através da realização de um cálculo, para o qual se propõe uma média aritmética entre os valores informados pelo usuário e o valor atual constante na carga cognitiva do modelo de estudante. Isto, pois o usuário pode não entender o objetivo desta funcionalidade ou escolher “brincar” com o STI, levando ao incorreto funcionamento deste.

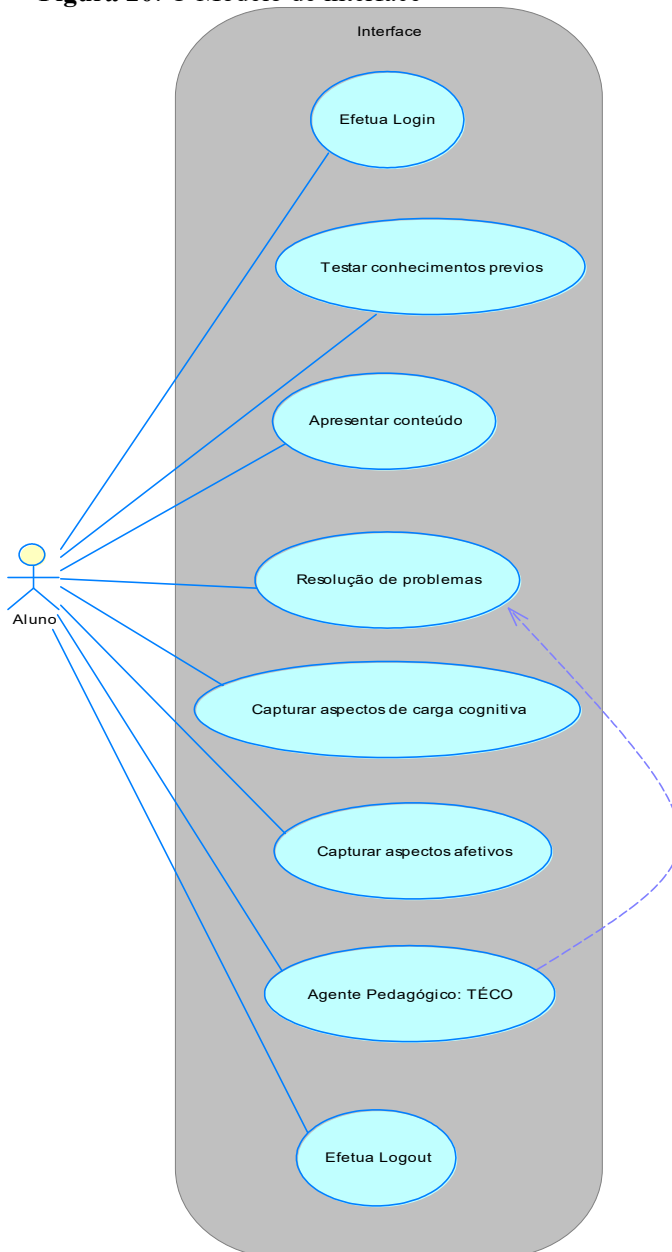
A Figura 20 apresenta o modelo de interface. Nela são apresentadas as principais funcionalidades relacionadas à interação entre o aluno e o STI. Obviamente devem existir mais elementos ou funcionalidades que possibilitem à interação entre o professor/administrador e interface do STI, viabilizando, por exemplo, o cadastramento de alunos e de novos materiais, contudo, como o foco é o processo de aprendizagem estes não serão detalhados.

O caso de uso “efetuar *login*” e “efetuar *logout*” é onde o aluno deve iniciar e terminar a utilização do STI. No primeiro, deve ser validado nome de usuário e senha, de modo a garantir a utilização individual e única do sistema. Ainda, no caso de não ser o primeiro acesso, devem ser recuperadas as informações sobre o modelo de aluno. No segundo, ao fechar o sistema executa-se automaticamente “efetuar *logout*”.

O caso de uso “Testar conhecimentos prévios” é um conjunto de telas a ser apresentado ao usuário no seu primeiro acesso após efetuar *login*. O objetivo é a buscar inferir o nível de *expertise* do usuário frente as unidades de conteúdo que compõe o STI.

A *expertise* do aluno é um ponto chave para muitos dos efeitos que a TCC apresenta. Maiores detalhes podem ser observados nos norteadores teóricos ao tratar do efeito reverso de experiência.

Para o teste de conhecimentos prévios, é indicado que em um primeiro momento se esclareça ao aluno a relevância desse processo, já que o seu resultado será usado para inferir os esquemas adquiridos pelo aluno e influenciará todo o funcionamento do STI.

Figura 20: O Modelo de interface

Fonte: elaborado pelo autor.

Para a inferência do nível de *expertise*, propriamente dito, é proposta a utilização de problemas que versem sobre as unidades de conteúdo. Podem ser utilizadas questões: de múltipla escolha (incluindo uma opção para “não sei a resposta”); A apresentação de um problema resolvido e outro semelhante para o aluno resolver; Resoluções com trechos a serem completados; Problemas totalmente em aberto. A definição de qual problema será apresentado está a cargo do caso de uso “Definir apresentação de unidade” do tutor cognitivo e será discutido adiante. A resolução ou resposta apresentada pelo aluno será repassada ao caso de uso “Avaliar a resolução” do Tutor Cognitivo (discutido adiante) com o propósito geral de corrigir e identificar eventuais incorreções e indiretamente de definir em que grau o aluno possui um esquema. Todas essas trocas de informações entre os casos de uso podem ser visualizadas na Figura 17: diagrama de casos de uso para o STI proposto.

O caso de uso “Apresentar conteúdo” é um módulo do STI com características de alterar o que é exibido (de forma análoga a um navegador *web*) e permitir a emissão de sons e fala. O seu grande objetivo é disponibilizar ao aluno, em especial àquele com baixa *expertise*, as “apresentações de uma unidade” classificadas como “apresentação de conteúdo”, visando atender o princípio do empréstimo e reorganização da TCC.

A definição de qual apresentação de uma unidade será apresentada ao aluno será realizada pelo tutor cognitivo no caso de uso “Definir apresentação de unidade”. Caso sejam definidas pelo tutor cognitivo várias apresentações de materiais, será exibido, além do material, uma listagem das apresentações da unidade e será facultado ao aluno navegar entre elas, clicando sobre a que deseja. Um protótipo para a interface do STI é apresentado na Figura 21.

O aluno ao ter realizado o estudo da unidade de conteúdo, ou, tendo sido determinado seu nível de *expertise* como maior que novato, será facultado a ele utilizar o caso de uso “resolução de problemas”. Este é um módulo do STI que além de permitir inquerir o aluno com questões basicamente em dois formatos: a) questões de múltipla escolha; b) questões que visem o desenvolvimento da resolução de uma questão. Na elaboração das questões, que serão resolvidas pelos aprendizes, é relevante que se considere e se utilize os diversos efeitos abordados anteriormente, como o exemplo trabalhado e de problemas a completar, enfraquecimento de orientação e imaginação.

Figura 21: Protótipo de um exemplo da tela principal do STI.

Nome do Aluno
[Editar meu perfil](#)
[Sair](#)

Qual o grau de dificuldade?
 Moleza Médio Difícilimo

Graduação em 9 níveis, atendendo a escala Likert de 9 pontos.

Home > [Óptica Geométrica](#) > [Formação de Imagens](#) > Exemplos Resolvidos

Exemplo 2

A partir de uma fonte de luz, e com a utilização de uma lente, como se dá a formação de uma imagem?

Resposta: Editor de Diagramas de raio de Luz

Bulbo (Fonte de Luz) Lente Convergente Tela

Você está indo bem.

Reparou que os raios de luz partem de um mesmo ponto? E que nem todos os raios de luz atingem a lente?

[Quero voltar e ver mais sobre Unidade 1.](#)
[Quero voltar e ver mais sobre Unidade 2.](#)

Todo texto informado pelo TÊCO o aluno ouvirá pelos fones de ouvido no momento em que for apresentado na tela.

Mais um Exemplo?

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao visar o desenvolvimento da resolução de questões, a interface deverá ser capaz de apresentar e permitir a resolução de distintos formatos de questões. O mais simples é a capacidade de apresentar e questionar o aprendiz com questões de múltipla escolha. Também vislumbra-se a necessidade do usuário resolver questões relacionadas à elaboração de diagramas de raios, em especial os aplicados à área da física na óptica geométrica. Para tal, espera-se que o usuário interaja com a utilização do mouse, desenhando os raios de luz. Estas questões podem ser exemplos resolvidos, estar parcialmente resolvidas (nas quais é solicitado ao aprendiz o término da resolução), ou questões em aberto (visando formar uma lista de exercícios para alunos experientes).

Uma outra possibilidade são questões cuja resolução é realizada através de um editor de equações (como discutidos nos norteadores teóricos, em especial ao tratar do Pat2Math e ANDES) e permitir de maneira fácil e intuitiva a sua escrita, da maneira mais semelhante possível ao desenvolvimento da equação com papel e lápis. Para os passos de resolução de equações, estes podem se apresentar de forma análoga aos diagramas de raios. Pode ser apresentado um problema ou equação inicial e solicitado ao usuário desenvolver a resolução de toda a

questão. Outra forma é a apresentação da equação com sua resolução parcial e a solicitar ao usuário para terminá-la. Esse término feito pelo usuário pode consistir de concluir os passos finais da resolução da equação, uma ou mais partes intermediárias desta ou uma parte inicial.

No primeiro acesso do aluno ao caso de uso “resolução de problemas” ou quando o aluno desejar, deverá ser apresentado um tutorial instruindo para a utilização da interface em questão, com exemplos e propostas simples para verificar o entendimento dos distintos formatos de questões. Deverá também ser facultado pular esta etapa.

A definição de qual problema será apresentado ao aluno estará a cargo do tutor cognitivo no caso de uso “Definir apresentação de unidade” dentre aquelas categorizadas como “resolução de problemas”. Caso sejam definidas pelo tutor cognitivo várias apresentações de materiais, será exibido além de um dos problemas, uma listagem dos problemas propostos da unidade e será facultado ao aluno navegar entre elas, clicando sobre a que deseja resolver.

Durante o processo de edição da resolução de uma questão, sempre que houver uma alteração, todos os dados referentes a resolução serão passados ao caso de uso “Avaliar resolução” do tutor cognitivo visando fornecer subsídios para o caso de uso “Fornecer ajuda personalizada”. Ambos casos de uso serão discutidos a frente junto com o tutor cognitivo.

Ainda durante o processo de resolução de um problema, o aluno terá ajuda personalizada. A definição de qual a ajuda a ser apresentada está a cargo do tutor cognitivo e tutor motivacional. A ajuda a ser fornecida ao aluno pode ser classificada quanto a forma de apresentação e quanto ao conteúdo.

Quanto a forma de apresentação contemplará dois aspectos: a) no próprio editor de resolução de equações, realçando (por exemplo, circulando em amarelo, um raio de luz incoerente ou uma incógnita e seu coeficiente) uma etapa da resolução de um problema com alguma deficiência ou erro; b) O “agente pedagógico: TÉCO” apresentará o conteúdo da ajuda de forma gradual, com pequenas pausas, em pequenos blocos logicamente constituídos, simultaneamente de forma oral e escrita em balões.

Neste mecanismo espera-se tirar proveito de três efeitos da TCC, divisão de atenção, modalidade e efeito reverso de redundância. Ao realçar no editor de equações onde está o problema, se diminui a carga cognitiva estranha gerada pela procura do erro e ao apresentar a ajuda

através da fala, espera-se diminuir a carga cognitiva imposta, tendo em vista que com a fala temos o efeito modalidade, utiliza-se do canal auditivo que é parcialmente independente ao canal visual. Ainda segundo o modelo de arquitetura cognitiva adotado pela TCC, a fala é biologicamente primária, levando uma vantagem no processo de aprendizagem. Ainda a forma como está estruturada a apresentação do conteúdo tira proveito do efeito reverso de redundância.

Quanto ao conteúdo da ajuda a ser fornecida será definida pelo tutor cognitivo no caso de uso “Fornecer ajuda personalizada” discutido adiante.

O caso de uso “Capturar aspectos de carga cognitiva” tem como objetivo permitir ao STI determinar o aumento ou diminuição da carga cognitiva apresentada pelo aluno.

A captura dar-se-á através de forma subjetiva e automatizada. Na captura subjetiva o aluno informará em uma escala Likert de 9 pontos a sua autoavaliação da carga cognitiva. O aluno poderá atualizar esses valores a qualquer momento, e será automaticamente interrogado após a apresentação de um conteúdo e depois de resolvido um problema.

Na captura automatizada será usada a *webcam* e interação com outros elementos da interface. O intuito é a partir da imagem capturada do aluno determinar se ele está observando o material apresentado em tela ou olhando para algum outro lugar. Para tal, apenas se buscará evidenciar através do reconhecimento facial, se o rosto do aluno está voltado para o monitor. No caso de não olhar para a tela, assume-se que o aluno está ocupando sua memória de trabalho com outra atividade, assim, para os fins do aprendizado proposto, aumentando a carga cognitiva estranha. Esse aumento é prejudicial ao aprendizado, pois restringe a quantidade de memória de trabalho disponível para o processamento de carga cognitiva intrínseca, e conseqüentemente relevante ao aprendizado. O que se propõe é que se permita a parametrização de valores para inferir um aumento da carga cognitiva do modelo de estudante, como por exemplo, para cada cinco segundos que o aluno estiver olhando para o lado será aumentado em um ponto da escala Likert da carga cognitiva.

A parametrização pode ser entendida como pontos de configuração do STI, para os quais ele estará preparado para funcionar com valores distintos. Por exemplo, com a condução de experimentos com grandes grupos de aprendizes do público-alvo, variando-se os valores da parametrização para determinar quais seriam ótimos. Obtendo-se ao final desse estudo valores melhores que os apresentados

no exemplo anterior, poder-se-ia substituí-los facilmente.

A interação com elementos da interface também deve ser considerada de forma automatizada para determinar a carga cognitiva do modelo de estudante. A proposta também é de permitir a parametrização de valores, em especial o tempo que aluno permanece com a mesma informação sendo apresentada na interface do STI e sem interação, como por exemplo: a cada vinte segundos que o aluno permaneça na mesma tela com a mesma apresentação da unidade de conteúdo, a carga cognitiva seja aumentada em um ponto.

Isto se justifica pois o material instrucional que compõe as distintas apresentações de unidades de conteúdo não são cadastradas com uma carga cognitiva inerente a elas. Mesmo que fossem cadastradas, seriam diferentes para diferentes alunos. Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) aponta que uma forma de determinar alterações na carga cognitiva instantânea é o monitoramento dos olhos, seguindo seu movimento, onde de forma geral longa fixação dos olhos corresponde a um maior processamento cognitivo, bem como identifica onde o aluno foca a atenção e o quão duradouro é.

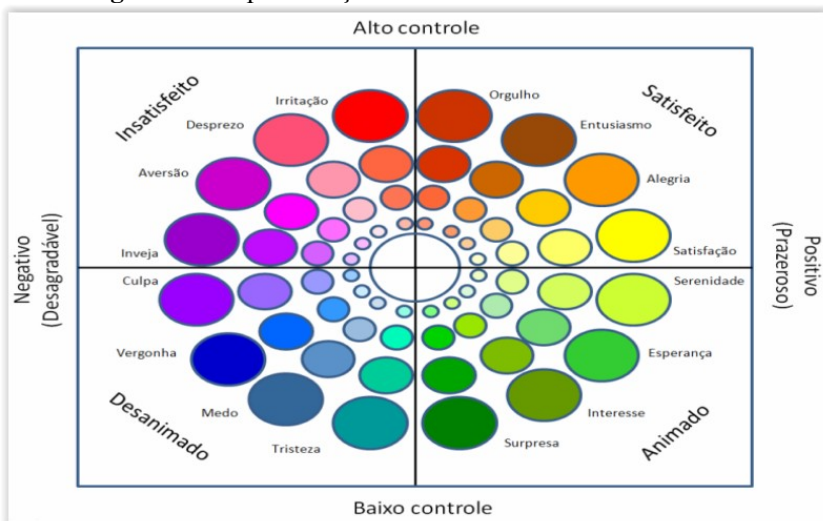
As informações capturadas sobre os aspectos de carga cognitiva serão repassadas ao “modelo de estudante” especificamente ao caso de uso “carga cognitiva”. Esse caso de uso é responsável por inferir, para fins de funcionamento do STI, a efetiva carga cognitiva associada ao aluno, que possivelmente será distinta da que o aluno informa subjetivamente. Por exemplo, se o aluno informar que a resolução de um problema apresenta nível 7 na escala Likert de 9 pontos utilizada, mas for detectado que metade do tempo o aluno estava observando algo que não é a tela, a efetiva demanda mental pode ser determinada como menos que 7. Para se chegar a tal resultado, espera-se tirar proveito de um mecanismo de parametrização (descrito anteriormente), como por exemplo, a parametrização de uma fórmula.

De forma análoga ao caso de uso “capturar de aspectos da carga cognitiva” será o “capturar aspectos afetivos”.

Na captura subjetiva de aspectos afetivos, o aluno informará qual o seu estado emocional. A classificação do estado emocional pode ser dada a partir do modelo OCC conforme Frozza, Silva e Schreiber (2011) como sendo: alegria, tristeza, expectativa, indignação, surpresa, atenção ou dúvida. Ou ainda, a partir da representação de estados de ânimo proposto por Tran (2004 apud Amorim e Bercht, 2009) apresentado na Figura 22. Na captura automatizada, a imagem da *webcam* será passada ao tutor motivacional em especial o caso de uso “Avaliar o estado

afetivo” que buscará inferir o estado de ânimo do aluno. A combinação da captura subjetiva com a captura automatizada permitirá definir o estado de ânimo efetivo do aluno.

Figura 22: Representação dos estados de ânimo



Fonte: Tran (2004 *apud* Amorim e Bercht, 2009).

Ao estar sempre presente na interface do STI, o “Agente Pedagógico: TÊCO” terá representação humanizada com diferentes expressões faciais e corporais que imitem o comportamento humano, apesar de poder não ser um humano, como uma coruja, por exemplo.

O caso de uso “Agente pedagógico: TÊCO” tem como grande objetivo realizar a maior parte da interação individualizada percebida diretamente pelo aluno e se dará através de um agente pedagógico chamado de TÊCO, já mencionado. Outros momentos em que haverá individualização da utilização do STI é na apresentação de unidades de conteúdo e no realçamento da localização do erro na resolução de problemas. Neste momento, o agente pedagógico poderá voar ou caminhar pela tela, aproximando-se do ponto da tela onde está o erro, e neste momento com ponta da asa apontar para o problema ao mesmo tempo em que apresentar o conteúdo da ajuda.

Este agente pedagógico apresentará o conteúdo da ajuda de forma

gradual, com pequenas pausas, em pequenos blocos logicamente constituídos, simultaneamente de forma oral e escrita em balões. A narração será feita através de um sintetizador de voz a partir do texto escrito. Dentro dos balões, além do texto de ajuda ou uma revisão de conceitos, poderão haver botões, visando a interação do aluno com o tutor. Podem ser botões ou ligações para levar o aluno a uma apresentação de unidade de conteúdo visando a revisão de um assunto, a resposta como sim/não ou se ele quer mais ajuda.

Neste mecanismo espera-se tirar proveito de três efeitos da TCC, divisão de atenção, modalidade e efeito reverso de redundância. Ao trazer ligações para apresentações de unidade de conteúdo em que o aluno apresenta dificuldades, se diminui a carga cognitiva estranha gerada pela procura deste material. Com a ajuda através da fala espera-se diminuir a carga cognitiva imposta, tendo em vista que com a fala pode-se ter o efeito modalidade, que utiliza-se do canal auditivo que é parcialmente independente ao canal visual. Ainda segundo o modelo de arquitetura cognitiva adotado pela TCC a fala é biologicamente primária, levando uma vantagem no processo de aprendizagem. Ainda a forma como está estruturada a apresentação do conteúdo tira proveito do efeito reverso de redundância.

Quanto ao conteúdo da ajuda a ser fornecida pelo TÉCO ao aluno será definida pelo tutor cognitivo no caso de uso “Fornecer ajuda personalizada”. Ainda apresentará mensagens de cunho afetivo definidas pelo tutor motivacional no caso de uso “Mensagens Motivacionais”. Já em “Determinar apresentação TÉCO” serão definidos aspectos humanizados a serem representados pelo agente pedagógico TÉCO, como expressões faciais e corporais.

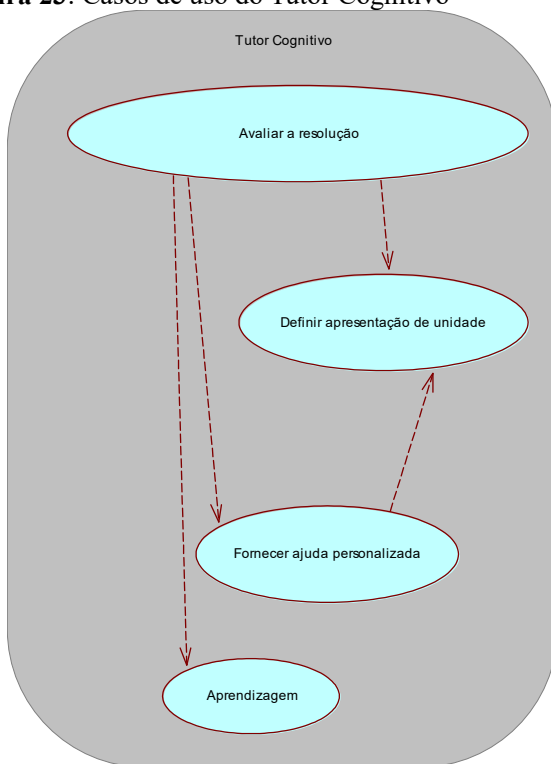
O tutor cognitivo (Figura 23) apresenta uma série de funcionalidades com o objetivo primordial de fornecer o material mais adequado possível ao estudante, tendo em vista principalmente o grau de *expertise* do aluno e a ajuda personalizada às dificuldades de aprendizagem que apresentar.

Essa combinação de materiais e aprendizes, buscando melhorar o aprendizado, remete aos efeitos de redundância, reverso de experiência e enfraquecimento de orientação da TCC.

O efeito reverso de experiência baseia-se na redundância que os mesmos materiais podem apresentar ao serem apresentados indiscriminadamente tanto a alunos novatos em uma área ou a mais experientes, isto é, já com algum conhecimento na área. Essa é uma consequência do papel central que o conhecimento já adquirido exerce

na arquitetura cognitiva humana. Uma vez que uma informação já está na memória de longo prazo, reapresentá-la gerará uma carga cognitiva estranha que potencialmente prejudicará o aprendizado. A partir do efeito reverso de experiência temos o efeito de enfraquecimento de orientação. Esse define que a ajuda ou orientação fornecidas a alunos deve diminuir conforme aumenta a sua experiência em determinada área. A ajuda fornecida refere-se não apenas a intervenção de um tutor, mas também ao próprio material utilizado.

Figura 23: Casos de uso do Tutor Cognitivo



Fonte: elaborado pelo autor.

O trabalho de Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) apresenta a caracterização da *expertise* de alunos em três níveis: novatos,

intermediários e experientes. Tomando a como base e os efeitos de *expertise* reversa e enfraquecimento de orientação, gerou-se o Quadro 1, buscando caracterizar e relacionar as apresentações de uma unidade de conteúdo e a ajuda fornecida em relação a *expertise* dos alunos. Esse quadro será usado como base para muitas das funcionalidades do tutor cognitivo.

Quadro 1: *Expertise* dos alunos, materiais e ajuda/orientação

<i>Expertise</i>	Tipo de material	Ajuda/Orientação
Novatos	Detalhado, direto e preferencialmente integrado; Usar o efeito modalidade; Exemplo: Texto narrado, Vídeo, diagramas.	Exemplos resolvidos; Exemplos resolvidos narrados;
Intermediários	Uma combinação de instrução direta e prática de resolução de problemas com ajuda reduzida. Exemplo: questões de múltipla escolha, atividades parcialmente resolvidas.	Atividade parcialmente resolvida; Ajuda ativa ao se detectar um problema. Identificar o erro e apresentar revisão do princípio envolvido; Permite voltar ao material detalhado;
Experientes	Resolução de problemas com ajuda mínima. Exemplo: Lista de exercícios;	Ajuda passiva; Identifica apenas o erro; Opcionalmente apresenta o princípio envolvido e permite voltar ao material detalhado;

Fonte: adaptado de Sweller, Ayres e Kalyuga (2011).

É importante ressaltar ainda que além de ser determinado um nível para o aluno através do caso de uso “testar conhecimentos prévios” no início da utilização do STI, haverá no monitoramento em tempo real

da experiência do aprendiz pelo tutor cognitivo, através do caso de uso aprendizagem que interage com o modelo de estudante possibilitando alterá-lo dinamicamente durante a utilização do STI.

O caso de uso “Definir apresentação de unidade” é responsável por determinar para a interface qual o conteúdo a ser apresentado ao aluno. Para isso toma como base as propostas do Quadro 1 acima e a interação com outros casos de uso.

A partir de uma comparação entre as unidades de conteúdo do modelo de domínio com os esquemas do modelo de estudante, se pode inferir a falta de experiência do aluno. Com base nisso seleciona as apresentações de unidades de conteúdo condizentes com a sua *expertise*. Gera-se a listagem desses materiais e os passa para a interface, ordenados de acordo com os pré-requisitos estabelecidos. Como discutido anteriormente, a interface é responsável pela apresentação.

No caso de ser o primeiro acesso do aluno, será necessário testar os seus conhecimentos prévios. Para tal, serão selecionadas de forma aleatória três “apresentações de unidades” classificadas como “resolução de problemas” para cada “unidade de conteúdo” que não apresenta “pré-requisitos”. No caso de o usuário conseguir resolver os três problemas referentes a uma unidade de conteúdo, serão apresentados mais três problemas de cada unidade de conteúdo que tenham a primeira como pré-requisito. Esse processo repete-se enquanto o usuário se mostrar proficiente.

O caso de uso “Avaliar a resolução” tem por objetivo verificar se a resposta apresentada pelo usuário está correta. O resultado desta avaliação é informado aos casos de uso “Aprendizagem”, “Fornecer ajuda personalizada” e “Avaliar o estado afetivo”.

Além do simples “certo” ou “errado” a cada problema proposto que o aluno tenta resolver, será indicado qual foi o problema na resolução. O STI poderá inferi-lo através de regras de produção (Se... então...) a partir daqueles identificados na literatura, os quais serão discutidos adiante.

A “Aprendizagem” é um caso de uso que busca inferir se uma unidade de conteúdo foi aprendida pelo aluno. Para tal, como descrito no caso de uso “Esquemas” do modelo de estudante, cada unidade de conteúdo poderá ser inferida em três níveis ao aluno: novato, intermediário e experiente. O aluno será considerado novato ao ter contato com a apresentação de unidades de conteúdo do tipo “apresentação de conteúdo”.

A simples exibição em tela deste não configura o seu aprendizado. É necessário que o aluno atente-se ao material, com uma carga cognitiva que não ultrapasse sua capacidade. Para tal, para fins de funcionamento do STI, é esperado que ao término da apresentação de um conteúdo, a carga cognitiva do modelo de estudante esteja igual ou abaixo a um valor parametrizável no STI, como de 90%. Na resolução de problemas, esse critério é substituído pela correta resolução da atividade.

Se assim o estiver, o nível do esquema associado àquela unidade de conteúdo passará um sub-nível acima no esquema do modelo de estudante. Ainda vale salientar que o usuário deve satisfazer essa condição ao menos três vezes para efetivar a alteração de seu nível referente a uma unidade de conteúdo, como apresentado e justificado no modelo de estudante. A única exceção esperada é no caso de não haverem distintas apresentações de uma unidade, o que ocasionará a evolução para o próximo nível independentemente de quantos subníveis faltem. Caso não satisfaça aos critérios estabelecidos, não haverá alteração nos esquemas do modelo de estudante.

O caso de uso “Fornecer ajuda personalizada” efetivará suas ações através da interface na “Resolução de problemas” e através do “agente pedagógico: TÉCO”. A identificação de qual o problema conceitual e/ou erro encontrado no processo resolução está a cargo do caso de uso “Avaliar a resolução”.

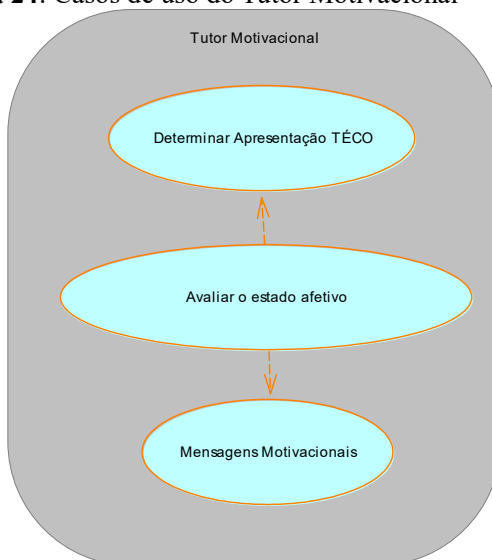
De posse deste, serão: a) identificado (por exemplo, circulando-se em amarelo) na interface de “resolução de problemas” o ponto onde ele encontra-se; b) definido um texto curto sumarizando uma revisão conceitual em texto escrito. Se o texto da ajuda mostrar-se longo, ele será dividido em pequenos blocos, mantendo-se a lógica e coerência, para que o TÉCO o apresente de forma gradual, com pequenas pausas, apresentado simultaneamente de forma oral e escrita em balões.

Adicionalmente, ao fim da ajuda, o aluno será indagado se gostaria de revisar essa unidade de conteúdo. Se assim o aluno quiser, o STI internamente enviará uma mensagem ao caso de uso “Definir apresentação de unidade” para que liste as apresentações das unidades envolvidas na atividade. Será facultado ao aluno voltar ao ponto que estava antes de solicitar esta ajuda extra. Uma outra opção será a resolução total do problema pelo STI, condição esta que não caracterizará nenhuma aprendizagem nem necessidade de avaliação da resolução.

A ajuda será apresentada de maneira distinta em função da *expertise* do aluno definida no modelo de estudante. Se for intermediário na unidade de conteúdo, a ajuda será ativa, isto é, a cada interação ou digitação de parte resolução de um problema, será avaliada a resposta até o momento desenvolvida. Todo o mecanismo aqui descrito para a ajuda será disparado automaticamente. Se o aluno for experiente na unidade de conteúdo, a ajuda será apresentada somente quando este solicitar a correção de um problema.

A carga cognitiva definida no modelo de estudante embasará o fornecimento de ajuda em forma de dicas. Aqui também espera-se permitir a parametrização de valores para funcionamento do STI. Para tal, proponho relacionar a carga cognitiva, com o tempo de determinada ação e o tipo de ajuda a ser fornecida. Por exemplo, caso esta carga cognitiva esteja acima de 70% e a resposta parcial do aluno apresentar alguma incorreção por mais de 30 segundos, será apresentada uma mensagem curta informando o erro e tendo a opção de mais detalhes da ajuda. Caso a carga cognitiva esteja acima de 70% e o aluno estiver sem resolver o problema por 15 segundos, será apresentado o próximo passo para resolução.

Neste mecanismo apresentado para o caso de uso “Fornece ajuda personaliza” espera-se tirar proveito de três efeitos da TCC discutidos anteriormente, que são: divisão de atenção, modalidade e efeito reverso de redundância.

Figura 24: Casos de uso do Tutor Motivacional

Fonte: elaborado pelo autor.

O agente pedagógico TÉCO ainda apresentará mensagens de cunho motivacional/afetivo definidas pelo tutor motivacional (Figura 24) no caso de uso “Mensagens Motivacionais”. O tutor motivacional em seu caso de uso “Determinar apresentação TÉCO” definirá aspectos humanizados a serem representados pelo agente pedagógico TÉCO, como expressões faciais e corporais.

Como já exposto anteriormente, a utilização e aproveitamento do tutor motivacional apresentam grande potencial, mas não será aprofundado neste trabalho, que tem por objetivo maior o tutor cognitivo. Limita-se a apresentar os resultados identificados para o tutor motivacional encontrados durante os estudos condizidos com a finalidade de definir o tutor cognitivo. A efetiva utilização do tutor motivacional carece de maiores estudos.

No próximo capítulo passa-se a discutir uma proposta de aplicabilidade desta arquitetura, no ensino de física, em especial na óptica geométrica, de forma a seguir a discussão apresentada no capítulo 4 - Percorso metodológico.

6 UMA PROPOSTA DE APLICABILIDADE: ÓPTICA GEOMÉTRICA

Conforme consta nas Orientações Educacionais Complementares ao Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) para o ensino médio (BRASIL, 2006), o ensino de Física vem deixando de ser a mera memorização de fórmulas ou repetição automatizada de procedimentos, em situações abstratas, e ganhando a consciência da necessidade de lhe dar significado.

A presente proposta não tem como objetivo esgotar o estudo de metodologias de ensino do tema de óptica geométrica, mas se buscou um tema relevante na área de ciências e a identificação das dificuldades apresentadas pelos alunos no processo de aprendizagem, a fim de subsidiar parte da inteligência do STI ora proposto e exemplificar a utilização da arquitetura proposta. De forma congruente, na perspectiva pensada neste trabalho, de propor o desenho didático para uma arquitetura de um STI, a ideia não é a de isolamento do aluno e de ausência de interação com professores e colegas. A sua inserção é pensada para um momento pedagógico específico dentro de um contexto metodológico que pressupõe a colaboração e a interação entre pessoas do cenário educacional.

Ainda com relação à importância da óptica geométrica para o ensino médio, temos nos PCN+ (BRASIL, 2006, p. 74) que:

“Também inclui, quanto à luz, compreender a formação de imagens e o uso de lentes ou espelhos para obter diferentes efeitos, como ver ao longe, de perto, ampliar ou reduzir imagens. Nesse sentido, o traçado dos raios de luz deve ser entendido como uma forma para compreender a formação de imagens e não como algo real com significado próprio.”

A óptica geométrica conforme apresentam Almeida et al. (2013) tem grande importância na história da ciência, permitindo o desenvolvimento de diversos aparatos como lupas, telescópios, microscópios, fibra óptica, entre outros, bem como a compreensão dos fenômenos envolvidos. Pode ser usada para explicar os fenômenos de

reflexão e refração da luz, ao utilizar simplificações como raios luminosos e a sua propagação retilínea. Não obstante, é um tema bastante propício para discussão de construção de modelos e representações e sua validade requer pouca ou nenhuma abordagem matemática.

Segundo Bauer, Westfall e Dias (2013) o estudo da luz pode ser dividido em óptica quântica, óptica ondulatória e óptica geométrica. Na óptica geométrica a luz é representada como raios. Com este modelo é possível explicar a óptica de lentes, espelhos, e outros dispositivos ópticos, além de prismas e arco-íris.

Os mesmos autores trazem que objetos que emitem luz, como sol, lâmpadas e fogo, são fontes primárias de luz, e os demais objetos, podem ser enxergados, pois refletem a luz. Para a óptica geométrica, a luz visível, como outras fontes eletromagnéticas, se espalha esfericamente a partir de uma fonte pontual. Os raios de luz podem ser representados como flechas, que são perpendiculares à frente de onda em cada ponto do espaço e apontam na direção e sentido da propagação da luz. Esta é a base geral para construção de diagramas de raios, e dela deriva o estudo de diversos fenômenos.

O grupo de ensino de física⁶ da Universidade Washington – Estados Unidos, há mais de 40 anos, vem conduzindo um programa coordenado de pesquisa, desenvolvimento de currículo e ensino de física, incluindo desde crianças até a formação de professores. Atualmente é coordenado pela professora Lillian C. McDermott, que compartilha as responsabilidades com os professores Peter S. Shaffer e Paula R.L. Heron. O grupo desenvolve pesquisa que busca identificar e analisar as dificuldades específicas que os alunos encontram ao estudar física. Os resultados são utilizados para orientar o desenvolvimento de materiais instrucionais e já deram origem a inúmeras publicações de relevância na área. Um dos temas abordados é a óptica geométrica, desta forma, sendo usado como suporte para a presente proposta de aplicabilidade.

Uma das conclusões do trabalho de Goldberg e McDermott (1987), que explorou a compreensão de estudantes sobre a produção de imagens reais por lentes convergentes e espelhos côncavos, foi de que os diagramas de raios não foram entendidos por muitos estudantes. Ao utilizarem para justificar suas respostas, os alunos referiam-se a eles como entidades físicas que formam as imagens em vez de uma representação geométrica que é útil para descrever como a luz se

6 <https://depts.washington.edu/uwpeg/>

comporta em certas circunstâncias. Mesmo quando conseguiam produzir adequadamente o diagrama, muitas vezes ficavam perdidos em como extrair a informação necessária para realizar uma tarefa em particular. Assim, permite-se inferir a relevância da visualização no ensino de ciências.

No trabalho de Vavra et al. (2011), discute-se as diferentes definições do termo visualização e, por isso, propõem a sistematização em três distintas classificações: objetos de visualização, a visualização introspectiva e a interpretativa.

A primeira refere-se a figuras, modelos tridimensionais, diagramas esquemáticos, ilustrações geométricas, imagens geradas por computadores, simulações e animações. O mais importante aspecto é que sirvam como suporte para reflexão em vez de servir como uma ajuda para codificar a informação não visual. Neste sentido, sugerem alguns caminhos para sua utilização: objetos de visualização que apresentam sistemas lógicos de operações visuais (os mesmos autores exemplificam com os diagramas Venn, que são usados em matemática para simbolizar graficamente propriedades, axiomas e problemas relativos aos conjuntos, normalmente pela intersecção de círculos); que podem descrever conceitos maiores divididos em conceitos menores; que podem descrever a relação global entre conceitos a fim de facilitar generalizações; que podem ser usados para relacionar e identificar soluções alternativas (como um gráfico que relaciona duas variáveis, permitindo geração de novas hipóteses); que servem como um retrato dos dados permitindo aos estudantes referirem-se a eles ao recuperar informações.

A visualização introspectiva refere-se aos modelos criados na mente do ser humano. Os autores apontam como sendo popular na literatura, mas com poucos estudos sobre sua efetividade.

A visualização interpretativa envolve uma ação cognitiva, a qual, através de crenças, experiências e entendimentos um objeto de visualização ou uma visualização introspectiva geram mudanças na forma de pensar e criar as representações próprias. Os autores ponderam na necessidade de grande aprendizado neste campo. Ainda, que para maximizar os benefícios da visualização de objetos, a sua escolha (dentre um objeto de visualização A ou B) deve ser apropriada ao nível dos estudantes. Ao considerar diferentes níveis de estudantes, percebe-se a convergência da visualização interpretativa com a TCC bem como com arquitetura proposta para um STI, como pode ser ilustrado no Quadro 1.

6.1 EXEMPLIFICANDO A ARQUITETURA PROPOSTA

Como destacado no capítulo do percurso metodológico, uma vez proposta a nova arquitetura, aqui se apresentam alguns materiais instrucionais a fim de exemplificar e demonstrar a sua utilização. Para isto, considerando um processo de *design* instrucional, faz-se necessário: a) identificar as unidades de conteúdo; b) propor suas apresentações; c) propor dados para o modelo de estudante; d) Simular as interações de um estudante com o STI.

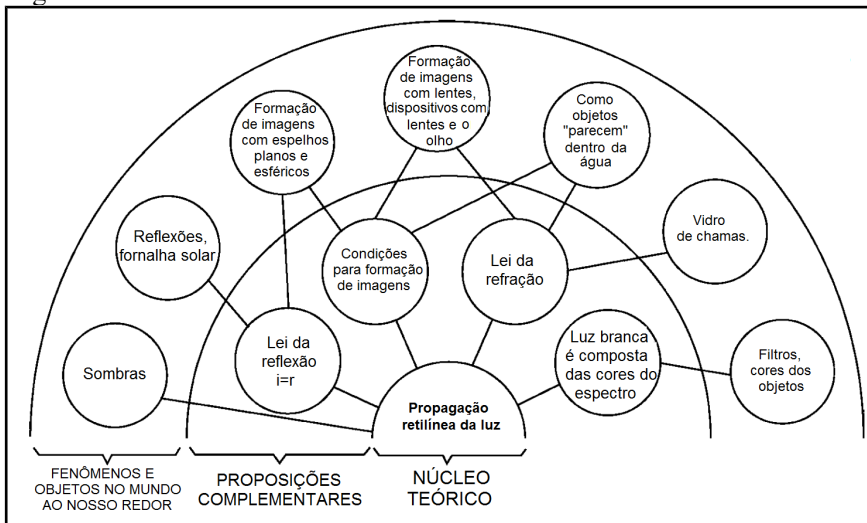
A primeira etapa consiste na definição do Modelo da Base de Domínio, que deve identificar as unidades de conteúdo a serem trabalhadas, seus pré-requisitos e apresentações. Estes são fatores importantes, pois influenciam diretamente na interatividade entre STI e aluno, organizando os materiais que serão apresentados e estruturando os esquemas nos quais se objetiva a proficiência dos alunos.

Para a identificação das unidades de conteúdo, seus pré-requisitos e a ordem de apresentação para o tema de óptica geométrica, pode-se adotar a estrutura proposta por Andersson e Bach (2005) apresentada na Figura 25. Para a adaptação à arquitetura proposta, cada círculo pode representar uma unidade de conteúdo e as suas ligações a partir do núcleo teórico formam os pré-requisitos. Por exemplo, a unidade de conteúdo “Sombras” tem como único pré-requisito a propagação linear da luz.

Definidas as “Unidades de conteúdo” e seus pré-requisitos, para cada uma destas unidades faz-se necessária a criação/adaptação de “Apresentações de uma unidade”, também discutidas anteriormente.

Vale ressaltar que, dentro do contexto proposto para a aplicabilidade há requisitos gerais a serem atendidos pelos alunos, como estarem familiarizado a utilização de microcomputadores pessoais e outros dispositivos comuns a alunos ingressantes no ensino médio, além disso, as habilidades e conhecimentos estabelecidos para o ensino fundamental nos parâmetros curriculares nacionais.

Figura 25: Uma representação da estrutura conceitual de óptica geométrica



Fonte: Adaptado de Andersson e Bach (2005).

Um exemplo de “Apresentações de uma unidade” pode ser extraído do trabalho de Goldberg e McDermott (1987). Neste estudo, os pesquisadores utilizaram uma bancada com lente convergente ou espelho côncavo, uma fonte de luz e uma tela, a qual está representada na Figura 26.

Nesta investigação foram entrevistados alunos da graduação e pós-graduação e aplicados questionários em grupos. A investigação consistia em avaliar a capacidade dos alunos em prever o que aconteceria se certas condições fossem aplicadas na bancada de experimentos, como remoção de lentes, cobertura parcial de lentes, reposicionamento ou remoção da tela. Além de descrições textuais, os alunos eram incentivados a utilizar diagramas de raios para fundamentar suas respostas.

Figura 26: Representação da entrevista de Goldberg e McDermott.



Fonte: adaptado de Goldberg e McDermott (1987)

Na presente proposta de arquitetura, para um aluno que através do caso de uso “testar conhecimentos prévios” fora inferida a classificação de Novato na unidade de conteúdo “formação de imagens com lentes, dispositivos com lentes e o olho” poder-se-ia solicitar a assistir com atenção a um vídeo, conforme proposto no Quadro 1, que apresente conceitos introdutórios ao tema a ser desenvolvido, conforme indicado na Figura 27. Outro material que poderia ser indicado, refere-se a exemplos resolvidos, como o apresentado na Figura 21. É importante destacar que na apresentação de materiais a estes alunos, muitos dos efeitos discutidos podem ser contemplados. Bem como, que sejam apresentados os conteúdos de forma detalhada, direta e integrada. No exemplo apresentado na Figura 27, espera-se tirar proveito do efeito modalidade, ao correlacionar informações apresentadas simultaneamente de forma oral e as figuras do vídeo, explicando-as. Ainda, ao permitir o controle do vídeo do aluno, espera-se que este possa gerenciar sua carga cognitiva, por exemplo, pausando ou retrocedendo o vídeo.

Figura 27: Um exemplo de apresentação de conteúdo para alunos novatos.

The screenshot shows the STI-TECO Intelligent Tutoring System interface. At the top, the browser address bar displays <http://www.sti-teco.com.br>. The system title is "Sistema Tutor Inteligente - TECO".

On the left, a navigation menu shows the following structure:

- Unidade 1 - Óptica Geométrica
 - A propagação retilínea da Luz
 - Apresentação
 - Definição
 - Exemplos Resolvidos
 - Sombras
 - Condições para formação de Imagens
 - Lei da Refração
 - Formação de imagens
 - Apresentação** (highlighted)
 - Definição
 - Exemplos Resolvidos
 - Exemplos Parcialmente Resolvidos
 - Lista de Exercícios
- Unidade 3
- Unidade 4

The main content area is titled "Formação de Imagens". Below the title, a text box states: "A seguir é apresentado um vídeo onde o professor da disciplina apresenta os conceitos introdutórios desta Unidade." Below this is a diagram of a candle (labeled "Imagem") and a lens (labeled "Objeto") on a horizontal axis (X-Y). The diagram shows the formation of a real, inverted image (A'B') on the opposite side of the lens (D) from the object (A). Key points labeled include A', B', F₁, B, O, F₂, Z, and W. A video player interface is visible at the bottom of the diagram area.

On the right, the "Cara Aluno" section contains a message: "Ao abordar a formação de 'imagens com com lentes, dispositivos com lentes e o olho' é esperado que já tenha domínio de outros pontos:" followed by a list of links:

- [Propagação retilínea da Luz](#)
- [Condições para formação de imagens](#)
- [Lei da Refração](#)

 Below the message, it says: "Caso ainda tenha dúvidas, revise esses pontos antes de continuar." A cartoon owl icon is positioned at the bottom right of this section.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na Figura 27 observa-se a interação promovida pelo agente TÉCO, apresentada ao aluno ao iniciar o estudo do tópico corrente, a qual lhe faculta retomar as apresentações de unidades que são pré-requisitos ao tema abordado.

Para um aluno que através do caso de uso “testar conhecimentos prévios” for inferida a classificação de Intermediário na unidade de conteúdo “formação de imagens com lentes, dispositivos com lentes e o olho”, poderia ser solicitado a resolver um problema com um diagrama de raios de luz parcialmente resolvido (Quadro 1). Do aluno, é esperado, que utilizando o *mouse*, desenhe as setas faltantes, para produzir um diagrama de raios de luz coerente. Uma proposta é apresentada na Figura 28, baseada em uma atividade de Goldberg e McDermott (1987), que indagou aos alunos o que aconteceria caso a lente fosse retirada. Na figura 28, a resolução parcial fornecida ao aluno está apresentada em azul. Um exemplo de possível produção do aluno está em verde, em um instante antes de terminar de desenhar a segunda linha.

Figura 28: Exemplo de atividade parcialmente resolvida: para alunos intermediários.

The screenshot displays the STI-TECO interface. At the top, the browser address bar shows <http://www.sti-teco.br>. The system title is "Sistema Tutor Inteligente - TECO".

On the left, a navigation menu lists units and topics. The current path is: [Home](#) > [Óptica Geométrica](#) > [Formação de Imagens](#) > [Exemplos Parcialmente Resolvidos](#) > [Exemplo 1](#). The menu items include: Unidade 1 - Óptica Geométrica, A propagação Linear da Luz, Apresentação, Definição, Exemplos Resolvidos, Sombras, Condições para formação de Imagens, Lei da Refração, Formação de imagens, Apresentação, Definição, Exemplos Resolvidos, Exemplos Parcialmente Resolvidos (highlighted), and Lista de Exercícios. Below this are Unidade 3 and Unidade 4.

At the top right, there is a user profile section with a "Nome do Aluno" field, "Editar meu perfil", and "Sair" buttons. Next to it is a difficulty level selector titled "Qual o grau de dificuldade?" with radio buttons for "Moleza", "Médio", and "Difícilimo". The "Médio" option is selected.

The main content area is titled "Exemplo 1" and contains the following text: "Observe o diagrama de raios de luz abaixo. Crie um novo diagrama imaginando que a lente foi removida." Below the text is a diagram showing a light bulb ("Bulbo (Fonte de Luz)") emitting rays that pass through a converging lens ("Lente Convergente") and focus on a screen ("Tela").

Below the diagram is a response editor titled "Resposta: Editor de Diagramas de raio de Luz". It shows a simplified diagram with a light bulb ("Bulbo (Fonte de Luz)") and a screen ("Tela"). Two parallel green rays are drawn from the bulb to the screen. A yellow mouse cursor icon is over a red button labeled "Seta do Mouse". A "Mais um Exemplo?" button is located at the bottom right of the editor.

On the far right, there is a cartoon owl illustration.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um dos grandes objetivos ao se definir uma proposta de aplicabilidade é a identificação das principais dificuldades encontradas pelos alunos ao lidarem com o tema abordado, de forma a subsidiar parte da inteligência a ser implementada na arquitetura proposta do STI e que é apresentada no caso de uso “Avaliar a resolução”.

A superação de uma dificuldade é um dos aspectos da arquitetura proposta, contudo há outros. O foco é a aprendizagem de uma unidade de conteúdo que se dará de forma individualizada, considerando o nível de *expertise* do aluno e a alocação de material adequado (conforme Quadro 1). E ao longo de todo esse processo, haverá a ajuda que busca identificar dificuldades do aluno e prestar auxílio. O sistema pode ser capaz de identificar zero, uma ou várias dificuldades/erros. Obviamente, quanto mais consistente for a definição e identificação destas dificuldades, melhor será o apoio fornecido aos estudantes, o que se

espera que leve a melhores resultados de aprendizagem. Ao mesmo tempo em que traz complicadores: conhecer quais são os erros e a ajuda a ser prestada para cada um deles. E quando a arquitetura for implementada (não é o caso deste mestrado) há a necessidade de que o sistema seja capaz de identificar a dificuldade que o aluno apresenta, a qual em alguns casos pode ser simples, mas também pode ser extremamente difícil detectar (IA).

Uma proposta de identificação de erros e revisão conceitual para as dificuldades identificadas por alunos pode ser extraída de Goldberg e McDermott (1987), onde para a atividade acima apresentada a maioria dos estudantes entrevistados apontou que a imagem ficaria direta (não invertida). Muitos afirmaram que sem a lente a luz viajaria a partir do bulbo em linhas paralelas e formaria uma imagem na tela. Pouquíssimos estudantes reconheceram que sem lentes não haveria imagem. Mais adiante, questionados sobre suas respostas e o papel das lentes, muitos indicaram que essas servem para inverter e talvez alterar o tamanho da imagem.

Desta forma, considerando que o aluno produziu o que está indicado na figura anterior (Figura 28), de acordo com a presente proposta de arquitetura para um STI, através do caso de uso “Avaliar a resolução”, ele identificará se e quando o aluno vier a apresentar essa dificuldade. Para o Caso de Uso “Fornecer ajuda personalizada” é necessário um texto, resumindo uma revisão conceitual para cada um dos erros a serem identificados. Ao adaptar-se o trabalho de Goldberg e McDermott (1987) pode-se chegar ao seguinte texto: “Sem as lentes não há formação da imagem. A luz não segue em um caminho paralelo até a tela, mas espalha em todas as direções a partir de todos os pontos do objeto de origem. Assim, por exemplo, em nosso dia a dia, não observamos que bulbos formem imagens em paredes ou forros.”

Além desse texto, que será lido e apresentado pelo agente pedagógico TÉCO para o aluno, será identificado junto à interface do STI o ponto onde ocorreu a dificuldade, visando diminuir o efeito de divisão de atenção. Por exemplo, circulando em uma cor distinta (ou outro mecanismo visando destaque) o erro do aluno e movimentando o agente pedagógico TÉCO junto à interface. A identificação dos erros está a cargo do caso de uso “resolução de problemas”. É facultado ao aluno retomar as apresentações de unidade que remontem ao tema abordado na questão e/ou corrigir sua resposta. Ainda considerando que se trata de um aluno com *expertise* intermediária, essa ajuda será exibida no exato momento que o STI identificar a dificuldade. Uma proposta

desse processo pode ser observada na Figura 29, em um instante após terminar de desenhar a segunda linha.

Figura 29: Exemplo de ajuda em atividade parcialmente resolvida: para alunos intermediários.

The screenshot shows the STI-TECO interface. At the top, there is a browser address bar with the URL <http://www.sti-teco.com.br>. Below the address bar, there is a user profile section with a name field and buttons for 'Editar meu perfil' and 'Sair'. To the right, there is a difficulty level selector with radio buttons for 'Moleza', 'Médio', and 'Difícilimo', with 'Médio' selected. The main content area displays a navigation breadcrumb: 'Home > Óptica Geométrica > Formação de Imagens > Exemplos Parcialmente Resolvidos > Exemplo 1'. The title 'Exemplo 1' is prominently displayed. Below the title, there is a text prompt: 'Observe o diagrama de raios de luz abaixo. Crie um novo diagrama imaginando que a lente foi removida.' The diagram shows a light bulb (labeled 'Bulbo (Fonte de Luz)') emitting rays that pass through a converging lens (labeled 'Lente Convergente') and focus on a screen (labeled 'Tela'). Below this, there is a 'Resposta: Editor de Diagramas de raio de Luz' section showing a light bulb and a screen with a thick grey bar representing an opaque material placed between them. A help dialog box on the right contains the text: 'Sem as lentes não há formação da imagem. A luz não segue em um caminho paralelo até a tela, mas se espalha em todas as direções a partir de todos os pontos do objeto de origem. Assim, por exemplo em nosso dia a dia, não observamos que bulbos formem imagens em paredes ou forros. Gostaria de mais ajuda? [Formação de imagens](#) [Condições para formação de imagens.](#) [Lei da Refração](#) [Propagação retilínea da luz](#)'. At the bottom right, there is a button labeled 'Mais um Exemplo?'. The left sidebar shows a navigation tree with 'Unidade 1 - Óptica Geométrica' expanded, containing sub-items like 'A propagação retilínea da Luz', 'Sombas', and 'Exemplos Parcialmente Resolvidos'.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga ao exemplo anterior, considerando um aluno que tenha sido inferida a classificação de Experiente poderia ser solicitada a resolução de uma lista de exercícios com problemas. A principal diferença consistiria no tipo de ajuda a ser fornecida, sendo passiva e questões a serem resolvidas integralmente.

Para exemplificar uma atividade para alunos experientes e com base no trabalho dos mesmos autores, consiste em solicitar que se faça uma previsão do que ocorre no caso de uma mesma configuração de bulbo/lente/tela com um material opaco (cartão) colocado entre o bulbo e a lente, ocultando metade da lente. Do aluno é esperado que com o *mouse* desenhe as setas para produzir um diagrama coerente de raios de luz. Uma proposta é apresentada na Figura 30.

Figura 30: Exemplo de atividade: aluno experiente.

The screenshot shows the STI-TECO Intelligent Tutoring System interface. At the top, the browser address bar displays <http://www.sti-teco.com.br>. The system title is "Sistema Tutor Inteligente - TECO".

On the left side, there is a user profile section with a smiley face icon, labeled "Nome do Aluno" with links for "Editar meu perfil" and "Sair". Below this is a navigation menu for "Unidade 1 - Óptica Geométrica", which includes sub-sections like "A propagação Linear da Luz", "Formação de Imagens", and "Lista de Exercícios".

The main content area is titled "Exercício 89" and contains the following text: "Observe a configuração abaixo, com um cartão opaco (que impede a passagem da luz) inserido em frente a lente, tampando a metade da mesma. Crie um diagrama de raios que represente a imagem a ser formada na tela." Below the text is a diagram labeled "Resposta: Editor de Diagramas de raio de Luz". The diagram shows a light bulb labeled "Bulbo (Fonte de Luz)", a converging lens labeled "Lente Convergente" with an orange rectangular block labeled "Material Opaco" covering its top half, and a vertical screen labeled "Tela". A "Corrigir" button is at the bottom of the diagram editor.

At the top right, there is a difficulty level selector titled "Qual o grau de dificuldade?" with radio buttons for "Moleza", "Médio", and "Difícilimo". The "Médio" option is selected. Below the difficulty selector is a breadcrumb trail: "Home > Óptica Geométrica > Formação de Imagens > Lista de Exercícios > Exemplo 89".

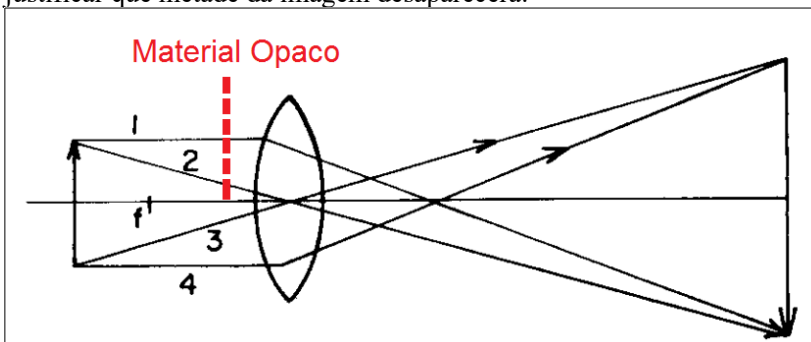
At the bottom right, there is a small owl icon and a button labeled "Mais um exercício?".

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os autores apontam nesta atividade que a imagem inteira permanece intacta e somente o seu brilho diminui. Isto, pois a luz se propaga de forma isotrópica de cada ponto da fonte, atravessando todas as partes da lente. Desta forma, para a formação de uma imagem completa do objeto, uma fração da lente é suficiente.

Nesta atividade, os autores ainda apontam que a maioria dos alunos respondeu incorretamente que metade da imagem desapareceria. Muitos pareciam convencidos de que algo deveria mudar, no caso de metade da lente ser coberta. Os diagramas de raios produzidos por muitos estudantes (Figura 31) reforçam sua intuição de que metade da imagem deveria desaparecer.

Figura 31: Diagrama de raios de luz criado por alunos para justificar que metade da imagem desaparecerá.



Fonte: Adaptado de Goldberg e McDermott (1987).

Segundo Goldberg e McDermott (1987), deste diagrama essencialmente correto é possível observar dois raios de luz especiais advindos do topo do objeto: um paralelo ao eixo principal que é refratado ao ponto focal e outro passando pelo centro da lente sem desvio. Muitos alunos, acreditando que se a metade superior da lente for coberta, estes raios serão bloqueados levando ao desaparecimento da metade inferior da imagem. Estes raios são suficientes para determinar a posição da imagem, mas não necessários. Talvez se os alunos tivessem considerado um terceiro tipo especial de raio de luz, eles teriam respondido corretamente a questão. Esse se refere ao raio de luz que parte do topo do objeto, passa pelo ponto focal, entra na porção inferior da lente e emerge paralelo ao eixo principal.

Desta forma, considerando que o aluno produziu o que está indicado na Figura 32 na cor verde, quando o aluno solicitar avaliação de sua resposta pelo STI, o agente pedagógico TÉCO pode apresentar a seguinte ajuda além de realçar o local do erro visando diminuir o efeito de divisão de atenção: “Nesta atividade, a imagem inteira permanece intacta e somente o seu brilho diminui. Isto, pois, a luz irradia-se para todas as direções de todos os pontos do objeto, assim, luz de cada ponto do objeto passa por todas as partes da lente. Para a formação de uma imagem completa, uma fração da lente é suficiente. Experimente considerar o raio de luz que parte do topo do objeto, passa pelo ponto focal, entra na porção inferior da lente e emerge paralelo ao eixo principal.”

Figura 32: Exemplo de atividade com ajuda: aluno experiente.

The screenshot displays the 'Sistema Tutor Inteligente - TECO' interface. At the top, there is a browser address bar with 'http://www.sti-teco.com.br'. Below it, a navigation menu on the left lists 'Unidade 1 - Óptica Geométrica' with sub-items like 'A propagação Retilínea da Luz', 'Apresentação', 'Definição', 'Exemplos Resolvidos', 'Sombras', 'Condições para formação de Imagens', 'Lei da Refração', and 'Formação de imagens'. The main content area is titled 'Exercício 89' and contains the following text: 'Observe a configuração abaixo, com um cartão opaco (que impede a passagem da luz) inserido em frente a lente, tampando a metade da mesma. Crie um diagrama de raios que represente a imagem a ser formada na tela.' Below this text is a diagram showing a light bulb ('Bulbo (Fonte de Luz)') on the left, a converging lens ('Lente Convergente') in the center, and a screen ('Tela') on the right. A vertical orange rectangle labeled 'Material Opaco' is placed in front of the lens, blocking its top half. Green rays are drawn from the top half of the bulb, passing through the bottom half of the lens and converging on the screen. A red ray is drawn from the bottom half of the bulb, passing through the top half of the lens and converging on the screen. A 'Corrigir' button is located below the diagram. To the right of the diagram, there is a text box with instructions: 'Nesta atividade a imagem inteira permanece intacto e somente o seu brilho diminui. Isto pois a luz irradia-se para todas as direções de todos os pontos do objeto, assim, luz de cada ponto do objeto passa por todas as partes da lente. Desta forma, para a formação de uma imagem completa uma fração da lente é suficiente. Experimente considerar o raio de luz que parte do topo do objeto, passa pelo ponto focal, entra na porção inferior da lente e emerge paralelo ao eixo principal.' Below this text box is a 'Gostaria de mais ajuda?' section with links to 'Formação de imagens', 'Condições para formação de imagens', 'Lei da Refração', and 'Propagação retilínea da luz'. At the bottom right, there is a 'Mais um exercício?' button.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro aspecto que os autores destacam como contribuinte às dificuldades dos alunos na atividade proposta está a falha entre distinguir entre a localização e a formação de uma imagem. Talvez pela forma como se trata os raios de luz em nosso dia a dia, referindo-se aos raios solares. Muitas vezes não percebem a diferença entre um raio de luz e um estreito feixe de luz. O raio de luz é uma abstração, parte de um modelo que pode ser usado com certas regras, e não uma entidade física. Pode-se inferir que têm as limitações e adequações necessárias a utilização de visualização no ensino de ciências.

Neste sentido, os autores ainda apresentam outro tipo de diagrama que foi criado para responder a mesma atividade. Dois raios paralelos partindo do objeto, um do topo e outro da base. Estes alunos acreditam que o raio do topo sendo bloqueado, ele não aparece na tela. Desta forma, metade da imagem desaparece. Normalmente, todos os raios desenhados são paralelos ao eixo principal, o que leva a considerar que os alunos acreditam que os raios emanam do objeto mantendo a sua forma ao se propagar pelo espaço para formar uma imagem.

De forma análoga ao erro anterior, considerando que o aluno produziu o que está indicado na Figura 33, quando o aluno solicitar avaliação de sua resposta pelo STI, o agente pedagógico TÉCO pode apresentar a seguinte ajuda: “Nesta atividade a imagem inteira permanece intacta e somente o seu brilho diminui. Isto, pois a luz irradia-se para todas as direções de todos os pontos do objeto, assim, luz de cada ponto do objeto passa por todas as partes da lente. Para a formação de uma imagem completa, uma fração da lente é suficiente. Experimente considerar raios de luz que não são paralelos ao eixo principal, como o raio de luz que parte do topo do objeto, passa pelo ponto focal, entra na porção inferior da lente e emerge paralelo ao eixo principal.”

Figura 33: Exemplo de atividade com ajuda: aluno experiente.

The screenshot displays the STI-TECO interface. At the top, the browser address bar shows 'http://www.sti-teco.com.br'. The main content area is titled 'Exercício 89' and contains the following text: 'Observe a configuração abaixo, com um cartão a impede a passagem da luz inserido em frente a a metade da mesma. Crie um diagrama de raios a imagem a ser formada na tela.' Below the text is a diagram showing a light bulb (Bulbo) on the left, a converging lens (Lente Convergente) in the center, and a screen (Tela) on the right. A vertical orange rectangle labeled 'Material Opaco' is placed in front of the lens. Green and red rays are shown originating from the bulb and passing through the lens. A blue owl character is positioned below the lens. To the right of the diagram, a help dialog box is open, containing the text: 'Nesta atividade a imagem inteira permanece intacta e somente o seu brilho diminui. Isto pois a luz irradia-se para todas as direções de todos os pontos do objeto, assim, luz de cada ponto do objeto passa por todas as partes da lente. Desta forma, para a formação de uma imagem completa uma fração da lente é suficiente. Experimente considerar raios de luz que não são paralelos ao eixo principal, como o raio de luz que parte do topo do objeto, passa pelo ponto focal, entra na porção inferior da lente e emerge paralelo ao eixo principal.' The dialog box also includes a difficulty level selector (Moleza, Médio, Difícilimo) and a 'Corrigir' button. A yellow sticky note on the right side of the dialog box says: 'Esse "balão" com o texto é exibido sobre os demais componentes da interface.' At the bottom of the dialog box, there is a 'Mais um exercício?' button. On the left side of the interface, there is a navigation menu with a tree view showing 'Unidade 1 - Óptica Geométrica' and its sub-items, including 'Lista de Exercícios' which is highlighted. A small box at the bottom center of the interface contains the text: 'O agente pedagógico TÉCO pode movimentar-se na interface, visando diminuir o efeito de divisão de atenção.'

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que aqui foram apresentados alguns exemplos concretos de interatividade entre aluno e a arquitetura de STI proposta.

Todos seguindo os mecanismos já definidos na proposta de arquitetura. Para uma efetiva utilização do STI, além de ser implementado, seriam necessários o desenvolvimento de apresentações de unidades dos distintos níveis de *expertise* para todas as unidades de conteúdo de um tema a ser abordado. A qualidade das apresentações de unidades desenvolvidas e a identificação das dificuldades dos alunos diante de temas específicos (como a óptica geométrica) são aspectos fundamentais para o processo de aprendizagem e conseqüentemente para o STI.

A qualidade das apresentações não se refere ao realismo das representações, mas antes, a adequada utilização dos mecanismos de visualização inerentes ao ensino de ciências e a busca em contemplar os efeitos da TCC durante a elaboração dos materiais/apresentações a serem utilizados no STI.

Os mecanismos de inteligência artificial a serem desenvolvidos estão intimamente atrelados à definição dos materiais/apresentações a serem utilizados. Em um primeiro momento, através da avaliação de *expertise* de um aluno em um determinado tema, espera-se que o STI seja capaz de fornecer material adequado. E ainda, de posse das possibilidades de erros a serem cometidas pelos alunos, já identificadas através de pesquisas no tema de aplicação do STI (como óptica geométrica), espera-se tirar proveito delas para que o STI possa identificar os erros cometidos individualmente por aluno e fornecer ajuda adequada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A popularização da utilização de recursos computacionais nas últimas décadas têm aumentado o interesse de pesquisadores e professores em beneficiarem-se de suas potencialidades no processo educacional.

Neste sentido, os Sistemas Tutores Inteligentes apresentam-se como muito promissores. Em sua definição tem como foco o aluno, buscando personalizar a ele o processo educacional, tanto em conteúdo quanto na forma de apresentação. Valem-se da vanguarda das diversas áreas envolvidas: ciência da computação, pedagógica/cognitiva e da própria área de conhecimento onde ele é aplicado. Essa contemporaneidade, multidisciplinaridade e complexidade do processo educacional podem ser fatores para que se tenham efetivamente poucos exemplares de Sistemas Tutores Inteligentes desenvolvidos.

A Teoria da Carga Cognitiva pode ser utilizada e embasa diversos estudos que visam determinar muitas das características de um processo educacional efetivo. As publicações de Sweller e seus colaboradores apresentam uma proposta de arquitetura cognitiva humana, mostrando seus princípios de funcionamento e uma série de efeitos. Segundo este modelo da cognição humana, a memória está dividida em duas, a de trabalho e a de longo prazo. A memória de trabalho é limitada e de curta duração, um dos pontos centrais desta teoria. Nela processam-se as informações advindas do ambiente em conjunto com o conhecimento já adquirido, que está na memória de longo prazo, que por sua vez é virtualmente ilimitada. A carga cognitiva refere-se à demanda de trabalho imposta à memória de trabalho, processamento este indispensável à aquisição de novos conhecimentos. Ao abordar os efeitos, os autores apontam que são demonstrações experimentais de procedimentos instrucionais facilitadores da aprendizagem ou resolução de problemas.

Ante o exposto, ao longo deste trabalho, percebe-se a convergência entre Sistemas Tutores Inteligentes e a Teoria da Carga Cognitiva. Mesmo assim, dentre os trabalhos avaliados na revisão do estado da arte sobre estes sistemas e pesquisas exploratórias internacionais, nenhuma arquitetura foi identificada tendo como base esta abordagem teórica.

Com relação aos objetivos traçados, esta teoria apresentou-se como uma alternativa viável e de grande potencial, fundamentada em

princípios e efeitos, com vasta evidência empírica, da qual foi possível extrair uma proposta teórica e instrumental, que fornecem orientações sobre a mediação pedagógica, os quais subsidiaram este trabalho que busca evidenciar quais são as características relevantes e desejáveis em uma arquitetura de um Sistema Tutor Inteligente de tal forma que atue como um facilitador do processo de aprendizagem de ciências. Mapeiam-se aspectos da Teoria da Carga Cognitiva em casos de uso da arquitetura de um Sistema Tutor Inteligente, apresentando-se uma solução a esta questão.

A arquitetura baseia-se numa arquitetura clássica de Sistemas Tutores Inteligentes. Possui múltiplas camadas, onde o aluno tem contato direto apenas com a camada de interface. Cada uma de suas funcionalidades ou casos de uso foram minuciosamente detalhados e, relacionadas aos efeitos da TCC. O tutor cognitivo tem o objetivo primordial de definir o material mais adequado possível ao nível de *expertise* do aluno e a ajuda personalizada às dificuldades de aprendizagem que o aluno apresentar. Sweller, Ayres e Kalyuga (2011) classifica a *expertise* dos alunos em níveis: novatos, intermediários e experientes, o que permitiu categorizar e relacionar as apresentações de unidades de conteúdo e a ajuda fornecida.

As características relevantes e desejáveis foram mapeadas em casos de uso, onde através da combinação de materiais e *expertises*, remetem a vários efeitos da TCC, em especial, o efeito reverso de experiência e o efeito de enfraquecimento de orientação. O primeiro baseia-se na redundância que um mesmo material pode ter ao ser apresentado indiscriminadamente tanto a alunos novatos ou a mais experientes em uma área. Essa é uma consequência do papel central que o conhecimento já adquirido exerce na arquitetura cognitiva humana. Uma vez que uma informação já está na memória de longo prazo, reapresentá-la gerará uma carga cognitiva estranha que potencialmente prejudicará o aprendizado. A partir do efeito reverso de experiência, temos o efeito de enfraquecimento de orientação. Esse define que a ajuda ou orientação fornecida a alunos deve diminuir conforme aumenta a sua experiência em determinada área. Ela refere-se não apenas a intervenção de um tutor, mas também ao próprio material instrucional indicado a um aluno, como por exemplo, pela apresentação de atividades resolvidas ou parcialmente resolvidas para alunos novatos. Vale ressaltar ainda, que a apresentação de uma unidade em si, pode contemplar diversos outros efeitos, como descrito nos capítulos 3 (da Teoria da Carga Cognitiva) e 5 (a proposta de arquitetura propriamente

dita).

Ainda com relação à resposta ao problema de pesquisa, destaca-se o mecanismo de ajuda que é individualizado para cada aprendiz. Será percebido principalmente através do agente pedagógico TÉCO, o qual busca tirar proveito dos efeitos de divisão de atenção, modalidade e reverso de redundância. A aplicabilidade do efeito de divisão de atenção pode ser obtida ao identificar e destacar junto à interface o local do erro na resolução de uma atividade, pela movimentação do agente pedagógico e pela apresentação de uma listagem das unidades de conteúdo correlacionadas ao erro. Com a ajuda através da fala, espera-se diminuir a carga cognitiva imposta, tendo em vista que com a fala podemos ter o efeito modalidade, que se utiliza do canal auditivo, o qual é parcialmente independente ao canal visual. A fala é biologicamente primária, levando uma vantagem no processo de aprendizagem. Ainda a forma como está estruturada a apresentação do conteúdo da ajuda tira proveito do efeito reverso de redundância.

O domínio selecionado para exemplificar a aplicabilidade da arquitetura foi no ensino de óptica geométrica. Conteúdo este obrigatório no ensino médio brasileiro e que permite explorar princípios da visualização no ensino de ciências. Esta escolha foi determinada pela existência de estudos que exploram os erros dos alunos diante de situações didáticas reais, como os de Goldberg e McDermott (1987) e de Andersson e Bach (2005).

Foi explorada uma apresentação de atividades com diagramas de raios de luz. Isto permite mais uma vez destacar o potencial da arquitetura do Sistema Tutor Inteligente proposto, indo além de apresentações de unidades mais corriqueiras, como textos, figuras, vídeos ou questões de múltipla escolha, que facilmente podem ser observados em outras ferramentas computacionais mediadoras da aprendizagem, mas que também podem ser utilizadas na presente proposta.

Não há intenção de esgotar o estudo de metodologias de ensino do tema. Na perspectiva pensada para este trabalho, a ideia não é a de isolamento do aluno e de ausência de interação com professores de colegas. A sua inserção é pensada para um momento pedagógico específico dentro de um contexto metodológico que prevê a utilização de recursos computacionais. Buscou-se um tema relevante à área do ensino de ciências com dificuldades de aprendizagem bem delimitadas na literatura de pesquisa em ensino de física, permitindo assim subsidiar parte da inteligência artificial do STI ora proposto (a partir da análise

dos erros cometidos pelos alunos) e exemplificar a utilização da arquitetura proposta.

Com relação a trabalhos futuros são apresentados alguns desafios não alcançados por limitações de tempo e por fugirem ao escopo deste trabalho. Como por exemplo, e afetiva a implementação desta arquitetura em um *software*, um STI. Bem como, a sua posterior caracterização a partir de estudos que visem identificar os valores ótimos de características parametrizáveis do STI, definidos no caso de uso “Captura de aspectos de carga cognitiva”.

Para efetivar a utilização desta arquitetura em distinta área de domínio, faz-se necessário definir as unidades de conteúdo, criação de materiais adequados a estas unidades, interface que possibilite apresentar corretamente cada um destes materiais, que possibilite ao aluno resolver distintos exercícios, identificar suas dificuldades, fornecer ajuda adequada e a criação de mecanismos de Inteligência Artificial necessários para identificar essas dificuldades. Diante destes itens, surge uma série de possibilidades e perspectivas.

A definição das unidades de conteúdos e seus pré-requisitos representam a menor unidade de conhecimento que pode ser subdividido determinado domínio de conhecimento. Isto se torna importante no momento de mapear o conhecimento do estudante, conforme o modelo de estudante proposto gerará representações dos esquemas em que o aprendiz deveria ser proficiente. Cada uma dessas unidades de conteúdo, devem conter distintas apresentações de materiais, visando serem apresentadas aos alunos conforme seu nível (novato, intermediário, experiente) em cada uma delas.

Na criação ou adaptação de apresentações de materiais, é altamente recomendável que considere a *expertise* e os efeitos da Teoria da Carga Cognitiva, objetivando potencializar o aprendizado de cada aluno.

A interface a ser implementada constitui um desafio e uma grande quantidade de trabalho. Isto, pois, são esperados vários formatos de materiais, como texto, áudio, vídeo, diagramas de setas, resolução de equações e outros que venham a ser definidos. Além de serem simplesmente apresentados, o que provavelmente poder-se-ia resolver-se com o padrão HTML ou com uma figura, a interação necessária para a resolução de um exercício é específica, necessitando de implementação de cada modelo. Tome-se, por exemplo, a resolução de equações ou do diagrama de raios de luz retratado, provavelmente será necessária a sua inteira implementação. Para corrigir o procedimento de resolução de

uma equação de um aluno, de forma análoga ao que ocorre no papel, o sistema deve ser capaz de determinar as corretas etapas da resolução de uma equação comparando com o que foi produzido pelo aluno. Requer ainda, botões específicos para facilitar a sua digitação, como no caso de uma fração, raiz quadrada ou equação mais complexa.

Além da necessária identificação cuidadosa e meticulosa das dificuldades apresentadas pelos alunos, diante da especificidade do projeto de interface, a inferência de que determinada dificuldade é apresentada por um aluno também se torna complexa e trabalhosa. Isto sem contarmos que o campo de Inteligência Artificial é contemporâneo e está em franco desenvolvimento. Como exemplo, os diagramas de raios de luz apresentados, o STI deve ser capaz de identificar determinados padrões produzidos pelo aluno, em uma interface específica/própria/única, para inferir que o aluno está com dificuldade A ou B prestando o auxílio necessário.

Um aspecto de grande potencial identificado durante as pesquisas, mas não explorado por fugir do escopo do trabalho, refere-se ao tutor motivacional. Ao definir, por exemplo, expressões faciais e corporais para o agente pedagógico TÉCO, pode aumentar a afinidade entre aluno e o Sistema Tutor Inteligente proposto. O objetivo em trabalhar com a emoção do aluno é verificar se está apto e motivado a determinada atividade e realizar ações de modo a encorajá-lo a estudar.

Outro indicativo encontrado nas pesquisas realizadas, mas que também requer maiores estudos, é a utilização do JADE, que é um *framework* de *software* que provê funcionalidades para a implementação de sistemas multiagentes com a utilização da linguagem Java.

Desta forma o presente estudo, além de contribuir individualmente para a divulgação tanto dos Sistemas Tutores Inteligentes quanto da Teoria da Carga Cognitiva, traz uma contribuição pedagógica, metodológica e técnica ao propor uma arquitetura pouco explorada e muito promissora para a construção de Sistemas Tutores Inteligentes. Ainda explora a sua aplicabilidade diante de um tema real do currículo escolar brasileiro de física, a óptica geométrica. Diante do exposto, acredita-se que essas investigações poderão contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias educacionais mais eficazes que respeitem as individualidades de aprendizagem, os diferentes ritmos de estudo, a autonomia do aluno, a flexibilização da sala de aula e a integração dos recursos computacionais no ensino.

REFERÊNCIAS

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. **O Ensino de Ciências e a Educação Básica: Proposta para Superar a Crise**. Academia Brasileira de Ciências, 2008.

ALMEIDA, W. L.; LUZ, F. M. D. M.; SILVA, J. B.; SILVA, S. L. R.; BRINATTI, A. M. Espelhos esféricos confeccionados com materiais acessíveis para demonstração de formação de imagens em sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p. 396–408, 2013.

AMARAL, M. A.; OLIVEIRA, K. A.; BARTHOLO, V. D. F. Uma experiência para definição de storyboard em metodologia de desenvolvimento colaborativo de objetos de aprendizagem. **Ciências & Cognição**, v. 15, n. 1, p. 19–32, 2010. Disponível em: <<http://cienciasecognicao.tempsite.ws/revista/index.php/cec/article/viewArticle/279>>. Acesso em: 20/6/2015.

AMORIM, M. J. V.; BERCHT, M. O uso da webcam na educação. **Novas Tecnologias na Educação**, v. 7, n. 3, 2009.

ANDERSSON, B.; BACH, F. On designing and evaluating teaching sequences taking geometrical optics as an example. **Science Education**, v. 89, n. 2, p. 196–218, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/sce.20044>>. Acesso em: 15/9/2015.

ANDRADE-LOTTERO, L. A. Teoría de la carga cognitiva, diseño multimedia y aprendizaje: un estado del arte. **Revista Internacional de Investigación en Educación**, v. 5, p. 75–92, 2012.

BABBIE, E. **Metodos de Pesquisa de Survey**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1999.

BAUER, W.; WESTFALL, G.; DIAS, H. **Física para Universitários: Óptica e Física Moderna**. Bookman, 2013.

BODEMER, D.; PLOETZNER, R. Encouraging the Active Integration of Information During Learning with Multiple and Interactive Representations. **Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning**, 2002. Disponível em: <<http://www.iwm-kmrc.de/workshops/visualization/bodemer.pdf>>. Acesso em: 15/4/2015.

BODEMER, D.; PLOETZNER, R.; FEUERLEIN, I.; SPADA, H. The active integration of information during learning with dynamic and interactive visualisations. **Learning and Instruction**, v. 14, n. 3, p. 325–341, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959475204000350>>. Acesso em: 15/4/2015.

BRASIL. Lei 9394/96 - Estabelece as Diretrizes e bases da educação nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19394.htm>. Acesso em: 15/9/2015.

BRASIL. PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares ao Parâmetros Curriculares Nacionais. **Brasília: Ministério da Educação**, p. 1–141, 2006. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 15/9/2015.

CHAVES, A. S.; FILHO, C. A. A. DE C.; BARRETO, F. C.; VELHO, G. C. A.; JORNADA, J. A. H.; BEVILACQUA, L.; DAVIDOVICH, L.; NUSSENZVEIG, M.; GATTASS, R. Subsídios para a reforma da Educação Superior. **Academia Brasileira de Ciências**, p. 40, 2004. Rio de Janeiro. Disponível em:

<<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-29.pdf>>. Acesso em: 18/6/2014.

FERREIRA, N. As pesquisas denominadas “estado da arte”. **Educação & sociedade**, p. 257–272, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/es/v23n79/10857.pdf>>. Acesso em: 18/6/2014.

FILATRO, A. **Design instrucional na prática**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.

FROZZA, R.; SILVA, A. DA; SCHREIBER, J. Agentes Pedagógicos Emocionais atuando em um Ambiente Virtual de Aprendizagem. **Renote**, 2011. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/renote/article/view/21911>>. Acesso em: 15/4/2015.

GILBERT, J. K. **Visualization in Science Education**. Springer Netherlands, 2005.

GIRAFFA, L. M. M. **Uma arquitetura de tutor utilizando estados mentais**, 1999. UFRGS. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17620/000269142.pdf>>. Acesso em: 15/4/2015.

GIRAFFA, L. M. M.; VICCARI, R. M. Estratégias de Ensino em Sistemas Tutores Inteligentes modelados através da tecnologia de agentes. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, , n. 5, 1999. Disponível em: <<http://ceie-sbc.educacao.ws/pub/index.php/rbie/article/view/2276>>. Acesso em: 18/6/2014.

GOLDBERG, F. M.; MCDERMOTT, L. C. An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. **American Journal of Physics**, v. 55, n. 2, p. 108, 1987.

GONZÁLEZ, S. M.; TAMARIZ, A. R. Integração de uma Metodologia de Ensino Presencial de Programação com um Sistema Tutor Inteligente. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 22, n. 2, p. 16–30, 2014.

HARRER, A.; DEVEDZIC, V. Design and analysis patterns in ITS architectures. **International Conference on Computers in Education. Anais.**, v. 1, p. 523–527, 2002. IEEE Comput. Soc. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1185996>. Acesso em: 28/8/2014.

HUERTAS, C.; JUÁREZ-RAMÍREZ, R. Developing an Intelligent Tutoring System for Vehicle Dynamics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 106, p. 838–847, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042813047113>>. Acesso em: 18/6/2014.

JESUS, A. Sistema Tutores Inteligentes: Uma Visão Geral. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação**, 2009. Disponível em: <<http://revistas.facecla.com.br/index.php/reinfo/article/viewArticle/140>>. Acesso em: 6/6/2014.

KALYUGA, S. Effects of information transiency in multimedia learning. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 30, p. 307–311, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.10.061>>. Acesso em: 15/4/2015.

LACERDA, A. L. **Contribuições do design instrucional ao ensino presencial de física apoiado por ambiente virtual de aprendizagem**, 2013. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://tede.ufsc.br/teses/PECT0195-D.pdf>>. Acesso em: 18/6/2014.

MARCHI, A. C. B. DE; RABELLO, R. DOS S.; ALBAN, A.; BORDIGNON, J. M.; PASSERINO, L. Um Sistema Multiagente

para Identificar Falhas na Conversação no Bate-papo da CV-Muzar. **Novas Tecnologias na Educação**, v. 7, n. 3, 2009.

MAYER, R. E. **The Cambridge Handbook of Multimedia Learning: Second Edition**. 2º ed. Cambridge University Press, 2014.

MAYER, R. E.; MORENO, R. Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning. **Educational Psychologist**, v. 38, n. 1, p. 43–52, 2003.

MEDEIROS, L. F.; MOSER, A.; SANTOS, N. Small Talks como estratégia para conversação tutorial em um assistente de conhecimento. **Novas Tecnologias na Educação**, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2013. Disponível em:

<<http://seer.ufrgs.br/renote/article/view/41687>>. Acesso em: 18/9/2014.

MELLO, G.; CARLOTTO, T.; RUBI, G.; SEFFRIN, H.; JAQUES, P. Implementando o Agente de Base de Domínio do Sistema Tutor Inteligente PAT2Math. **Renote**, 2009. Disponível em:

<<http://www.projeto.unisinos.br/pat2math/papers/58301-markups.pdf>>. Acesso em: 15/4/2015.

MITROVIC, A.; WILLIAMSON, C.; BEBBINGTON, A.; MATHEWS, M.; SURAWEEERA, P.; MARTIN, B.; THOMSON, D.; HOLLAND, J. Thermo-Tutor: An Intelligent Tutoring System for thermodynamics. **2011 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**, p. 378–385, 2011. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5773164>>. Acesso em: 15/4/2015.

MORAIS, F.; JAQUES, P. Avaliação de usabilidade do Sistema Tutor Inteligente PAT2Math. **Renote**, v. 11, p. 1–10, 2013. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/renote/article/view/44929/0>>. Acesso em: 15/4/2015.

NOZAWA, E. H.; OLIVEIRA, E. H. T.; VICARI, R. M.; CASTRO JÚNIOR, A. N. Esquema de integração de hipermídias adaptativas em ambientes virtuais de aprendizagem. **Renote**, p. 1–10, 2008.

NUNES, T. M.; JAQUES, P. A. Utilizando Agentes Pedagógicos Animados como uma abordagem não restritiva ao Gaming The System. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 22, n. 1, p. 1–16, 2014.

PAULA FILHO, W. P. **Engenharia de software: Fundamentos, métodos e padrões**. 3° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

POZZEBON, E.; FRIGO, L. B.; BITTENCOURT, G. Inteligência artificial na educação universitária: quais as contribuições? , 2004. Disponível em:

<<http://www.miniweb.com.br/educadores/artigos/pdf/pozzebon04.pdf>>. Acesso em: 15/4/2015.

PRESSMAN, R. S. **Engenharia de Software**. 3° ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1995.

PRESSMAN, R. S. **Engenharia de Software: uma abordagem profissional**. 7° ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

RAABE, A. L. A. Uma proposta de arquitetura de sistema tutor inteligente baseada na teoria das experiências de aprendizagem mediadas. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação**, 2005.

RAMOS, E. S.; OLIVEIRA, J. M. P. Especificação e verificação formal de um modelo de STI-PBL por Redes de Petri Coloridas. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 17, n. 3, p. 53–66, 2009.

RAUBER, M. F.; SILVA, T. Perspectivas para inclusão de Sistemas Tutores Inteligentes no ensino de ciências Prospects for inclusion of Intelligent Tutoring Systems in science teaching. X Encontro

Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. **Anais**. p.1–8, 2015. Disponível em: <<http://www.xenpec.com.br/anais2015/resumos/R1527-1.PDF>>. Acesso em: 30/11/2015.

RIBEIRO, L. O que é UML e Diagramas de Caso de Uso: Introdução Prática à UML. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/o-que-e-uml-e-diagramas-de-caso-de-uso-introducao-pratica-a-uml/23408>>. Acesso em: 14/5/2015.

RISSOLI, V. R. V.; GIRAFFA, L. M. M.; MARTINS, J. P. Sistema Tutor Inteligente baseado na Teoria da Aprendizagem Significativa com acompanhamento Fuzzy. **Informática na educação: teoria & prática**, v. 9, n. 2, p. 35–48, 2006. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/InfEducTeoriaPratica/article/view/2397/0>>. Acesso em: 19/3/2014.

SÁ, H.; SILVA, M. Mediação docente e desenho didático: uma articulação complexa na educação online. **Revista Diálogo Educacional**, v. 13, n. 334, p. 139, 2013. Disponível em: <<http://www2.pucpr.br/reol/index.php/dialogo?dd1=7635&dd99=view>>. Acesso em: 18/6/2014.

SAN PEDRO, M. O. Z.; BAKER, R. S. J. D.; RODRIGO, M. M. T. Carelessness and Affect in an Intelligent Tutoring System for Mathematics. **International Journal of Artificial Intelligence in Education**, v. 24, n. 2, p. 189–210, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40593-014-0015-y>>. Acesso em: 6/6/2014.

SANTOS, A. C.; CANEVER, C. F.; GIASSI, M. G.; FROTA, P. R. DE O. A importância do ensino de ciências na percepção de alunos de escolas da rede pública municipal de Criciúma - SC. **Revista Univap**, v. 17, n. 30, p. 68–80, 2011. Disponível em:

<<http://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/29/26>>
. Acesso em: 18/6/2014.

SANTOS, E.; SILVA, M. Desenho didático para educação on-line. **Em aberto**, v. 22, n. 79, p. 105–120, 2009. Disponível em:
<<http://emaberto.inep.gov.br/index.php/emaberto/article/view/1437/1172>>. Acesso em: 18/6/2014.

SELWYN, N. **Distrusting educational technology: critical questions for changing times**. Routledge, 2014.

SILVA, A.; COSTA, E.; BITTENCOURT, I. I. Uma Linha de Produto de Software baseada na Web Semântica para Sistemas Tutores Inteligentes. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 20, n. 1, p. 87–96, 2012. Disponível em:
<<http://www.br-ie.org/pub/index.php/rbie/article/view/1373>>. Acesso em: 15/9/2014.

SILVA, D. H.; DORÇA, F. A. Uma Abordagem Automática para Personalização do Processo de Ensino Baseada em Estilos de Aprendizagem em Sistemas Adaptativos e Inteligentes para Educação a Distância. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 22, n. 2, 2014.

SILVA, M. T.; BITTENCOURT, I. I.; COSTA, E. Modelos para a Construção de Sistemas Multiagentes: Um Estudo de Caso em Sistemas Tutores Inteligentes. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 19, n. 01, p. 74–84, 2011. Disponível em:
<<http://www.br-ie.org/pub/index.php/rbie/article/view/1299>>. Acesso em: 18/9/2014.

SILVA, T.; BARROSO, M. F. Fenômenos astronômicos e ensino a distância: produção e avaliação de materiais didáticos. **XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**, p. 1–12, 2008.

SOUZA, N. P. C. **Teoria da Carga Cognitiva: origem, desenvolvimento e diretrizes aplicáveis ao processo ensino-aprendizagem**, 2010. Belém: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

SUWARA, M.; PLAZOWSKI, J. W. Is cognitive science a science at all? **2012 IEEE 3rd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)**, p. 733–738, 2012. Ieee.

Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6421948>>. .

SWELLER, J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning. **Cognitive Science**, v. 12, n. 2, p. 257–285, 1988.

Disponível em: <[http://doi.wiley.com/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](http://doi.wiley.com/10.1016/0364-0213(88)90023-7)>. Acesso em: 18/6/2014.

SWELLER, J. Instructional Design Consequences of an Analogy between Evolution by Natural Selection and Human Cognitive Architecture. **Instructional Science**, v. 32, n. 1/2, p. 9–31, 2004.

Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1023/B:TRUC.0000021808.72598.4d>>. Acesso em: 18/6/2014.

SWELLER, J. Human cognitive architecture. In: M. J. Spector; M. D. Merrill; J. van Merriënboer; M. P. Driscoll (Orgs.); **Handbook of Research on Educational Communications and Technology: A Project of the Association for Educational Communications and Technology**. 3º ed, p.1296, 2008. Taylor & Francis. Disponível em:

<<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=GgCPAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA369&dq=Human+Cognitive+Architecture&ots=A8UZCON1n2&sig=GF9gH5JIVcdVcncelZnqQXCJXSI>>. Acesso em: 2/7/2014.

hl=en&lr=&id=GgCPAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA369&dq=Human+Cognitive+Architecture&ots=A8UZCON1n2&sig=GF9gH5JIVcdVcncelZnqQXCJXSI>. Acesso em: 2/7/2014.

SWELLER, J.; AYRES, P.; KALYUGA, S. **Cognitive Load Theory**. New York, NY: Springer, 2011.

SWELLER, J.; MERRIENBOER, J. J. G. VAN; PAAS, F. G. W. C. Cognitive Architecture and Instructional Design. **Educational Psychology Review**, v. 10, n. 3, p. 251–296, 1998.

VANLEHN, K.; SANDE, B.; SHELBY, R.; GERSHMAN, S. The Andes Physics Tutoring System: An Experiment in Freedom. In: R. Nkambou; J. Bourdeau; R. Mizoguchi (Orgs.); **Advances in Intelligent Tutoring Systems**, Studies in Computational Intelligence. v. 308, p.421–443, 2010. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-14363-2>>. Acesso em: 18/6/2015.

VAVRA, K. L.; JANJIC-WATRICH, V.; LOERKE, K.; PHILLIPS, L. M.; NORRIS, S. P.; MACNAB, J. Visualization in Science Education. **Alberta Science Education Journal**, p. 22–30, 2011. Disponível em: <<http://www.edpolicystudies.ualberta.ca/en/researchcentresinstitutesandnetworks/crystalalberta/~media/crystal/documents/asej/aserjvol41no1.pdf#page=24>>. Acesso em: 15/4/2015.

ZHU, W. $p < 0.05$, < 0.01 , < 0.001 , < 0.0001 , < 0.00001 , < 0.000001 , or < 0.0000001 . **Journal of Sport and Health Science**, DOI 10.1016/j.jshs.2016.01.019, v. 5, p. 77–79, 2016.