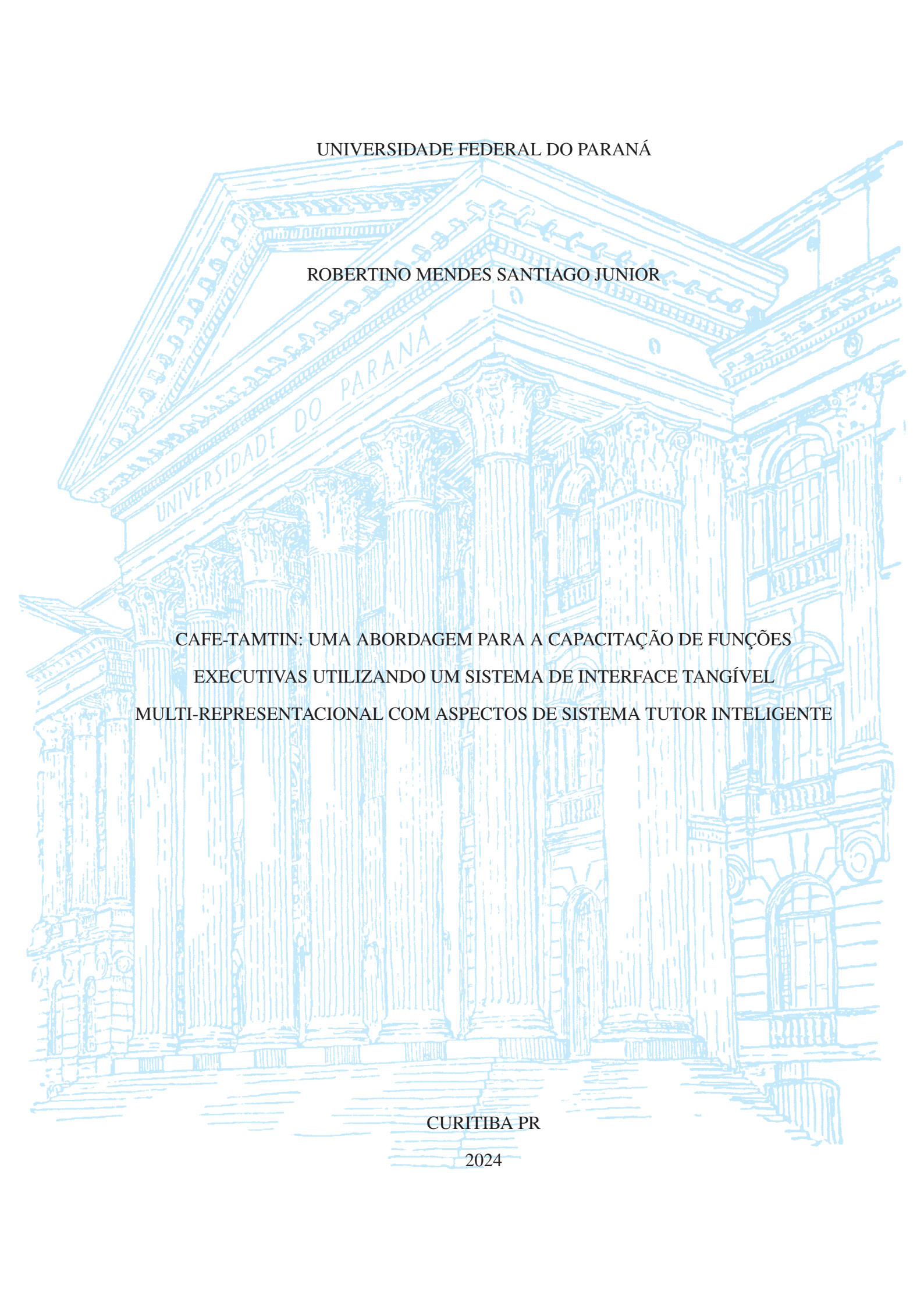




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBERTINO MENDES SANTIAGO JUNIOR

CAFE-TAMTIN: UMA ABORDAGEM PARA A CAPACITAÇÃO DE FUNÇÕES
EXECUTIVAS UTILIZANDO UM SISTEMA DE INTERFACE TANGÍVEL
MULTI-REPRESENTACIONAL COM ASPECTOS DE SISTEMA TUTOR INTELIGENTE

CURITIBA PR

2024

ROBERTINO MENDES SANTIAGO JUNIOR

CAFE-TAMTIN: UMA ABORDAGEM PARA A CAPACITAÇÃO DE FUNÇÕES
EXECUTIVAS UTILIZANDO UM SISTEMA DE INTERFACE TANGÍVEL
MULTI-REPRESENTACIONAL COM ASPECTOS DE SISTEMA TUTOR INTELIGENTE

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação no Programa de Pós-Graduação em Informática, Setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Computação*.

Orientador: Andrey Ricardo Pimentel.

CURITIBA PR

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA JANDAIA DO SUL

Santiago Junior, Robertino Mendes

CaFE-TaMTIn : uma abordagem para a capacitação de funções executivas utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistema tutor inteligente. / Robertino Mendes Santiago Junior. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Informática.
Defesa: Curitiba, 22/08/2024.

Orientadora: Prof. Dr. Andrey Ricardo Pimentel.

1. Funções executivas. 2. Jogos educativos. 3. Interfaces (Computador). I. Pimentel, Andrey Ricardo. II. Título.

CDD 004.0712

Bibliotecário: César A. Galvão F. Conde - CRB-9/1747

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação INFORMÁTICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ROBERTINO MENDES SANTIAGO JUNIOR** intitulada: **CaFE-TaMTIn: uma abordagem para a capacitação de funções executivas utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistema tutor inteligente**, sob orientação do Prof. Dr. ANDREY RICARDO PIMENTEL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Agosto de 2024.

Assinatura Eletrônica

30/08/2024 17:54:11.0

ANDREY RICARDO PIMENTEL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

28/08/2024 15:04:59.0

NATASHA MALVEIRA COSTA VALENTIM

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

28/08/2024 16:45:03.0

HELENA MACEDO REIS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - CAMPUS
JANDAIA DO SUL)

Assinatura Eletrônica

30/08/2024 13:37:44.0

AVANILDE KEMCZINSKI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA
CATARINA)

*Dedico à minha filha, Andressa, que,
com seu jeito especial, ocupou um
lugar em meu coração cuja existên-
cia eu até então desconhecia. Te
amo, Dêssa!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e por todas as graças concedidas.

À minha família: meu pai, Robertino (*in memoriam*), minha mãe, Marina, minha esposa, Francielle, minha irmã, Thaís, e minha filha, Andressa, por serem meu alicerce, por todo o amor e carinho, e por despertarem em mim o desejo de ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao meu orientador, Prof. Andrey Ricardo Pimentel, pelos aconselhamentos, ensinamentos, orientações e direcionamentos, pela paciência e pela amizade. Muito obrigado!

Às professoras Avanilde (UDESC/Joinville), Helena (UFPR/Jandaia do Sul), e Natasha (UFPR/Curitiba), membros da banca avaliadora, pelo aceite e pelas valorosas contribuições a este trabalho.

Aos amigos e amigas da UFPR campus Jandaia do Sul, em especial aqueles que contribuíram diretamente com esta pesquisa: Carlos Beleti Jr, Bárbara Braz, Janete Ferrareze, Raimundo Tostes, José Padilha, Rafael Germano, Carlos Galvão e Marcos Galvão. Vocês fizeram a diferença para a conclusão desta etapa.

Aos amigos e amigas do PPGInf, em especial Leonam Oliveira, Ludmila Galvão, Alisson Puska, Guilherme Guerino, Gabriela Corbari, Krissia Menezes e Deógenes Silva Jr, pela amizade e pelos momentos de interação, desabafos e diversão.

À Secretaria do PPGInf, em especial Jonas Strunck e Rafael Pereira, por toda a ajuda e elucidação de dúvidas.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Pró-Reitoria de Gestão de Pessoas e ao Câmpus da UFPR em Jandaia do Sul, pelo afastamento integral concedido para a realização deste doutoramento.

Às psicólogas, Mariana Abuhamad e Dayane Antunes, por todo o suporte oferecido em relação aos tópicos relacionados às funções executivas.

Ao Núcleo Regional de Educação de Apucarana e a toda a equipe do Colégio em Jandaia do Sul, onde foi realizado o experimento.

Aos professores e professoras que participaram do estudo preliminar, permitindo que esta pesquisa pudesse evoluir.

Aos pais dos alunos que autorizaram a participação de seus filhos no experimento, bem como aos estudantes do 8º e 9º anos do Colégio, os quais foram o público-alvo do experimento.

A todos e todas que colaboraram, direta ou indiretamente, para a conclusão da minha formação.

RESUMO

O sistema executivo desempenha ações essenciais no cotidiano, como refletir antes de agir, resolver problemas imprevistos, pensar sob diferentes perspectivas, evitar distrações, organizar atividades, planejar e manter o foco. As funções executivas são compostas por flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho. A inibição, objeto deste estudo, permite controlar reações instintivas, resistir a distrações e interromper comportamentos inadequados. No contexto cultural e escolar, essas funções são pouco estimuladas, resultando em muitas crianças e adolescentes com funções executivas subdesenvolvidas. Ferramentas tecnológicas podem ajudar a estimular essas funções. A pesquisa desenvolveu a abordagem CaFE-TaMTIn, utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional e tutor inteligente, para capacitar as funções executivas dos estudantes, utilizando o processo metodológico baseado no método Design Science Research Methodology. Um jogo tangível, denominado “Jogo do 15”, foi criado com quatro fases desafiando os jogadores a resolver problemas matemáticos manipulando a interface tangível. Construído com materiais de baixo custo, o jogo foi testado por meio de um estudo preliminar e um experimento. O estudo preliminar, envolvendo sete professores, avaliou as funcionalidades do jogo, identificou erros e validou a coleta automática de dados. O experimento envolveu 19 estudantes da rede pública de Jandaia do Sul/PR, mostrando que a abordagem pode melhorar a capacidade de controle inibitório dos estudantes, especialmente os com menor capacidade inicial. Houve uma melhora estatisticamente significativa no pós-teste para os estudantes do grupo com baixa capacidade do controle inibitório e uma melhora discreta para estudantes do grupo com média capacidade do controle inibitório. Os dados relativos ao experimento indicam que o jogo, desenvolvido utilizando a abordagem elaborada neste estudo, contribuiu para a capacitação do controle inibitório dos estudantes. A pesquisa contribui com uma abordagem para desenvolver ferramentas que capacitem as funções executivas em crianças e o desenvolvimento de um jogo matemático que, por meio de uma interface tangível multi-representacional, possibilita melhorar a capacidade de controle inibitório de estudantes com baixos índices de capacidade.

Palavras-chave: Funções Executivas. Jogo educacional. Interface tangível.

ABSTRACT

The executive system performs essential actions in everyday life, such as reflecting before acting, solving unforeseen problems, thinking from different perspectives, avoiding distractions, organizing activities, planning and maintaining focus. Executive functions are made up of cognitive flexibility, inhibition and working memory. Inhibition, the object of this study, allows you to control instinctive reactions, resist distractions and stop inappropriate behaviors. In the cultural and school context, these functions are poorly stimulated, resulting in many children and adolescents with underdeveloped executive functions. Technological tools can help stimulate these functions. The research developed the CaFE-TaMTIn approach, using a multi-representational tangible interface system and intelligent tutor, to empower students' executive functions, using the methodological process based on the Design Science Research Methodology method. A tangible game, called "Jogo do 15", was created with four phases challenging players to solve mathematical problems by manipulating the tangible interface. Built with low-cost materials, the game was tested through a preliminary study and an experiment. The preliminary study, involving seven teachers, evaluated the game's functionalities, identified errors and validated the automatic data collection. The experiment involved 19 students from the public school system in Jandaia do Sul/PR, showing that the approach can improve the inhibitory control capacity of students, especially those with lower initial capacity. There was a statistically significant improvement in the post-test for students in the group with low inhibitory control capacity and a slight improvement for students in the group with medium inhibitory control capacity. The data related to the experiment indicate that the game, developed using the approach elaborated in this study, contributed to the training of students' inhibitory control. The research contributes with an approach to develop tools that enable executive functions in children and the development of a mathematical game that, through a tangible multi-representational interface, makes it possible to improve the inhibitory control capacity of students with low levels of ability.

Keywords: Executive Functions. Educational game. Tangible interface.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Etapas do processo metodológico.	16
2.1	Direção das setas no teste de Flanker	21
2.2	Palavras utilizadas no teste de Stroop.	22
2.3	Representação das interações tangíveis	23
2.4	Funções das múltiplas representações externas.	25
2.5	Domínio Sistemas Tutores Inteligentes	26
2.6	Arquitetura de um sistema tutor inteligente clássico	27
3.1	Quantidade de publicações por ano	34
3.2	Quantidade de publicações por periódico.	34
3.3	Quantidade de publicações por evento científico	35
3.4	Quantidade de representações externas utilizadas	35
3.5	Categorias das combinações das representações externas	36
3.6	Formas de distribuição da informação	37
3.7	Tipos de sequenciamento de apresentação	38
3.8	Correlação entre tecnologia utilizada e tipo de representação externa	39
3.9	Componentes das funções executivas.	39
3.10	Correlação entre o número de representações utilizadas e as funções executivas .	40
3.11	Correlação entre o tipo de representações utilizadas e as funções executivas . . .	40
3.12	Conteúdos disciplinares abordados nos estudos	41
3.13	Contexto de aplicação do estudo	42
3.14	Faixa etária dos participantes dos estudos	43
4.1	Abordagem proposta	46
4.2	Representação das emoções em quadrantes.	51
5.1	Plataforma tangível	58
5.2	Tela inicial do jogo	59
5.3	Personagem virtual Monique	60
5.4	Primeira fase	61
5.5	Remediação apresentada na Fase 1	62
5.6	Segunda fase	63
5.7	Remediação apresentada na Fase 2	65
5.8	Terceira fase.	66

5.9	Remediação apresentada na Fase 3	67
5.10	Quarta fase	68
5.11	Remediação apresentada na Fase 4	70
6.1	Estudantes jogando o Jogo do 15	73
6.2	Estudantes participando do pré-teste	73
6.3	Teste de Flanker em duas condições.	74
6.4	Teste de Stroop em duas condições.	75
6.5	Grupos baseados no índice da capacidade do controle inibitório.	75
6.6	Taxa de interferência dos pré e pós-testes de Flanker e Stroop	76
6.7	Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 1	78
6.8	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 1	78
6.9	Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 1	79
6.10	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 1	79
6.11	Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 2	80
6.12	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 2	81
6.13	Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 2	81
6.14	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 2	82
6.15	Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 3	83
6.16	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 3	83
6.17	Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 3	84
6.18	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 3	84
6.19	Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 4	85
6.20	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 4	86
6.21	Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 4	86
6.22	Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 4	87

LISTA DE TABELAS

3.1	Subquestões de pesquisa	30
3.2	<i>String</i> de busca	31
3.3	Crítérios de inclusão e de exclusão	32
3.4	Quantidade de publicações obtidas e incluídas no mapeamento sistemático	32
3.5	Relação das publicações obtidas e incluídas no mapeamento sistemático	33
4.1	Relação entre mecânicas dos jogos e funções executivas.	47
4.2	<i>Level design</i> em jogos associados às funções executivas	49
4.3	Composição da classificação.	52
4.4	Variáveis de rastreamento do controle inibitório	53
5.1	Elementos de <i>Level Design</i>	60
5.2	Possíveis erros e remediações da Fase 1	61
5.3	Possíveis erros e remediações da Fase 2	64
5.4	Possíveis erros e remediações da Fase 3	66
5.5	Possíveis erros e remediações da Fase 4	69
6.1	Erros identificados e alterações realizadas	71
6.2	Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 1	77
6.3	Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 2	80
6.4	Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 3	82
6.5	Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 4	85

LISTA DE ACRÔNIMOS

CaFE-TaMTIn	Capacitação das Funções Executivas, Tangíveis, Multi-representacional e Tutores Inteligentes
CAI	<i>Computer Assisted Instruction</i>
CI	Controle inibitório
DeFT	Design, Functions, Tasks
DSR	<i>Design Science Research</i>
DSRM	<i>Design Science Research Methodology</i>
FC	Flexibilidade cognitiva
FE	Funções executivas
GQM	<i>Goal-Question-Metrics</i>
ICAI	<i>Intelligent Computer Assisted Instruction</i>
ICCI	Índice de capacidade do controle inibitório
MRE	Múltiplas Representações Externas
MSL	Mapeamento Sistemático da Literatura
MT	Memória de trabalho
NFC	<i>Near Field Communication</i>
PIO	<i>Population, Intervention, Output</i>
RE	Representações Externas
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SQ	Subquestão
STI	Sistemas Tutores Inteligentes
TDAH	Transtorno de Déficit de Atenção e Hiperatividade
TUI	<i>Tangible User Interface</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.	18
2.1	FUNÇÕES EXECUTIVAS	18
2.1.1	Controle inibitório	19
2.1.2	Capacitação das funções executivas e do controle inibitório	20
2.1.3	Avaliação do controle inibitório	21
2.2	INTERFACE TANGÍVEL DO USUÁRIO	22
2.3	MÚLTIPLAS REPRESENTAÇÕES EXTERNAS	24
2.4	SISTEMAS TUTORES INTELIGENTES	26
2.4.1	Sistemas Tutores Afetivos.	28
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	29
3	MAPEAMENTO SISTEMÁTICO	30
3.1	METODOLOGIA.	30
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.2.1	Número de representações externas.	35
3.2.2	Combinação das representações externas.	35
3.2.3	Distribuição da informação entre as representações externas	36
3.2.4	Sequenciamento de apresentação das representações externas	37
3.2.5	Tecnologia utilizada na exibição	38
3.2.6	Componentes das funções executivas.	39
3.2.7	Teoria ou modelo utilizado como base	40
3.2.8	Conteúdos disciplinares abordados	41
3.2.9	Contexto de aplicação.	42
3.2.10	Faixa etária	42
3.3	AMEAÇAS À VALIDADE E LIMITAÇÕES	43
3.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	43
4	ABORDAGEM CAFE-TAMTIN	45
4.1	CONTEXTO DA ABORDAGEM	45
4.2	ABORDAGEM CAFE-TAMTIN	45
4.2.1	Interface gráfica e interface tangível	46

4.2.2	Identificação do estado afetivo	50
4.2.3	Identificação do tipo de erro	51
4.2.4	Identificação da avaliação das funções executivas	53
4.3	ASPECTOS DE SISTEMAS TUTORES INTELIGENTES	56
4.4	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	56
5	O JOGO DO 15	58
5.1	DESENVOLVIMENTO DO JOGO	58
5.1.1	Fase 1	60
5.1.2	Fase 2	63
5.1.3	Fase 3	65
5.1.4	Fase 4	68
5.2	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
6.1	ESTUDO PRELIMINAR - PROFESSORES.	71
6.2	EXPERIMENTO - ESTUDANTES	72
6.2.1	Fase 1	77
6.2.2	Fase 2	79
6.2.3	Fase 3	82
6.2.4	Fase 4	84
6.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
6.3.1	Estudo Preliminar	87
6.3.2	Experimento.	87
6.4	AMEAÇAS À VALIDADE DOS EXPERIMENTOS	88
6.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	89
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
7.1	TRABALHOS FUTUROS	91
7.2	PUBLICAÇÕES	92
	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DOS BLOCOS NUMERADOS IMPRESSOS EM 3D	105
	APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DA PARTE INFERIOR DA PLATAFORMA IMPRESSA EM 3D.	107
	APÊNDICE C – CÓDIGO-FONTE DA PARTE SUPERIOR DA PLATAFORMA IMPRESSA EM 3D.	111

1 INTRODUÇÃO

A tríade funcional da aprendizagem, composta pelas funções cognitivas, conativas e executivas, por meio de sua interatividade e inseparabilidade, possibilita a sustentação do processo da aprendizagem humana (Fonseca, 2014). O sistema executivo é responsável por ações importantes do cotidiano das pessoas, como pensar antes de agir, resolver desafios inesperados, pensar sob ângulos diferentes, evitar distrações, organização de atividades diversas, planejamento, manutenção do foco, entre outros (Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância, 2016). As funções executivas são caracterizadas em três componentes básicos: flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho (Miyake et al., 2000; Miyake e Friedman, 2012; Archambeau e Gevers, 2018).

A flexibilidade cognitiva faz referência à capacidade que o ser humano possui para mudar suas perspectivas, mudar seu pensamento sobre algo (“pensar fora da caixa”), ajustar-se às novas demandas ou prioridades, aproveitar as oportunidades repentinas e inesperadas (Diamond, 2013). A memória de trabalho é a capacidade de reter informações na mente e realizar manipulações sobre essas informações (Young et al., 2017). A inibição permite que o indivíduo iniba ou adie uma reação instintiva, resista à interferência de distrações que ocasionam a perda de atenção durante a execução de uma atividade ou, ainda, possibilita que este indivíduo interrompa um comportamento impróprio (Fitó, 2012).

As funções executivas, na perspectiva cultural e escolar, são pouco estimuladas, portanto, muitas crianças e adolescentes, os quais lutam para terem mais rendimento e aproveitamento na aprendizagem em sala de aula, as possuem mal adaptadas, deficitárias, frágeis ou fracas (Fonseca, 2014). Entretanto, quando os componentes das funções executivas (flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho) são instigados, desenvolvem-se outras habilidades executivas complexas, como planejamento, tomada de decisão, resolução de problemas e raciocínio (Krause, 2020). Dessa forma, é fundamental que as funções executivas de estudantes sejam estimuladas.

Ferramentas tecnológicas podem ser utilizadas na criação de estratégias de estímulo às funções executivas (Loures et al., 2020). Cada dia mais presente em diversos ambientes, inclusive no escolar, essas ferramentas podem ser usadas para auxiliar e melhorar a aprendizagem dos estudantes, além de servir de suporte às atividades docentes (Alves et al., 2020; Klein et al., 2020). Ademais, o uso dessas ferramentas no ambiente educacional permite que os estudantes possam criar concepções do conhecimento, possibilitando, ainda, que sua capacidade criativa seja instigada e que novos conceitos sejam formados de maneira distinta, transformando tarefas, antes consideradas difíceis, em processos dinâmicos e mais facilitados (Klein et al., 2020).

Conforme Scarlatos et al. (2002), o fato de muitas dessas ferramentas tecnológicas presentes no ambiente educacional recorrerem aos dispositivos de entrada tradicionais, como teclado e mouse, geram alguns problemas, como a restrição do número de alunos que podem interagir simultaneamente com a ferramenta e o fato da manipulação dos objetos nem sempre ser direta. Porém, segundo González-González et al. (2019), as interfaces tangíveis do usuário (TUI - *Tangible User Interface*) permitem a manipulação direta de objetos físicos, sendo mais adequadas para a interação com crianças, haja vista ser comum crianças brincarem, individual ou colaborativamente, com objetos físicos (blocos, material dourado, quebra-cabeças) para aprenderem diferentes habilidades.

As interfaces tangíveis possibilitam envolver vários dos sentidos dos estudantes (visão, tato, audição), consideradas mais acessíveis a crianças mais novas, iniciantes e pessoas com dificuldades de aprendizagem, (Zuckerman et al., 2005), permitem a promoção de um comporta-

mento construtivo (exploração, colaboração e ludicidade) (Schneider et al., 2011), aumentam a aprendizagem lúdica, o envolvimento e a reflexão (González-González et al., 2019), além de favorecerem a aprendizagem colaborativa (Marshall, 2007).

Além disso, utilizar diversas modalidades para apresentar informações aos alunos é vantajoso, pois essas informações são processadas ativamente (Ainsworth, 2006). Contudo, apenas a disponibilidade de várias representações não é suficiente para que os estudantes estabeleçam a relação entre elas e haja a aquisição de conhecimento (Herbert, 2008; Rau et al., 2013). Múltiplas representações externas podem ser muito exigentes para os alunos, especialmente quando são organizadas em diferentes objetos na tela (Schwonke et al., 2008). Muitos alunos possuem dificuldade em relacionar os conteúdos apresentados em diferentes representações externas, apesar disso, compreender como essas diferentes representações externas se complementam pode contribuir com sua aprendizagem (Schneider et al., 2011).

Os alunos necessitam de diferentes suportes instrucionais em diferentes momentos de seu aprendizado, sendo necessário que estes suportes possuam recursos de adaptação das representações externas de modo a melhorar sua aprendizagem (Rau et al., 2019). É possível fornecer este estilo de suporte por meio de sistemas tutores inteligentes (STI). Os STI possibilitam apoiar a aprendizagem de estudantes com várias representações externas, pois fornecem suporte individualizado para interações entre os estudantes e as representações (Rau et al., 2013).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A falta de tutores inteligentes incorporados em interfaces tangíveis pode dificultar a aprendizagem dos alunos, no momento em que surgirem dúvidas e não houver disponibilidade do professor para fornecer ajuda (Scarlatos, 2002), e pode, também, dificultar o estabelecimento de relação entre as representações físicas e virtuais (Rau, 2016). Além disso, é importante que o STI possa, de alguma forma, considerando as funções executivas, adaptar-se conforme o desempenho ou necessidades da criança (Somma et al., 2019), haja vista que indivíduos que possuem falhas ou atraso no desenvolvimento das funções executivas tendem a apresentar dificuldades na aprendizagem (Corso et al., 2013). Ante ao exposto, tem-se a seguinte pergunta de pesquisa:

É possível e eficaz combinar sistemas tutores inteligentes, interfaces tangíveis e múltiplas representações externas na capacitação das funções executivas?

Entretanto, não foram encontrados na literatura trabalhos e/ou pesquisas que abordem, de forma isolada, o componente de controle inibitório no uso de múltiplas representações externas e interfaces tangíveis de usuário. Assim, para o desenvolvimento desta pesquisa, optou-se pela delimitação de abordagem utilizando apenas o componente controle inibitório. Além disso, foram observados poucos trabalhos que envolvem essa temática, considerando como público-alvo crianças e adolescentes.

Assim, tomando como base as premissas de que as funções executivas, em especial o controle inibitório, são importantes no processo de aprendizagem dos estudantes, de que a utilização de ferramentas tecnológicas no ambiente educacional é benéfica para os aprendizes, e de que os objetos manipuláveis são adequados ao ensino de crianças e adolescentes, além da falta de trabalhos e pesquisas envolvendo o componente controle inibitório na literatura, definiu-se a seguinte Hipótese de Pesquisa:

A combinação de sistemas tutores inteligentes, interfaces tangíveis e múltiplas representações externas pode aumentar a capacidade do controle inibitório em estudantes cuja capacidade de controle inibitório é deficitária.

Assim, esta pesquisa apresenta a abordagem denominada CaFE-TaMTIn (**Capacitação das Funções Executivas, Tangíveis, Multi-representacional e Tutores Inteligentes**), a qual visa permitir o desenvolvimento de interfaces tangíveis de usuário, multi-representacionais, dotadas de aspectos de sistemas tutores inteligentes (modelo do aprendiz, modelo do domínio e modelo tutorial), capazes de capacitar as funções executivas dos estudantes.

Ao longo do trabalho, apresentam-se os conceitos essenciais que permeiam o assunto, fornecendo base para a fundamentação desta pesquisa. Além disso, foram realizados um estudo preliminar com professores universitários e um experimento com estudantes matriculados nos oitavo e nono anos do ensino fundamental, visando avaliar a abordagem desenvolvida.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa consiste em **desenvolver uma abordagem para a capacitação de funções executivas utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistema tutor inteligente**, denominada CaFE-TaMTIn. Para tal, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar e caracterizar os principais componentes das funções executivas;
2. Identificar e caracterizar os sistemas de interfaces tangíveis;
3. Identificar e caracterizar múltiplas representações externas e suas funções;
4. Identificar e caracterizar as técnicas de sistemas tutores inteligentes aplicáveis ao trabalho;
5. Analisar como incorporar técnicas de sistemas tutores inteligentes em sistemas de interfaces tangíveis e múltiplas representações externas;
6. Desenvolver a abordagem CaFE-TaMTIn;
7. Avaliar e analisar os efeitos da abordagem CaFE-TaMTIn nas funções executivas;
8. Avaliar e analisar as potencialidades e fragilidades do uso do sistema de interface tangível multi-representacional nas funções executivas.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente trabalho baseia-se na metodologia denominada *Design Science Research* (DSR), a qual, segundo Dresch et al. (2015), é um método orientado à solução de problemas específicos, não sendo necessário a busca por uma solução ótima, mas, a solução satisfatória para a situação. Ainda segundo os autores, a solução deve ser passível de generalização, possibilitando que outros pesquisadores possam recorrer ao conhecimento gerado.

A DSR é uma abordagem que possibilita a validação do desenvolvimento de artefatos, os quais são utilizados para produzir conhecimento científico do ponto de vista filosófico e epistemológico (Pimentel, 2018). Um artefato é algo projetado, um engenho, uma artificialidade, o qual possui uma solução incorporada para um problema específico, não se restringindo a objetos físicos (Pimentel et al., 2020; Peffers et al., 2007).

Neste trabalho, foi adotado o método *Design Science Research Methodology* (DSRM) proposto por Peffers et al. (2007). As etapas específicas deste método podem ser observadas na Figura 1.1.

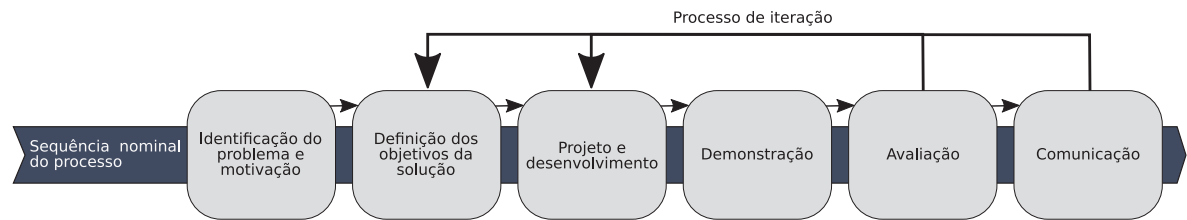


Figura 1.1: Etapas do processo metodológico.
Fonte: Peffers et al. (2007)

A etapa “identificação do problema e motivação” aborda o desafio de como desenvolver as funções executivas dos aprendizes por meio de tecnologias computacionais que permitam a manipulação direta de objetos. Foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre os conceitos envolvidos, conforme apresentado no Capítulo 2, e um mapeamento sistemático da literatura, apresentado no Capítulo 3.

A etapa “definição dos objetivos da solução” refere-se aos objetivos estabelecido nesta pesquisa, em que o objetivo geral é “desenvolver uma abordagem para a capacitação de funções executivas utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistema tutor inteligente”. Os objetivos específicos podem ser visualizado na Seção 1.2.

A etapa “projeto e desenvolvimento” consiste na elaboração da abordagem denominada CaFE-TaMTIn, em que são definidos elementos da interface gráfica e da interface tangível de usuário, inferência do estado afetivo, identificação do tipo de erro e a identificação da capacidade controle inibitório, conforme pode ser visualizado no Capítulo 4. Além disso, a etapa aborda o desenvolvimento do jogo tangível denominado Jogo do 15, o qual consiste em uma plataforma tangível e uma interface gráfica que implementam a abordagem CaFE-TaMTIn, como pode ser observado no Capítulo 5.

A etapa de “demonstração” refere-se à realização do estudo preliminar e do experimento. O estudo preliminar tem como objetivo avaliar as funcionalidades do jogo, validando as instruções e os feedbacks, além de identificar erros e falhas existentes. O público-alvo deste estudo são professores universitários, conforme abordado na Seção 6.1. O experimento, que visa avaliar a abordagem desenvolvida, tem como público-alvo estudantes matriculados no oitavo e nono anos do ensino fundamental II e foi dividido em quatro etapas: pré-teste, primeira rodada do jogo do 15, segunda rodada do jogo do 15, e pós-teste, sendo cada etapa realizada com um intervalo de uma semana. O experimento é abordado na Seção 6.2.

A etapa “avaliação” consiste na análise dos dados obtidos por meio do estudo preliminar e do experimento. Para isso, os dados relativos ao pré-teste foram utilizados para definir os grupos conforme a capacidade de controle inibitório dos estudantes, sendo realizada também a comparação com o pós-teste. Os dados coletados durante a interação dos estudantes com o jogo do 15 permitiram analisar o desempenho, o engajamento e o impacto sobre o controle inibitório. A análise dos resultados é discutida no Capítulo 6.

A etapa “comunicação” envolve a elaboração de artigos científicos visando apresentar os resultados obtidos na pesquisa. Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas três publicações, as quais são listadas na Seção 7.2. Salienta-se que durante essas duas últimas etapas é possível retornar às etapas de definição dos objetivos e projeto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao trabalho, os objetivos geral e específicos e, também, a metodologia utilizada. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica envolvendo os conceitos relacionados ao desenvolvimento desta pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta o mapeamento sistemático da literatura realizado com base nos objetivos propostos por esta pesquisa. No Capítulo 4, é descrita a abordagem desenvolvida neste estudo. O jogo tangível multi-representacional desenvolvido baseado na abordagem desta pesquisa é descrito no Capítulo 5. O Capítulo 6 descreve o estudo preliminar e o experimento, ambos elaborados para validar a abordagem proposta, e também discute os resultados obtidos.

No Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais, seguido das referências bibliográficas utilizadas neste trabalho e os apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta a fundamentação teórica relacionada ao desenvolvimento deste trabalho. São abordados conceitos sobre funções executivas, interface tangível do usuário, múltiplas representações externas e sistemas tutores inteligentes.

2.1 FUNÇÕES EXECUTIVAS

Funções executivas (FE) podem ser definidas como o conjunto de habilidades de ordem superior, suportadas em parte pelo córtex pré-frontal, que, de forma integrada, permitem ao indivíduo direcionar comportamentos a objetivos, realizando ações voluntárias, as quais são fundamentais para diversas atividades psicológicas do dia a dia (Mourão Junior e Melo, 2011; Knapp e Morton, 2017). Essas ações são auto-organizadas, por meio da avaliação de sua adequação e eficiência em relação ao objetivo pretendido, possibilitando eleger as melhores estratégias para resolver problemas imediatos e/ou de médio e longo prazo (Mourão Junior e Melo, 2011).

As FE possuem a capacidade de modular a operação de vários subprocessos cognitivos, regulando a dinâmica da cognição humana (Miyake et al., 2000) e são essenciais para a saúde mental e física, para um bom desempenho escolar, para o desenvolvimento cognitivo, social e psicológico (Diamond, 2013). As FE são necessárias para a formulação de planos de ação ou para a seleção e esquematização de sequências de respostas apropriadas (Mourão Junior e Melo, 2011). Além disso, as FE permitem que os indivíduos brinquem mentalmente com as ideias, se adaptem de forma rápida e flexível às novas circunstâncias, reservem tempo para considerar as ações que serão feitas a seguir, resistam às tentações, mantenham o foco e enfrentem desafios novos e inesperados (Diamond, 2013).

Várias são as definições sobre os elementos que compõem as funções executivas, fornecidas por diversos autores, conforme apresentado por McCloskey e Perkins (2012). Neste trabalho, são considerados elementos das funções executivas os seguintes componentes básicos: inibição, memória de trabalho e flexibilidade cognitiva (Miyake et al., 2000; Miyake e Friedman, 2012; Archambeau e Gevers, 2018).

A inibição, também conhecida como controle inibitório, permite que o indivíduo iniba ou adie uma reação instintiva, resista à interferência de distrações que ocasionam a perda de atenção durante a execução de uma atividade ou, ainda, possibilita que este indivíduo interrompa um comportamento impróprio (Fitó, 2012). Sem este controle, um indivíduo sucumbe aos impulsos, aos velhos hábitos de pensamento ou ação e a estímulos presentes no ambiente (estimulação visual, ruídos, entre outros) (Diamond, 2013).

A memória de trabalho refere-se a um sistema, ou sistemas, considerado necessário para manter informações em mente enquanto são executadas tarefas complexas, como raciocínio, compreensão e aprendizagem (Baddeley, 2010), permitindo a integração de ideias e informações recebidas, de fontes variadas, com o conhecimento prévio (Follmer e Sperling, 2020). A memória de trabalho é fundamental para dar sentido a algo que se desenrolou temporalmente, pois é necessário ter em mente o que aconteceu antes e relacionar isso com o que vem depois (Diamond, 2013).

A partir da associação e do suporte da memória de trabalho e da inibição, a flexibilidade cognitiva é desenvolvida, a qual se refere à modificação consciente de perspectivas ou abordagens visando a solução de um problema específico (de Santana et al., 2020). Para mudar as perspectivas,

é necessário inibir (ou desativar) a perspectiva anterior e carregar (ou ativar) na memória de trabalho uma perspectiva diferente, sendo assim, a flexibilidade cognitiva requer e se baseia no controle inibitório e na memória de trabalho (Diamond, 2013).

2.1.1 Controle inibitório

Diariamente, os indivíduos fazem uso do controle inibitório nas mais diversas situações, como esperar o momento mais apropriado para falar (não interrompendo ninguém) durante uma conversa entre amigos ou durante a aula, conseguir manter uma conversa em um ambiente com som alto, ou, ainda, ter controle emocional em situações estressantes, evitando comportamentos inapropriados como gritar, bater ou chorar (Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância, 2016; Cristiano, 2018). O controle inibitório permite que os indivíduos mudem ou escolham como reagir e se comportar em determinadas situações (Diamond, 2013), inibam ou adiem uma reação instintiva, resistam à interferência de distrações que ocasionam a perda de atenção durante a execução de uma atividade, mantendo o foco visando concluí-la ou, ainda, possibilita que estes indivíduos interrompam um comportamento impróprio (Fitó, 2012; Loures et al., 2020).

Os primeiros sinais do controle inibitório surgem entre 7 e 8 meses de vida, entretanto, algumas formas elementares de habilidades executivas já podem ser observadas desde o nascimento dos indivíduos, como, por exemplo, a capacidade de regular o comportamento diante de contingências (Pires, 2014). Segundo Brocki e Bohlin (2004), o controle inibitório está completamente desenvolvido entre os 10 e 12 anos. Sobretudo, as funções executivas permanecem se desenvolvendo até o indivíduo atingir a fase adulta (Fitó, 2012) e, após um período de maturidade na fase adulta, conforme a idade avança, sofre um declínio (Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância, 2016).

O controle inibitório pode ser subdividido em dois processos cognitivos: (1) inibição da resposta, a qual se refere ao processo de revogação de respostas motoras prepotentes; e (2) inibição atencional, referindo-se à capacidade de resistir à interferência de estímulos existentes no ambiente externo (Tiego et al., 2018). Segundo Diamond (2013), inibição da resposta envolve o controle sobre o próprio comportamento, sobre as próprias emoções, permitindo resistir às tentações e não agir por impulsividade, enquanto a inibição atencional permite que os indivíduos atendam seletivamente, focando no que é importante para o momento e suprimindo a atenção aos demais estímulos.

No contexto educacional, a inibição faz referência à capacidade dos alunos de processarem informações, considerando sua importância, relevância e consistência, de modo a apoiar a construção de significado (Follmer e Sperling, 2020), permite que os estudantes possam ter paciência de esperar a vez e manter o foco nas atividades propostas (Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância, 2016). O controle inibitório é importante para, por exemplo, a resolução de problemas numéricos, os quais exigem que os estudantes não sejam impulsivos, como nas seguintes situações (Van Dooren e Inglis, 2015):

1. Um taco e uma bola juntos custam \$ 1,10 (1 dólar e 10 dez centavos). O taco custa \$ 1,00 (um dólar) a mais que a bola. Quanto custa a bola?
2. Qual desses números é numericamente maior? 8 ou 6?

Conforme Van Dooren e Inglis (2015), na primeira situação, a resposta prepotente tende a ser 10 centavos, apesar da resposta correta ser 5 centavos, e na segunda situação, o número numericamente menor está impresso em uma fonte maior, devendo esse fato ser ignorado.

2.1.2 Capacitação das funções executivas e do controle inibitório

O conceito de capacitação de funções executivas aplicado nesta pesquisa refere-se ao processo de desenvolvimento e fortalecimento dessas habilidades cognitivas, podendo envolver treinamento cognitivo, intervenções educacionais, tecnologias assistivas, entre outros. Há na literatura diversos trabalhos que promovem a capacitação de funções executivas, em especial do controle inibitório, por meio da realização de certas atividades e intervenções, como atividade física (Browne et al., 2016; Souza et al., 2019; Aguirre-Loaiza et al., 2022), música (Moreno e Farzan, 2015; Bolduc et al., 2020; Suppalarkbunlue et al., 2022), estimulação cognitiva (Maraver et al., 2016), terapia ocupacional (Ribeiro et al., 2020), entre outras.

Ferramentas tecnológicas também têm sido objeto de estudo para a capacitação das funções executivas, principalmente o componente controle inibitório. No trabalho apresentado por Arfé et al. (2020), foram investigados os benefícios do pensamento computacional e da codificação, utilizando a plataforma Code.org, no planejamento e inibição de respostas, haja vista que o pensamento computacional está progressivamente sendo incluído nos currículos escolares em todo o mundo. Neste estudo, foram utilizados dois testes para avaliar a inibição de resposta (NEPSY-II Inibição [quadrados/círculos] e Teste de Stroop Numérico) e dois testes para avaliar o planejamento (Teste do Labirinto de Elithorn e Teste da Torre de Londres) em 179 crianças com idade aproximada de 6 anos. Segundo os autores, os resultados mostraram que a prática de codificação não apenas melhorou a capacidade das crianças para resolver problemas de codificação, mas também suas funções executivas, aumentando o tempo que as crianças dedicam ao planejamento, sua capacidade de resolver tarefas padronizadas e sua habilidade para inibir respostas prepotentes.

No trabalho desenvolvido por Crepaldi et al. (2020), foi relatado o projeto de um jogo sério apoiado por computador para treinamento do controle inibitório em crianças com Transtorno de Déficit de Atenção e Hiperatividade (TDAH). No jogo, as crianças devem bloquear tendências impulsivas, refletir sobre a situação, inibir pensamentos irrelevantes e encontrar a solução não intuitiva. Para ter sucesso no jogo, o jogador deve mudar sua atitude, pensando antes de realizar qualquer ação, em vez de agir por impulso. Participaram do estudo 16 meninos, com idade variando entre 8 e 11 anos, que foram avaliados por meio de dois testes padronizados: Ranette e Stroop Numérico. Os dados demonstram que o desempenho no jogo se correlaciona com as pontuações obtidas nos testes padronizados. Segundo os autores, o jogo é uma ferramenta adequada para ajudar as crianças a inibir sua tendência a comportar-se impulsivamente.

Duas versões de um jogo digital para treinamento do controle inibitório, uma focada em velocidade e outra em precisão, foram desenvolvidas por Homer et al. (2019). Conforme ilustram os autores, foi considerada a hipótese de que os adolescentes mais jovens se beneficiariam mais com a versão de velocidade, e os adolescentes mais velhos, mais com a versão de precisão. Baseado nos resultados, ficou demonstrado que a hipótese é válida.

Entretanto, em pesquisas realizadas, não foram encontrados trabalhos que envolvessem o uso de interfaces tangíveis de usuário na capacitação do controle inibitório. Considerando o uso dessas interfaces, tem-se o trabalho apresentado por Fan et al. (2016). Neste trabalho, são discutidas oportunidades e recomendações de *design* para projetos de sistemas de leitura tangíveis para crianças, especialmente aquelas com dislexia. Dentre as recomendações, os autores consideram os efeitos sobre o componente de memória de trabalho das crianças.

No trabalho apresentado por Davis et al. (2017), foi projetado um ambiente de aprendizagem com suporte háptico (*feedback* tátil). Os autores analisaram dados de estudantes durante o uso do ambiente para fazer conexões entre duas representações matemáticas diferentes de seno e cosseno: o círculo unitário e seu gráfico no plano cartesiano. Sobretudo, os autores fazem, ainda, considerações sobre os riscos de sobrecarregar a memória de trabalho dos estudantes.

2.1.3 Avaliação do controle inibitório

Diversos instrumentos têm sido utilizados por diferentes grupos de pesquisa para realizar a avaliação das funções executivas dos participantes (Lima et al., 2009). O compêndio desenvolvido por Bailey et al. (2018) fornece informações sobre diversas medidas disponíveis para avaliar funções executivas e outras habilidades relacionadas à regulação. Este compêndio pode ajudar pesquisadores, equipe de programas, especialistas em desenvolvimento infantil e outros profissionais a compreender as medidas mais comumente utilizadas, demonstrando e esclarecendo as várias abordagens para avaliar as funções executivas.

O controle inibitório tem sido avaliado baseando-se em duas medidas principais (Carlson e Moses, 2001): a) capacidade em retardar, moderar ou reter uma resposta prepotente e b) capacidade de responder de maneira diferente, de forma correta, diante de uma resposta conflitante e normalmente prepotente, porém incorreta.

A avaliação do controle inibitório pode ser realizada por meio do teste de Flanker (Eriksen e Eriksen, 1974). Segundo Bailey et al. (2018), nesse teste, o indivíduo deve pressionar uma tecla de seta direcional (ou outra pré-estabelecida) que corresponde à direção do estímulo central (Figura 2.1) enquanto inibe a atenção aos estímulos que o flanqueiam (exemplo: peixes ou flechas, conforme a idade), podendo os flankeadores serem congruentes (estímulos na mesma direção, como os visualizados nas Figuras 2.1 (a) e (b)) e incongruentes (estímulos em direção oposta, como os visualizados nas Figuras 2.1 (c) e (d)). O efeito Flanker é mensurado pela diferença do tempo de reação entre as tentativas incongruentes e congruentes respondidas corretamente. De maneira geral, um menor efeito Flanker é considerado melhor, pois indica uma maior capacidade de atenção seletiva e controle inibitório, pois o indivíduo tem a capacidade de ignorar estímulos distratores irrelevantes e focar no estímulo-alvo.

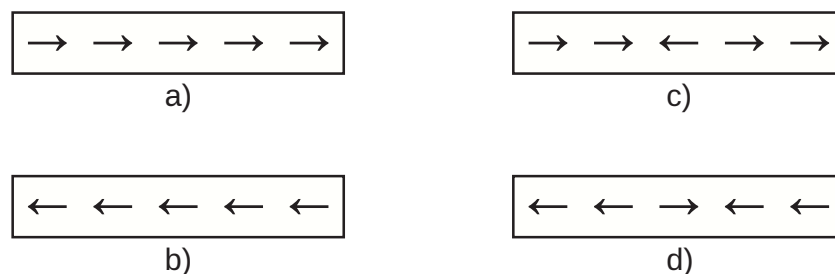


Figura 2.1: Direção das setas no teste de Flanker: a) congruente, b) congruente, c) incongruente e d) incongruente.

É possível, também, realizar a avaliação do controle inibitório por meio do teste de Stroop (MacLeod, 1991; Stroop, 1935). Neste teste, são exibidas quatro palavras coloridas (vermelho, verde, azul e amarelo), como pode ser observado na Figura 2.2. Essas palavras podem ser impressas na mesma cor de seu significado, como uma condição congruente (Figura 2.2 (a)), ou em outra cor deste conjunto, sendo uma condição incongruente (Figura 2.2 (b)). Os indivíduos devem responder à cor da palavra e não ao significado dela. O efeito Stroop é mensurado pela diferença entre o tempo de reação entre as tentativas incongruentes e congruentes respondidas corretamente. Geralmente, um menor efeito Stroop é desejável, demonstrando que o indivíduo possui uma maior capacidade de foco, controle atencional e controle inibitório.

Segundo Rey-Mermet e Gade (2017), o teste de Flanker visa avaliar a capacidade do indivíduo em ignorar informações que possam distraí-lo, enquanto o teste de Stroop tende a avaliar a capacidade do indivíduo de ignorar a interferência de resposta (respostas automáticas ou impulsivas).

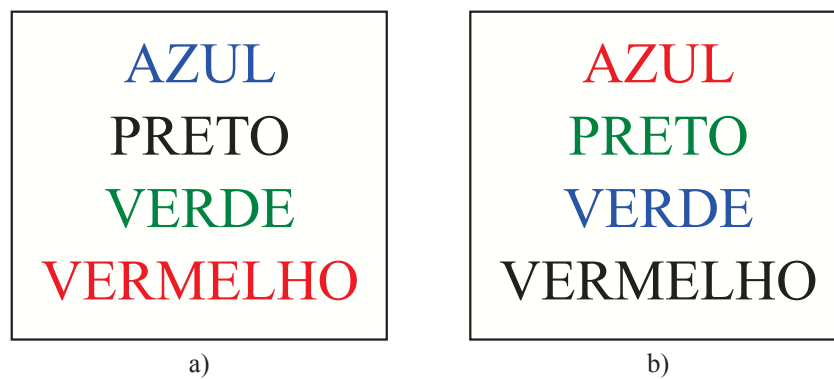


Figura 2.2: Palavras utilizadas no teste de Stroop: a) congruente e b) incongruente.

2.2 INTERFACE TANGÍVEL DO USUÁRIO

O termo Interface Tangível do Usuário (TUI - *Tangible User Interface*) define interfaces de usuário que aumentam o mundo físico real, utilizando a união de informações digitais a objetos e ambientes físicos do cotidiano (Ishii e Ullmer, 1997). As TUI tornam a informação digital diretamente manipulável e perceptível por meio dos sentidos periféricos, dando formas físicas às informações digitais, visando aproveitar as habilidades de interação tátil dos indivíduos (Ishii, 2008).

As TUI possibilitam solucionar limitações naturais de interfaces gráficas tradicionais, como, por exemplo, a impossibilidade de o usuário controlar objetos que não estejam presentes na área visível da interface gráfica ou, ainda, a interação e manipulação colaborativa de objetos em um mesmo dispositivo (Nunes et al., 2011). Cada objeto da interface tangível possui uma representação digital em um contexto e, ao ser manipulado, sua condição é atualizada no sistema (Radicchi et al., 2010).

Segundo Xu (2005), as interfaces tangíveis podem beneficiar a aprendizagem das crianças, pois requerem pouco tempo de aprendizado e baixo esforço cognitivo, além de fornecer uma forma alternativa de interação e controle. As TUI permitem, ainda, que os aprendizes explorem, testem e pratiquem seus conhecimentos, tanto de forma física quanto colaborativa, além de oferecerem uma forma divertida de interação, ajudando na retenção e transferência de informações (Scarlatos, 2006).

Ao projetar sistemas de interfaces tangíveis, Antle e Wise (2013) enfatizam a importância de determinados elementos quando esta interface é desenvolvida para a aprendizagem. São estes:

- **Objetos físicos:** conjunto de materiais com os quais os aprendizes deverão interagir com a interface tangível. Estes materiais existem concretamente no mundo e devem ser consideradas as propriedades físicas destes objetos ao serem projetadas, incluindo atributos visuais, táteis e, em alguns casos, auditivos, além de suas propriedades espaciais;
- **Objetos virtuais:** são entidades virtuais que também possuem atributos específicos. As propriedades que devem ser consideradas destes objetos são semelhantes às propriedades dos objetos físicos, excluindo-se os atributos táteis e adicionando propriedades temporais;
- **Ações sobre os objetos:** conjunto de manipulações de entrada que os aprendizes realizam sobre os objetos físicos (e em alguns casos digitais) detectados pelo sistema;

- **Relações informacionais:** coleção de acoplamentos entre os objetos digitais, os objetos físicos e as ações que podem ser executadas sobre eles e as referências aos objetos do mundo real;
- **Atividades de aprendizagem:** são o contexto, as instruções e as orientações fornecidas aos aprendizes para enquadrar sua interação com o sistema TUI.

Sobretudo, em relação aos objetos físicos e virtuais (Figura 2.3), Radicchi et al. (2010) ressaltam que, na interface tangível, os objetos que fornecem entrada de dados podem ser objetos de uso cotidiano (1,2,3), toques com as mãos em superfícies sensíveis (4) ou outros objetos de uso comum que podem ser interpretados como dispositivo de entrada. Suas representações digitais podem estar contidas em interfaces gráficas exibidas em monitores (6), em dispositivos tangíveis disponíveis para atividades colaborativas (7), mesas sensíveis a toque (8) e outros dispositivos de saída (9).

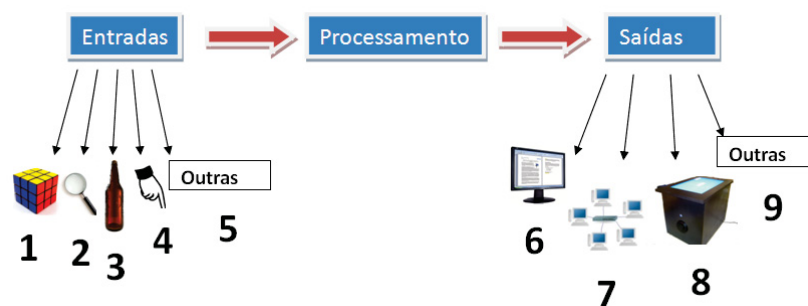


Figura 2.3: Representação das interações tangíveis.
Fonte: Radicchi et al. (2010)

Assim, sistemas com interface tangível permitem que objetos específicos, os quais normalmente são familiares aos aprendizes, sejam utilizados como recursos manipulativos de entrada. É o caso do trabalho de Alves et al. (2020), o qual apresenta o desenvolvimento de um jogo digital, voltado para o ensino de matemática, em que é utilizado o material dourado como interface tangível. O jogo é constituído de desafios interativos sobre as operações básicas de matemática (soma, subtração, multiplicação e divisão), os quais devem ser resolvidos com uso do material dourado tangível.

Outro exemplo é o trabalho apresentado por da Silva e Meucci (2017), em que foi desenvolvido um jogo educativo tangível acessível, destinado a crianças matriculadas nos primeiros anos escolares. Neste jogo são abordados conceitos e operações matemáticas básicas (adição, subtração, multiplicação, associatividade e comutatividade). O jogo consiste em formar uma operação matemática utilizando as peças tangíveis (números e operadores matemáticos), dispondo-as em um leitor para que o computador valide a expressão.

No trabalho de Scarlatos (2006), é apresentada uma biblioteca de funções para o desenvolvimento rápido de protótipos de jogos com interface tangível de usuário, dotados de rastreamento baseado em visão e uma abordagem pedagógica que enfatiza a atividade física, a colaboração, a prática e a personalização do professor. Para validar a abordagem e a biblioteca, os autores desenvolveram diversos jogos matemáticos tangíveis, como, por exemplo, um tangram e torre de Hanói.

As tecnologias tangíveis requerem computação móvel e tecnologias sem fio, como dispositivos com conexão *bluetooth*, redes sem fio, etiquetas e leitores de identificadores RFID (*Radio Frequency Identification*), sensores, *webcam*, entre outros (Xu, 2005).

2.3 MÚLTIPLAS REPRESENTAÇÕES EXTERNAS

As representações externas (RE) estão envolvidas em diversas tarefas complexas, como realizar uma conta de multiplicação utilizando papel e lápis, comprar produtos no supermercado utilizando uma lista de compras escrita, navegar na internet, resolver problemas geométricos, compreender gráficos, raciocínio diagramático, jogo de xadrez, sendo muitas dessas tarefas realizadas por meio de computadores (Zhang, 2000).

Representações externas podem ser descritas como o conhecimento e a estrutura no ambiente, como objetos, símbolos físicos ou dimensões (símbolos escritos, dimensões de um gráfico, entre outros), e como restrições, regras externas ou relações contidas em configurações físicas (layout de um diagrama, por exemplo), as quais permitem ao aluno interagir com algum domínio de conteúdo (Cox e Brna, 1995; Zhang, 1997; de Vries, 2012). As RE permitem que um instrutor forneça aspectos específicos durante o processo de aprendizagem e ajude os aprendizes a terem mais atenção (Ertl et al., 2008).

Segundo Zhang (1997), alguns tipos comuns de RE são diagramas, gráficos e imagens, utilizados em diversas tarefas cognitivas, como resolução de problemas, raciocínio e tomada de decisão. Sobretudo, Zhang e Norman (1994) enfatizam que a utilização de representações externas permite reduzir a carga cognitiva¹ ao fornecer auxílio para o processo de memorização, provê informações que podem ser diretamente percebidas e utilizadas sem serem interpretadas e formuladas explicitamente, podem fornecer elementos que permitem ancorar e estruturar o comportamento cognitivo e mudar a natureza das tarefas, facilitando-as.

Conforme Palmer (1978), a especificação de uma representação deve ser realizada considerando: (1) o mundo representado; (2) o mundo representante; (3) quais aspectos do mundo representado estão sendo modelados; (4) quais aspectos do mundo representante estão presentes na modelagem; e (5) as correspondências entre os dois mundos. No trabalho de Wu e Puntambekar (2012), é apresentada uma taxonomia de representações externas, sendo: verbal-textual (utilizada para categorizar palavras e símbolos linguísticos, por exemplo), simbólico-matemático (por exemplo, sinais, símbolos e convenções matemáticas), visual-gráfico (gráficos, figuras, animações e vídeos) e acional-operacional (demonstrações e manipulativos).

Ter acesso a múltiplas representações externas (MRE), como textos, imagens ou equações, pode ser benéfico aos aprendizes quando estes são confrontados com ideias novas e complexas, haja vista que estas representações podem fornecer diferentes visões sobre essas ideias (Schwonke et al., 2009). Além disso, ao oportunizar diferentes representações de um conceito, o aprendiz pode recodificar estas representações de diferentes modos, refinando e possibilitando uma compreensão mais explícita (Laburú e Faria, 2018).

Para Prain e Waldrip (2006), os aprendizes devem ser expostos ao mesmo conceito repetidas vezes, por meio de múltiplas representações. Para os autores, essa prática refere-se a re-representar o mesmo conceito utilizando-se de diferentes formas, sejam em modos verbais, gráficos e numéricos. Sobretudo, ainda conforme Prain e Waldrip (2006), os aprendizes precisam compreender que os diferentes modos de representação de um conceito são utilizados para diferentes propósitos, como, por exemplo, a representação por meio de uma combinação de representações escritas e em diagramas.

O trabalho de Ainsworth (2006) apresenta uma abordagem que considera diferentes aspectos da aprendizagem com representações externas, argumentando sobre fatores que influenciam a aprendizagem com MRE. A estrutura DeFT (*Design, Functions, Tasks*)² sugere que muitas

¹Carga cognitiva é um construto multidimensional que representa a carga imposta ao sistema cognitivo das pessoas durante a realização de uma tarefa específica (Paas e Van Merriënboer, 1994).

²Do português: Projeto, Funções e Tarefas.

dimensões se combinam para influenciar se um aprendiz conseguirá beneficiar-se do aprendizado por meio de uma combinação particular de representações. As múltiplas representações externas possuem três funções principais (Ainsworth, 2006, 1999), as quais apoiam a aprendizagem (Figura 2.4): complementar, restringir e construir.

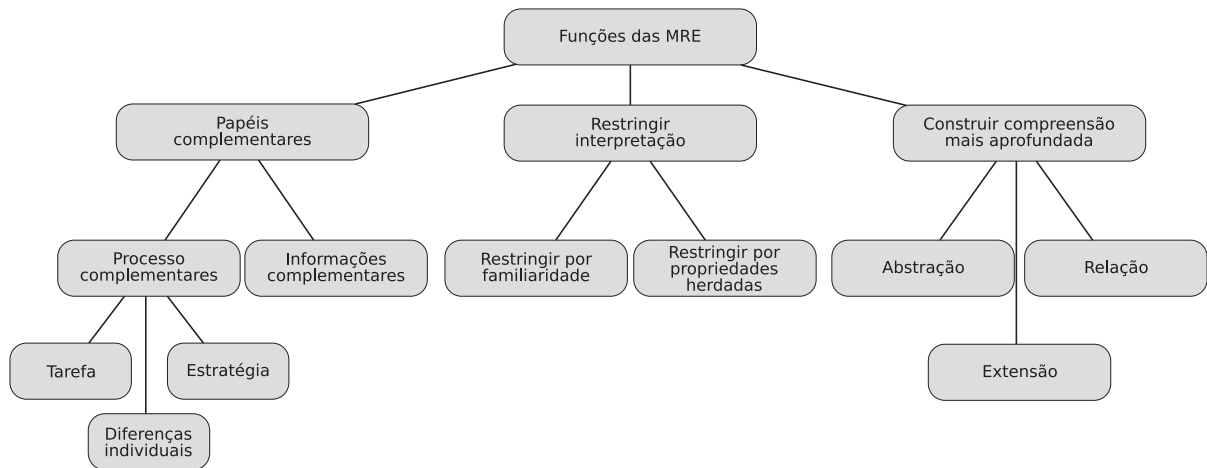


Figura 2.4: Funções das múltiplas representações externas.
Fonte: traduzido de Ainsworth (2006)

As MRE possuem papéis complementares, pois diferem nas informações que cada uma contém ou nos processos que cada uma oferece, permitindo aos estudantes se beneficiarem por meio das vantagens que cada representação oferece. Esta função possui as seguintes subfunções: a) processos complementares: as representações que, teoricamente, contém as mesmas informações, ainda diferem em suas vantagens para o aprendizado em determinadas situações e, com o fornecimento de MRE, processos complementares podem ser apoiados por tarefas (quando a notação representacional é baseada no problema), por diferenças individuais (ao utilizar representações que melhor se adaptam às necessidades dos aprendizes) e por estratégias (ao encorajar os aprendizes a utilizarem diferentes estratégias); e b) informações complementares: cada representação existente dentro das MRE pode conter (algumas) informações diferentes entre si.

O papel restritivo das MRE, segundo Ainsworth (2006), permite aos alunos desenvolver uma melhor compreensão de determinado domínio utilizando uma representação mais familiar para restringir sua interpretação acerca de outra representação mais complexa ou tirando proveito das propriedades inerentes das representações. Ainda segundo a autora, a função de construção permite que os alunos integrem as informações das representações para o desenvolvimento de uma compreensão mais aprofundada, que seria difícil de alcançar com apenas uma única representação. Isso pode ocorrer por abstração (criando entidades mentais que servem de base para novos procedimentos e conceitos), extensão (estendendo o conhecimento de um conceito conhecido para um desconhecido) e relação (associando duas representações). Cabe ressaltar que essas funções (complementar, restringir e construir) não são excludentes, pois, uma mesma representação pode conter uma ou mais destas funções pedagógicas (Laburú e Faria, 2018).

O framework DeFT (Ainsworth, 2006) estabelece, ainda, um conjunto de cinco parâmetros de projeto aplicados exclusivamente às MRE: (a) o número de representações, (b) a forma de distribuição da informação, (c) o formato de cada representação, (d) a sequência de apresentação das representações e (e) o suporte para a alternância entre as representações. Além disso, combinar o tipo de RE com as demandas de aprendizagem pode melhorar, significativamente, o desempenho e a compreensão dos estudantes (Ainsworth, 2006).

2.4 SISTEMAS TUTORES INTELIGENTES

As ferramentas computacionais voltadas à educação vêm sendo desenvolvidas desde a década de 50, época em que surgiram os softwares educacionais conhecidos como CAI - *Computer Assisted Instruction* (Instrução Assistida por Computador) (Jesus, 2009). Estes softwares apenas exibiam o conteúdo e o conhecimento era apresentado de forma linear, não considerando fatores externos para a modificação desta ordem e sem instigar o aprendizado (Bezerra Neto e de Lima, 2016).

Entretanto, com o decorrer do tempo, sentiu-se necessidade da oferta de instruções de ensino e aprendizagem personalizadas, tornando o sistema adaptativo às características dos aprendizes, dando aspectos de “inteligência” aos softwares educacionais (Jesus, 2009). Ao incluir inteligência artificial nos softwares CAI, deu-se origem ao termo ICAI (*Intelligent CAI*, que, posteriormente, foi substituído pelo termo *Intelligent Tutoring Systems* (Sistemas Tutores Inteligentes) (Fischetti e Gisolfi, 1990);

Sistema tutor inteligente (STI) pode ser definido como um programa que auxilia um aprendiz durante sua aprendizagem por meio de análise de diferentes variáveis, podendo servir de guia durante o processo de aprendizagem, intervindo quando necessário ou sugerindo novos materiais conforme o grau de aprendizagem do aprendiz (Dalmon et al., 2010). Um STI deve fornecer orientação personalizada, *feedback* individualizado e adaptação de conteúdo baseado nas necessidades e habilidades de cada estudantes, ou seja, instrução adaptada tanto em forma quanto em conteúdo (Giraffa e Khols-Santos, 2023).

Segundo Nwana (1990), o desenvolvimento de tutores inteligentes encontram-se na intersecção entre as áreas de Ciência da Computação, Psicologia Cognitiva e Pesquisa Educacional (Figura 2.5), sendo essa intersecção referida como Ciência Cognitiva. Esta ciência objetiva estudar o processo de aquisição do conhecimento, sendo importante sua integração à concepção de um STI, fornecendo subsídios valiosos na definição dos modelos contidos neste STI (Jesus, 2009).

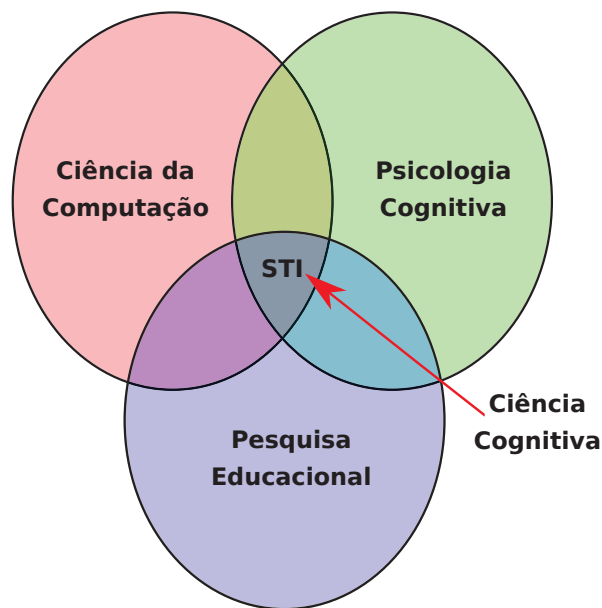


Figura 2.5: Domínio Sistemas Tutores Inteligentes.
Fonte: Adaptado de Nwana (1990)

A arquitetura de um STI clássico é composta por quatro módulos, também conhecidos como modelos: modelo do aluno, modelo do domínio, modelo do tutor e modelo da interface.

Esta arquitetura pode ser observada na Figura 2.6. Cada modelo dentro do STI possui uma responsabilidade, conforme segue (Jesus, 2009; Jiménez et al., 2018):

- **Modelo do aluno:** responsável por conter informações sobre o aprendiz. Com base nas características do aprendiz, o STI define um modelo de aluno personalizado, representando as preferências, conhecimentos, objetivos, histórico de desempenho e outros aspectos relevantes. Com base nessas informações, o STI fornece ao aprendiz uma instrução individualizada;
- **Modelo do domínio:** o conhecimento a ser apresentado e os materiais de ensino sobre o conteúdo fornecido pelo STI são contidos neste modelo. É utilizado para avaliar o desempenho do estudante, além de ser utilizado na geração de soluções para o problema elaborado;
- **Modelo do tutor:** É responsável pela estrutura didático e pedagógica do STI, atuando como a espinha dorsal do sistema de tutoria. Representa o processo de ensino, apoiando a infraestrutura de conhecimento na adaptação da estrutura e do conteúdo a um modelo específico de aluno, ou seja, é utilizado na tomada de decisão sobre qual ou quais táticas de ensino são utilizadas para ensinar o conteúdo abordado;
- **Modelo da interface:** é o elo de comunicação entre o aprendiz e o STI. É por meio deste modelo que o STI apresenta as informações necessárias, exibe os materiais de ensino ou entrega um *feedback* ao aprendiz. Além disso, este modelo deve ser capaz de se adaptar às necessidades individuais do aprendiz, fornecendo-lhe sugestões e explicações quando necessário.

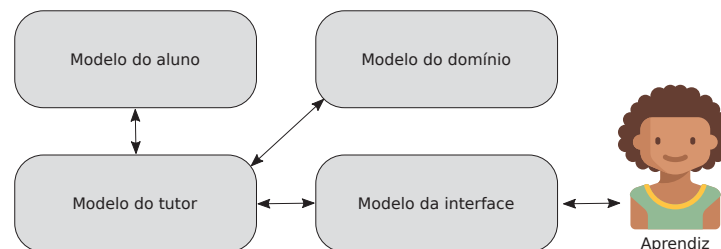


Figura 2.6: Arquitetura de um sistema tutor inteligente clássico.
Fonte: Adaptado de Jiménez et al. (2018)

Há algumas vantagens na incorporação de STI em ambientes de aprendizagem (Stottler e Domeshek, 2005):

- Podem fornecer suporte ao aprendiz quando não houver disponibilidade de tutores humanos;
- Ajudam o aprendiz no desenvolvimento de habilidades relacionadas à resolução de problemas;
- Permitem o desenvolvimento de treinamentos e avaliações mais realistas e relevantes;
- Possibilitam a personalização do treinamento conforme as necessidades individuais dos aprendizes;

- Podem capturar a experiência dos melhores instrutores e distribuir a todos os aprendizes.

Em sala de aula, os professores podem recorrer a recurso de aprendizagem secundários (expressões faciais e linguagem corporal) para compreender a aprendizagem dos alunos, utilizar estratégias diversas para apoiar a aprendizagem (repetir parcialmente uma determinada explicação ou adaptar o *feedback*) ou personalizar suas respostas conforme as necessidades de cada aluno (Woolf, 2010).

Assim como os professores durante uma aula, os sistemas tutores inteligentes realizam inferências sobre o conhecimento do aluno e armazenam-nas no modelo do aluno (Woolf, 2010). Além disso, em determinado momento, o aprendiz pode necessitar de atenção personalizada, sendo necessário interagir com o tutor para a obtenção de *feedback* individualizado. Sobretudo, nem sempre haverá um tutor humano disponível para este atendimento (Jiménez et al., 2018). A utilização de sistemas tutores é, também, particularmente apropriada para ensino e aprendizagem na modalidade remota, em qualquer hora e lugar, podendo ocorrer longe das salas de aula (Alepis e Virvou, 2011).

Há bons exemplos de STI atualmente. A plataforma de aprendizagem de idiomas Duolingo³ utiliza inteligência artificial para analisar os dados dos estudantes, fornecendo *feedback* e instruções personalizados baseado nas áreas em que necessitam serem mais praticados. A Carnegie Learning⁴ é uma plataforma de aprendizagem adaptativa destinada ao ensino de conceitos matemáticos do ensino fundamental ao médio, visando melhorar o desempenho dos estudantes em Matemática, utilizando adaptação do conteúdo e suporte individualizado. O PAT2Math⁵ auxilia estudantes na resolução de problemas algébricos, empregando Inteligência Artificial durante o processo de ensino, corrigindo e provendo dicas durante todos os passos envolvidos da resolução de equações de primeiro grau.

2.4.1 Sistemas Tutores Afetivos

Sistemas tutores inteligentes que incorporam o estado afetivo para personalizar a aprendizagem são comumente referenciados como Sistemas Tutores Afetivos (Ben Ammar et al., 2010; Reis et al., 2018). Esses sistemas monitoram as emoções dos estudantes para fornecer *feedback* adaptado durante o ensino, ajustando-se às necessidades emocionais do aprendiz, criando uma experiência de aprendizado mais humanizada, imitando cenários reais de interação, o que pode ajudar a estimular o engajamento e a motivação dos estudantes (Reis et al., 2018).

É fundamental que o estado afetivo dos estudantes seja incorporado na tomada de decisões dos sistemas tutores. As emoções estão intimamente ligadas ao processo cognitivo e, em determinadas situações, podem impedir que os estudantes se concentrem quando experimentam emoções intensas, ou, ao contrário, podem estimular um pensamento mais criativo quando experimentam emoções positivas (Ochs e Frasson, 2004).

Segundo Mohanan et al. (2017), os sistemas tutores afetivos podem utilizar webcams para capturar as expressões faciais dos estudantes e, além disso, analisar dados relacionados aos movimentos e cliques do mouse para avaliar o estado emocional e afetivo dos alunos, permitindo que o sistema ajuste dinamicamente o conteúdo ou elabore outros materiais conforme necessário.

Quando o estado afetivo é inferido por meio das expressões faciais, é possível capturar imagens dos estudantes utilizando câmeras direcionais. Uma das técnicas para processar essas imagens e reconhecer o estado afetivo é realizada por meio de redes neurais profundas, como no trabalho apresentado por Toisoul et al. (2021). Os autores disponibilizam dois modelos

³<https://pt.duolingo.com/>. Acesso em: 07/03/2024.

⁴<https://www.carnegielearning.com/>. Acesso em: 07/03/2024.

⁵<http://www.projeto.unisinos.br/pat2math/>. Acesso em: 07/03/2024.

pré-treinados que reconhecem 5 classes (neutro, feliz, triste, surpresa e medo), com acurácia de 82% ou 8 classes (neutro, feliz, triste, surpresa, medo, nojo, raiva e desprezo) de emoções, com acurácia de 75%, utilizando a base de dados de expressões faciais AffectNet (Mollahosseini et al., 2019), além de fornecer valores de valência e excitação, bem como pontos de referência faciais.

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Considerando o escopo desta pesquisa, que objetiva a criação de uma abordagem para o desenvolvimento de interfaces tangíveis de usuário, multi-representacionais, dotadas de aspectos de sistemas tutores inteligentes, capazes de capacitar as funções executivas dos estudantes, foram apresentados, neste capítulo, conceitos relevantes, considerados importantes para o desenvolvimento da pesquisa. Foram abordados conceitos sobre as funções executivas e, em especial, o componente controle inibitório. Em seguida, foram apresentados conceitos sobre interfaces tangíveis de usuário. Foram também apresentados os conceitos fundamentais sobre múltiplas representações externas, as quais possuem funções que apoiam a aprendizagem fornecendo diferentes informações e processos, ajudando na compreensão de conceitos complexos. Por fim, foram discutidos conceitos sobre sistemas tutores inteligentes. O uso dos conceitos apresentados neste capítulo será detalhado no Capítulo 4.

3 MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

O presente capítulo apresenta o mapeamento sistemático da literatura (MSL) desenvolvido baseado nos objetivos propostos deste estudo. No decorrer do capítulo é apresentado o protocolo elaborado e discutido os resultados obtidos.

3.1 METODOLOGIA

O MSL fornece uma visão geral sobre determinada área de pesquisa, visando estabelecer a existência de estudos sobre um tópico específico, possibilitando, assim, obter uma indicação da quantidade de evidências e possíveis lacunas (Kitchenham e Charters, 2007). Este MSL objetivou identificar o estado da arte da pesquisa e identificar tópicos de interesse, não sendo necessário a realização de uma análise em profundidade. O protocolo do mapeamento sistemático foi baseado nas diretrizes proposta por Kitchenham e Charters (2007).

O MSL buscou identificar e caracterizar o uso das MRE na capacitação das funções executivas, visando o desenvolvimento deste sistema. A estrutura do objetivo do mapeamento sistemático foi estabelecida, seguindo o paradigma *Goal-Question-Metrics* (GQM) (Basili e Rombach, 1988), objetivando *analisar* estudos primários, *com o propósito* de caracterizar, *em relação à* utilização de MRE na capacitação das funções executivas, *do ponto de vista dos* pesquisadores em Ciência da Computação, *no contexto de* publicações disponíveis nas bibliotecas digitais ACM DL, APA PsycNet, Engineering Village, IEEE Xplore e PubMed.

A questão de pesquisa principal do mapeamento é **“Como as múltiplas representações externas têm sido utilizadas na capacitação de funções executivas?”**. Desta forma, para responder à questão principal, foram estabelecidas subquestões de pesquisa, as quais são exibidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Subquestões de pesquisa

Subquestão	Possíveis respostas
SQ1: Qual a quantidade de representações externas utilizadas no estudo?	Valor numérico da quantidade de representações externas utilizadas pelo estudo
SQ2: Qual a combinação de representações externas utilizada no estudo?	As representações externas podem ser enquadradas como (a) Acional-operacional, (b) Simbólico-matemático, (c) Verbal-textual e (d) Visual-gráfico
SQ3: Como a informação é distribuída entre as representações externas?	As respostas podem ser (a) Redundante, (b) Parcialmente redundante, (c) Não redundante, (d) Combinado e (e) Não informado
SQ4: Como é realizado o sequenciamento de apresentação das representações externas?	As respostas podem ser (a) Apresentadas simultaneamente, (b) Sequencial, alternada pelo sistema, (c) Sequencial, alternada pelo usuário, (d) Sem ordem definida, (e) Combinado e (f) Não informado
SQ5: Qual a tecnologia utilizada na apresentação das múltiplas representações externas?	As tecnologias utilizadas podem ser enquadradas como (a) Desktop, (b) Interface tangível, (c) Material impresso, (d) Web e (e) Não especificado

Continua na próxima página

Tabela 3.1 – Continuação da página anterior

Subquestão	Possíveis respostas
SQ6: Quais componentes das funções executivas são abordadas pelo estudo?	Os componentes das funções executivas foram indicados como (a) Flexibilidade cognitiva, (b) Inibição, (c) Memória de trabalho e (d) Combinado
SQ7: Qual teoria ou modelo base é abordado no estudo?	Identificação de quais teorias ou modelos serviram de base durante o estudo (por exemplo: teoria da aprendizagem multimídia, teoria da flexibilidade cognitiva, etc.)
SQ8: Quais conteúdos disciplinares são abordados pelo estudo?	Identificação dos conteúdos disciplinares abordados no estudo.
SQ9: Em qual contexto o estudo foi aplicado e avaliado?	Identificação do local de aplicação e avaliação do estudo: (a) Casa, (b) Escola, (c) Clínica, (d) Combinado e (e) Não informado
SQ10: Qual é a faixa etária considerada no estudo?	Identificação da faixa etária considerada no estudo: (a) criança, (b) adolescente, (c) adulto e (d) idoso

Foram considerados estudos primários escritos em língua inglesa, por ser o idioma predominante nas pesquisas na área. A busca nas bases de dados foi realizada em 15 de janeiro de 2021 e não foi estabelecida restrição em relação à data de publicação dos estudos.

Para a identificação dos estudos, foram utilizadas cinco bibliotecas digitais: ACM DL, APA PsycNet, Engineering Village, IEEE Xplore e PubMed. Dada a característica multidisciplinar, essas bibliotecas foram selecionadas por abrangerem publicações nas áreas de Ciência da Computação, Ciências da Saúde e Psicologia. O presente MSL utilizou o critério PIO (*Population, Intervention, Output*) (Kitchenham e Charters, 2007), para a definição da *string* de busca. As palavras-chave utilizadas em cada componente do critério PIO são apresentadas conforme segue: a) *Population*: executive functions, cognitive flexibility, shifting, inhibition, working memory; b) *Intervention*: multiple external representations, multiple representations, multimodal representations; c) *Output*: learning, education, teaching. As palavras-chave dos componentes do critério PIO foram intercaladas com o operador OR e os componentes foram intercalados com o operador AND, conforme pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: *String* de busca

(“*executive functions*” OR “*cognitive flexibility*” OR “*shifting*” OR “*inhibition*” OR “*working memory*”) AND (“*multiple external representations*” OR “*multiple representations*” OR “*multimodal representations*”) AND (“*learning*” OR “*education*” OR “*teaching*”)

Cada artigo obtido por meio do MSL foi avaliado de forma independente por dois pesquisadores, os quais decidiram sobre a seleção ou não. Foram utilizadas a aplicação de dois filtros. No primeiro, foi realizada a leitura somente do título, resumo e palavras-chave e, no segundo, foi considerada a leitura completa do artigo.

Os critérios de inclusão e exclusão podem ser visualizados na Tabela 3.3. Durante a aplicação do primeiro filtro, os artigos foram excluídos por consenso entre os pesquisadores. Em caso de discrepância, o artigo foi incluído para aplicação do segundo filtro.

Foi utilizado, neste MSL, o teste estatístico de Kappa para avaliar o grau de concordância entre os dois pesquisadores. O valor de Kappa (κ), de maneira geral, pode variar entre -1 e +1, sendo valores negativos indicando discordância total e 1 representa uma concordância perfeita (McHugh, 2012). O valor de (κ) para o primeiro filtro foi 0.85, indicando uma concordância

quase perfeita. As discrepâncias na seleção dos artigos, durante a aplicação do segundo filtro, foram resolvidas por consenso entre os pesquisadores após a leitura completa. O segundo filtro obteve o valor 1 no coeficiente de Kappa, indicando uma concordância perfeita.

Tabela 3.3: Critérios de inclusão e de exclusão

ID	Critério	Descrição
CI1	Inclusão	Artigos que abordam duas ou mais formas de representações externas envolvendo funções executivas
CI2	Inclusão	Artigos destinados à capacitação da flexibilidade cognitiva, inibição e/ou memória de trabalho utilizando múltiplas representações externas
CE1	Exclusão	Publicações que não atendam ao escopo da pesquisa
CE2	Exclusão	Publicações que não estejam em língua portuguesa ou língua inglesa
CE3	Exclusão	Publicações que já foram selecionadas em outra base de dados (publicações duplicadas)
CE4	Exclusão	Publicações pertencentes à literatura cinzenta (manuais, relatórios, teses, dissertações, etc.), excluindo capítulos de livros que são artigos
CE5	Exclusão	Publicações que representem estudos secundários ou terciários
CE6	Exclusão	Publicações que não estejam disponíveis integralmente para a leitura e análise de dados

A Tabela 3.4 apresenta o número de publicações obtidas e o total de artigos selecionados após a aplicação do 1º e 2º filtro. A busca inicial nas bibliotecas selecionadas retornou 188 publicações. Após a aplicação do 2º filtro, foram selecionados 18 publicações para a extração dos dados, resultando em 9.57% do total.

Tabela 3.4: Quantidade de publicações obtidas e incluídas no mapeamento sistemático

Biblioteca selecionada	Publicações obtidas	1º filtro	2º filtro
ACM Digital Library	144	44	9
APA PsycNet	28	12	5
Engineering Village	7	2	2
IEEE Xplore	4	2	1
PubMed	5	3	1
Total	188	63	18

O instrumento de extração de dados foi elaborado para conter detalhes sobre os autores, o título do artigo, ano e local de publicação e objetivo do trabalho. Os dados extraídos foram agrupados em uma planilha eletrônica, utilizando o Google Sheets, auxiliando assim a sintetização dos dados. Foi utilizado ainda o software Gnuplot para a geração dos gráficos.

Além disso, o instrumento objetivou responder as subquestões de pesquisa, descritas na Tabela 3.1, contendo, quando aplicado, as possíveis respostas para cada subquestão. A estratégia de extração garante que os mesmos critérios de extração sejam utilizados em todas as publicações selecionadas.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As publicações, incluídas a partir do segundo filtro, podem ser observadas na Tabela 3.5. Foram extraídos dados de 18 artigos, sendo estes publicados entre os anos de 1989 e 2020,

conforme pode ser observado na Figura 3.1. Entretanto, observa-se um discreto aumento no número de publicações nos últimos anos, com o maior número de publicações ocorrendo no ano de 2020 (Hansen e Richland, 2020; Tomlinson et al., 2020; Blanchard et al., 2020). Isso demonstra que, apesar do baixo número de publicações, ainda existem pesquisas sobre o assunto sendo realizadas atualmente.

Tabela 3.5: Relação das publicações obtidas e incluídas no mapeamento sistemático

Ref.	Título	Autor e ano
PUB0001	Teaching and Learning Science through Multiple Representations: Intuitions and Executive Functions	Hansen e Richland (2020)
ACM0019	Auditory Display in Interactive Science Simulations: Description and Sonification Support Interaction and Enhance Opportunities for Learning	Tomlinson et al. (2020)
ACM0047	Dual-Modality Instruction and Learning: A Case Study in CS1	Blanchard et al. (2020)
APA0021	Executive function in learning mathematics by comparison: Incorporating everyday classrooms into the science of learning	Begolli et al. (2018)
ACM0123	The Haptic Bridge: Towards a Theory for Haptic-Supported Learning	Davis et al. (2017)
ACM0143	Writing In-Code Comments to Self-Explain in Computational Science and Engineering Education	Vieira et al. (2017)
ACM0038	Design Rationale: Opportunities and Recommendations for Tangible Reading Systems for Children	Fan et al. (2016)
ENV0001	Integration of multiple external representations in chemistry: A requirements-gathering study	Pande e Chandrasekharan (2014)
ENV0002	A creative experience for chemical, food, and environmental engineering students in a material balances course	Husted et al. (2014)
IEE0001	Multimedia Educational Pills (MEPs) for Corporate Training: Methodology and Cases	Giordani et al. (2012)
APA0015	Exploring the roles of the executive and short-term feature-binding functions in retrieval of retrograde autobiographical memories in severe traumatic brain injury	Coste et al. (2011)
ACM0003	A Closer Look at the Split Attention Effect: Integrated Presentation Formats for Troubleshooting Tasks	Huff et al. (2010)
APA0025	External and mental referencing of multiple representations	Bodemer e Faust (2006)
ACM0138	Visualizing Complex Medical Phenomena for Medical Students	Vainio et al. (2005)

Continua na próxima página

Tabela 3.5 – Continuação da página anterior

Ref.	Título	Autor e ano
ACM0030	Collaborative Modeling: Hiding UML and Promoting Data Examples in NEMo	Schank e Hamel (2004)
APA0007	Cognitive load in reading a foreign language text with multimedia aids and the influence of verbal and spatial abilities	Plass et al. (2003)
APA0026	Acquisition of a problem-solving skill: Levels of organization and use of working memory	Carlson et al. (1990)
ACM0128	The Role of External Representation in the Writing Process: Implications for the Design of Hypertext-Based Writing Tools	Neuwirth e Kaufer (1989)

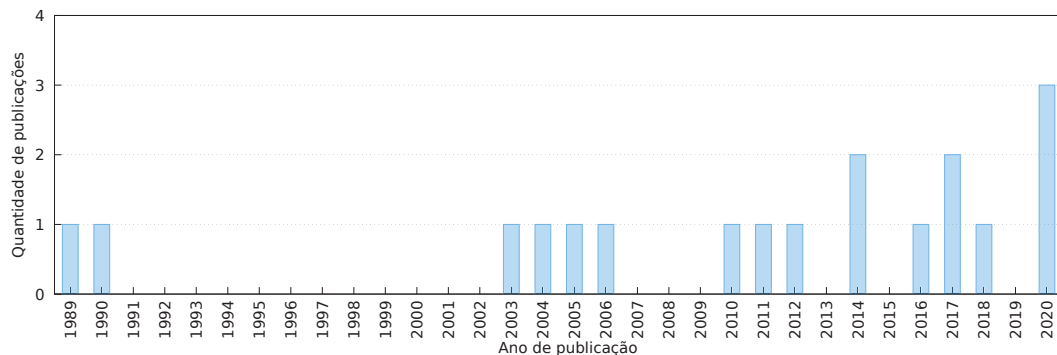


Figura 3.1: Quantidade de publicações por ano

Os artigos foram publicados em seis periódicos e em 10 eventos científicos. As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, a quantidade de artigos publicados nos periódicos e nos eventos científicos identificados neste MSL. O periódico com mais publicações foi o *Computers in Human Behavior*, com dois artigos publicados. Este periódico, segundo o site oficial, tem foco em pesquisas sobre o uso de computadores sob a perspectiva psicológica.

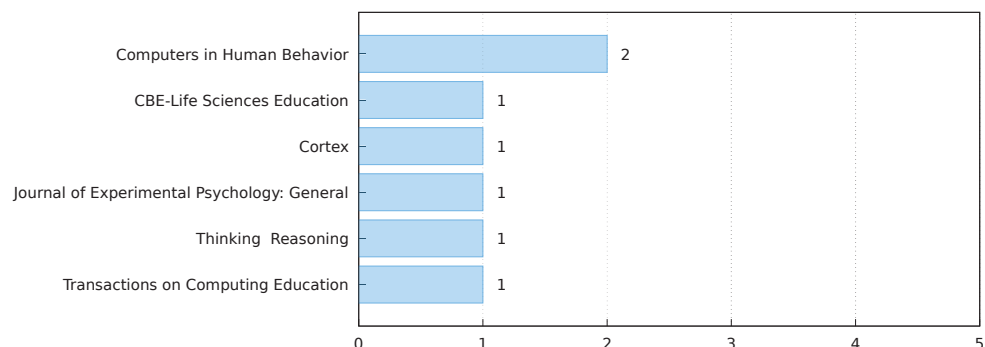


Figura 3.2: Quantidade de publicações por periódico

Os principais eventos, com dois artigos cada, foram *Conference on Human Factors in Computing Systems* e *Conference on Interaction Design and Children*, ambos organizados pela *Association for Computing Machinery* (ACM). Nas subseções a seguir, serão respondidas as subquestões de pesquisa.

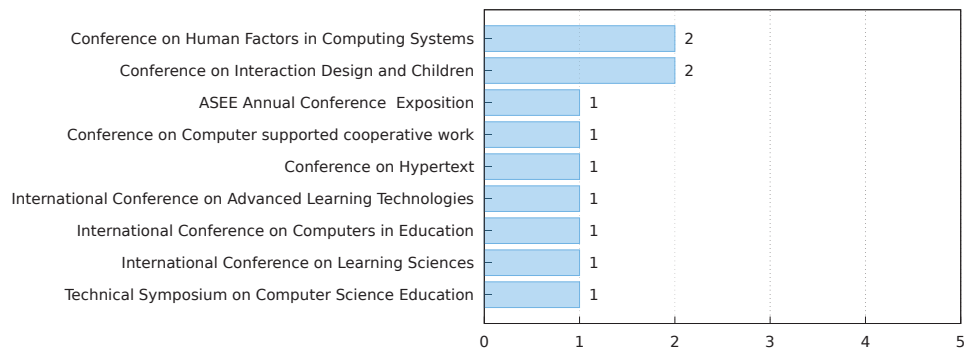


Figura 3.3: Quantidade de publicações por evento científico

3.2.1 Número de representações externas

A SQ1 (Qual a quantidade de representações externas utilizadas no estudo?) procurou investigar a quantidade de RE utilizada por cada publicação obtida no MSL. Dentre os parâmetros de *design* aplicados exclusivamente a sistemas multi-representacionais, o número de representações deve ser analisado (Ainsworth, 2006).

A quantidade de RE utilizada variou entre dois e sete, como pode ser observado na Figura 3.4. A maioria das publicações obtidas no MSL, com 44.44%, recorreu a duas RE (Hansen e Richland, 2020; Coste et al., 2011; Begolli et al., 2018; Bodemer e Faust, 2006; Huff et al., 2010; Schank e Hamel, 2004; Fan et al., 2016; Blanchard et al., 2020). As demais quantidades de RE utilizadas nas publicações possuem valores mais próximos entre si, sendo 16.67% com quatro (Pande e Chandrasekharan, 2014; Plass et al., 2003; Neuwirth e Kaufer, 1989) e 16.67% com cinco (Husted et al., 2014; Vainio et al., 2005; Vieira et al., 2017) RE, 11.11% das publicações utilizaram três RE (Carlson et al., 1990; Davis et al., 2017) e, com 5.56%, as publicações que utilizaram seis (Tomlinson et al., 2020) ou sete (Giordani et al., 2012) RE, cada.

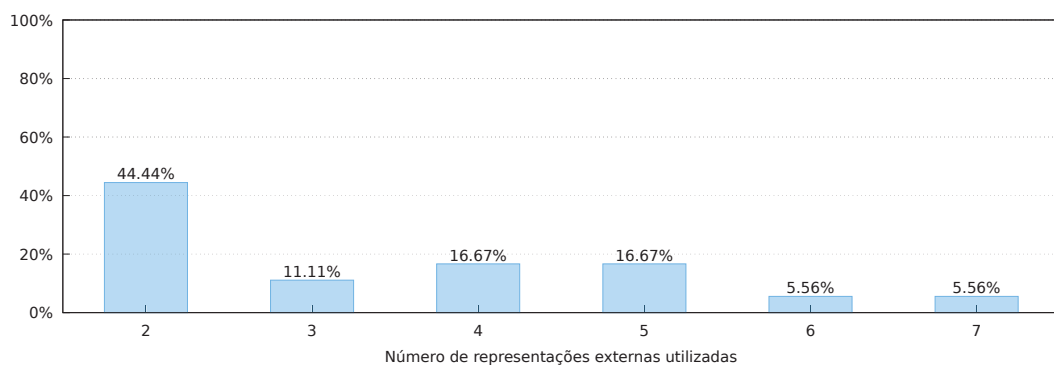


Figura 3.4: Quantidade de representações externas utilizadas

Ao analisar a Figura 3.4, pode-se observar que houve preferência por um número menor de RE envolvidas no sistema multi-representacional. Sobretudo, é recomendável a utilização de um número mínimo de representações, devendo este corresponder com a função pedagógica estabelecida, considerando as tarefas cognitivas envolvidas na adição de RE (Ainsworth, 2006).

3.2.2 Combinação das representações externas

O segundo elemento pertencente aos parâmetros de *design*, segundo Ainsworth (2006), é o formato de apresentação das MRE. Assim, a SQ2 objetivou identificar os diversos tipos de

RE utilizados nas publicações obtidas neste MSL. A integração entre as representações externas e os processos científicos envolvidos na aprendizagem podem maximizar os benefícios de cada representação. Além disso, essa integração pode permitir que as limitações contidas em uma determinada representação sejam compensadas por meio de outras (Wu e Puntambekar, 2012).

Para categorizar as RE contidas nos artigos, optou-se por utilizar a taxonomia apresentada por Wu e Puntambekar (2012). A taxonomia contém as categorias verbal-textual, que engloba palavras, texto escrito e símbolos linguísticos; simbólico-matemático, categorizando sinais, símbolos, equações, fórmulas e convenções matemáticas; visual-gráfico, compreendendo gráficos, figuras, tabelas, simulações, animações e vídeos; e acional-operacional, para categorizar demonstrações, modelos físicos e manipulativos. Cada RE foi enquadrada em uma destas categorias. Assim, os artigos recorreram a RE enquadradas em uma ou mais categorias.

Como pode ser observado na Figura 3.5, a maioria, com 50% das publicações (Hansen e Richland, 2020; Giordani et al., 2012; Plass et al., 2003; Coste et al., 2011; Begolli et al., 2018; Bodemer e Faust, 2006; Blanchard et al., 2020; Neuwirth e Kaufer, 1989; Vainio et al., 2005), recorreu a RE utilizando o dueto verbal-textual e visual-gráfico. Algumas das RE contidas nestas categorias e utilizadas pelos estudos selecionados são: texto, áudios descritivos, proposições orais, imagens, vídeos, fotos, tabelas e animações.

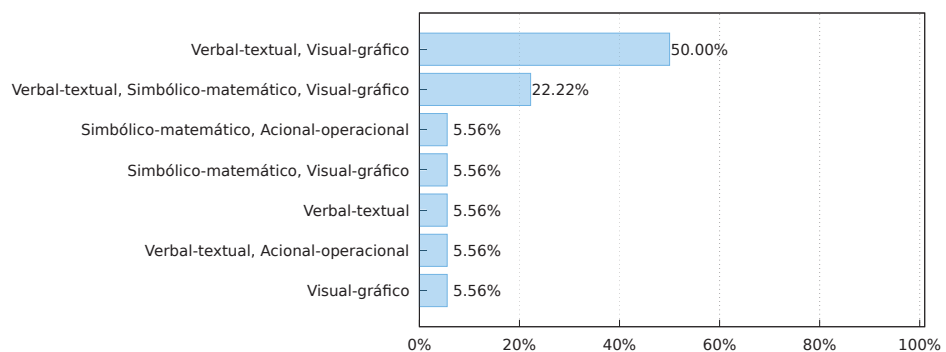


Figura 3.5: Categorias das combinações das representações externas

A combinação de representações externas da tríade verbal-textual, simbólico-matemático e visual-gráfico esteve presente em 22.22% (Husted et al., 2014; Carlson et al., 1990; Tomlinson et al., 2020; Vieira et al., 2017). Observa-se que o dueto principal, verbal-textual e visual-gráfico, esteve presente, isolados ou associado a outra categoria, em 72.22% dos estudos. Isso se justifica, pois, quando imagens são utilizadas adjuntas de texto, podem melhorar a memorização do texto, dado que as imagens podem representar o conteúdo do texto e fornecer uma representação não verbal que possa ser recuperada (Robinson, 2002).

Publicações que apresentaram RE nas demais categorias, representam 5,56%, cada, sendo simbólico-matemático e visual-gráfico (Pande e Chandrasekharan, 2014), verbal-textual e acional-operacional (Fan et al., 2016), visual-gráfico (Huff et al., 2010), verbal-textual (Schank e Hamel, 2004) e simbólico-matemático e acional-operacional (Davis et al., 2017).

3.2.3 Distribuição da informação entre as representações externas

A flexibilidade na forma como as informações são distribuídas entre as RE impacta na complexidade de cada representação externa e na redundância de informações entre elas (Ainsworth, 2006). Assim, a SQ3 objetivou identificar como a informação foi distribuída em cada estudo, haja vista que este quesito faz parte dos parâmetros de *design* estabelecidas no DeFT.

Conforme observado na Figura 3.6, 38.89% dos estudos apresentaram o conteúdo parcialmente redundante entre as MRE (Husted et al., 2014; Begolli et al., 2018; Bodemer e Faust, 2006; Huff et al., 2010; Tomlinson et al., 2020; Neuwirth e Kaufer, 1989; Vainio et al., 2005). A informação foi apresentada de maneira redundante em 38.89% dos estudos (Hansen e Richland, 2020; Plass et al., 2003; Carlson et al., 1990; Schank e Hamel, 2004; Fan et al., 2016; Blanchard et al., 2020; Davis et al., 2017). Não houve redundância de informações entre as múltiplas representações em 5.56% dos estudos (Coste et al., 2011).

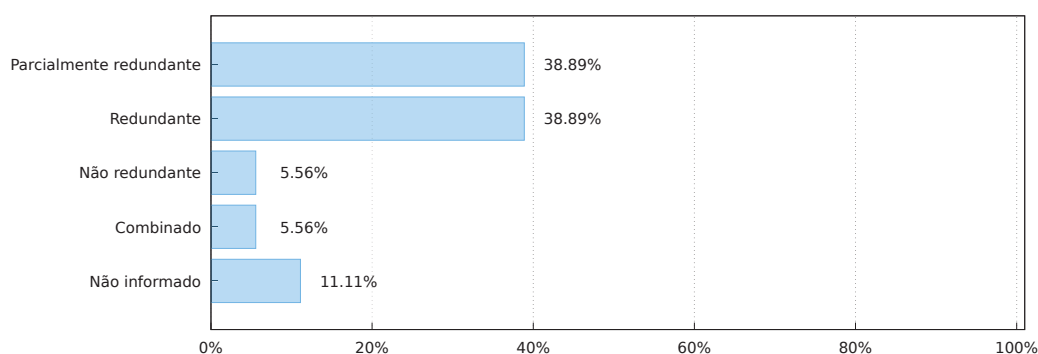


Figura 3.6: Formas de distribuição da informação

Em 5.56% dos estudos (Pande e Chandrasekharan, 2014), foi utilizado a combinação de duas formas de distribuição das informações entre as MRE. Neste caso, havia grupos de RE, com e sem redundância de informações, que compunham cada grupo. Não foi possível identificar a forma de distribuição das informações em 11.11% dos estudos (Giordani et al., 2012; Vieira et al., 2017).

Apesar da maioria dos artigos apresentarem as informações de maneira redundante, esta forma é apenas sugerida quando as informações, isoladamente, são ininteligíveis; caso contrário, é recomendado a omissão da redundância. Processar a mesma informação, mais de uma vez, pode fazer com que os alunos utilizem recursos cognitivos desnecessários e tenham sua aprendizagem comprometida (Cook, 2006).

3.2.4 Sequenciamento de apresentação das representações externas

O sequenciamento, outro elemento dos parâmetros de *design* do DeFT (Ainsworth, 2006), diz respeito sobre como as MRE devem ser apresentadas ou construídas, necessário quando as representações não são apresentadas simultaneamente. Além disso, o usuário ou o sistema devem decidir quando uma nova RE será apresentada ou quando ocorrerá a alternância entre as MRE existentes.

Sobretudo, o sequenciamento das MRE é considerado crítico para a aprendizagem de determinados conceitos e pode afetar o foco dos estudantes em relação às explicações e moldar suas percepções sobre as representações (Wu et al., 2012; Hsu e Wu, 2015). Assim, a SQ4 buscou identificar como ocorre o sequenciamento de apresentação das RE nos estudos obtidos pelo MSL.

Como pode ser observado na Figura 3.7, 33.33% dos estudos (Coste et al., 2011; Carlson et al., 1990; Tomlinson et al., 2020; Fan et al., 2016; Blanchard et al., 2020; Davis et al., 2017) realizaram a apresentação simultânea das MRE. Em 11.11% dos artigos (Pande e Chandrasekharan, 2014; Begolli et al., 2018) as RE foram apresentadas de forma sequencial, sendo a alternância realizada pelo próprio sistema, enquanto, em 16.67% dos artigos (Husted

et al., 2014; Huff et al., 2010; Schank e Hamel, 2004), essa alternância foi realizada pelo próprio usuário.

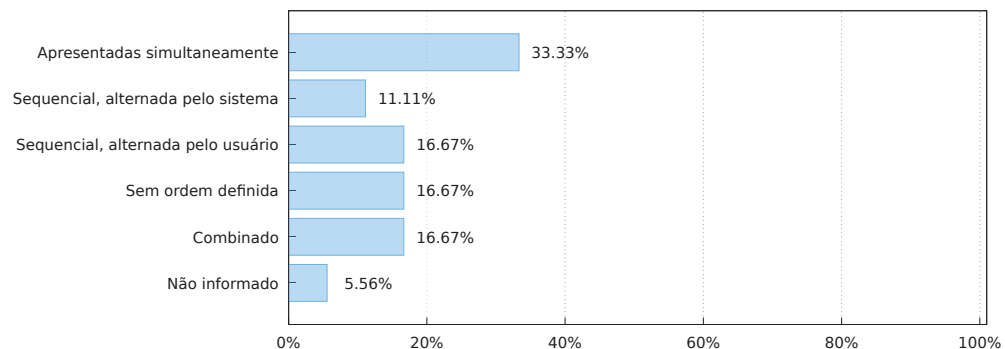


Figura 3.7: Tipos de sequenciamento de apresentação

Os usuários puderam acessar as RE de forma livre (sem ordem definida) em 16.67% dos estudos (Giordani et al., 2012; Plass et al., 2003; Neuwirth e Kaufer, 1989). Uma combinação das possibilidades de sequenciamento foi utilizada em 16.67% dos estudos (Hansen e Richland, 2020; Bodemer e Faust, 2006; Vainio et al., 2005). Não foi possível identificar o sequenciamento das representações externas em 5.56% dos estudos (Vieira et al., 2017).

3.2.5 Tecnologia utilizada na exibição

A tecnologia utilizada no suporte para a alternância entre as MRE é outro parâmetro de *design* do DeFT, pelo fato de poder oferecer, de forma automática, a tradução entre as representações e possuir diversas maneiras de indicar a conexão entre as RE (Ainsworth, 2006). Desse modo, a SQ5 visa identificar qual o tipo de tecnologia utilizada para a apresentação das MRE. Foram estabelecidas categorias para agrupar as tecnologias identificadas.

Entre os artigos obtidos por este MSL, apenas uma publicação (Begolli et al., 2018) não especificou a tecnologia envolvida na apresentação das RE. O uso de computador (notebook, PC, entre outros) foi o recurso predominante na exibição. Sobretudo, 11 publicações (Pande e Chandrasekharan, 2014; Husted et al., 2014; Plass et al., 2003; Coste et al., 2011; Bodemer e Faust, 2006; Carlson et al., 1990; Huff et al., 2010; Fan et al., 2016; Blanchard et al., 2020; Davis et al., 2017; Neuwirth e Kaufer, 1989) apresentaram uso de software em plataforma *desktop*, enquanto seis publicações (Hansen e Richland, 2020; Giordani et al., 2012; Tomlinson et al., 2020; Schank e Hamel, 2004; Vainio et al., 2005; Vieira et al., 2017) fizeram o uso de software em plataforma *Web*.

Duas publicações utilizaram interface tangível (Fan et al., 2016; Davis et al., 2017) e material impresso (Pande e Chandrasekharan, 2014; Husted et al., 2014) foi apresentado em duas publicações. Apesar da plataforma *Web* permitir o acesso por meio de dispositivos móveis (*smartphone* e *tablet*), notou-se ausência do uso específico da plataforma *mobile*.

Ao analisar a correlação entre a tecnologia utilizada e o tipo de representação externa (Figura 3.8), observa-se que não houve experimentação envolvendo interfaces tangíveis e representações visuais-gráficas, além de haver pouca integração entre a plataforma *desktop* e representações acionais-operacionais.

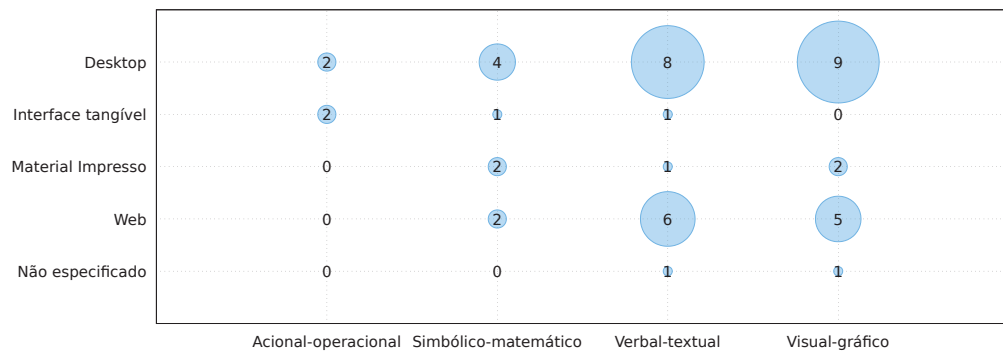


Figura 3.8: Correlação entre tecnologia utilizada e tipo de representação externa

3.2.6 Componentes das funções executivas

A SQ6 buscou responder quais componentes das funções executivas foram abordados nas publicações. Conforme pode ser observado na Figura 3.9, 66.67% das publicações abordaram o componente memória de trabalho (Pande e Chandrasekharan, 2014; Plass et al., 2003; Bodemer e Faust, 2006; Carlson et al., 1990; Huff et al., 2010; Tomlinson et al., 2020; Schank e Hamel, 2004; Fan et al., 2016; Blanchard et al., 2020; Davis et al., 2017; Neuwirth e Kaufer, 1989; Vieira et al., 2017), enquanto o componente flexibilidade cognitiva (Giordani et al., 2012; Husted et al., 2014; Vainio et al., 2005) foi abordado em 16.67% das publicações.

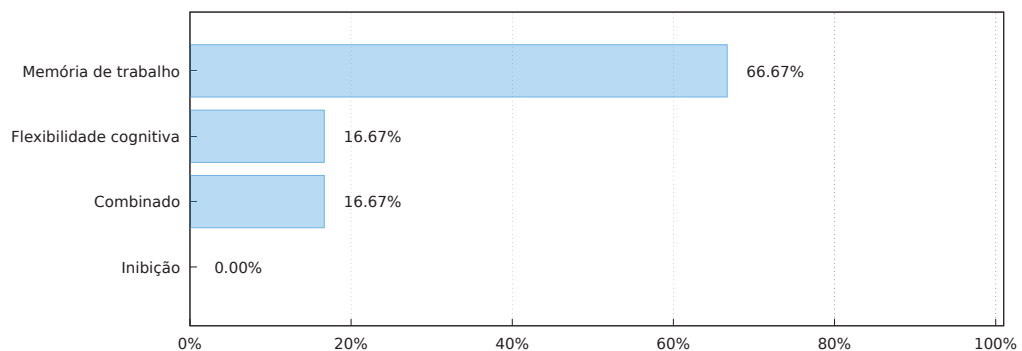


Figura 3.9: Componentes das funções executivas

Em 16.66% das publicações (Hansen e Richland, 2020; Coste et al., 2011; Begolli et al., 2018), as funções executivas foram abordadas como um conjunto de componentes (memória de trabalho, flexibilidade cognitiva e inibição), identificado aqui como Combinado. Nenhuma publicação abordou o componente inibição de forma isolada.

Apesar das publicações abordarem os componentes das funções executivas, apenas quatro publicações avaliaram o(s) componente(s) durante o estudo. Para avaliar a memória de trabalho, no trabalho de Huff et al. (2010) foi realizado um teste de capacidade de memória de trabalho (*working memory span test*) e, no trabalho de Carlson et al. (1990), foi realizada a avaliação do estado da saída de circuitos eletrônicos em intervalos de tempo regulares.

Os trabalhos que avaliaram os três componentes das funções executivas recorreram a testes padronizados. Em Coste et al. (2011) foi utilizado o teste *Plus/Minus Task* para avaliar a flexibilidade cognitiva, *Running Span Task* para avaliar a memória de trabalho e *Stroop Task* para avaliar a inibição. O trabalho de Begolli et al. (2018) usou o *Automated Working Memory Assessment Battery* para avaliar a memória de trabalho, *The Hearts and Flowers Task* para avaliar a flexibilidade cognitiva e, para avaliar a inibição, utilizou o teste *The Stop-Signal Task*.

Quando estabelecida uma correlação entre o número de representações externas e o componente das funções executivas abordado (Figura 3.10), é possível notar que, ao considerar os componentes memória de trabalho ou combinado, os estudos usaram uma quantidade menor de representações externas. Entretanto, ao considerar apenas o componente flexibilidade cognitiva, utilizou-se um número maior de representações externas.

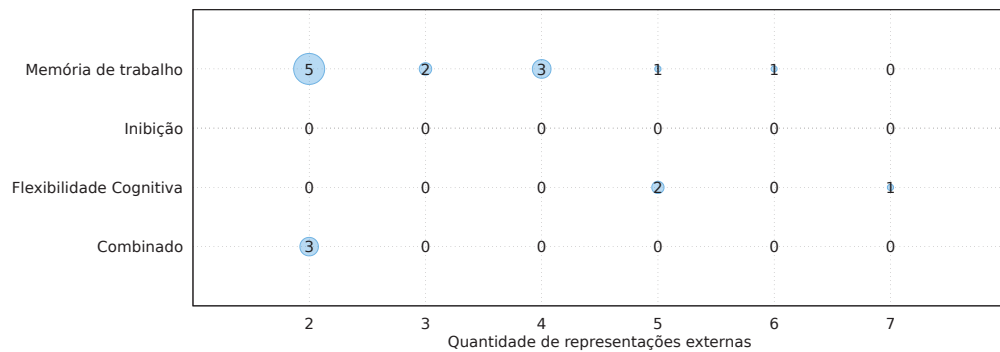


Figura 3.10: Correlação entre o número de representações utilizadas e as funções executivas

Quando analisada a correlação entre o tipo de representação externa utilizada e o componente das funções executivas abordado, como demonstrado na Figura 3.11, nota-se que, para a categoria acional-operacional, avaliou-se apenas o componente memória de trabalho, não havendo estudos que envolvessem os componentes inibição ou flexibilidade cognitiva. É possível observar, ainda, que não houve estudos que considerassem, simultaneamente, mais de um componente das funções executivas utilizando RE contidas nas categorias acional-operacional e simbólico-matemático.

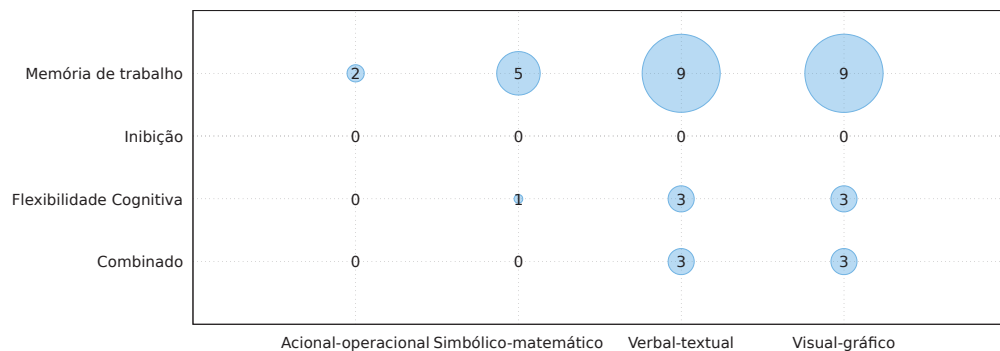


Figura 3.11: Correlação entre o tipo de representações utilizadas e as funções executivas

3.2.7 Teoria ou modelo utilizado como base

Teorias e modelos são partes fundamentais do corpo de conhecimento de diversos campos de pesquisa, pois fornecem explicações para fenômenos e são amplamente difundidos (Tracey e Morrow, 2017). Desta forma, a SQ7 procurou identificar as teorias ou modelos utilizados como base nos artigos. Algumas publicações basearam-se em mais de uma teoria e/ou modelo.

Dentre as 18 publicações selecionadas neste MSL, não foi possível identificar a teoria ou modelo em um número considerável de estudos (22.22%) (Begolli et al., 2018; Tomlinson et al., 2020; Schank e Hamel, 2004; Neuwirth e Kaufer, 1989). A teoria mais mencionada foi a Teoria da Flexibilidade Cognitiva (Giordani et al., 2012; Husted et al., 2014; Vainio et al., 2005).

Essa teoria visa o desenvolvimento da flexibilidade cognitiva e descreve como as múltiplas representações e a rerepresentação dos materiais, conceitualmente diferente, podem servir de apoio à formação da compreensão de fenômenos complexos (Vainio et al., 2005).

Outras teorias são abordadas pelas demais publicações: teorias baseadas em raciocínio relacional (Hansen e Richland, 2020), teoria da cognição distribuída e corporificada (Pande e Chandrasekharan, 2014), teoria de investimento da criatividade (Husted et al., 2014), teoria da aprendizagem multimídia (Plass et al., 2003), teoria da carga cognitiva (Bodemer e Faust, 2006; Vieira et al., 2017), teoria ACT* (Carlson et al., 1990), teoria de detecção de sinal (Huff et al., 2010), teoria da codificação dual (Fan et al., 2016) e construtivismo (Davis et al., 2017).

Outras publicações utilizaram modelos como base para seus estudos, como o modelo de Johnstone (Pande e Chandrasekharan, 2014), modelo Conway de memória autobiográfica (Coste et al., 2011), modelo neo-piagetiano (Blanchard et al., 2020).

3.2.8 Conteúdos disciplinares abordados

A SQ8 investigou o conteúdo disciplinar abordado durante os experimentos relatados nos artigos. Como pode ser observado na Figura 3.12, as MRE podem ser exploradas no ensino e aprendizagem de diferentes disciplinas, em diferentes áreas de conhecimento. Entretanto, não foi possível identificar o conteúdo disciplinar em 5.56% dos estudos (Coste et al., 2011).

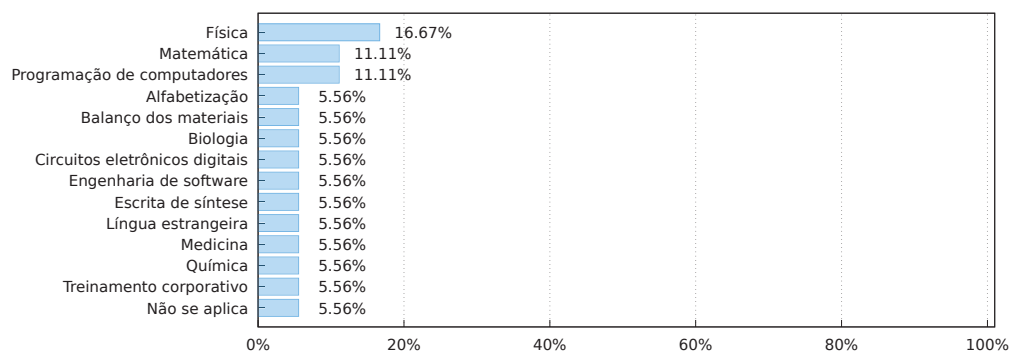


Figura 3.12: Conteúdos disciplinares abordados nos estudos

O conteúdo disciplinar mais utilizado foi Física, abordados em 16.67% dos estudos (Bodemer e Faust, 2006; Huff et al., 2010; Tomlinson et al., 2020). Com 11.11% estão os conteúdos disciplinares Matemática (Begolli et al., 2018; Davis et al., 2017) e Programação de computadores (Blanchard et al., 2020; Vieira et al., 2017), cada. Os demais conteúdos disciplinares utilizados nos estudos representam, cada um, 5.56% do total, sendo: Alfabetização (Fan et al., 2016), Balanço dos Materiais (Husted et al., 2014), Biologia (Hansen e Richland, 2020), Circuitos Eletrônicos Digitais (Carlson et al., 1990), Engenharia de Software (Schank e Hamel, 2004), Escrita de Síntese (Neuwirth e Kaufer, 1989), Língua Estrangeira (Plass et al., 2003), Medicina (Vainio et al., 2005), Química (Pande e Chandrasekharan, 2014) e Treinamento Corporativo (Giordani et al., 2012).

Identificar os conteúdos disciplinares abordados no uso das MRE permite compreender quais áreas tem se beneficiado mais com estes recursos. Observa-se que houve um maior uso de MRE em conteúdos disciplinares relacionados a disciplinas de Ciências Exatas, em especial Física, Matemática e Ciência da Computação.

3.2.9 Contexto de aplicação

A SQ9 investigou em qual contexto os estudos foram realizados, ou seja, o ambiente onde os participantes do estudo realizaram os experimentos. Como pode ser observado na Figura 3.13, a maioria das publicações utilizou o ambiente universitário como contexto de aplicação (Pande e Chandrasekharan, 2014; Husted et al., 2014; Plass et al., 2003; Bodemer e Faust, 2006; Carlson et al., 1990; Huff et al., 2010; Blanchard et al., 2020; Neuwirth e Kaufer, 1989; Vainio et al., 2005; Vieira et al., 2017), totalizando 55.56%. O ambiente escolar foi utilizado como contexto de aplicação de 11.11% das publicações (Hansen e Richland, 2020; Davis et al., 2017).

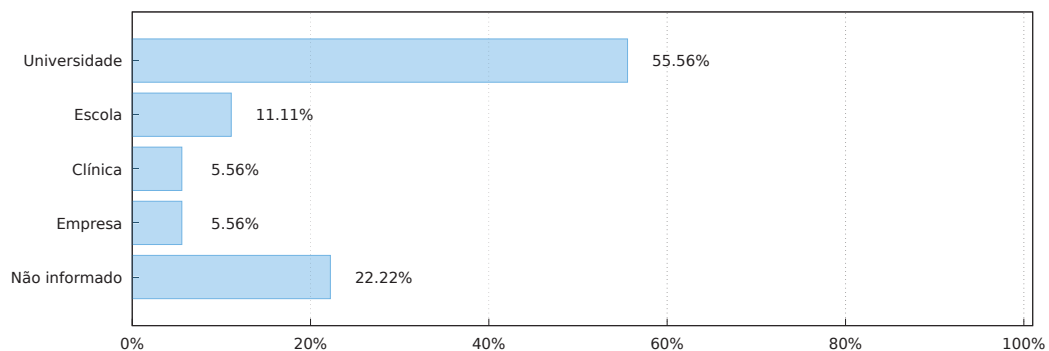


Figura 3.13: Contexto de aplicação do estudo

Tanto o ambiente empresarial (Giordani et al., 2012) quanto o clínico (Coste et al., 2011) foram considerados como contexto de aplicação em 5.56% das publicações, cada. Não foi possível identificar o contexto de aplicação de 11.11% das publicações (Begolli et al., 2018; Tomlinson et al., 2020; Schank e Hamel, 2004; Fan et al., 2016). Nenhum estudo realizou experimentos na casa dos participantes ou em mais de um ambiente (combinado).

3.2.10 Faixa etária

Investigar a faixa etária dos participantes dos estudos foi o objetivo da SQ10. Como demonstrado na Figura 3.14, a maioria das publicações (Pande e Chandrasekharan, 2014; Husted et al., 2014; Plass et al., 2003; Coste et al., 2011; Bodemer e Faust, 2006; Carlson et al., 1990; Huff et al., 2010; Tomlinson et al., 2020; Blanchard et al., 2020; Neuwirth e Kaufer, 1989; Vainio et al., 2005; Vieira et al., 2017) realizou o estudo com pessoas adultas, sendo 66.67% dos estudos.

A faixa etária denominada Adolescentes foi considerada por 16,67% dos estudos obtidos (Hansen e Richland, 2020; Begolli et al., 2018; Davis et al., 2017), enquanto a faixa etária Crianças foi considerada em apenas 5.56% das publicações (Fan et al., 2016). Não foi possível identificar a faixa etária em 11.11% das publicações (Giordani et al., 2012; Schank e Hamel, 2004).

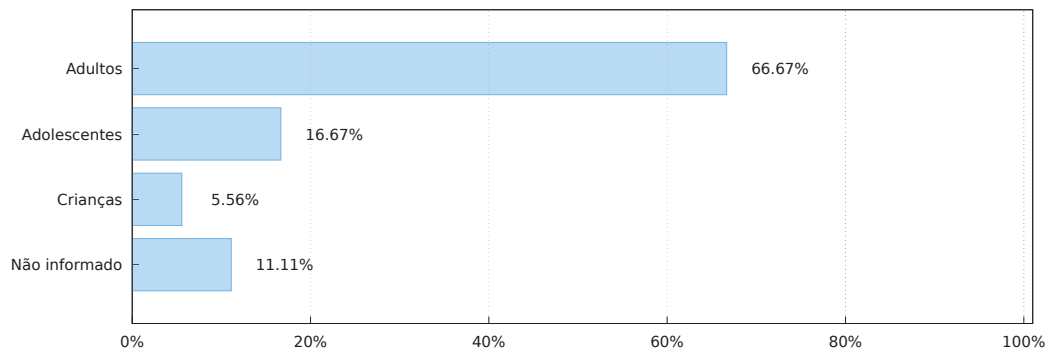


Figura 3.14: Faixa etária dos participantes dos estudos

3.3 AMEAÇAS À VALIDADE E LIMITAÇÕES

Considerando as ameaças mais comuns à validade apresentadas em Ampatzoglou et al. (2019), buscamos mitigar o viés na extração de dados e na pesquisa ao realizar o processo com dois pesquisadores, que avaliaram os estudos de forma independente e se reuniram periodicamente para discutir o processo de seleção. Em relação ao viés de inclusão/exclusão de estudos, o protocolo do mapeamento foi criado, analisado e discutido por dois pesquisadores. Buscamos definir critérios de inclusão e exclusão para selecionar artigos que pudessem responder plenamente às questões de pesquisa.

Para a construção da string de busca, foi adotada a metodologia PIO (Kitchenham e Charters, 2007), amplamente utilizada na elaboração de estudos secundários. Para mitigar a ameaça de seleção de bibliotecas digitais, buscamos diversificar as fontes em relação à área do conhecimento. Assim, foram selecionadas bases de dados populares que focam em Ciência da Computação, Ciências da Saúde e Psicologia. No entanto, como limitações deste estudo, entende-se que o número limitado de mecanismos de busca selecionados pode restringir a abrangência da seleção de estudos que atendam aos objetivos deste MSL. Outra limitação está relacionada a técnicas alternativas de recuperação de artigos, como o *snowballing*, que não foram empregadas no processo.

3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o MSL, desenvolvido visando responder a seguinte questão de pesquisa: “*Como as múltiplas representações externas têm sido utilizadas na capacitação de funções executivas?*”. Para tal, foram estabelecidas 10 subquestões. Assim, após a extração dos dados, foi possível identificar que as pesquisas sobre MRE e funções executivas tem sido desenvolvidas ao longo do tempo, com maior ênfase nos últimos anos e publicadas, principalmente, em eventos científicos.

Os experimentos têm sido realizados, principalmente, com pessoas adultas em ambientes universitários, abordando conteúdos disciplinares relativos à área de Exatas, como Física, Matemática e Computação. Os sistemas multi-representacionais utilizam, preferencialmente, duas representações externas, as quais foram, majoritariamente, caracterizadas no dueto verbal-textual e visual-gráfico, utilizando, principalmente, aplicações *desktop* em computadores. As representações possuíam informações parcial ou integralmente redundantes e apresentadas simultaneamente para os usuários. A principal teoria base foi teoria da flexibilidade cognitiva. Em relação às funções executivas, o componente mais abordado foi a memória de trabalho,

e nenhum estudo considerou, de forma isolada, o controle inibitório, embora poucos artigos tenham avaliado as funções executivas.

Foi possível identificar algumas lacunas que exigem pesquisas mais aprofundadas. Além disso, é necessário realizar pesquisas que incluam crianças e adolescentes como participantes, uma vez que as funções executivas se desenvolvem desde a infância até a idade adulta (Fitó, 2012). É válido, também, sugerir o desenvolvimento de pesquisas no ambiente escolar para favorecer a aprendizagem de crianças e adolescentes.

Observa-se, ainda, a possibilidade do desenvolvimento de pesquisas sobre os efeitos das MRE nos componentes flexibilidade cognitiva e inibição, sobretudo, variando a quantidade de representações externas utilizadas no sistema multi-representacional. Além disso, apesar de haver estudos na categoria acional-operacional, que inclui, por exemplo, interfaces tangíveis, esses estudos consideram apenas o componente memória de trabalho. Entende-se que são necessárias pesquisas envolvendo essa categoria de representação externa e os componentes controle inibitório e flexibilidade cognitiva.

4 ABORDAGEM CAFE-TAMTIN

O presente capítulo detalha a abordagem para capacitação de funções executivas utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistema tutor inteligente, desenvolvida neste estudo, denominada CaFE-TaMTIn (**Capacitação das Funções Executivas, Tangíveis, Multi-representacional e Tutores Inteligentes**). A seguir, é apresentada uma contextualização da abordagem. Na sequência, são apresentadas a descrição da abordagem e a arquitetura do sistema tutor que utiliza a abordagem.

4.1 CONTEXTO DA ABORDAGEM

Crianças aprendem desde cedo a manipular objetos nos mais variados ambientes onde transitam, em suas brincadeiras ou atividades de aprendizagem, utilizando, por exemplo, blocos de madeira e quebra-cabeças (Rodić e Granić, 2021). Esses objetos, tangíveis, fazem parte do cotidiano de diversos estudantes e podem ser utilizados para facilitar a aprendizagem, permitindo-os explorarem conceitos científicos e matemáticos (Carbonneau et al., 2013; Marley e Carbonneau, 2015; Rodić e Granić, 2021).

Sobretudo, quando estes materiais não oferecem ajuda aos aprendizes, faz-se necessária a presença do tutor durante o processo de aprendizagem (Falcão e Gomes, 2007). Além disso, dúvidas podem surgir enquanto o aprendiz manipula o objeto tangível e acontecer do tutor não estar disponível para sanar essas dúvidas ou auxiliá-lo de alguma forma. O efeito negativo da indisponibilidade momentânea do tutor pode ser amenizado pelo uso de tutores inteligentes acoplados aos objetos tangíveis, pois pode oferecer suporte individualizado e fornecer mais exemplos sobre tópico (Mohan et al., 2017).

Ademais, quando um conceito é apresentado ao aprendiz, utilizando formas variadas, recorrendo às representações externas adequadas, tende a melhorar a compreensão sobre este conceito (Ainsworth, 2006). Contudo, deve-se observar os efeitos dessa exposição nas funções executivas dos aprendizes, haja vista que esta área de investigação é pouco explorada (Follmer e Sperling, 2020).

Desta forma, a abordagem CaFE-TaMTIn visa possibilitar o desenvolvimento de interfaces tangíveis multi-representacionais, dotada de aspectos de sistemas tutores inteligentes, voltada para a capacitação das funções executivas dos aprendizes.

4.2 ABORDAGEM CAFE-TAMTIN

Conforme o contexto apresentado, a Figura 4.1 ilustra a abordagem desenvolvida neste estudo, denominada CaFE-TaMTIn. A interação inicial do aprendiz ocorre por meio de duas interfaces: a) interface gráfica e b) interface tangível. As atividades propostas são exibidas na interface gráfica, e o aprendiz deve manipular os elementos por meio da interface tangível. Assim, para responder aos desafios, o aprendiz precisa indicar a resposta utilizando a interface tangível. Após indicar a resposta, o sistema identifica o estado afetivo do aprendiz.

A resposta é então avaliada pelo sistema, que pode seguir por dois fluxos: a) se a resposta informada estiver correta; ou b) se a resposta informada estiver incorreta. Quando a resposta fornecida pelo aprendiz for a esperada, o sistema deve identificar o estado afetivo do aprendiz. Em seguida, o sistema estabelece o feedback apropriado e seleciona uma representação externa adequada para exibição. Além disso, o sistema realiza os ajustes necessários nos níveis

de dificuldade do jogo e apresenta a intervenção na interface gráfica, permitindo que o aprendiz interaja novamente.

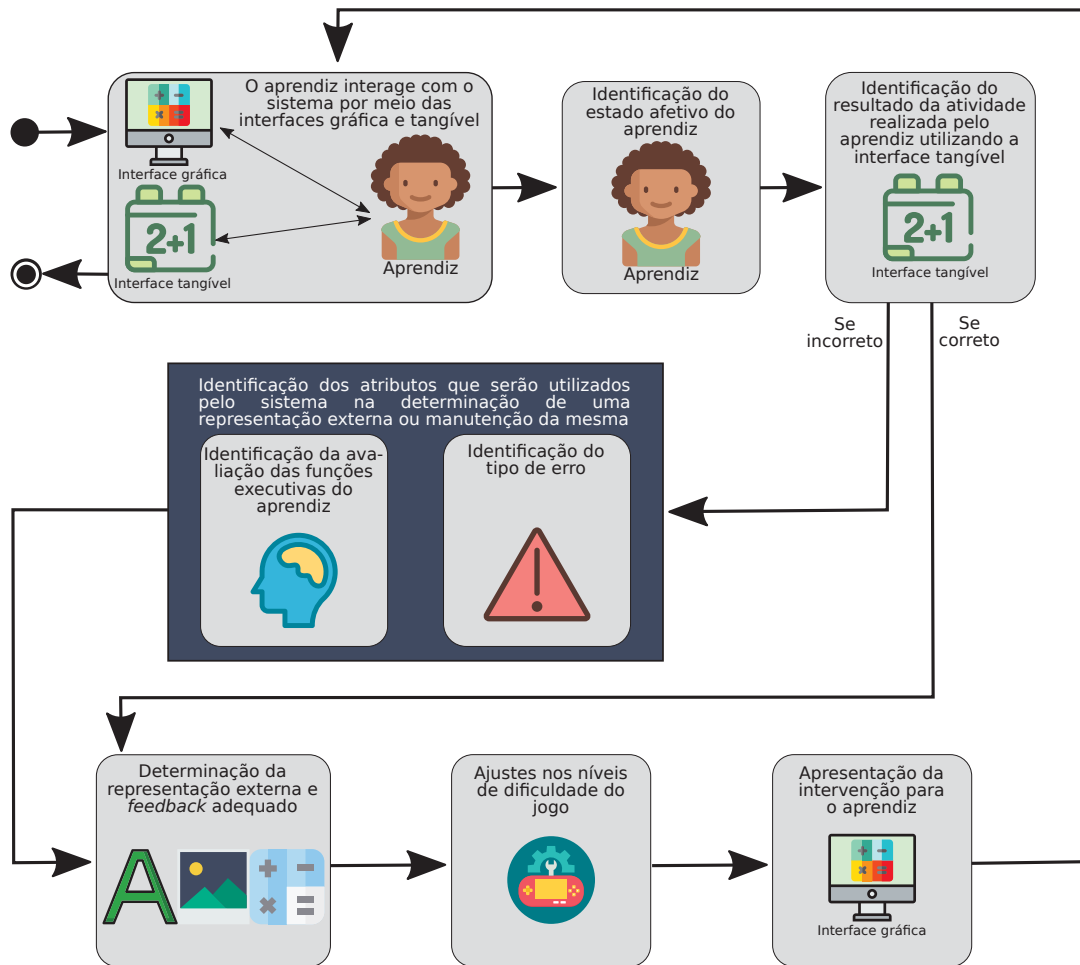


Figura 4.1: Abordagem proposta.

Fonte: Autoria própria

Se a resposta fornecida pelo aprendiz não estiver correta, o núcleo da abordagem é acionado, caracterizado por dois mecanismos básicos: a) avaliação das funções executivas do aprendiz e b) identificação do tipo de erro cometido. Com base nas informações sobre as funções executivas e no tipo de erro cometido, o sistema determina o feedback apropriado e a representação externa adequada para a resolução da próxima atividade, que é apresentada ao aprendiz utilizando a interface gráfica. Se necessário, ajustes nos níveis de dificuldade do jogo também são realizados.

Nas subseções a seguir são discutidos cada elemento que compõem a abordagem.

4.2.1 Interface gráfica e interface tangível

A interface gráfica é composta por um jogo educativo voltado para o ensino de conceitos matemáticos (operações de adição e subtração, análise combinatória, propriedades de números pares e ímpares, entre outros), utilizando múltiplas representações externas. Segundo Ke e Clark (2020), uma plataforma de aprendizagem baseada em jogos, que recorre a representações dinâmicas e multimodais de problemas matemáticos, pode reforçar as interações entre alunos e elementos do problema e, assim, facilitar a representação e resolução de problemas matemáticos.

A definição da utilização de um jogo educacional para a interface gráfica baseia-se no trabalho apresentado por Krause et al. (2020), o qual apresenta um modelo de inter-relação entre as funções executivas e elementos presentes em jogos digitais, tais como mecânica do jogo e níveis de dificuldade, colaborando assim para o favorecimento das funções executivas. A Tabela 4.1 exibe as mecânicas dos jogos e sua relação com os componentes das funções executivas.

Tabela 4.1: Relação entre mecânicas dos jogos e funções executivas.

Mecânica	Descrição	Função Executiva
Ma - Reação rápida	Saltar, pular entre plataformas; desviar de obstáculos ou elementos que interferem na atenção (distração); ser induzido a manter ações e repentinamente ter de suspendê-las por um tempo, voltando a ação anterior induzida. Requer responder rapidamente ao estímulo, sem que precise analisar as consequências da ação, senso de prontidão para agir diante do estímulo alvo. Por exemplo, se x , faço.	Controle inibitório e flexibilidade cognitiva
Mb - Agir e reagir conforme regra ativa ou inibitória	Navegar capturando alvos (x) e desviar de obstáculos, inimigos (y); selecionar (escolher) elementos alvo entre elementos de distração ou de indução ao erro. Requer agir conforme duas regras antagônicas, uma positiva e outra negativa, neste caso, há elemento de restrição da ação. Por exemplo, se x faço (ação e ganha); se y , não faço (suspensão) e se fizer perco.	Controle inibitório, memória de trabalho e funções executivas gerais
Mc - Alternar ações conforme regras modificáveis ou conflitantes (inversas)	Aprende padrão de ação e depois esse padrão é alterado (inverte), depende do fator tempo de aprendizado entre as fases ou níveis; tarefas que requerem alternar ações, movimentos ou padrões; alternar lados do corpo com ação espacialmente correspondente, por exemplo, apanhar com a mão esquerda objetos à esquerda da tela e pegar com a mão direita objetos à direita da tela; requer modificar os padrões de ação e estratégias para atingir o objetivo devido alteração na função do personagem. Por exemplo, numa fase o jogador desempenha papel de chefe de uma empresa e gerenciar pessoas, depois, no mesmo jogo, passa a ser um funcionário que cumpre ordens e na fase seguinte, essas regras se invertem. Se x e T_1 , faço; se x e T_2 , não faço.	Controle inibitório e flexibilidade cognitiva
Md - Mirar e atingir	Situações que requerem analisar e selecionar (posição alvo, ângulo de lançamento) antes de executar a ação; requerem precisão e estratégia visomotora; envolve lançamentos horizontais. Por exemplo, manejar arco-flecha, catapulta, arma, estilingue, etc. Se x , quando T , então faço.	Controle inibitório

Continua na próxima página

Tabela 4.1 – Continuação da página anterior

Mecânica	Descrição	Função Executiva
Me - Gerenciar fatores externos que interferem no progresso ou sucesso da tarefa em curso (objetivo)	Situações em que a atenção no contexto geral (variável) é o fator mais importante durante a execução para o sucesso da tarefa; requer monitoramento prolongado associado a reação rápida; envolve situações de aleatoriedade e randomicidade. Por exemplo, resgatar um soldado (objetivo), desviando de obstáculos (trajeto) atirando e se protegendo dos inimigos que não se tem previsão do local de surgimento, rota e frequência de aparição; dirigir um automóvel num simulador de trânsito com presença de variáveis não controláveis pelo jogador (ciclistas, pedestres, semáforos, animais, etc.). É a versão da Mb com objetivos maiores e que podem transpor a fase ou nível.	Flexibilidade cognitiva
Mf - Planejar as ações antes de executá-las, buscando o melhor trajeto ou solução ótima	Dadas várias possibilidades, encontrar a que requer menor gasto ou o maior ganho; antever os passos necessários para atingir o objetivo, ordenando-os. Por exemplo, se x , então $y = k, t, w...n$, sendo que existe y ótimo.	Memória de trabalho e flexibilidade cognitiva
Mg - Resolver enigmas ou identificar padrões lógicos	Decifrar charadas, analisar sequências e situações buscando regras e padrões de repetição. Requer construir mentalmente várias soluções ou regras que justificam a recorrência de aparição; procurar similaridade ou correspondência. Por exemplo, se $a_i \rightarrow b_i$, com $i = 1, ..., n$, então existe $A \rightarrow B$	Memória de trabalho e flexibilidade cognitiva
Mh - Rotacionar mentalmente objetos, buscando a solução ótima	Requer imaginar espacialmente as faces e ângulos de objetos ou peças que se encaixam ou são complementares; simular espacialmente diferentes pontos de vista; completar espacialmente formas e figuras. Por exemplo, jogos de encaixe, quebra-cabeça.	Flexibilidade cognitiva
Mi - Recordar sequência de tarefas a cumprir	Durante a execução, ter que recordar quais passos já foram executados e quais precisam ser cumpridos, e em qual ordem/sequenciamento; recordar itens/objetos que precisam ser selecionados; recordar regras, objetivos/metast, missão ou condições de resolução; requer suspender uma ação por um período de tempo e acioná-la posteriormente, agindo oportunamente, sendo este tempo de suspensão maior que o tempo de reação. Por exemplo, estar lutando com inimigos e lembrar que determinado objeto na cena vale pontos extras; recordar a ordem das missões sem o recurso de dicas; passos para elaboração de receita.	Controle inibitório e memória de trabalho

Continua na próxima página

Tabela 4.1 – Continuação da página anterior

Mecânica	Descrição	Função Executiva
Mj - Imitar sequência motora de um avatar	Repetir os movimentos corporais instruídos no jogo (conjunto e/ou sequências de setas ou do avatar), executar coreografia. Por exemplo, jogos de dança, nos quais as personagens fazem os movimentos e o jogador precisa repetir.	Memória de trabalho
Mk - Resistir a opções de domínio ou confortáveis para executar tarefas necessárias	Resistir à tentação de repetir o que sabe (domínio) ou fazer o percebido como mais fácil, mesmo não sendo o correto ou ótimo. É uma mecânica que pode não ser explícita (percebida) pelo jogador.	Controle inibitório
MI - Parear informação (tem-não tem) observando diferenças ou similaridades entre cenas ou objetos	Similar ao jogo de sete erros, requer descobrir elementos faltantes ou incoerentes; identificar elementos faltantes em comparação com cena padrão (imaginária, do cotidiano). Por exemplo, observar que há talheres ausentes na mesa de refeição. Se a_i está contido em A , então a'_i está contido em A' .	Memória de trabalho

Fonte: Krause et al. (2020)

O conjunto de mecânicas apresentado na Tabela 4.1, segundo Krause et al. (2020), busca converter situações em que é necessário o uso das funções executivas para a linguagem dos jogos, como planejamento, tomada de decisão, correção de erros, resolução de problemas, entre outros.

O trabalho de Krause et al. (2020) identificou, ainda, estratégias de níveis de dificuldade utilizadas para graduar a dificuldade dos componentes executivos em videogames. O *design* de níveis (*level design*) pode ser entendido como a criação de ambientes, cenários ou missões presentes em um jogo eletrônico e, estes níveis, podem ser utilizados para aprimorar o modo de jogar, organizar a progressão e estruturar o jogo em subdivisões eficazes (Novak, 2017). A Tabela 4.2 exhibe os elementos de *level design* associados às funções executivas.

Tabela 4.2: *Level design* em jogos associados às funções executivas

Elementos de <i>level design</i>	Função Executiva
D1: Presença/ausência de tempo para jogar	Controle inibitório, memória de trabalho, flexibilidade cognitiva e funções executivas gerais
D2: Quantidade de elementos alvo	Controle inibitório, memória de trabalho e flexibilidade cognitiva
D3: Velocidade dos elementos	Controle inibitório e flexibilidade cognitiva
D4: Presença/ausência de pontuação para o jogador	Controle inibitório

Continua na próxima página

Tabela 4.2 – Continuação da página anterior

Elementos de <i>level design</i>	Função Executiva
D5: Presença/ausência/quantidade de distratores ou obstáculos	Memória de trabalho
D6: Quantidade de movimentos necessários para atingir o objetivo	Memória de trabalho
D7: Quantidade de tentativas (margem de erro)	Controle inibitório e flexibilidade cognitiva
D8: Presença/ausência de condição ou restrição	Controle inibitório e flexibilidade cognitiva
D9: Presença/ausência de pista cognitiva	Controle inibitório, memória de trabalho e flexibilidade cognitiva
D10: Presença/ausência/quantidade de vidas ou munição	Controle inibitório e flexibilidade cognitiva
D11: Dimensão/tamanho do objeto	Flexibilidade cognitiva
D12: Presença/ausência de elementos agressivos	Controle inibitório
D13: Presença/ausência de <i>feedback</i>	Flexibilidade cognitiva

Fonte: Krause et al. (2020)

A interface tangível é composta por uma superfície capaz de reconhecer a presença de objetos, estilo “bloco”. Existem diversos mecanismos que podem ser utilizados no processo de reconhecimento dos blocos sobre a superfície, como, uso de marcadores visuais e visão computacional para reconhecimento utilizando *webcam*, componentes eletrônicos como RFID (*Radio Frequency Identification*) ou NFC (*Near Field Communication*), os quais podem ser utilizados na comunicação com o STI. A resolução dos desafios propostos no jogo deve ser realizada pela manipulação destes blocos sobre a superfície.

Optou-se pelo uso da interface tangível por ser uma ferramenta digital que permite explorar a espacialidade humana e ser de fácil utilização (Sharlin et al., 2004), além de possibilitar o desenvolvimento de novos formatos e combinações representacionais, aumentando o poder representacional para apoiar a aprendizagem (Price et al., 2008).

Após o aprendiz posicionar os blocos na superfície e indicar que a resolução da atividade proposta está concluída, o sistema deve verificar se a resposta apresentada é a esperada ou não. Caso a resolução esteja correta, o sistema apresenta uma nova atividade ao aprendiz e realiza os ajustes para o avanço de dificuldade/fase/nível do jogo. Caso contrário, o sistema avalia o ocorrido.

4.2.2 Identificação do estado afetivo

Identificar os estados afetivos dos aprendizes, durante o andamento das atividades, pode permitir que ações sejam tomadas de modo a auxiliá-los (Iepsen et al., 2012). Neste sentido, o trabalho de Gottardo e Pimentel (2018) apresenta um modelo para realizar a inferência do estado afetivo, por meio da representação das emoções em quadrantes (Figura 4.2). Este modelo utiliza as dimensões de valência (eixo horizontal) e ativação (eixo vertical) para criar quatro quadrantes de emoções, além do reconhecimento da emoção neutra. A ativação refere-se à intensidade com que uma emoção é vivenciada, variando entre sonolência até a agitação, enquanto a valência refere-se à experiência subjetiva do valor afetivo ou qualidade de um estímulo emocional, variando de triste a alegre (Bradley e Lang, 1994; Gottardo e Pimentel, 2018).

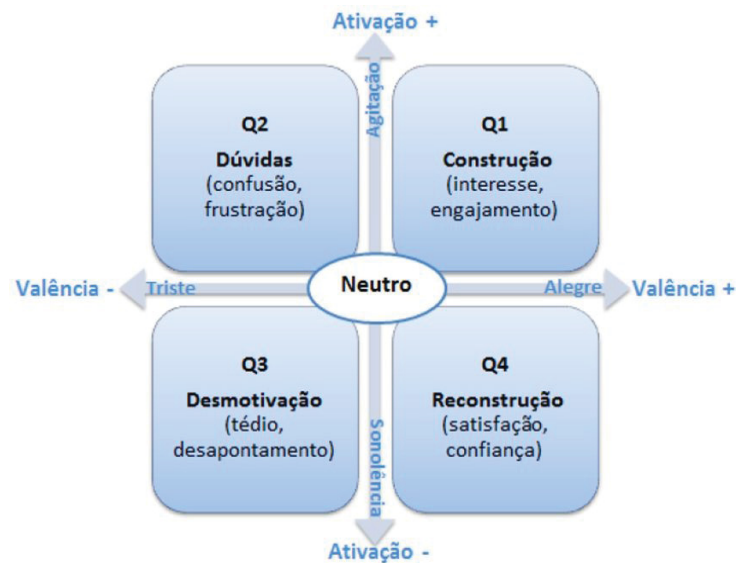


Figura 4.2: Representação das emoções em quadrantes.
Fonte: Gottardo e Pimentel (2018)

A identificação do estado afetivo é realizado utilizando imagens capturadas, oriundas de câmera(s) direcionada(s) ao aprendiz, onde o estado afetivo é inferido por meio das expressões faciais. A imagem capturada é processada pela rede neural profunda desenvolvida por Toisoul et al. (2021), obtendo a emoção do aprendiz e os valores de valência e excitação.

Optou-se por utilizar expressões faciais para a inferência das emoções por existir uma forte correlação entre características faciais e os estados emocionais (McDaniel et al., 2007), por ser um dos meios mais importantes de comunicação não verbal (Reis et al., 2018) e por não requerer equipamentos caros (Bosch et al., 2014).

4.2.3 Identificação do tipo de erro

No passado, diversas correntes de pensamento evidenciaram os aspectos negativos do erro matemático, porém, atualmente, é visto como uma etapa natural da construção do conhecimento (Fiori e Zuccheri, 2005). Independente da idade e/ou nível de desempenho, o erro está presente durante a trajetória escolar dos estudantes (Leite et al., 2012).

Há vários motivos que podem levar os estudantes a cometerem erros. Segundo Wijaya et al. (2014) um estudante pode cometer erros ao interpretar incorretamente o que a tarefa está pedindo, ao não compreender termos matemáticos, quando não consegue selecionar uma informação correta, ao utilizar operações matemáticas incorretas, quando tenta interpretar gráficos sem considerar suas propriedades, durante a resolução da expressão ou função algébrica, ao deixar tarefa inacabadas, entre outros.

O erro no processo de aprendizagem não deve ser negligenciado, haja vista que, dependendo do contexto em que o aprendiz está inserido, poderá levar um tempo considerável para este realizar uma nova tentativa de resolver o mesmo exercício, pois isso dependerá de uma reestruturação cognitiva do aprendiz (Marczal et al., 2016).

Segundo Leite et al. (2012), os erros matemáticos podem ser classificados em:

- **Interpretação equivocada da linguagem:** engloba a dificuldade do aprendiz em avançar na compreensão da estrutura do problema para, então, ser formulada uma estratégia;

- **Diretamente identificáveis:** engloba a dificuldade do aprendiz em aplicar corretamente os conceitos, utilizar as informações disponíveis e em escolher o operador correto. Esta categoria possui as subcategorias:
 - Erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados;
 - Erro de deficiência de regra, teorema ou definição;
 - Erro referente a operador lógico.
- **Indiretamente identificáveis:** concentra erro apresentado por falta de lógica correta, podendo ser uma classificação incorreta, uma resposta para uma estratégia incorreta, transformação sem avanço;
- **Solução não categorizável:** contempla a inexistência de classificação entre os demais.

Dessa forma, a identificação do tipo de erro é baseada na arquitetura para remediação de erros desenvolvida por Leite et al. (2012). Por meio desta arquitetura é possível classificar os erros cometidos pelos aprendizes durante a resolução da atividade proposta. Esta arquitetura foi escolhida por permitir fornecer uma remediação do erro mais apropriada utilizando múltiplas representações externas.

Conforme Leite et al. (2012), as funções das múltiplas representações externas podem ser utilizadas para oferecerem remediação do erro, permitindo revisar os fatos, regras e conceitos esquecidos. A Tabela 4.3 apresenta, além do tipo de erro matemático, uma subclassificação do erro, a função das múltiplas representações externas envolvida e a sugestão de remediação do erro.

Tabela 4.3: Composição da classificação.

Tipo de erro	Subclassificação	Função das MREs	Remediação
Interpretação equivocada	—	Papéis complementares	Propor outras formas de apresentar o problema, possibilitando uma releitura através da simbolização matemática
Diretamente identificáveis	Deficiência do domínio ou uso inadequado de dados	Restrição de interpretação	Mostrar que embora a estratégia possa estar correta, a deficiência se encontra no uso das informações
	Deficiência de regra, teorema ou definição	Compreensão mais aprofundada	Apresentar a regra ou teorema, com o objetivo de reorganizar conceito ou generalizar
	Deficiência na escolha do operador correto	Compreensão mais aprofundada	Demonstrar que o equívoco encontra-se na escolha do operador
Indiretamente identificáveis	—	Restrição de interpretação	Demonstrar que a lógica adotada não resulta na solução do problema
Solução não categorizável	—	Compreensão mais aprofundada	Propor a revisão de conceitos elementares ou presente na base de domínio

Fonte: Leite et al. (2012)

4.2.4 Identificação da avaliação das funções executivas

O nível de capacidade do controle inibitório (CCI) inicial dos estudantes é determinado por meio da realização de dois testes padronizados, o teste de Stroop e teste de Flanker, ambos descritos na Subseção 2.1.3. O protocolo definido por (Barzykowski et al., 2021b) permite classificar os participantes em grupos conforme a capacidade de controle inibitório (baixo, média, alta), baseado nos resultados obtidos pelos testes padronizados.

Os objetos de uma TUI podem ser mapeados para fornecerem dados aos sistemas computacionais, principalmente quando a interação entre os usuários e a própria interface acontece. As seis variáveis elencadas, encontradas na literatura, foram utilizadas para rastrear o controle inibitório, levando em consideração o uso das TUI em jogos digitais no contexto educacional, permitindo a coleta de dados de interação de estudantes enquanto fazem uso do jogo. Para o rastreamento dos outros componentes das funções executivas, mais estudos precisam ser realizados.

Os dados considerados na coleta são, data e hora (*timestamp*), tempo de reação, resposta fornecida, respostas corretas e respostas errôneas. Devem ser criadas categorias de erros para cada atividade, permitindo a diferenciação entre os erros cometidos em cada resposta errônea.

Dessa forma temos $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$ sendo o conjunto de todos os estudantes e $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{|P|}\}$ o conjunto das fases do jogo. A sequência de respostas de um estudante s em uma fase p do jogo é representada por $R_{sp} = \{r_1, r_2, \dots, r_{|R_{sp}|}\}$. Cada respostas do estudante ($r_i \in R_{sp}$) faz parte do conjunto de respostas incorretas $W_p = \{w_1, w_2, \dots, w_{|W|}\}$ ou do conjunto de respostas corretas $C_p = \{c_1, c_2, \dots, c_{|C|}\}$ para uma determinada fase do jogo p . O conjunto de respostas errôneas de um estudante s em uma fase p é representado por $RW_{sp} = R_{sp} \cap W_p$, assim como $RC_{sp} = R_{sp} \cap C_p$ representa o conjunto de respostas corretas de um estudante s na fase p .

A Tabela 4.4 apresenta o conjunto de variáveis e uma breve descrição. As subseções seguintes descrevem cada uma das variáveis.

Tabela 4.4: Variáveis de rastreamento do controle inibitório

Elemento	Descrição	Autores
Erros de impulsividade	Ocorre quando o aprendiz falha prematuramente, demonstrando incapacidade em suprimir respostas automáticas, dominantes ou prepotentes.	(Machado et al., 2020; Rivero, 2016; Diamond, 2013)
Insistir no mesmo erro	O aprendiz permanece preso em ciclos repetitivos de um padrão aprendido anteriormente.	(Machado et al., 2020)
Cometer erros mais comuns	Considera a quantidade de respostas prepotentes, o que pode indicar a existência de crença ou conhecimento prévio do aluno.	(Machado et al., 2020)
Tempo de resolução de problema	O aprendiz apresenta elevado tempo de resolução de problemas.	(Galarza et al., 2020; Rivero, 2016)
Número de tentativas	O aprendiz demonstra necessitar de diversas tentativas para resolver um problema com sucesso.	(Galarza et al., 2020; Rivero, 2016)
Eficiência	Proporção entre o número de respostas corretas e o total de respostas.	(Rivero, 2016)

4.2.4.1 Erros de impulsividade

Erros de impulsividade são erros ocorridos por não saber esperar (Diamond, 2013). Em determinadas tarefas, por vezes, os indivíduos apressam-se em responder e cometem erros ao dar a resposta impulsiva (ou automática) quando é necessário dar uma resposta diferente (Diamond, 2013). Indivíduos que responderam erroneamente e de forma muito rápida a uma determinada tarefa apresentam um comportamento disfuncional de controle inibitório (Machado et al., 2020).

Para determinar a ocorrência de erros de impulsividade, são isolados os erros cometidos por todos os estudantes durante suas interações com a interface tangível no decorrer da execução de uma fase do jogo p e, então, são ordenados em ordem crescente considerando o tempo de reação, representado por $RWO_{sp} = \{r_i \in RW_{sp} \mid r_1, r_2, \dots, r_{|RWO_{sp}|} \text{ ordenados de forma que } t(r_1) \leq t(r_2) \leq \dots \leq t(r_{|RWO_{sp}|})\}$. O primeiro quartil ϕ_p foi utilizado como ponto de corte para determinar se o erro cometido foi impulsivo. Assim, o subconjunto que representa os erros de impulsividade é dado por $VF_{sp} = \{r_i \in RWO_{sp} \mid t(r_i) \leq \phi_p\}$.

A partir da ocorrência de 3 erros impulsivos, é estabelecida a existência de erros de impulsividade para o estudante, sendo:

$$IE_{sp} = \begin{cases} \text{true,} & \text{se } |VF_{sp}| \bmod 3 = 0 \\ \text{false,} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.2.4.2 Insistir no mesmo erro

Indivíduos com disfunção executiva, tendem a apresentar déficits na capacidade de inibir padrões de comportamentos bem aprendidos, ficando preso em ciclos repetitivos, persistindo neste mesmo comportamento (Henry e Bettenay, 2010). Um estudante que permanece persistindo em um mesmo erro durante uma determinada atividade, pode indicar um comportamento repetitivo (Machado et al., 2020).

Para a identificação da insistência do estudante no mesmo erro, os erros cometidos durante sua interação com a interface tangível em determinada fase do jogo são isolados (RW_{sp}). Os dados são ordenados em ordem crescente, conforme a data e hora da interação (*timestamp*). A partir da existência de 2 ou mais erros iguais, consecutivos, considerando as últimas respostas fornecidas, é estabelecida a existência de insistência no mesmo erro, sendo:

$$ISE_{sp} = \begin{cases} \text{true,} & \text{se } r_{|RW_{sp}|} \in RW_{sp} \text{ e } r_{|RW_{sp}|} = r_{|RW_{sp}|-1} \\ \text{false,} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.2.4.3 Cometer erros mais comuns

Indivíduos com baixa capacidade de controle inibitório tendem a se comportarem de forma menos eficiente na resolução de problemas devido à sua inabilidade de resistir a estímulos externos e recordar informações pregressas (Peng et al., 2021). A resposta prepotente pode indicar um conhecimento prévio ou crença do estudante que demanda esforço para ser suprimido, e esse conhecimento errôneo pode ser mapeado por meio do erro mais frequente cometido pelos estudantes em cada atividade (Machado et al., 2020).

Primeiro, é necessário encontrar o erro mais comum (mca) em cada fase do jogo p contando as ocorrências de cada resposta em RW_p e selecionando a resposta com maior contagem, definido por $mca = \arg \max_{r \in RW_p} \text{count}(r, RW_p)$.

Após identificar o erro mais comum (mca), é necessário observar sua ocorrência. O estabelecimento da existência do cometimento do erro mais comum ocorre a partir da terceira ocorrência, sendo:

$$MCE_{sa} = \begin{cases} \text{true}, & \text{se } \text{count}(mca, RW_{sp}) \bmod 3 = 0 \\ \text{false}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.2.4.4 Tempo de resolução de problema

Há uma relação diretamente proporcional entre o tempo de resolução de problemas e a capacidade do controle inibitório (Rivero, 2016; Galarza et al., 2020). Indivíduos com capacidade de controle inibitório reduzida demandam mais tempo para determinar a resposta para uma determinada atividade e, ao utilizarem uma maior quantidade de tempo, a resposta prepotente tende a desaparecer, possibilitando que a resposta correta seja alcançada (Diamond, 2013). Além disso, estes indivíduos, ao tentarem responder uma atividade de forma impulsiva, geram dificuldades e necessitam de mais tempo para obterem uma resposta correta (Galarza et al., 2020).

Desta forma, para cada fase do jogo, deve ser determinado um tempo máximo para sua conclusão (τ_p). Os dados de interação do estudante com a interface tangível durante o jogo são ordenados, em ordem crescente, conforme a data e hora da interação (*timestamp*). Assim, o subconjunto que representa os erros de tempo de resolução excedido é dado por $RTE_{sp} = \{r_i \in RW_{sp} \mid t(r_i) \geq \tau_p\}$. É considerado que o estudante excedeu o tempo de resolução de uma fase a partir da terceira ocorrência consecutiva, sendo:

$$PRT_{sp} = \begin{cases} \text{true}, & \text{se } r_{|RW_{sp}|} \in RTE_{sp} \text{ e } r_{|RW_{sp}|} = r_{|RW_{sp}|-1} \text{ e } r_{|RW_{sp}|} = r_{|RW_{sp}|-2} \\ \text{false}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.2.4.5 Número de tentativas

Existe uma relação diretamente proporcional entre a capacidade de controle inibitório e o número de tentativas que um estudante precisa para resolver um problema com sucesso (Galarza et al., 2020). Ao possuírem capacidade de controle inibitória reduzida, com dificuldades de regulação comportamental, estudantes tendem a ter um comportamento de tentativa e erro até o sucesso da resolução correta da atividade (Rivero, 2016; Galarza et al., 2020).

A determinação da ocorrência de excesso no número de tentativas é estabelecida pela quantidade de erros cometidos pelo estudante para uma fase do jogo (RW_{sp}). Assim, é considerado que o estudante possui um comportamento de tentativa e erro a partir do cometimento de cinco respostas incorretas, sendo:

$$NA_{sp} = \begin{cases} \text{true}, & \text{se } |RW_{sp}| \bmod 5 = 0 \\ \text{false}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.2.4.6 Eficiência

Estudantes que possuem um bom controle inibitório tendem a ser mais capazes de manter o foco e a atenção durante a execução de uma determinada tarefa, sendo capazes de resistir a distrações e regular suas impulsividades (Mourão Junior e Melo, 2011). Assim, ao

possuírem um alto nível de controle inibitório, os estudantes, naturalmente, apresentarão uma maior eficiência na resolução de atividades (maior número de respostas corretas), pois conseguem ter concentração, compreender a atividade e apresentar a resposta assertiva.

Para determinar a eficiência dos estudantes na atividade, o total de respostas corretas é dividido pelo total de respostas fornecidas (Rivero, 2016), sendo:

$$EF = \frac{RC_{sp}}{R_{sp}}$$

São estabelecidas, então, três categorias de eficiência: baixa (0.0 a 0.33), média (0.34 a 0.66) e alta (0.67 a 1.0).

4.3 ASPECTOS DE SISTEMAS TUTORES INTELIGENTES

A arquitetura clássica de sistemas tutores inteligentes é composta por quatro componentes principais: o módulo de domínio, o módulo do estudante, o módulo tutorial e a interface de usuário. O conceito de “aspectos” de STI refere-se à possibilidade de utilizar apenas partes ou componentes específicos da arquitetura, sem a necessidade de implementar todo o sistema.

Dentro dessa abordagem, o modelo de domínio é responsável por duas funções principais: identificar se a resposta fornecida pelo estudante está correta ou incorreta e, quando errada, identificar o tipo de erro cometido. Esse diagnóstico é fundamental para que o sistema possa fornecer *feedback* apropriado ao aprendiz.

O modelo do estudante utiliza diversas informações para criar um perfil dinâmico e adaptativo do estudante, com o objetivo de personalizar a experiência de aprendizado. Faz uso da quantidade de respostas corretas e incorretas fornecidas durante as atividades, do índice de capacidade de controle inibitório inicial, inferido no pré-teste, do rastreamento do índice de controle inibitório em tempo real e do estado afetivo do estudante.

O modelo tutorial, com base na identificação do tipo de erro cometido pelo estudante, fornece o *feedback* adequado e seleciona a representação externa apropriada. Além disso, o modelo ajusta os níveis de dificuldade do jogo com base no índice de capacidade de controle inibitório.

A possibilidade de uso seletivo de aspectos da arquitetura de STI permite maior flexibilidade e adaptabilidade na implementação de sistemas de interface tangíveis multi-representacionais.

4.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o detalhamento da abordagem desenvolvida neste estudo. A abordagem denominada CaFE-TaMTIn visa capacitar as funções executivas de aprendizes por meio de interface tangível multi-representacional dotada de aspectos de sistemas tutores inteligentes.

O núcleo da abordagem, conforme apresentado, é composto pela identificação da avaliação das funções executivas, a identificação do tipo de erro cometido pelo aprendiz. A interação entre aprendiz e o sistema ocorre por meio da interface tangível. A interface gráfica é utilizada para exibir os outros tipos de representação externa. Após o fornecimento da resposta, a identificação do estado afetivo é realizada. Além disso, as demais informações pertinentes são apresentadas na interface gráfica.

As atividades devem ser apresentadas ao aprendiz por meio de um jogo, o qual possui aspectos de sistemas tutores inteligentes. Os elementos do jogo devem ser utilizados no

favorecimento das funções executivas conforme o trabalho de Krause et al. (2020). Os níveis de dificuldade devem ser ajustados a cada tentativa de resolução de atividade, bem como a identificação do estado afetivo.

5 O JOGO DO 15

O presente capítulo apresenta o jogo tangível multi-representacional, denominado Jogo do 15, desenvolvido para validar a abordagem CaFE-TaMTin. São apresentados os recursos utilizados na construção do jogo e descritas as fases elaboradas.

5.1 DESENVOLVIMENTO DO JOGO

O jogo utilizado neste estudo, denominado Jogo do 15, consiste em uma plataforma tangível, construída com objetos de baixo custo (canos de PVC e impressão 3D), conforme pode ser observado na Figura 5.1, e uma interface gráfica (Figura 5.2) desenvolvida utilizando a linguagem de programação Python.



Figura 5.1: Plataforma tangível

A plataforma e os blocos numerados foram modelados utilizando o software livre OpenSCAD¹. Os códigos-fonte dos blocos numerados e da plataforma podem ser visualizados nos Apêndices A, B e C. Todos os materiais impressos em 3D utilizaram filamento PLA (*Polylactic Acid*). Acoplados à plataforma, constam: a) uma *webcam*, localizada na parte superior, apontada para a base da plataforma, a qual é utilizada para reconhecer o posicionamento dos blocos numerados sobre a plataforma; b) uma placa Arduino Uno R3, utilizada para reconhecer

¹Disponível em: <https://openscad.org/>

os pressionamento dos botões de interação da plataforma; e c) uma *webcam* apontada para o estudante, a fim de reconhecer o estado afetivo deste.



Figura 5.2: Tela inicial do jogo

O modelo de reconhecimento dos blocos numerados sobre a plataforma foi treinado utilizando técnicas de visão computacional baseada no framework YOLOv4 e Google Colab². As imagens utilizadas para o treinamento do modelo foram etiquetadas por meio do software LabelImg³. A plataforma fez uso, ainda, de dois círculos de luzes de LED (*ring light*), um apontado para a plataforma e outro para o estudante, visando melhorar o reconhecimento dos blocos numerados e do estado afetivo, respectivamente.

A interface gráfica, desenvolvida em linguagem de programação Python, fez uso de bibliotecas como PyGame⁴, utilizada na construção da própria interface do jogo, OpenCV⁵, para o reconhecimento dos blocos números sobre a plataforma, PyTorch⁶, utilizada para o reconhecimento do estado afetivo dos estudantes e Telemetry⁷, para a comunicação com o Arduino. O código-fonte completo do jogo está disponível no GitHub através do endereço <https://github.com/robertinosantiago/cafetamtin>.

Foram desenvolvidas quatro fases utilizando a abordagem CaFE-TaMTIn. Em cada fase, durante a execução do jogo, ao identificar a ocorrência de alguma das variáveis estabelecidas na Tabela 4.4, foi possível realizar a adequação ao índice de capacidade do controle inibitório (ICCI) do estudante, inferido inicialmente pelos testes padronizados. Dessa forma, baseado em três níveis de ICCI (baixa, média e alta), foram realizados ajustes a fim de adaptar o jogo às

²Disponível em: <https://colab.research.google.com/drive/1n7shQSxvvfwOlorfA0vNd-dNp1w0E6Z?usp=sharing>

³Disponível em: <https://github.com/HumanSignal/labelImg>

⁴Disponível em: <https://www.pygame.org/>

⁵Disponível em: <https://opencv.org/>

⁶Disponível em: <https://pytorch.org/>

⁷Disponível em: <https://mryslab.github.io/telemetry/>

necessidades do estudante. A Tabela 5.1 exibe o conjunto de elementos de níveis de dificuldade definidos para o jogo, baseado no modelo proposto por (Krause et al., 2020).

Tabela 5.1: Elementos de *Level Design*

<i>Level design</i>	Elemento do Jogo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Ld1 - Tarefa ou ação com tempo	Tempo do timer	Ausente	Tempo normal	Tempo reduzido
Ld1 - Tarefa ou ação com tempo	Ação de finalização do timer	Ausente	Perda de pontos	Perda de vida
Ld1 - Tarefa ou ação com tempo	Resolução correta antes da metade do tempo estipulado	Ganhar vida e pontos	Ganhar pontuação bônus	Ganhar pontuação bônus
Ld5 - Condições e restrições relacionadas com a situação de vitória ou derrota	Resolução correta	Ganhar pontos	Ganhar pontos	Ganhar pontos
Ld5 - Condições e restrições relacionadas com a situação de vitória ou derrota	Resolução incorreta	Perda de pontos	Perda de vida	Perda de pontos e vida
Ld8 - <i>Feedback</i>	Resolução correta	Presente	Presente	Presente
Ld8 - <i>Feedback</i>	Resolução incorreta	Presente	Presente	Presente

Em cada uma das fases, ao acessá-la, o estudante tem acesso a um tutorial explicativo sobre os objetivos das fase e como jogá-la. O tutorial, dicas e *feedbacks* são apresentados pela personagem virtual chamada Monique (Figura 5.3). As subseções a seguir descrevem cada fases do jogo.



Figura 5.3: Personagem virtual Monique

5.1.1 Fase 1

A primeira fase desenvolvida consiste em desafios matemáticos envolvendo operações matemáticas de adição e/ou subtração. Um exemplo de operação matemática de adição pode ser observado na Figura 5.4. O estudante, para resolver este desafio, deve realizar o cálculo envolvido e posicionar, sobre o tabuleiro, o bloco numerado correspondente ao resultado e pressionar o botão verde da plataforma para validar a resposta.

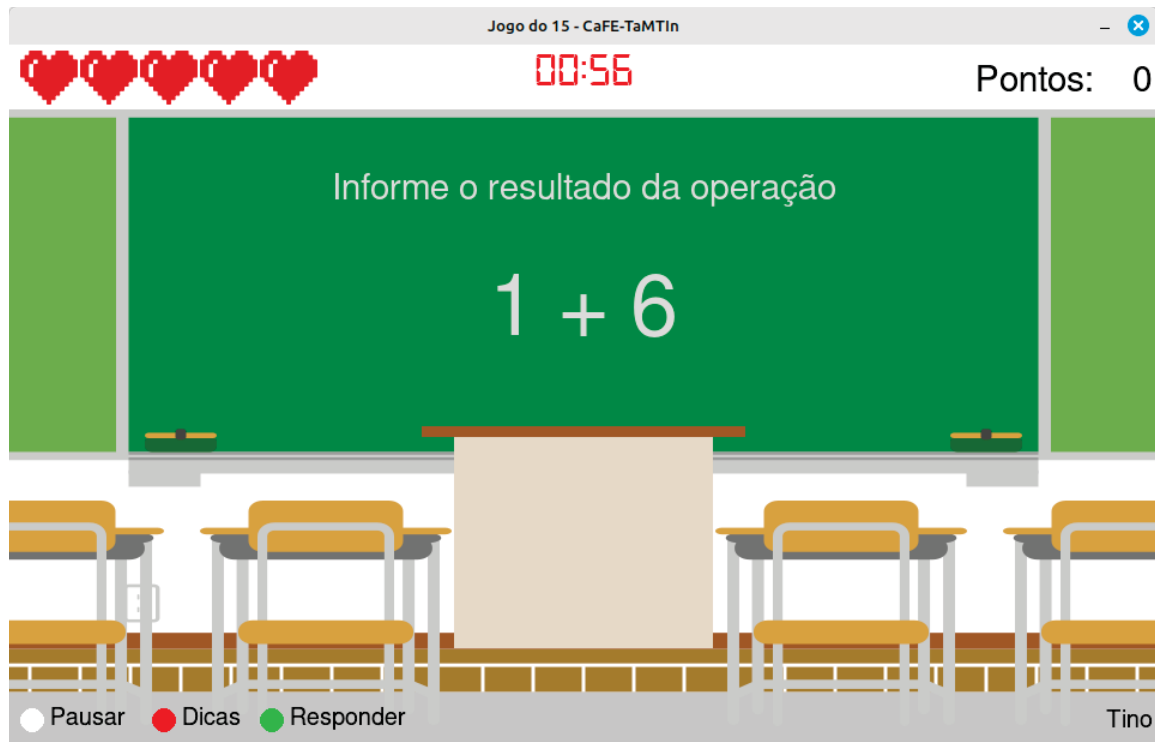


Figura 5.4: Primeira fase

Inicialmente, são exibidas operações envolvendo dois termos e, após a resolução correta de cinco operações seguidas, as operações passam a possuir três termos. Todas as operações matemáticas exibidas possuem resultado variando entre 1 e 9 e cada termo da operação, inclusive o operador, é obtido de forma aleatória.

Por meio de encontros com professoras universitárias de Matemática, foram estabelecidas, para cada fase, possíveis erros que os estudantes podem cometer e as possíveis remediações, considerando as funções das múltiplas representações externas e a classificação de erros apresentada na Subseção 4.2.3. A Tabela 5.2 apresenta os possíveis erros e remediações para a primeira fase do jogo.

Tabela 5.2: Possíveis erros e remediações da Fase 1

Função das MRE	Tipo de erro	Subtipo de erro	Erro apresentado	Remediação sugerida
Papéis complementares	Interpretação equivocada da linguagem	-	E1- Não conseguir informar um resultado após determinado tempo	R1- Apresentar as instruções sobre a fase atual
Restrição de interpretação	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados	E1- Apresentar uma resposta errada	R1- Apresentar o resultado da soma e informar a diferença para o resultado correto

Continua na próxima página

Tabela 5.2 – Continuação da página anterior

Função das MRE	Tipo de erro	Subtipo de erro	Erro apresentado	Remediação sugerida
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência de regra, teorema ou definição	E1- Informar um resultado composto pela junção dos N termos apresentados no problema	R1- Apresentar explicação sobre o termos e operadores envolvidos na operação
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro referente a uso de operador	E1- Informar o resultado da operação com o(s) operador(es) trocados	R1- Evidenciar qual(is) operador(es) estão envolvidos na operação
Restrição de interpretação	Indiretamente identificáveis	-	Não se aplica	Não se aplica
Compreensão mais aprofundada	Solução não-categorizável	-	E1- Apresentar uma sequência de N respostas erradas consecutivas	R1- Apresentar conceitos sobre soma e subtração

Os erros definidos na Tabela 5.2 permitem que sejam apresentados *feedbacks* apropriados para os estudantes, considerando aspectos das múltiplas representações externas. A Figura 5.5 apresenta a remediação do para o tipo de erro “diretamente identificáveis” e o subtipo “erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados”.

Jogo do 15 - CaFE-TaMTin

Número informado: 2

Resolução: 9-1

$$\begin{array}{r} 9 \\ - 1 \\ \hline 8 \end{array}$$

subtração →

Diferença entre resultado informado e resultado esperado: 6

Ah.. Você não acertou. Você informou como resposta o número 2. Porém, como você pode perceber na resolução acima, a resposta correta é o número 8.

Pressione o botão VERMELHO para continuar

Continuar

Figura 5.5: Remediação apresentada na Fase 1

Neste caso, estão sendo utilizadas as representações, segundo a taxonomia de representações externas (Wu e Puntambekar, 2012), verbal-textual (texto de *feedback* apresentado pela Monique), simbólico-matemático (notação matemática contendo a operação apresentada) e acional-operacional (representação virtual do bloco numerado e o bloco numerado tangível).

5.1.2 Fase 2

Na segunda fase, são exibidos, na área central da interface gráfica, oito retângulos. Cada retângulo contém o texto “? + ? + ?”, indicando que cada um deles representa possíveis combinações de três números que, ao serem somados, resultam em quinze e que devem ser encontradas. A Figura 5.6 exibe a interface gráfica apresentada para o estudante. Durante o tutorial da fase, é explicado que a combinação deve englobar números entre 1 e 9, com números distintos.

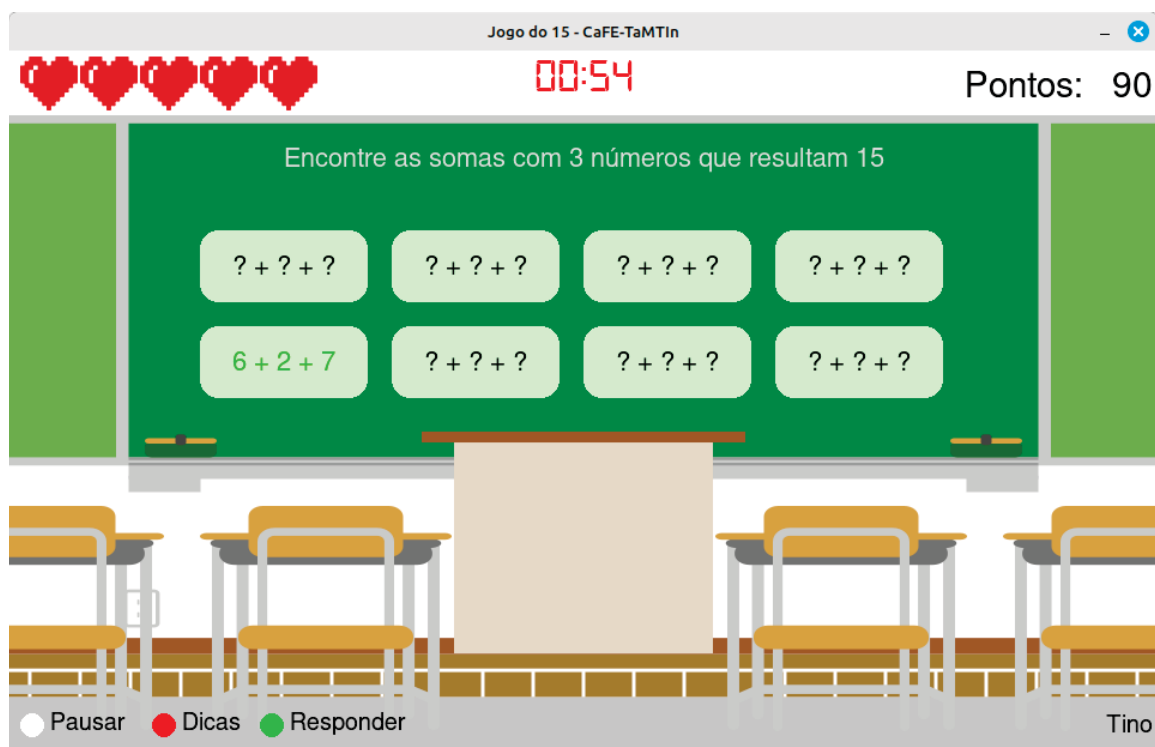


Figura 5.6: Segunda fase

O estudante, para resolver essa fase, deve, a cada jogada, posicionar sobre o tabuleiro três blocos numerados que, ao serem somados, resultam no valor 15. Para indicar uma resposta, o estudante, após o posicionamento dos blocos, deve pressionar o botão verde da plataforma. No total, considerando os números entre 1 e 9, há 8 combinações possíveis que, ao serem somadas, resultam no valor 15. São elas: 1+5+9, 1+6+8, 2+4+9, 2+5+8, 2+6+7, 3+4+8, 3+5+7, 4+5+6.

A partir do momento em que o estudante consegue encontrar uma soma de três termos que resulta em 15, um retângulo que anteriormente apresentava a mensagem “? + ? + ?”, passa a apresentar a soma encontrada (Figura 5.6). Esse recurso permite que o estudante perceba, visualmente, quais somas foram encontradas e quantas somas ainda precisam ser resolvidas.

Foram identificados, por meio das reuniões com as professoras universitárias de Matemática, os possíveis erros que podem ser produzidos pelos estudantes nesta fase e, assim, suas respectivas possíveis remediações, as quais são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Possíveis erros e remediações da Fase 2

Função das MRE	Tipo de erro	Subtipo de erro	Erro apresentado	Remediação sugerida
Papéis complementares	Interpretação equivocada da linguagem	-	E1- Não conseguir resolver nenhuma soma 15 depois de um determinado tempo; E2- Não conseguir apresentar nenhuma nova soma 15 após um determinado tempo	R1- Evidenciar quantas vezes cada número aparece nas somas 15 possíveis
Restrição de interpretação	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados	E1- Informar uma sequência de três números ímpares que não somam 15; E2- Informar uma sequência de dois números pares e um número ímpar que não somam 15	R1- Apresentar o resultado da soma e informar a diferença para o número 15
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência de regra, teorema ou definição	E1- Informar uma sequência de três números pares; E2- Informar uma sequência de dois números ímpares e um número par	R1- Apresentar explicação sobre números pares e ímpares
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro referente a uso de operador	Não se aplica	Não se aplica
Restrição de interpretação	Indiretamente identificáveis	-	E1- Informar uma quantidade de termos diferente de 3	R1- Mostrar que devem ser informados três termos que produzem soma 15
Compreensão mais aprofundada	Solução não-categorizável	-	E1- Apresentar uma sequência de N respostas erradas consecutivas	R1- Apresentar conceitos sobre soma

A Figura 5.7 apresenta a remediação para o tipo de erro “indiretamente identificáveis”. Neste caso, estão sendo utilizadas as representações, segundo a taxonomia de representações externas (Wu e Puntambekar, 2012), verbal-textual (texto de *feedback* apresentado pela Monique), simbólico-matemático (notação matemática considerando a operação de adição) e acional-operacional (representação virtual do bloco numerado e o bloco numerado tangível).

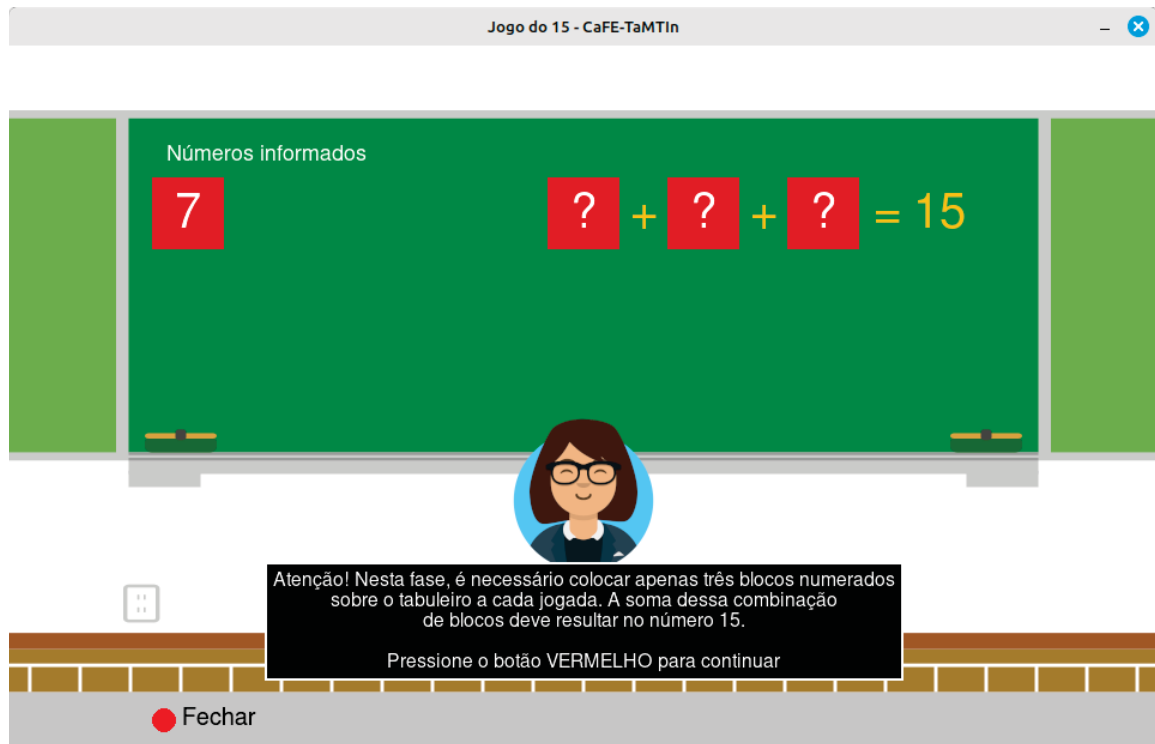


Figura 5.7: Remediação apresentada na Fase 2

5.1.3 Fase 3

Na terceira fase do jogo (Figura 5.8), o estudante é desafiado a jogar contra a Monique (personagem virtual). Nesta fase, a cada jogada, um bloco deve ser selecionado para ser colocado sobre o tabuleiro (no caso do estudante) ou no bloco “Blocos do tutor” (no caso da Monique). Ambos não podem selecionar um bloco numerado que seu oponente já selecionou. A combinação desses blocos selecionados deve produzir uma soma que resulta quinze.

O jogador que inicia (estudante ou Monique) pode selecionar até 5 blocos numerados entre 1 e 9 a cada desafio. Essa combinação de blocos numerados pode resultar em, no máximo, duas somas 15. Dessa forma, a cada desafio, cada jogador pode encontrar zero, uma ou duas somas quinze. Foram estabelecidos, nesta fase, seis desafios entre Monique e o estudante.

Durante o tutorial é explicado que, a cada desafio, um jogador inicia a jogada colocando um bloco numerado sobre o tabuleiro, ou seja, se o estudante começar jogando no primeiro desafio, no segundo desafio será a vez da Monique informar o primeiro número. Assim que o estudante posiciona o bloco numerado escolhido sobre o tabuleiro, o botão verde da plataforma deve ser pressionado para validar a resposta. Realizada a validação, o bloco numerado é exibido no tabuleiro virtual na interface gráfica e a Monique informa ao estudante qual número foi escolhido por ela.

Após esgotados os blocos numerados disponíveis, o desafio é encerrado, e o estudante deve retirar, de cima do tabuleiro, os blocos numerados, para que uma nova rodada seja iniciada.

A Tabela 5.4 exibe a identificação dos possíveis erros que podem ser produzidos pelos estudantes nesta fase, bem como suas respectivas remediações.

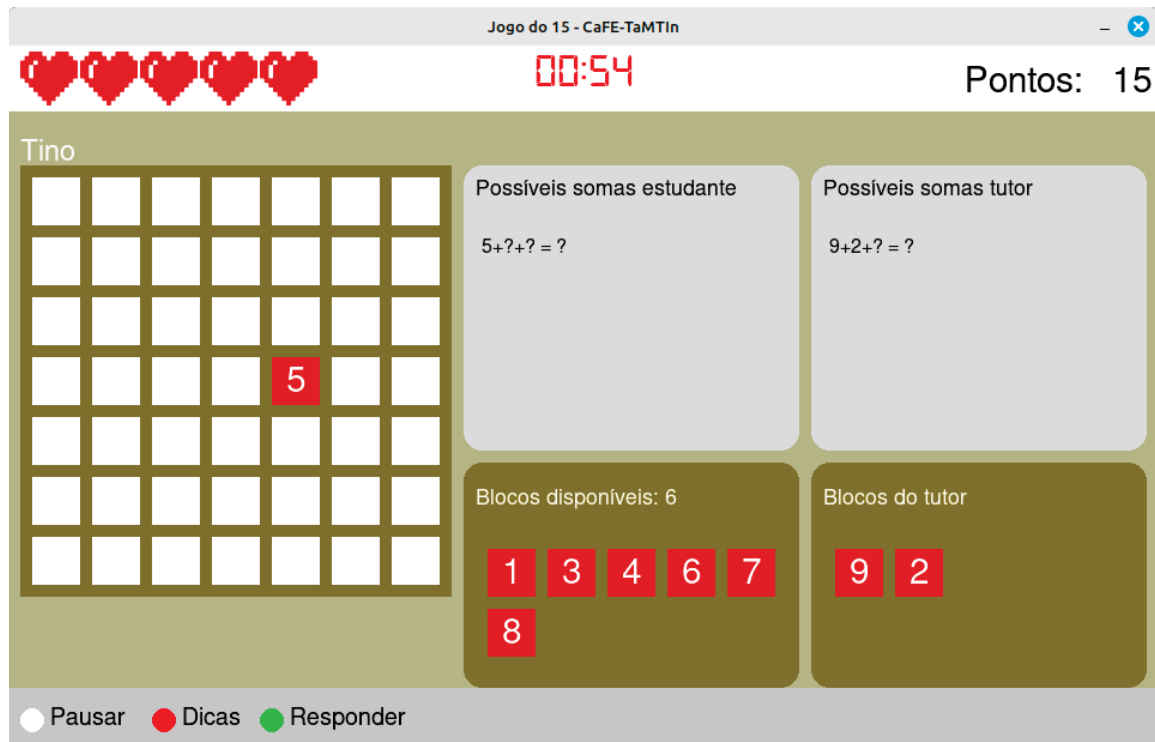


Figura 5.8: Terceira fase

Tabela 5.4: Possíveis erros e remediações da Fase 3

Função das MRE	Tipo de erro	Subtipo de erro	Erro apresentado	Remediação sugerida
Papéis complementares	Interpretação equivocada da linguagem	-	E1- Selecionar um número já selecionado pelo tutor	R1- Evidenciar os números que continuam disponíveis para seleção
Restrição de interpretação	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados	E1- Ter a possibilidade de completar a soma quinze e não o fazer; E2- Ter a possibilidade de evitar que o tutor some quinze e não o fazer	R1- Evidenciar que o número informado não produz a soma quinze e apresentar a diferença para o número 15; R2- Evidenciar que o há a possibilidade de evitar que o tutor forme uma soma quinze"

Continua na próxima página

Tabela 5.4 – Continuação da página anterior

Função das MRE	Tipo de erro	Subtipo de erro	Erro apresentado	Remediação sugerida
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência de regra, teorema ou definição	Não se aplica	Não se aplica
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro referente a uso de operador	Não se aplica	Não se aplica
Restrição de interpretação	Indiretamente identificáveis	-	E1- Não selecionar o número 5 primeiro, quando disponível	R1- Evidenciar quantas vezes o número 5 aparece nas possíveis somas
Compreensão mais aprofundada	Solução não-categorizável	-	E1- Não Informar nenhum número novo; E2- Informar dois ou mais números	R1- Apresentar as regras da fase

A Figura 5.9 apresenta a remediação para o tipo de erro “indiretamente identificáveis”. Neste caso, estão sendo utilizadas as representações, segundo a taxonomia de representações externas (Wu e Puntambekar, 2012), verbal-textual (texto de *feedback* apresentado pela Monique) e acional-operacional (representação virtual do bloco numerado e o bloco numerado tangível).

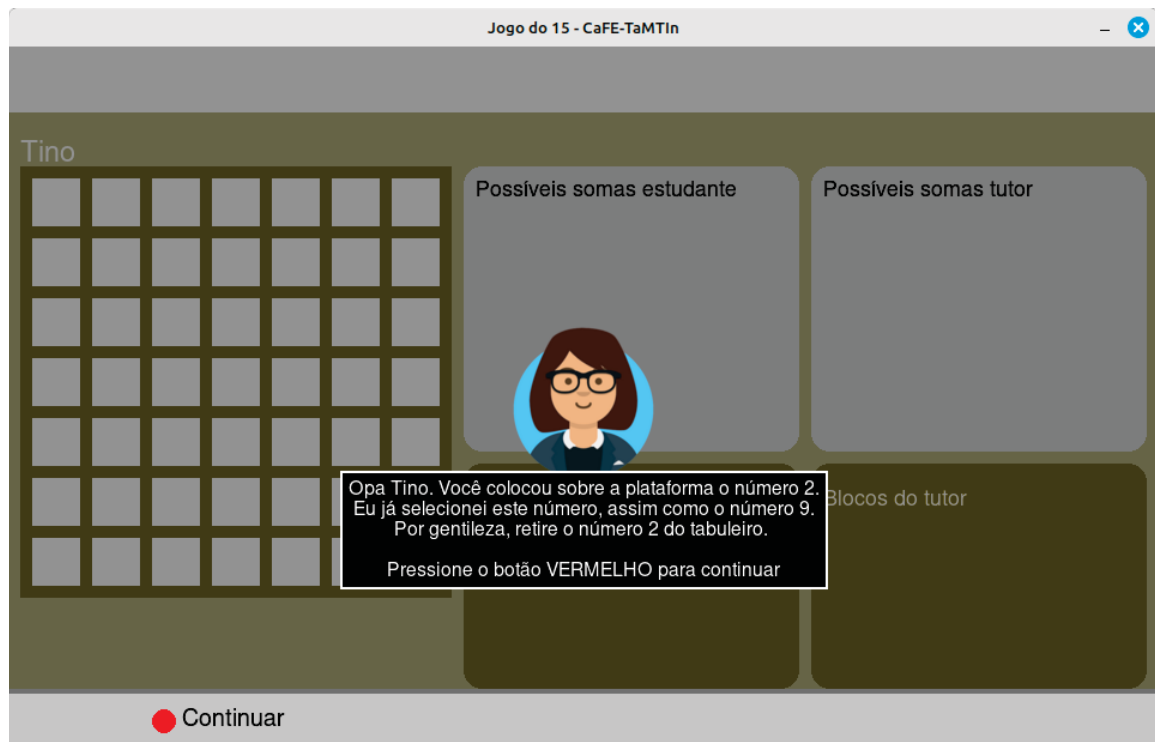


Figura 5.9: Remediação apresentada na Fase 3

5.1.4 Fase 4

A quarta e última fase possui um formato semelhante ao jogo conhecido como “quadrado mágico”⁸. Nesta fase, o estudante deve organizar os blocos numerados sobre a plataforma, conforme é solicitado pela Monique (Figura 5.10). A cada resolução concluída, é solicitado que o estudante reorganize os blocos numerados em um formato diferente, aumentando a complexidade da resolução.

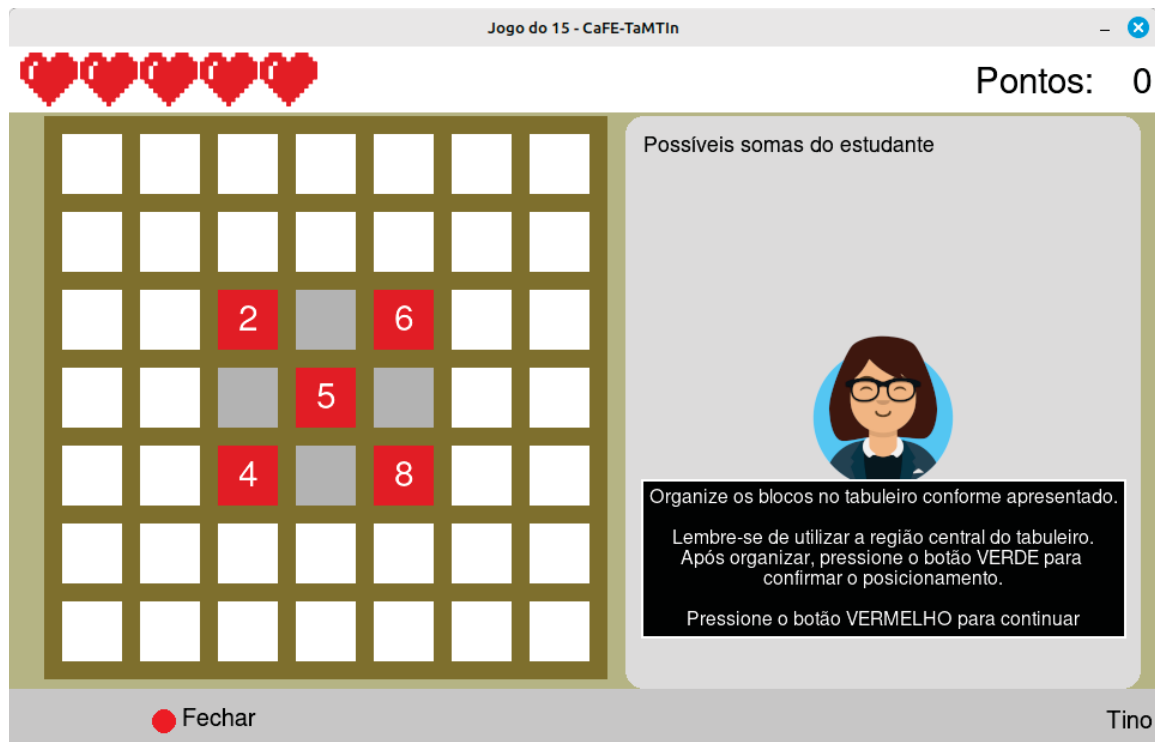


Figura 5.10: Quarta fase

No caso visualizado na Figura 5.10, o estudante deve posicionar os blocos 2, 4, 5, 6 e 8. O desafio do estudante é posicionar os blocos numerados restantes, de modo que as somas dos blocos, em cada linha, coluna e diagonal, resultem em 15. Por exemplo, o bloco como o número 7 deve ser posicionado entre os blocos 2 e 6, resultando em uma soma 15. Foram estabelecidas 5 combinações iniciais diferentes para serem resolvidas durante esta fase. O estudante pode posicionar todos os blocos faltantes e validar a resposta, pressionando o botão verde da plataforma, ou, ainda, validando a resposta a cada novo bloco posicionado.

O quadro denominado “Possíveis somas do estudante” possui uma representação dos blocos numerados posicionados de maneira que representem um “quadrado mágico” e o indicativo da diferença entre o número 15 e a soma dos blocos já posicionados.

A Tabela 5.5 exibe a identificação dos possíveis erros que podem ser produzidos pelos estudantes nesta fase, bem como suas respectivas remediações.

⁸https://pt.wikipedia.org/wiki/Quadrado_m%C3%A1gico

Tabela 5.5: Possíveis erros e remediações da Fase 4

Função das MRE	Tipo de erro	Subtipo de erro	Erro apresentado	Remediação sugerida
Papéis complementares	Interpretação equivocada da linguagem	-	E1- Não conseguir resolver nenhuma soma 15 depois de um determinado tempo	R1- Relembrar ao estudante alguma soma 15 com 3 algarismos já encontrada
Restrição de interpretação	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados	E1- Informar uma sequência de três números ímpares que não somam 15; E2- Informar uma sequência de dois números pares e um número ímpar que não somam 15	R1- Apresentar o resultado da soma e informar a diferença para o número 15
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro de deficiência de regra, teorema ou definição	E1- Informar uma sequência de três números pares; E2- Informar uma sequência de dois números ímpares e um número par	R1- Apresentar explicação sobre números pares e ímpares
Compreensão mais aprofundada	Diretamente identificáveis	Erro referente a uso de operador	Não se aplica	Não se aplica
Restrição de interpretação	Indiretamente identificáveis	-	E1- Tentar resolver o quadrado sem colocar o 5 no centro; E2 - Tentar resolver o quadrado sem colocar os números pares nos cantos	R1- Evidenciar quantas vezes o número 5 aparece nas possíveis somas; R2- Evidenciar quantas vezes cada número par aparece nas possíveis somas
Compreensão mais aprofundada	Solução não-categorizável	-	E1- Tentar resolver o quadrado mágico sem produzir nenhuma soma 15	R1- Apresentar as regras do jogo

A Figura 5.11 apresenta a remediação para o tipo de erro “diretamente identificáveis” e subtipo “erro de deficiência no domínio ou uso inadequado de dados”. Neste caso, estão

sendo utilizadas as representações, segundo a taxonomia de representações externas (Wu e Puntambekar, 2012), verbal-textual (texto de *feedback* apresentado pela Monique), simbólico-matemático (operação matemática informada no *feedback*) e acional-operacional (representação virtual do bloco numerado e o bloco numerado tangível).

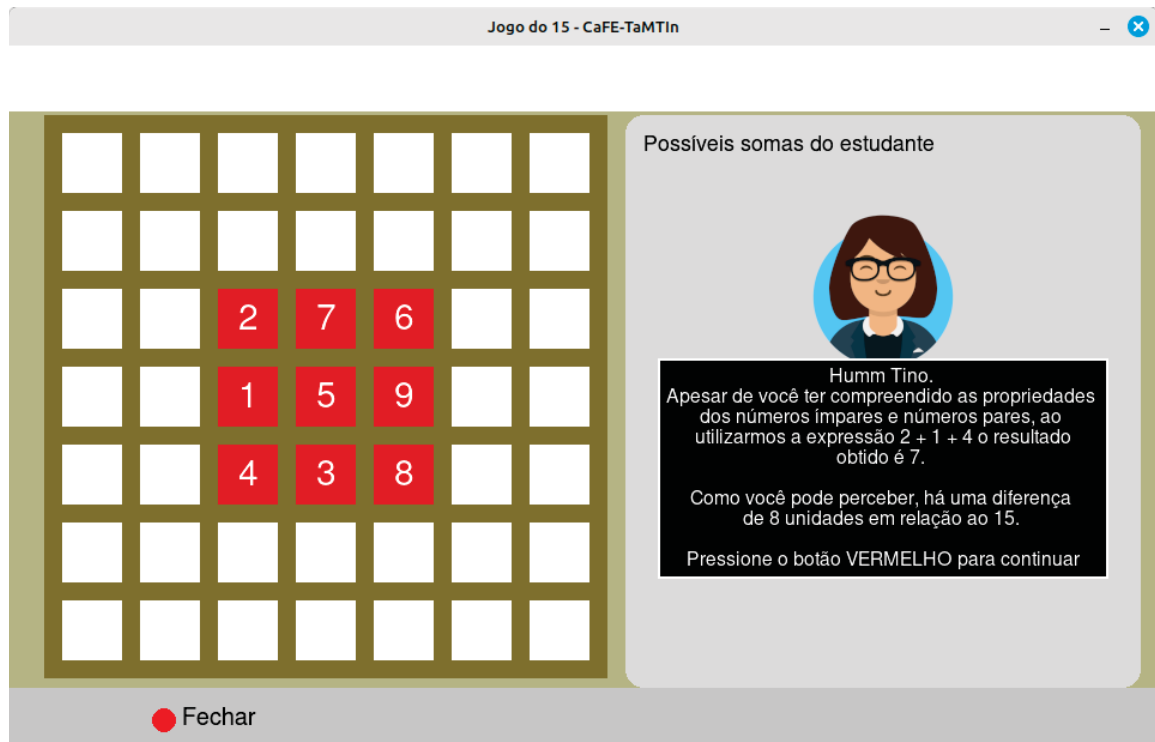


Figura 5.11: Remediação apresentada na Fase 4

5.2 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentado o desenvolvimento do jogo tangível multi-representacional denominado Jogo do 15. O jogo é composto por quatro fases. A primeira fase envolve a resolução de operações de adição e subtração. Na segunda fase, é solicitado ao estudante que seja encontrada todas as possíveis combinações de três números, entre os números de 1 a 9, que a soma resultam 15.

Na terceira fase, o estudante é desafiado pela personagem virtual Monique, para ver quem produz mais somas 15. A quarta fase consiste em completar “quadrados mágicos” com os números que estão faltando.

Foram identificados, ainda, por meio de reuniões com professoras universitárias de Matemática, os possíveis erros que os estudantes podem cometer em cada fase e suas possíveis remediações. Os *feedbacks* aos estudantes foram construídos considerando as múltiplas representações externas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados o estudo preliminar e o experimento, os quais foram desenvolvidos para avaliar a abordagem CaFE-TaMTIn. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos. A realização dos experimentos foi submetida ao Comitê de Ética em Pesquisa envolvendo seres humanos do Setor de Ciências da Saúde da UFPR (CEP/SD) sob protocolo CAAE 70297523.5.0000.0102 e aprovada pelo parecer 6.214.532.

6.1 ESTUDO PRELIMINAR - PROFESSORES

Este estudo objetivou avaliar as funcionalidades do jogo, validar as instruções e *feedbacks* fornecidos, bem como a identificação de erros e falhas existentes, e validar as funcionalidades de coleta automática de dados. Este estudo, ainda, objetivou avaliar a interface tangível e a funcionalidade da plataforma.

O público-alvo deste estudo foi composto por professores universitários. Foram selecionados sete professores, sendo cinco homens e duas mulheres, com idades variando entre 25 e 55 anos ($M = 37,7$; $DP = 8,94$). Em relação às áreas de atuação, participaram três professores de Computação, três de Matemática e um de Engenharia. Foram realizadas observações durante a interação entre os participantes e o jogo tangível, nas quais o observador anotava os itens observados. A observação permite ao observador identificar problemas, aumentar a compreensão sobre os conceitos envolvidos e estabelecer uma análise das relações e aplicações referentes ao fato observado (Mónico et al., 2017).

A Tabela 6.1 apresenta a sistematização dos erros e *bugs* identificados a partir da observação dos jogadores e as respectivas alterações realizadas. As alterações no software foram realizadas gradativamente, após cada professor ou professora finalizar sua participação.

Os principais erros observados fazem referência aos elementos presentes na interface gráfica do jogo. As alterações realizadas visaram melhorar a usabilidade e jogabilidade do jogador. Além disso, foi identificado um *bug* relacionado à apresentação do personagem virtual e o cronômetro, o qual não era pausado.

Foram, ainda, identificados problemas relacionados à plataforma e à aquisição das imagens da face dos jogadores, sendo necessário substituir as lâmpadas inicialmente instaladas por duas *ring lights* e alterar o posicionamento da *webcam* direcionada ao rosto do jogador.

Tabela 6.1: Erros identificados e alterações realizadas

Tipo	Erros identificados	Alterações realizadas
Ajuste software	O jogador demorou a perceber que precisava remover os blocos numerados de cima do tabuleiro.	Foi acrescida uma mensagem antes do início de uma tentativa para remover os blocos de cima do tabuleiro.
Ajuste software	O tempo regressivo acabava muito rápido.	Foi definido um tempo maior para a resolução das atividades.
Ajuste software	O tutorial da fase 2 estava confuso.	Foram reescritas as mensagens com a ajuda da professora de Matemática.

Continua na próxima página

Tabela 6.1 – Continuação da página anterior

Tipo	Erros identificados	Alterações realizadas
Ajuste software	O jogador removia os blocos da fase 3 antes do término do desafio.	Foi acrescida uma explicação durante o tutorial sobre as regras do jogo.
Ajuste software	A fase 3 possuía muitos desafios.	Foi reduzida a quantidade de desafios.
Ajuste software	O jogador não percebeu as funcionalidades dos botões da plataforma.	Foi acrescida uma mensagem no tutorial sobre a funcionalidade dos botões e adicionada uma legenda na parte inferior das fases identificando a funcionalidade de cada botão.
Ajuste hardware	Reconhecimento errôneo de um bloco numerado.	Melhorias na iluminação da plataforma.
Ajuste hardware	Reconhecimento errôneo do estado afetivo.	Reposicionamento da <i>webcam</i> e melhorias na iluminação do rosto do jogador.
<i>Bug</i>	Apresentação de erro, resultando em encerramento abrupto do programa, quando a mensagem do tutor era exibida por muito tempo.	O bug foi corrigido.

Como pode ser observado na Tabela 6.1, foi possível identificar seis alterações necessárias relativas ao software, duas alterações relacionadas ao hardware do jogo e uma correção de *bug*. A correção gradativa dos erros identificados permitiu uma melhor experiência para os demais jogadores.

6.2 EXPERIMENTO - ESTUDANTES

Foram convidados a participar do experimento, estudantes da rede pública de educação da cidade de Jandaia do Sul/PR, devidamente matriculados no oitavo ou nono ano do ensino fundamental II, no ano de 2024. Ao total, 27 estudantes manifestaram interesse em participar da pesquisa.

Destes, três estudantes tiveram seus dados removidos da análise por faltarem em alguma das etapas do experimento. Uma estudante manifestou desejo de não continuar participando da pesquisa durante a segunda rodada do jogo. Quatro estudantes foram identificados como produtores de dados não confiáveis durante o pré-teste por possuírem menos de 50% de respostas corretas em qualquer um dos testes padronizados (Flanker ou Stroop) e/ou tempos de reação maiores que 1700 milissegundos no teste de Flanker.

Desta forma, foram analisados os dados de 19 estudantes, com idade variando entre 12 e 15 anos ($M=13,4$; $DP=0,7$), sendo 13 estudantes do sexo masculino e seis estudantes do sexo feminino. Em relação à matrícula escolar, 12 estudantes pertencem ao 8º ano e sete estudantes matriculados no 9º ano. Todos os participantes preencheram e assinaram o Termo de Assentimento Livre e Esclarecido e os pais e/ou responsáveis preencheram e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

O experimento envolveu as seguintes etapas: a) pré-teste, utilizando os testes de Stroop e Flanker; b) primeira rodada do Jogo do 15; c) segunda rodada do Jogo do 15; d) pós-teste,

utilizando os testes de Stroop e Flanker. As etapas possuíram um intervalo de uma semana entre elas. Durante a primeira e a segunda rodada do Jogo do 15, cada estudante participante da pesquisa foi recepcionado individualmente no espaço disponibilizado pela escola, conforme pode ser observado na Figura 6.1.

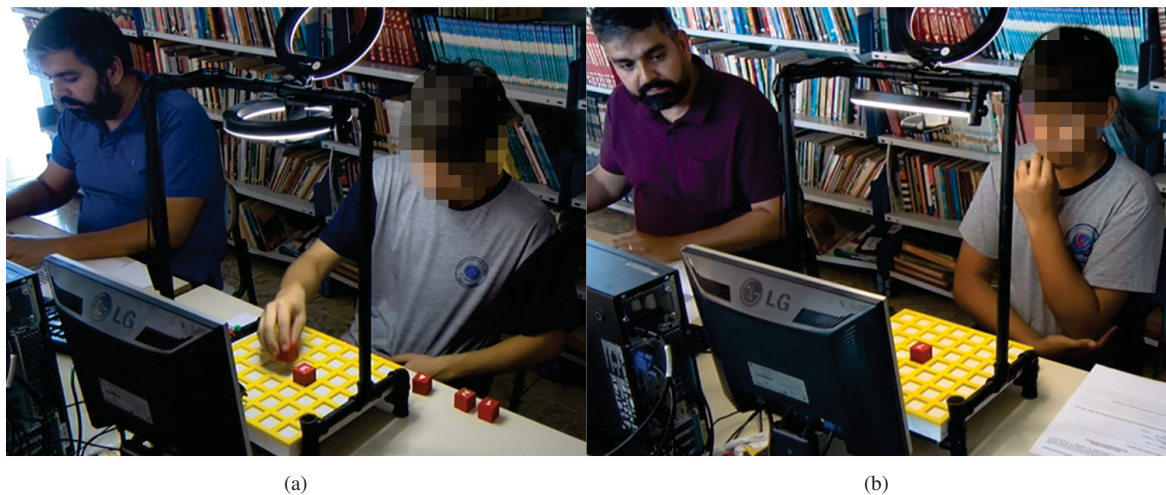


Figura 6.1: Estudantes jogando o Jogo do 15

Foram utilizados dois ambientes: a biblioteca e uma sala de aula, ambas sem a presença de pessoas não participantes da pesquisa. Durante os pré e pós-testes, os estudantes realizaram os testes por meio de notebooks na biblioteca da escola, em grupos de quatro estudantes, porém, cada estudante em um notebook (Figura 6.2).



Figura 6.2: Estudantes participando do pré-teste

O pré e o pós-teste foram baseados no protocolo estabelecido por Barzykowski et al. (2021b). No teste de Flanker, conforme pode ser observado na Figura 6.3, os estudantes tiveram que pressionar as teclas do teclado (teclas “Q” e “P”) conforme a direção indicada pela seta apresentada no centro da tela. Esta seta estava flanqueada por outras setas (duas de cada lado da seta central). Na condição congruente, todas as setas apontavam para a mesma direção, enquanto na condição incongruente, as setas flanqueadoras estavam apontadas para direção oposta à seta central. Antes do aparecimento das setas, foi exibido durante 950 milissegundos um quadro

vazio no centro da tela, indicando o local em que os participantes deveriam manter a visão. O conjunto de cinco setas ficou visível, a cada tentativa, por no máximo 1070 milissegundos e os estudantes tiveram que pressionar as teclas durante este intervalo. Foram apresentadas no total 140 tentativas, em que 70 eram na condição congruente e 70 estavam na condição incongruente, ambas exibidas de forma aleatória. Antes de iniciar o teste, os estudantes receberam 10 tentativas para praticar.

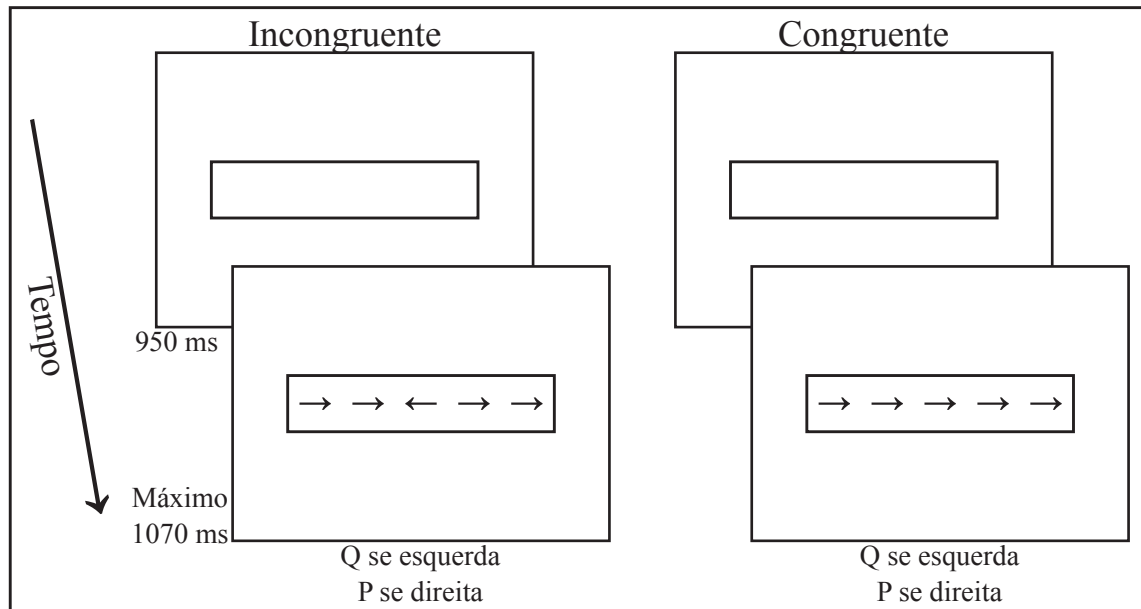


Figura 6.3: Teste de Flanker em duas condições.
Fonte: Adaptado de Barzykowski et al. (2021b)

No teste de Stroop (Figura 6.4), quatro palavras coloridas (vermelho, verde, azul e preto) foram selecionadas para serem dispostas, individualmente, no centro da tela, tingidas em uma dessas cores mencionadas. Por exemplo, a palavra VERMELHO poderia ser exibida nas cores vermelho, verde, azul ou preto. Os estudantes foram instruídos a identificar a cor da palavra o mais rápido possível, pressionando a tecla (“D”, “F”, “J” ou “K”) correspondente à cor em que a palavra estava sendo impressa, ignorando o significado da palavra. Cada palavra foi exibida na tela até que o estudante pressionasse uma das teclas, precedido de uma tecla branca por um intervalo de 400 milissegundos. Caso o estudante fornecesse uma resposta incorreta, uma tela de *feedback* com um “X” vermelho era exibida por 400 milissegundos. Foram dispostas 140 tentativas, sendo 70 na condição congruente, em que a palavra era colorida com a mesma cor do seu significado, e 70 na condição incongruente, em que a palavra era colorida com uma das outras cores, ambas tentativas apresentadas de forma aleatória. Antes de iniciar o teste, os estudantes receberam 14 tentativas para praticar.

Os testes de Flanker¹ e Stroop² foram implementados no Software Psytoolkit (Stoet, 2010, 2017), o qual permite que os testes sejam realizados por meio de navegadores web. Baseado no protocolo estabelecido por Barzykowski et al. (2021b), foi analisado o efeito da interferência dos testes padronizados (diferença entre a média dos tempos de resposta das tentativas incongruentes e congruentes, dividido pela média dos tempos de resposta das tentativas congruentes). Segundo Barzykowski et al. (2021a), quanto menor a taxa de interferência (ou seja, quanto mais rápida a interferência for resolvida), maior será a capacidade inibitória do indivíduo.

¹Disponível em: http://psytoolkit.org/c/3.4.6/run_exp?name=flankertino

²Disponível em: http://psytoolkit.org/c/3.4.6/run_exp?name=strooptino

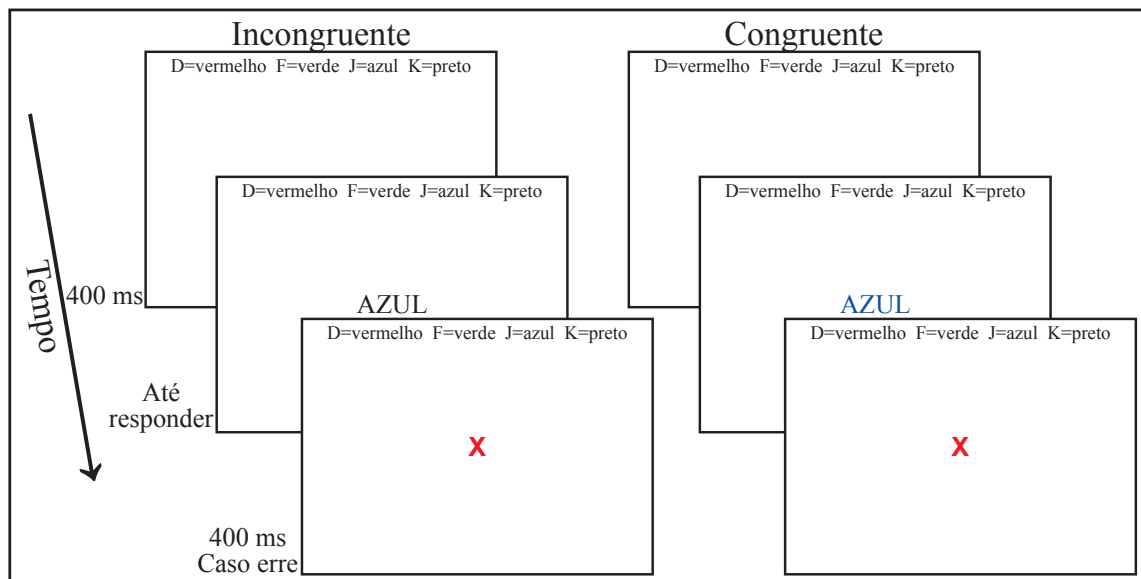


Figura 6.4: Teste de Stroop em duas condições.
Fonte: Adaptado de Barzykowski et al. (2021b)

Os efeitos da interferência foram calculados separadamente para os testes de Flanker e Stroop. Após o cálculo das pontuações dos efeitos da interferência (Flanker e Stroop), esses valores foram padronizados utilizando transformações Z para torná-los comparáveis entre si. Na sequência, o índice de capacidade do controle inibitório (ICCI) de cada estudante foi calculado por meio da média das pontuações dos efeitos de interferência transformadas em Z. Dessa forma, foi possível dividir os estudantes em três grupos de tamanho aproximadamente igual, conforme pode ser observado na Figura 6.5.

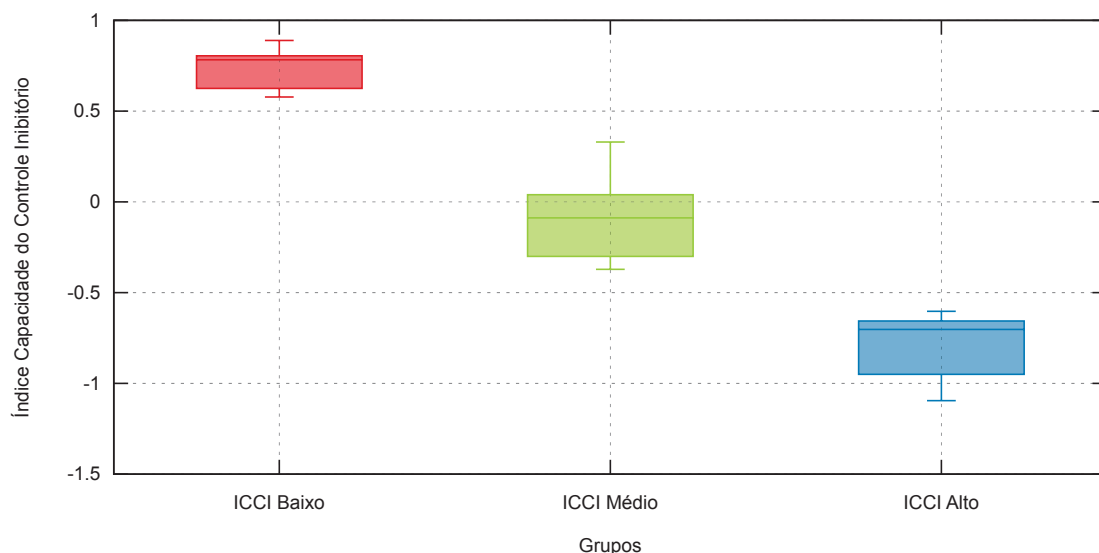


Figura 6.5: Grupos baseados no índice da capacidade do controle inibitório.

O grupo denominado ICCI Alto, com 6 estudantes, representa o grupo com maior capacidade de controle inibitório (com as menores pontuações dos efeitos de interferência transformadas em Z; $M=-0.78$, $DP=0.19$, faixa: -1.10 a -0.60). O grupo ICCI Médio, com 6 estudantes, representa os estudantes com capacidade de controle inibitório médio (com pontuações

médias dos efeitos de interferência transformadas em Z; $M=-0.08$, $DP=0.25$, faixa: -0,37 a 0.33). O grupo ICCI Baixo, com 7 estudantes, representa os estudantes com capacidade de controle inibitório baixo (com as maiores pontuações dos efeitos de interferência transformadas em Z; $M=0.74$, $DP=0.11$, faixa: 0.58 a 0.89). Uma ANOVA unidirecional foi realizada sobre a média do efeito de interferência nos testes de Stroop e Flanker, com os grupos de controle inibitório (baixo, médio, alto) como uma variável entre sujeitos, resultou em um efeito principal significativo ($F(2, 35) = 9.214$, $p = 0.00061$), indicando diferenças significativas entre os grupos.

A Figura 6.6 apresenta o comparativo entre os efeitos de interferência mensurados no pré e pós-teste. No grupo ICCI Baixo (Figura 6.6(a)), após a execução do pós-teste, 6 (85,71%) estudantes apresentaram efeito de interferência menor no teste de Flanker e 2 (28,57%) dos estudantes apresentaram efeito de interferência menor no teste de Stroop. Cabe ressaltar que, quanto menor a taxa de interferência, maior será a capacidade inibitória do indivíduo (Barzykowski et al., 2021a).

No grupo ICCI Médio (Figura 6.6(b)), em ambos os testes (Flanker e Stroop), após o pós-teste, 4 (66,67%) dos estudantes apresentaram efeito de interferência menor. Em relação ao grupo ICCI Alto (Figura 6.6(c)), após o pós-teste, 2 (33,33%) estudantes obtiveram efeito de interferência menor no teste de Flanker e 1 (16,67%) estudante apresentou efeito de interferência menor no teste de Stroop.

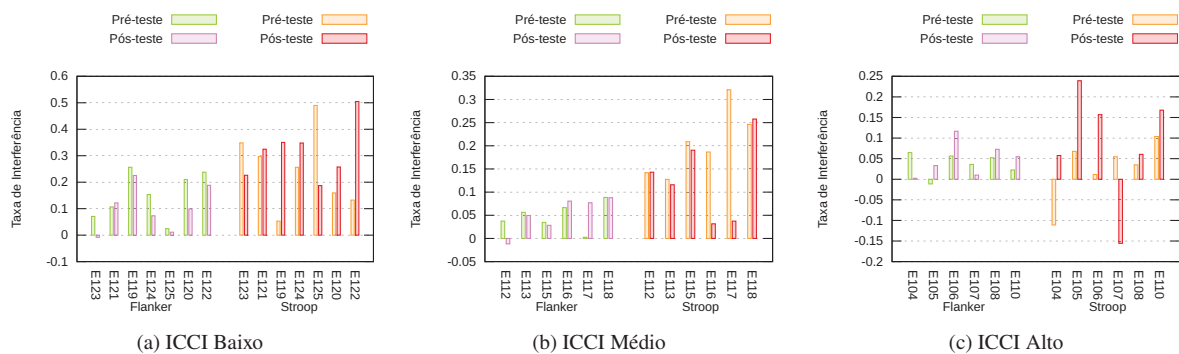


Figura 6.6: Taxa de interferência dos pré e pós-testes de Flanker e Stroop

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk, aplicado aos valores obtidos no teste de Flanker para o pré e pós-teste, sugere que as diferenças seguem uma distribuição normal nos três grupos (ICCI Baixo: valor- $p = 0.9426$, ICCI Médio: valor- $p = 0.4098$, ICCI Alto: valor- $p = 0.4845$). Para o teste de Stroop, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk indica que as diferenças seguem uma distribuição normal apenas nos grupos ICCI Baixo (valor- $p = 0.869$) e ICCI Alto (valor- $p = 0.07357$), enquanto no grupo ICCI Médio, as diferenças não seguem uma distribuição normal (valor- $p = 0.03718$).

O teste t pareado para o teste de Flanker indica que houve diferença estatisticamente significativa nos resultados do pós-teste em comparação com o pré-teste para o grupo ICCI Baixo ($t = 3.0288$, valor- $p = 0.02313$, intervalo de confiança de 95% para a diferença das médias de 0.009581268 a 0.090161589, média das diferenças é 0.04987143). Nos grupos ICCI Médio ($t = -0.25999$, valor- $p = 0.8052$, intervalo de confiança de 95% para a diferença das médias de -0.04663424 a 0.03806757, média das diferenças é -0.004283333) e ICCI Alto ($t = -0.60591$, valor- $p = 0.571$, intervalo de confiança de 95% para a diferença das médias de -0.06037600 a 0.03734267, média das diferenças é -0.01151667), os testes indicam que não há evidência estatisticamente significativa de uma diferença nas médias dos resultados do pré e pós-teste.

Em relação ao teste de Stroop, os resultados dos testes indicam que não há evidência estatística significativa de uma diferença nas médias dos resultados do pré e pós-teste. O teste t

pareado foi aplicado nos grupos ICCI Baixo ($t = -0.75492$, $\text{valor-}p = 0.4789$, intervalo de confiança de 95% para a diferença das médias de -0.2804691 a 0.1482120 , média das diferenças = -0.06612857) e ICCI Alto ($t = -1.0242$, $\text{valor-}p = 0.3527$, intervalo de confiança de 95% para a diferença das médias de -0.2134530 a 0.0918197 , média das diferenças = -0.06081667). O teste de Wilcoxon foi aplicado ao grupo ICCI Médio ($V = 18$, $\text{valor-}p = 0.1563$).

6.2.1 Fase 1

Durante a primeira rodada da Fase 1 do jogo, foram registradas no total 190 respostas, sejam certas ou erradas (Tabela 6.2). Dessas respostas, 129 (67,89%) são registros em que foi possível inferir o estado afetivo do estudante via *webcam* e mapear o quadrante correspondente, baseado no modelo apresentado na Subseção 4.2.2. Nos demais 61 registros (32,11%) não foi possível inferir o estado afetivo do estudante. As principais causas para a não identificação do estado afetivo são: mão na frente do rosto e posição do estudante fora do enquadramento da *webcam*.

O quadrante com maior número de ocorrência durante a primeira rodada, conforme pode ser observado na Tabela 6.2, foi o QN (neutro) com 113, representando 87,60% das ocorrências. A predominância do quadrante neutro para atividades educativas já foi observada em outros estudos (Gottardo e Pimentel, 2018; Ascari et al., 2020). Foram registradas 14 (10,85%) ocorrências no quadrante Q1 (construção). Neste quadrante estão contidas emoções como engajamento, motivação e alegria, as quais são desejadas no processo de aprendizagem (Ascari et al., 2020). Duas ocorrências (1,55%) foram registradas no quadrante Q2 (dúvidas).

Tabela 6.2: Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 1

Quadrante	Rodada 1			Rodada 2		
	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto
QN	43	35	35	46	28	48
Q1	7	6	1	0	3	0
Q2	2	0	0	3	1	0
Q3	0	0	0	0	0	0
Q4	0	0	0	0	1	0
Total	52	41	36	49	33	48
Média	10,4	8,2	7,2	9,8	6,6	9,6
Desvio padrão	18,4	15,2	15,5	20,3	12,0	21,5

Para avaliar as mudanças entre os quadrantes, foram gerados grafos dirigidos, utilizando a ferramenta Gephi³, em que os nós do grafo representam os quadrantes e as arestas representam as transições entre os quadrantes ou a persistência no mesmo quadrante. Durante a primeira rodada da Fase 1, ilustrada na Figura 6.7, podemos perceber que as maiores mudanças de quadrante ocorreram entre os quadrantes QN e Q1, para os três grupos. Destaca-se, ainda, as mudanças do quadrante Q2 para o quadrante Q1 no grupo ICCI Baixo. Segundo D’Mello et al. (2007), é importante que os alunos não permanecem em ciclos viciosos e que possam ser levados de um estado negativo para um estado positivo. O ciclo vicioso é estabelecido quando um ou mais estados afetivos negativos (quadrantes Q2 e Q3) ocorrem repetidamente (Gottardo, 2018).

³Disponível em: <https://gephi.org/>

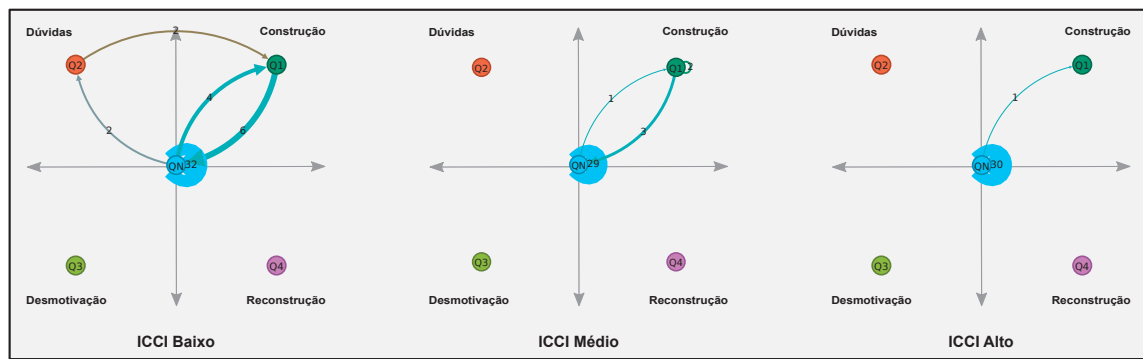


Figura 6.7: Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 1

A Figura 6.8 apresenta a inferência do índice da capacidade do controle inibitório (ICCI), baseada no modelo apresentado na Seção 4.2.4, realizada durante a primeira rodada da Fase 1. Os estudantes do grupo ICCI Baixo (Figura 6.8(a)) iniciaram o jogo com os ajustes de *level design* no nível 1, enquanto dos estudantes do grupo ICCI Médio (Figura 6.8(b)) iniciaram no nível 2 e, no nível 3, os estudantes do grupo ICCI Alto (Figura 6.8(c)). A cada jogada, foi inferido o ICCI do estudante e foram realizadas as adaptações na fase, conforme descritas na Tabela 5.1.

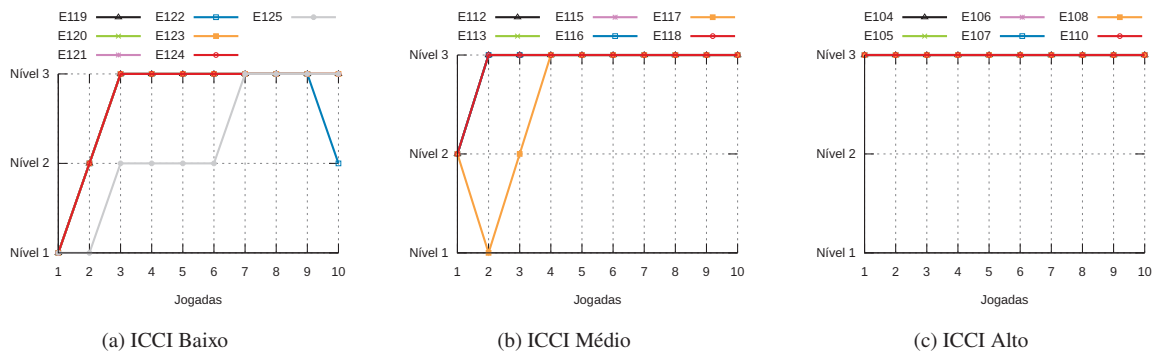


Figura 6.8: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 1

É possível observar na Figura 6.8, que, no decorrer das jogadas, os estudantes tiveram suas capacidades do controle inibitório capacitadas. Nesta fase, ao finalizarem a primeira rodada, todos os estudantes, de todos os grupos, permaneceram no nível em que iniciaram a fase (Figura 6.8(c)) ou acenderam a um nível superior (Figuras 6.8(a) e 6.8(b)).

Na segunda rodada da Fase 1 (Tabela 6.2), foram registradas 190 respostas fornecidas pelos estudantes. Destas, 130 (68,42%) são respostas em que foi possível inferir o estado afetivo do estudante e mapear o quadrante correspondente. Em 60 (31,58%) respostas, não foi possível inferir o estado afetivo. Houve uma predominância, nos três grupos, do quadrante QN (neutro), com 122 (93,84%) dos registros. O quadrante Q1 (construção) foi atribuído a três (2,31%) respostas de estudantes. Ainda, ocorreram quatro (3,08%) respostas mapeadas no quadrante Q2 (dúvidas) e uma (0,77%) resposta mapeada no quadrante Q4 (reconstrução). Não foram mapeadas respostas no quadrante Q3 (desmotivação).

As mudanças de quadrantes ocorridas durante a segunda rodada da Fase 1 podem ser observadas na Figura 6.9. É possível observar que os estudantes não permaneceram em ciclos viciosos. No grupo ICCI Baixo, ocorreram mudanças entre os quadrantes QN e Q2, além de uma reincidência no quadrante Q2. Foram identificadas mudanças entre os quadrantes QN e Q1 e entre os quadrantes QN e Q4 no grupo ICCI Médio. No quadrante Q4 estão os estados afetivos de satisfação, alívio e esperança. Ainda, no grupo ICCI Médio, foi registrada uma mudança do

quadrante Q2 para o Q1. Não foram registradas mudanças de quadrantes entre os estudantes do grupo ICCI Alto.

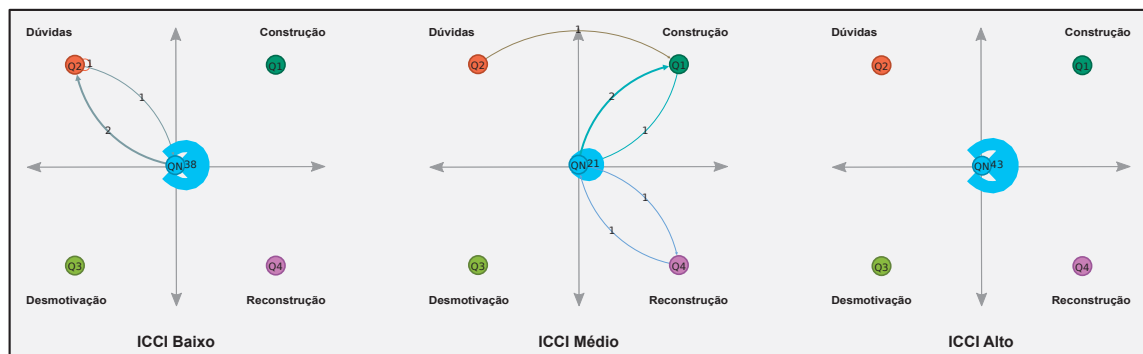


Figura 6.9: Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 1

Na Figura 6.10, pode-se observar os dados relativos à inferência do ICCI, realizada durante a segunda rodada da Fase 1. É importante salientar que, a segunda rodada não aproveitou dados dos estudantes oriundos da primeira rodada. Desta forma, os estudantes do grupo ICCI Baixo iniciaram a fase no nível 1, o grupo ICCI Médio iniciou no nível 2 e o grupo ICCI Alto no nível 3. Assim como na primeira rodada (Figura 6.8), todos os estudantes apresentaram capacitação do controle inibitório. Todos os estudantes permaneceram no nível em que iniciaram a fase (Figura 6.10(c)) ou ascenderam ao nível 3 (Figuras 6.10(a) e 6.10(b)).

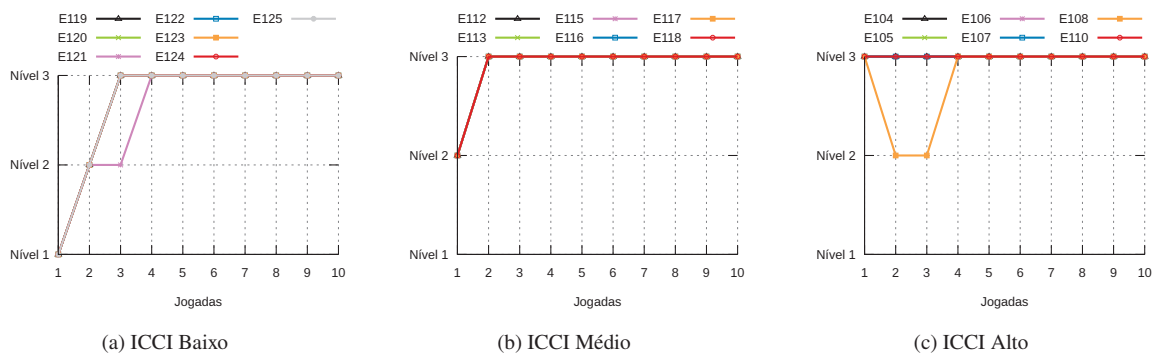


Figura 6.10: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 1

6.2.2 Fase 2

Na primeira rodada da Fase 2, foram registradas, no total, 219 respostas, sendo certas ou erradas. As respostas em que foi possível inferir o estado afetivo do estudante e mapear o quadrante correspondente totalizaram 169 (77,17%) registros. Em 50 (22,83%) das respostas não foi possível inferir o estado afetivo do estudante. Os principais motivos da não identificação do estado afetivo são: posição do estudante fora do enquadramento da *webcam* e mão posicionada na boca ou na frente do rosto.

Como pode ser observado na Tabela 6.3, o quadrante com o maior número de ocorrências foi o QN (neutro), com 139 (82,25%) registros. Na sequência, foram registradas 23 (13,61%) ocorrências do quadrante Q1 (construção). Ocorreram, ainda, seis (3,55%) registros de respostas identificadas no quadrante Q2 (dúvidas) e um (0,59%) registro no quadrante Q4 (reconstrução). Não foram identificadas respostas dos estudantes mapeadas no quadrante Q3 (desmotivação).

Tabela 6.3: Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 2

Quadrante	Rodada 1			Rodada 2		
	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto
QN	55	37	47	51	42	44
Q1	8	12	3	3	0	3
Q2	2	1	3	1	2	0
Q3	0	0	0	0	0	0
Q4	1	0	0	0	0	0
Total	66	50	53	55	44	47
Média	13,2	10,0	10,6	11,0	8,8	9,4
Desvio padrão	23,6	15,9	20,4	22,4	18,6	19,4

A Figura 6.11 apresenta as mudanças de quadrantes das emoções durante a primeira rodada da Fase 2. Observa-se que, para os grupos ICCI Baixo e ICCI Médio as maiores mudanças ocorreram entre os quadrantes QN e Q1. Houve, ainda, um registro de troca de quadrante entre QN e Q4 registrado no grupo ICCI Baixo. No grupo ICCI Alto, as maiores mudanças de quadrante ocorreram entre QN e Q2. Porém, também foram registradas mudanças de quadrante entre QN e Q1 para este grupo. É importante salientar que os quadrantes Q1 e Q2 são desejáveis em atividades educativas e podem estar relacionados de forma positiva com a aprendizagem (D’Mello et al., 2007; Ascari et al., 2020). Cabe ressaltar, ainda, que não foram identificados ciclos viciosos durante essa fase.

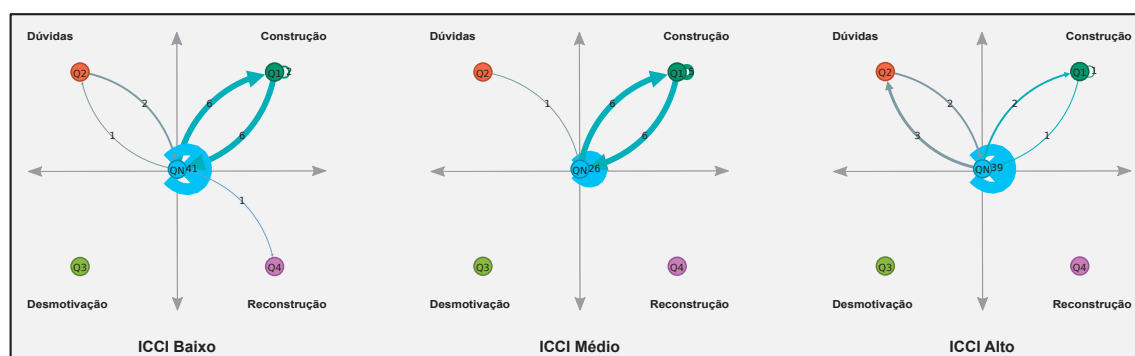


Figura 6.11: Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 2

A inferência do ICCI, realizada durante a primeira rodada da Fase 2, pode ser observada na Figura 6.12. Nesta fase, os estudantes herdaram o nível em que finalizaram a Fase 1. Dessa forma, é possível que estudantes de um determinado grupo tenham ajustes de *level design* diferentes entre si. Pode-se observar que os estudantes dos grupos ICCI Baixo (Figura 6.12(a)) e ICCI Médio (Figura 6.12(b)) possuíam maior número de alternância de nível em relação ao grupo ICCI Alto (Figura 6.12(c)). Nesta fase, 57,14% dos estudantes do grupo CCI Baixa permaneceram no nível em que iniciaram ou ascenderam a um nível superior. No grupo ICCI Médio, metade (50,00%) dos estudantes conseguiram permanecer no mesmo nível ou ascender a um nível superior, enquanto no grupo ICCI Alto, 83,33% dos estudantes alcançaram essa condição.

Durante a segunda rodada da Fase 2 (Tabela 6.3), foram registradas 192 respostas. Foi possível inferir o estado afetivo e mapear o quadrante correspondente em 146 (76,04%) respostas. Não foi possível inferir o estado afetivo do estudante devido ao posicionamento do estudante em frente à *webcam* ou, ainda, pela mão posicionada em frente ao rosto ou na boca em 46 (23,96%) dos registros. O quadrante com o maior número de ocorrência foi o QN (neutro), com 137

(93,84%) dos casos. Foram registradas no quadrante Q1 (construção) um total de 6 (4,11%) ocorrências, enquanto no quadrante Q2 (dúvidas) há registros de 3 (2,05%) ocorrências. Não houve registro de respostas mapeadas nos quadrantes Q3 (desmotivação) e Q4 (reconstrução).

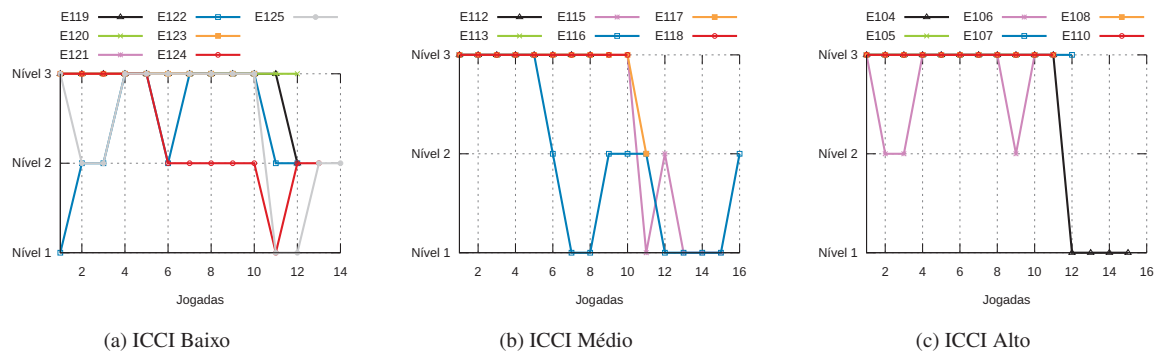


Figura 6.12: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 2

Relativo às mudanças de quadrantes das emoções durante a segunda rodada da Fase 2, pode-se observar, por meio da Figura 6.13, que não foram identificados ciclos viciosos. O grupo ICCI Baixo registrou mudanças do quadrante QN para os quadrantes Q1 e Q2 em quantidades semelhantes, enquanto o grupo ICCI Médio registrou mudanças entre os quadrantes QN e Q2 e o grupo ICCI Alto possui mudanças entre os quadrantes QN e Q1.



Figura 6.13: Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 2

A Figura 6.14 ilustra os dados relativos à inferência do índice de capacidade do controle inibitório realizada durante a segunda rodada da Fase 2. É possível perceber que todos os estudantes pertencentes ao grupo ICCI Alto (Figura 6.14(c)) permaneceram no nível mais alto durante todas as jogadas. Em relação aos estudantes do grupo ICCI Baixo (Figura 6.14(a)), 85,71% permaneceram ou atingiram um nível superior ao nível de *level design* com que iniciaram a rodada. Permaneceram ou ascenderam a um nível superior ao iniciado na rodada 66,67% dos estudantes do grupo ICCI Médio (Figura 6.14(b)).

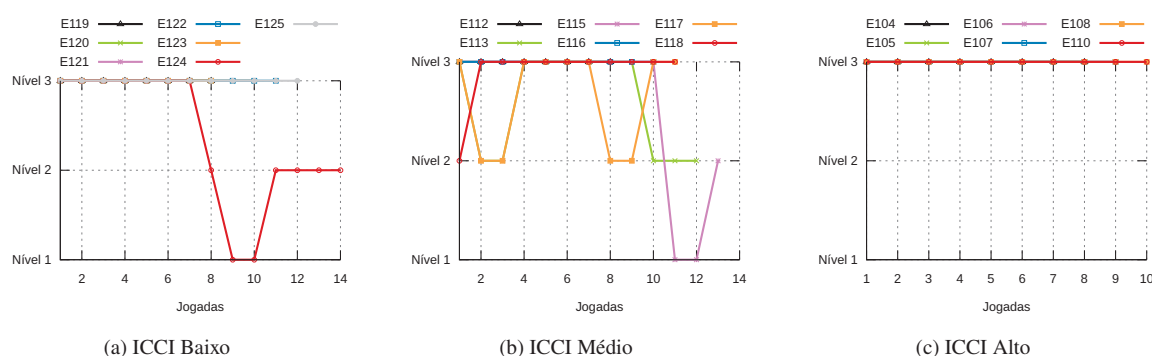


Figura 6.14: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 2

6.2.3 Fase 3

A Fase 3, devido às suas características, foi a fase do jogo em que mais respostas foram registradas. Nesta fase, os estudantes foram desafiados a jogar contra a tutora Monique, informando um número por vez para encontrar uma soma 15 ou evitar que fosse realizada, pela tutora, uma soma 15. Assim, foram registradas um total de 799 respostas durante a primeira rodada da Fase 3 (Tabela 6.4). Destas, em 562 (70,34%) respostas foi possível inferir o estado afetivo e mapear o quadrante correspondente. Nas demais 237 (29,66%) não foi possível inferir o estado afetivo. Assim como ocorreu nas fases anteriores e observado em outros estudos ((Gottardo e Pimentel, 2018; Ascari et al., 2020)), o quadrante com maior número de ocorrências foi o QN (neutro), com 449 (79,89%) registros. Na sequência, o segundo quadrante com o maior número de ocorrências foi o Q1 (construção), com 99 (17,62%) registros. O quadrante Q2 (dúvidas) foi identificado em 14 (2,49%) respostas dos estudantes. Não foram registradas nesta rodada respostas mapeadas nos quadrantes Q3 (dúvidas) e Q4 (reconstrução).

Tabela 6.4: Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 3

Quadrante	Rodada 1			Rodada 2		
	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto
QN	157	143	149	171	93	111
Q1	37	49	13	6	22	10
Q2	4	9	1	6	6	0
Q3	0	0	0	1	0	0
Q4	0	0	0	0	0	0
Total	198	201	163	184	121	121
Média	39,6	40,2	32,6	36,8	24,2	24,2
Desvio padrão	67,4	60,9	65,3	75,1	39,5	48,7

As mudanças de quadrantes das emoções durante a primeira rodada da Fase 3 é ilustrada na Figura 6.15. Observa-se, nesta rodada, que as maiores mudanças de quadrante ocorreram entre os quadrantes QN e Q1 para os três grupos. Foram observadas, ainda, trocas entre os quadrantes QN e Q2 para ambos os grupos. Houve, também, mudança entre os quadrantes Q2 e Q1 no grupo ICCI Médio e do quadrante Q2 para o Q1 no grupo ICCI Baixo. Destaca-se, nesta rodada, a reincidência do quadrante do Q1 nos três grupos, demonstrando interesse e engajamento dos estudantes.

Os dados relativos à inferência do ICCI realizada durante a primeira rodada da Fase 3 podem ser observados na Figura 6.16. Nesta fase, os estudantes iniciaram o jogo no mesmo nível de *level design* em que finalizaram a Fase 2. Nota-se que houve uma discrepância entre

a quantidade de jogadas dos estudantes em todos os grupos. Isso ocorreu pelo fato de alguns estudantes terem cometido muitos erros, perdendo assim, todas as vidas disponíveis, sendo necessário jogar mais de uma vez essa fase.

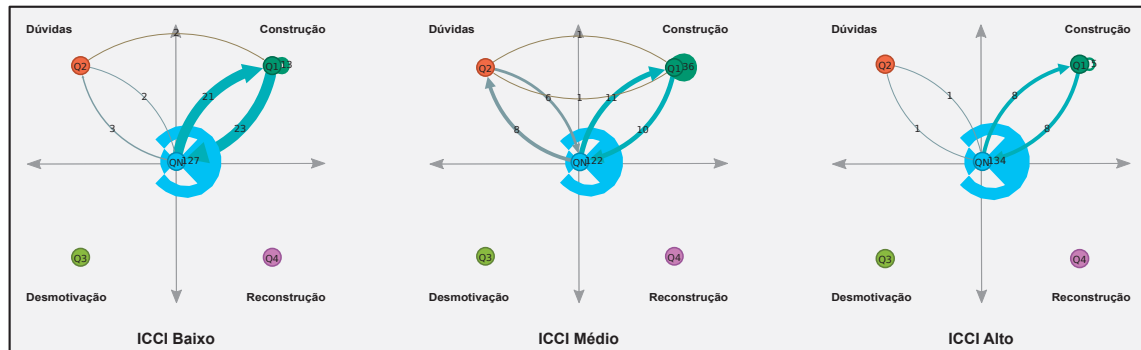


Figura 6.15: Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 3

No grupo ICCI Baixo (Figura 6.16(a)), 85,71% dos estudantes permaneceram no mesmo nível em que iniciaram a fase ou atingiram um nível maior. No grupo ICCI Médio (Figura 6.16(b)), todos os estudantes permaneceram no nível em que iniciaram a fase ou ascenderam a um nível superior. Relativo ao grupo CCI Alta (Figura 6.16(c)), permaneceram no mesmo nível ou atingiram um nível superior, 66,67% dos estudantes.

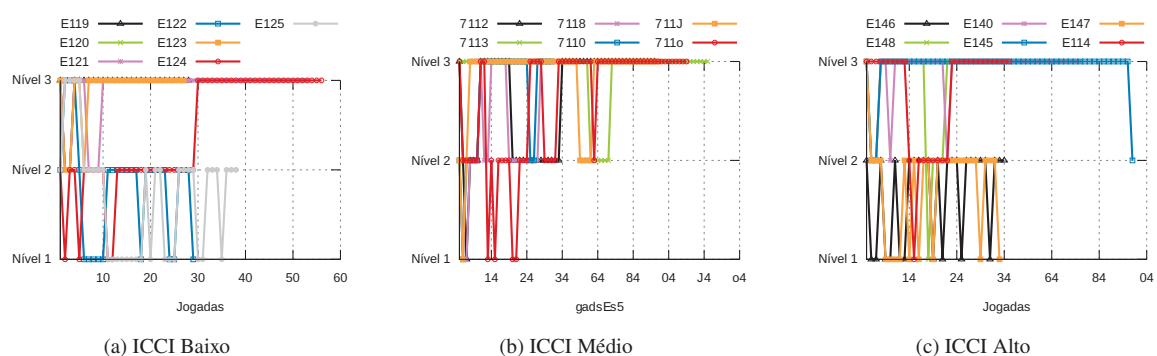


Figura 6.16: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 3

Na segunda rodada da Fase 3, foram registradas 576 respostas, sejam certas ou erradas. Em 426 (73,96%) foi possível inferir o estado afetivo do estudante e mapear o quadrante correspondente. Nas demais 150 (26,04%) respostas não foi possível inferir o estado afetivo do estudante. Como pode ser observado na Tabela 6.4, o quadrante com o maior número de ocorrências foi o QN (neutro), com 375 (88,03%). Foram mapeadas 38 (8,92%) respostas no quadrante Q1 (construção). O quadrante Q2 (dúvidas) foi identificado em 12 (2,82%) ocorrências. Foi registrado, ainda, uma (0,23%) resposta mapeada no quadrante Q3 (desmotivação). Não foram registradas respostas mapeadas no quadrante Q4 (reconstrução).

Os dados relativos às mudanças de quadrantes das emoções durante a segunda rodada da Fase 3 podem ser observados na Figura 6.17. Na segunda rodada, assim como ocorreu na primeira rodada, os estudantes herdaram o nível de *level design* em que finalizaram a Fase 2.

No grupo ICCI Baixo (Figura 6.18(a)) foi registrado, de maneira semelhante, mudanças entre os quadrantes QN e Q1 e os quadrantes QN e Q2. Houve uma mudança do quadrante Q2 para o quadrante Q1. Foi registrado, ainda, mudança entre os quadrantes QN e Q3. Um dos

motivos para o registro no quadrante Q3 pode ser a necessidade do estudante de jogar a fase mais de uma vez devido à perda de todas as vidas disponíveis.

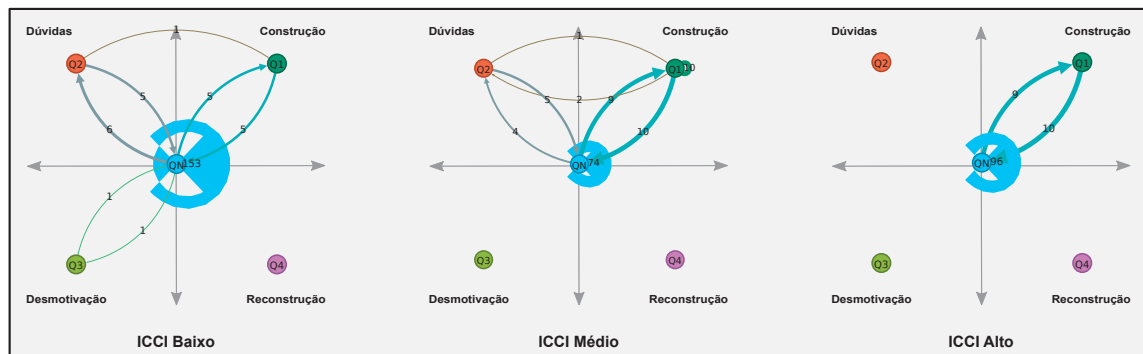


Figura 6.17: Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 3

A maior ocorrência de mudança de quadrantes no grupo ICCI Médio (Figura 6.18(b)) foi entre os quadrantes QN e Q1. Neste grupo, foram registradas mudanças entre os quadrantes QN e Q2, bem como entre os quadrantes Q1 e Q2. Foram registradas, ainda, reincidências no quadrante Q1. Mudanças entre os quadrantes QN e Q1 foram registradas no grupo ICCI Alto (Figura 6.18(c)).

A Figura 6.18 apresenta a inferência do ICCI ocorrida durante a segunda rodada da Fase 3. É possível observar que houve uma discrepância entre a quantidade de jogadas necessárias para finalizar a fase nos grupos ICCI Baixo (Figura 6.18(a)) e ICCI Alto (Figura 6.18(c)). Assim como ocorreu na primeira rodada, estudantes desses grupos necessitaram jogar mais de uma vez a fase para finalizá-la devido à quantidade de erros cometidos e a perda total de vidas no jogo.

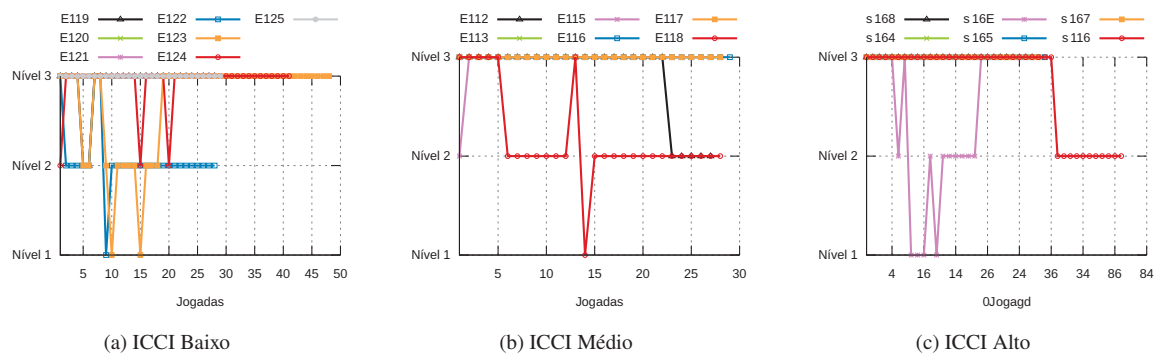


Figura 6.18: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 3

No grupo ICCI Baixo, 85,71% dos estudantes conseguiram permanecer no nível de *level design* em que iniciaram ou ascenderam a um nível superior. Entre os estudantes do grupo ICCI Médio (Figura 6.18(b)), 66,67% dos estudantes conseguiram subir de nível ou permanecer no mesmo nível, enquanto 83,33% dos estudantes do grupo ICCI Alto atingiram essa condição.

6.2.4 Fase 4

Na Fase 4, foram registradas durante a primeira rodada da Fase 4, ao todo, 183 respostas (Tabela 6.5). Dessas, em 118 (64,48%) respostas foi possível inferir o estado afetivo e mapear o quadrante correspondente. Nas demais 65 (35,52%) respostas, não foi possível inferir o estado afetivo do estudante.

Tabela 6.5: Número de ocorrências dos quadrantes na Fase 4

Quadrante	Rodada 1			Rodada 2		
	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto	ICCI Baixo	ICCI Médio	ICCI Alto
QN	49	31	23	38	24	35
Q1	6	4	2	2	1	7
Q2	2	0	1	1	0	1
Q3	0	0	0	0	0	0
Q4	0	0	0	0	0	0
Total	57	35	26	41	25	43
Média	11,4	7,0	5,2	8,2	5,0	8,6
Desvio padrão	21,2	13,5	10,0	16,7	10,6	15,0

O quadrante com o maior número de ocorrências, nesta rodada, foi o QN (neutro), com 103 (87,29%) registros. O segundo quadrante com maior número de ocorrências foi o Q1 (construção), com 12 (10,17%) registros. Foram identificadas 3 (2,54%) respostas no quadrante Q2 (dúvidas). Não foram registradas respostas mapeadas nos quadrantes Q3 (dúvidas) e Q4 (reconstrução) nesta rodada.

Durante a primeira rodada da Fase 4, considerando as mudanças de quadrantes das emoções, ilustrada na Figura 6.19, é possível observar que as maiores alterações de quadrante ocorreram entre os quadrantes QN e Q1, para grupos ICCI Baixo (Figura 6.20(a)) e ICCI Médio (Figura 6.20(b)). O grupo ICCI Baixo registrou, ainda, mudanças do quadrante QN para o Q2. No grupo ICCI Alto (Figura 6.20(c)) foram registradas mudanças do quadrante QN para o Q2 e do quadrante Q1 para QN. É possível observar que ocorreram reincidências no quadrante Q1 nos três grupos.

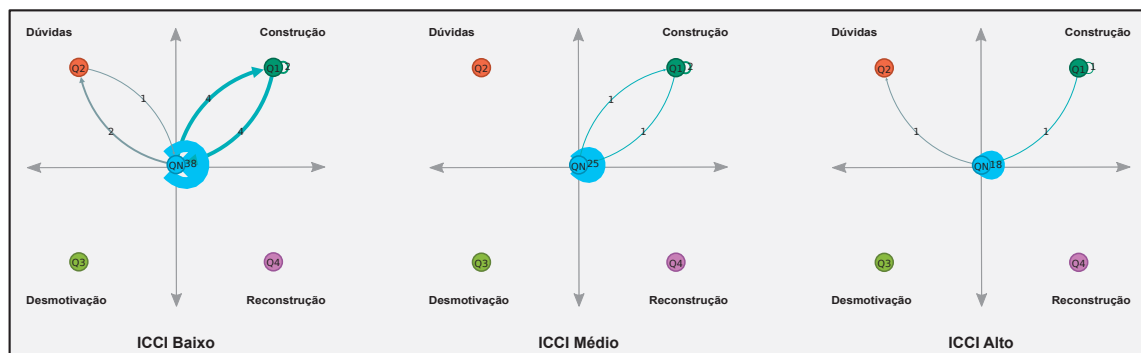


Figura 6.19: Mudanças de quadrantes durante a primeira rodada da Fase 4

A Figura 6.20 exibe os dados referentes à inferência do ICCI realizada durante a primeira rodada da Fase 4. Nessa fase, os estudantes começaram a rodada no mesmo nível de *level design* em que terminaram a Fase 3. Observa-se uma discrepância na quantidade de jogadas entre os estudantes dos grupos ICCI Baixo 6.20(a) e ICCI Médio 6.20(b). Este fato ocorreu porque alguns estudantes cometeram muitos erros, perdendo todas as vidas disponíveis, sendo necessário jogar essa fase mais de uma vez.

No grupo ICCI Baixo, 71,43% dos estudantes alcançaram um nível de *level design* superior ou permaneceram no mesmo nível. Nos grupos ICCI Médio e ICCI Alto (Figura 6.20(c)) 83,33% dos estudantes, em ambos os grupos, conseguiram permanecer no mesmo nível ou ascender a um nível superior em relação ao nível iniciado na fase.

Na segunda rodada da Fase 4 (Tabela 6.5), foram registradas 166 respostas dos estudantes. Destas, foi possível inferir o estado afetivo dos alunos e mapear o quadrante correspondente

em 109 (65,66%) registros. Em 57 (34,34%) respostas não foi possível determinar o estado emocional dos estudantes. Houve uma predominância do quadrante QN (neuro) nos três grupos, com 97 (88,89%) dos registros. O quadrante Q1 (construção) foi atribuído a 10 (9,17%) respostas. Além disso, ocorreram duas (1,83%) respostas no quadrante Q2 (dúvidas). Não foram identificadas respostas mapeadas nos quadrantes Q3 (desmotivação) e Q4 (reconstrução).

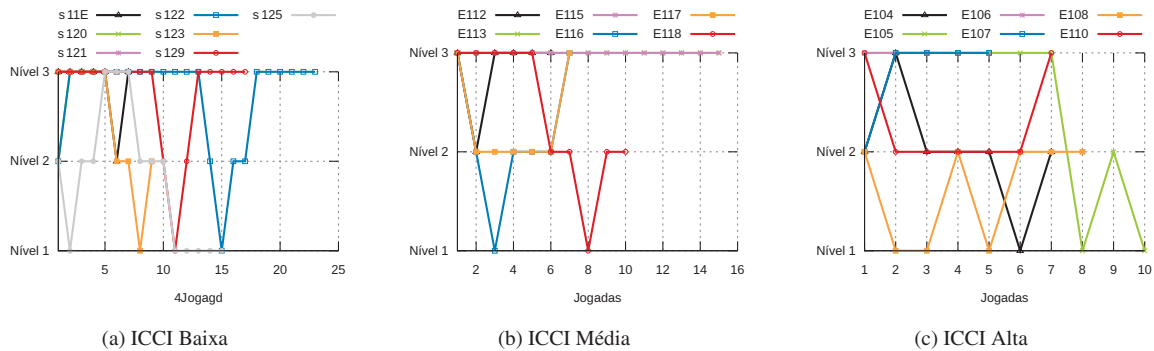


Figura 6.20: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da primeira rodada da Fase 4

As mudanças de quadrantes das emoções ocorridas na segunda rodada da Fase 4 podem ser observadas na Figura 6.21. A principal mudança de quadrante, para os três grupos, ocorreu entre os quadrantes QN e Q1. Observa-se uma mudança do quadrante Q1 para o Q2 no grupo ICCI Baixo e, no grupo ICCI Alto, uma mudança entre os quadrantes QN e Q2. Além disso, foi registrado reincidências no quadrante Q1 para este último grupo.

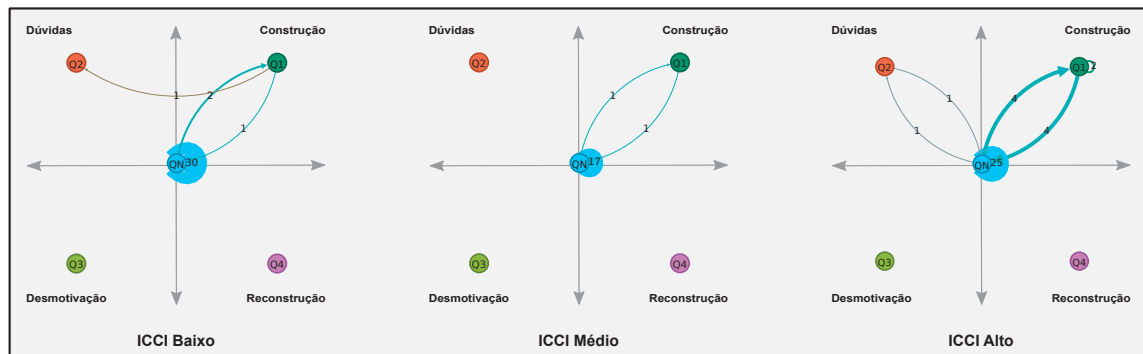


Figura 6.21: Mudanças de quadrantes durante a segunda rodada da Fase 4

A Figura 6.22 apresenta os dados referentes à inferência do ICCI durante a segunda rodada da Fase 4. No grupo ICCI Baixo (Figura 6.22(a)), 71,43% dos estudantes permaneceram ou alcançaram um nível superior. Para os estudantes do grupo ICCI Médio (Figura 6.22(b)), 83,33% permaneceram ou avançaram para um nível superior em relação ao nível inicial na rodada. No grupo ICCI Alto (Figura 6.22(c)), 66,67% dos estudantes conseguiram permanecer ou avançar para um nível superior. Observa-se, ainda, uma discrepância na quantidade de jogadas entre os estudantes deste grupo. O motivo foi a preferência do estudante E106 em ir resolvendo o quadrado mágico de forma parcial ao invés de informar a solução completa.

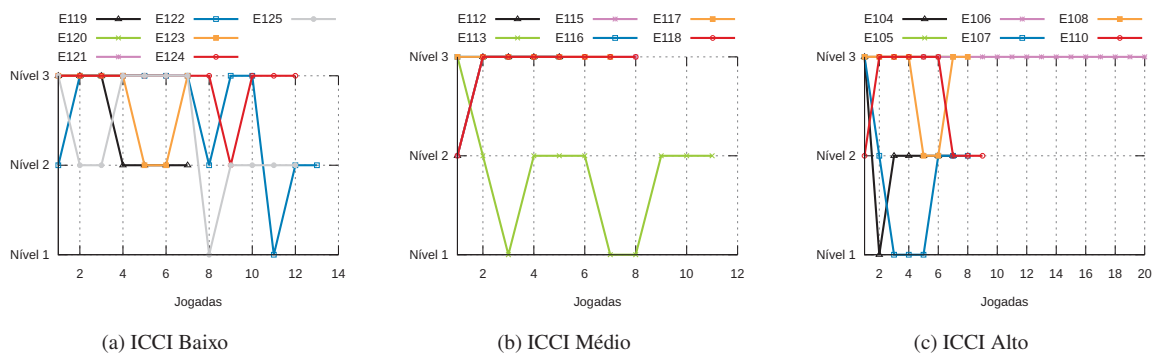


Figura 6.22: Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da segunda rodada da Fase 4

6.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente serão discutidos os resultados obtidos durante a realização do estudo preliminar. Posteriormente, é apresentada uma discussão sobre o experimento realizado com os estudantes.

6.3.1 Estudo Preliminar

O estudo preliminar, desenvolvido visando avaliar as funcionalidades do jogo, validar instruções e *feedbacks*, identificar erros e falhas existentes e validar as funcionalidades da coleta automática de dados, contou com a participação de professores universitários. Foram realizadas observações durante a interação entre os participantes e o jogo tangível em um ambiente controlado.

O método de observação foi escolhido, pois, segundo Mónico et al. (2017), possibilita ao observador identificar problemas, ampliar a compreensão dos conceitos envolvidos e realizar uma análise das relações e aplicações do fato observado.

Por meio da observação, foi possível identificar erros e bugs, os quais exigiram a realização de ajustes no software do jogo e, erros que evidenciaram a necessidade de modificações na estrutura física da plataforma. Ao total foram constatados 9 (nove) alterações realizadas.

As correções foram realizadas gradualmente, após a observação em que foi identificada tal necessidade. Isso permitiu que as alterações fossem validadas na próxima observação, além de permitir que os demais jogadores não se deparassem com o erro, favorecendo sua experiência com o jogo.

6.3.2 Experimento

O experimento foi realizado com estudantes do oitavo e nono ano do ensino fundamental II da rede pública de educação da cidade de Jandaia do Sul/PR. Foram analisados, ao total, os dados de 19 estudantes. Os estudantes participaram de quatro etapas, sendo: pré e pós-teste e, também, duas rodadas com o jogo tangível, cada etapa ocorrida em semanas diferentes.

O pré e o pós-teste foram baseados no protocolo estabelecido por Barzykowski et al. (2021b), utilizando dois testes padronizados: o teste de Flanker e o teste de Stroop. Por meio do pré-teste foi possível dividir os estudantes em três grupos, com tamanho semelhante, baseados nos índices de capacidade do controle inibitório, nomeados de ICCI Baixo, ICCI Médio e ICCI Alto.

Os testes estatísticos indicam que houve diferença estatisticamente significativa nos resultados do pós-teste em comparação com o pré-teste apenas para o teste de Flanker no grupo

ICCI Baixo. Nos demais grupos, não houve diferença estatisticamente significativa nos resultados do pós-teste em comparação com o pré-teste em nenhum dos testes padronizados.

Entretanto, ao comparar individualmente os resultados do pré e pós-teste dos estudantes, é possível observar que houve uma leve melhora no pós-teste para a maioria dos estudantes dos grupos ICCI Baixo e ICCI Médio. O pós-teste revelou que a maioria dos estudantes dos grupos ICCI Baixo e ICCI Médio apresentou menor efeito de interferência no teste de Flanker. Houve também uma redução no efeito de interferência no teste de Stroop para a maioria dos estudantes do grupo ICCI Médio. Quanto menor o efeito de interferência, maior é a capacidade inibitória dos indivíduos (Barzykowski et al., 2021b).

O teste de Flanker avalia a capacidade do indivíduo de ignorar informações que possam distraí-lo, permitindo que ele resista à interferência de estímulos no ambiente externo, enquanto o teste de Stroop avalia a capacidade do indivíduo de ignorar a interferência de resposta, inibindo respostas motoras prepotentes, ditas automáticas ou impulsivas (Rey-Mermet e Gade, 2017; Tiego et al., 2018).

A combinação de interfaces tangíveis de usuário e múltiplas representações externas demonstrou ser benéfica para estudantes com controle inibitório deficitário, pois ajuda a manter o foco e a atenção ao envolver múltiplos sentidos, reduzindo, assim, distrações. As interfaces tangíveis promovem a manipulação direta dos elementos, enquanto as múltiplas representações fornecem diferentes formas de visualizar o conteúdo, facilitando a compreensão. Para estudantes com alta capacidade de controle inibitório, os quais já conseguem gerenciar bem o foco e a atenção, o impacto dessas ferramentas é menos significativo, pois eles já possuem habilidades para lidar com distrações.

Em relação ao estado afetivo dos estudantes, assim como apontado em outros estudos ((Gottardo e Pimentel, 2018; Ascari et al., 2020)), o quadrante com maior número de ocorrências nas respostas dos estudantes foi o QN. Houve, ainda, registros consideráveis de respostas mapeadas nos quadrantes Q1 (construção) e Q2 (dúvidas) nas quatro fases do jogo em ambas as rodadas. Estes dois quadrantes englobam emoções que são desejáveis e podem estar correlacionadas positivamente com o processo de aprendizagem (D'Mello et al., 2007; Ascari et al., 2020). Em geral, os estudantes com menores índices de capacidade de controle inibitório tiveram mais registros de respostas em que foi possível inferir o estado afetivo e mapear o quadrante correspondente.

Os dados relativos à mudança de quadrantes não demonstraram haver, durante as jogadas, a existência de ciclos viciosos, conforme preconiza D'Mello et al. (2007). Assim, foi possível observar que os estudantes, principalmente dos grupos ICCI Baixo e ICCI Médio, apresentaram recorrências no quadrante Q1, além de, em alguns casos, serem levados de um estado negativo (quadrantes Q2 e Q3) para um estado positivo (quadrantes Q1 e Q4). Esses resultados indicam que os estudantes se mantiveram engajados e motivados enquanto jogavam, em ambas as rodadas.

Por meio do modelo de inferência do índice da capacidade de controle inibitório, foi possível realizar ajustes de *level design* após cada jogada dos estudantes. Os dados coletados demonstram que a maioria dos estudantes permaneceu no nível em que começou a fase ou conseguiu ascender a um nível superior. Esses dados indicam que, durante as jogadas, os estudantes tiveram sua capacidade de controle inibitório aprimorada.

6.4 AMEAÇAS À VALIDADE DOS EXPERIMENTOS

Uma possível limitação da pesquisa está relacionada ao tamanho reduzido da amostra (n=19) e a quantidade de estudantes presentes em cada grupo. Tal condição pode significar que, mesmo que haja uma diferença real nos dados, pode ser difícil identificá-la como estatisticamente

significativa devido à variabilidade natural dos dados e à limitada capacidade de generalização para toda a população. Esse fato pode ter dificultado a obtenção de mais diferenças estatísticas. Assim, considera-se necessário a realização de outros experimentos com um número maior de estudantes e abordando outras áreas do conhecimento, visando identificar potencialidades e fragilidades.

Outro ponto a ser observado, foi a realização do experimento. Os estudantes realizaram as atividades na biblioteca da escola, sem a interferência de outras pessoas. Sobretudo, não foi possível garantir que não houvesse ruído externo em momentos de troca de aula e horário de intervalo. Sugere-se que sejam realizados outros experimentos em ambientes que possam garantir a ausência de elementos sonoros externos.

Observa-se como uma ameaça à validade dos experimentos a possibilidade do efeito Hawthorne, que se refere à mudança de atitude dos participantes quando sabem que estão sendo observados. Para mitigar ou minimizar essa ameaça, as observações foram realizadas por meio de câmeras posicionadas fora do campo de visão dos participantes.

Considera-se, ainda, como ameaça à validade do experimento o alto percentual de respostas em que não foi possível inferir o estado afetivo dos estudantes e mapear o quadrante correspondente. Esse fato ocorreu devido aos estudantes posicionarem a mão sobre a boca ou rosto, ou, ainda, pelo posicionamento dos estudantes fora do enquadramento da *webcam*. Durante o experimento, optou-se por não intervir junto aos estudantes sobre esses aspectos para não prejudicar a concentração durante as jogadas. Além disso, considera-se a possibilidade de emoções serem inferidas incorretamente, dado o nível de acurácia do modelo utilizado nesta pesquisa. Dessa forma, recomenda-se a realização de outros experimentos que considerem diferentes métodos para inferir o estado afetivo.

Ressaltamos também, como uma ameaça à validade do experimento, a existência de um único jogo e a abordagem de apenas conceitos de Matemática. Portanto, é necessário realizar experimentos com uma variedade maior de formatos de jogos tangíveis, explorando diferentes objetos que possam oferecer novas perspectivas sobre a capacitação do controle inibitório. Além disso, é importante ampliar o escopo dos estudos para incluir conceitos de diversas áreas do conhecimento, como Ciências e Linguagens, entre outras, a fim de avaliar de forma mais abrangente os efeitos desses jogos sobre o controle inibitório dos estudantes.

6.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os experimentos elaborados nesta pesquisa, utilizando o jogo tangível multirepresentacional denominado Jogo do 15, o qual foi desenvolvido com base na abordagem CaFE-TaMTin. Participaram dos experimentos, professores do campus Jandaia do Sul da Universidade Federal do Paraná e estudantes do oitavo e nono ano do ensino fundamental II de uma escola do município de Jandaia do Sul/PR. O estudo preliminar, realizado com os professores, permitiu avaliar as funcionalidades do jogo, validar as instruções e feedbacks fornecidos, bem como a identificação de erros e falhas existentes, e validar as funcionalidades de coleta automática de dados, além de avaliar a interface tangível e a funcionalidade da plataforma.

O experimento realizado com os estudantes foi dividido em quatro etapas, com intervalo de aproximadamente uma semana entre elas. Primeiro foi realizado o pré-teste, seguido pela primeira rodada do jogo do 15, depois a segunda rodada e, por fim, o pós-teste. Os resultados indicam que a abordagem possibilitou que os estudantes pertencentes aos grupos ICCI Baixo e ICCI Médio tivessem suas capacidades de controle inibitório melhoradas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema executivo é responsável por ações importantes do dia a dia, como refletir antes de agir, resolver problemas imprevistos, pensar sob diferentes perspectivas, evitar distrações, organizar diversas atividades, planejar, manter o foco, entre outras (Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância, 2016). As funções executivas são divididas em três componentes básicos: flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho (Miyake et al., 2000; Miyake e Friedman, 2012; Archambeau e Gevers, 2018). Objeto deste estudo, a inibição permite que a pessoa controle ou adie uma reação instintiva, resista à interferência de distrações que causam perda de foco durante a realização de uma tarefa ou, ainda, possibilita que interrompa um comportamento inadequado (Fitó, 2012).

As funções executivas, do ponto de vista cultural e escolar, são pouco incentivadas. Consequentemente, muitas crianças e adolescentes que se esforçam para melhorar seu desempenho e aproveitamento na aprendizagem em sala de aula possuem essas funções mal desenvolvidas, deficitárias, frágeis ou fracas (Fonseca, 2014). Ferramentas tecnológicas podem ser utilizadas na criação de estratégias de estímulo às funções executivas (Loures et al., 2020). Sobre tudo, é importante que essas ferramentas permitam a manipulação direta de objetos físicos, ofereçam diferentes modalidades de apresentação das informações aos alunos e forneçam diversos suportes instrucionais em diferentes momentos de seu aprendizado.

Desta forma, nesta pesquisa, foi desenvolvida uma abordagem que visa capacitar as funções executivas de estudantes, utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistemas tutores inteligentes, a qual é denominada CaFE-TaMTIn (Capacitação das Funções Executivas, Tangíveis, Multi-representacional e Tutores Inteligentes). Essa abordagem define elementos a serem utilizados nas interfaces gráfica e tangível, bem como a inferência do estado afetivo, a identificação do tipo de erro cometido pelo estudante e a identificação da capacidade do controle inibitório do participante.

Visando validar a abordagem desenvolvida, foi construído um jogo tangível denominado Jogo do 15. Este jogo é composto por quatro fases em que, a cada fase, o jogador é desafiado a resolver problemas matemáticos manipulando a interface tangível. A plataforma foi construída utilizando recursos de baixo custo, como canos de PVC e material impresso em 3D. Foram utilizados também Arduino para a comunicação entre o computador e a plataforma, e duas *webcams*, sendo uma para reconhecimento da posição dos blocos numerados sobre a plataforma e outra para reconhecimento do estado afetivo do estudante.

Para tal, foram desenvolvidos um estudo preliminar e um experimento. O estudo preliminar contou com a participação de cinco professores e duas professoras, visando avaliar as funcionalidades do jogo, validar as instruções e *feedbacks* fornecidos, além de verificar a identificação de erros e falhas existentes, e validar as funcionalidades de coleta automática de dados. Este estudo também objetivou avaliar a interface tangível e a funcionalidade da plataforma. Ele permitiu realizar ajustes no software do jogo, em elementos físicos da plataforma e corrigir *bugs*.

No experimento, foram convidados estudantes da rede pública de educação da cidade de Jandaia do Sul/PR, devidamente matriculados nos oitavo e nono anos do ensino fundamental II, no ano de 2024. No total, 19 estudantes participaram do estudo. Os resultados do experimento indicam que a abordagem pode proporcionar capacitação do controle inibitório dos estudantes, sobretudo daqueles que possuem menor capacidade de controle da inibição.

Observa-se, assim, que os estudantes que possuíam os menores índices de capacidade de controle inibitório (grupos ICCI Baixo e ICCI Médio) tiveram sua capacidade do controle inibitório aprimoradas, favorecendo-os em relação à capacidade de resistir aos estímulos do ambiente externo e ignorar informações que pudessem distraí-los. Baseado nesses resultados, é possível, então, responder à pergunta de pesquisa, indicando que é possível e eficaz combinar sistemas tutores inteligentes, interfaces tangíveis e múltiplas representações externas na capacitação das funções executivas. Além disso, considerando a hipótese estabelecida no Capítulo 1, conclui-se que a combinação de sistemas tutores inteligentes, interfaces tangíveis e múltiplas representações externas pode melhorar a capacidade do controle inibitório dos estudantes com menores índices de capacidade.

A principal contribuição desta pesquisa foi fornecer uma abordagem que possibilite o desenvolvimento de ferramentas de interface tangível multi-representacional dotadas de aspectos de sistemas tutores inteligentes que possam ser utilizadas para a capacitação das funções executivas de crianças em idade escolar, sobretudo para aquelas matriculadas nos oitavos e nonos anos do ensino fundamental II.

O mapeamento sistemático da literatura desenvolvido durante a pesquisa, visando identificar como as múltiplas representações externas têm sido utilizadas na capacitação de funções executivas, lança luz sobre uma área pouco pesquisada atualmente. Além disso, este mapeamento revela lacunas que podem ser exploradas em futuras pesquisas.

Outra contribuição alcançada por esta pesquisa foi o desenvolvimento de um jogo matemático que, por meio de uma interface tangível multi-representacional, possibilita melhorar a capacidade de controle inibitório de estudantes com baixos índices de capacidade. Além disso, os resultados do experimento indicaram um aumento estatisticamente significativo na capacidade de controle inibitório dos estudantes com os menores índices, sugerindo que este jogo pode ser utilizado em ambientes controlados para promover o controle inibitório.

Consideramos, ainda, como contribuição desta pesquisa, o ensino de conceitos matemáticos aos estudantes, abordados durante o experimento. Entre os conceitos trabalhados, destacam-se as operações de adição e subtração, a análise combinatória e as propriedades dos números pares e ímpares, entre outros.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo considerou apenas um componente das funções executivas, o controle inibitório. Desta forma, uma das recomendações para trabalhos futuros é o desenvolvimento de um modelo de inferência da capacidade de flexibilidade cognitiva e da memória de trabalho, que possa ser integrado ao modelo aqui apresentado, a fim de verificar a possibilidade de capacitação dos três componentes das funções executivas.

Outra recomendação para estudos futuros é a possibilidade de uso de recursos auditivos nas interações com o usuário. A utilização desses recursos nos *feedbacks* fornecidos aos estudantes após cada resposta pode proporcionar uma experiência mais dinâmica, auxiliando no engajamento dos estudantes. Além disso, recursos auditivos podem ser utilizados para fornecer instruções antes do início de cada fase do jogo, visando facilitar a compreensão das atividades.

Sugere-se, ainda, o desenvolvimento de pesquisas que envolvam a avaliação da usabilidade e experiência do usuário sobre o Jogo do 15, visando avaliar estes elementos sobre a capacidade do controle inibitório dos estudantes.

Sugere-se, ainda, o desenvolvimento de pesquisas que avaliem a usabilidade e a experiência do usuário no Jogo do 15, com o objetivo de examinar como esses fatores influenciam a capacidade de controle inibitório dos estudantes. Investigar esses aspectos permitirá compre-

ender melhor o potencial pedagógico do jogo e de sua aplicabilidade em diferentes contextos educacionais.

7.2 PUBLICAÇÕES

Nesta seção, são apresentados as referências para os três artigos publicados durante o desenvolvimento deste estudo.

- Artigos publicados:

- SANTIAGO JUNIOR, Robertino M.; DE OLIVEIRA, Leonam C.; PIMENTEL, Andrey R. Multiple external representations for executive functions: a systematic mapping study. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO (SBIE), 33, 2022, Manaus. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2022. p. 634-647. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbie.2022.224711>;
- SANTIAGO JUNIOR, Robertino Mendes; PIMENTEL, Andrey Ricardo. CaFE-TaMTIn: uma abordagem para o desenvolvimento e capacitação de funções executivas utilizando um sistema de interface tangível multi-representacional com aspectos de sistema tutor inteligente. In: WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO: GRADUATE STUDENTS EXPERIENCE (STUDX) - CONGRESSO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO (CBIE), 11, 2022, Manaus. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2022. p. 168-173. DOI: https://doi.org/10.5753/cbie_estendido.2022.227182;
- SANTIAGO JUNIOR, R. M.; PIMENTEL, A. R. Inhibitory Control Capacity Tracking Model for Educational Tangible User Interfaces. In: EDULEARN24 Proceedings, 16, 2024, Palma, Espanha. Anais [...]. Palma: IATED, 2024, p.4929-4936. DOI: <https://doi.org/10.21125/edulearn.2024.1210>.

REFERÊNCIAS

- Aguirre-Loaiza, H., Arias, I., Bonilla, S., Ramírez, R., Ramírez-Herrera, S., Nanez, J., Barbosa-Granados, S. e Arenas-Granada, J. (2022). Effect of acute physical exercise on inhibitory control in young adults: High-intensity indoor cycling session. *Physiology & Behavior*, 254:113902_1–113902_8.
- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2):131–152.
- Ainsworth, S. (2006). Deft: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3):183–198.
- Alepis, E. e Virvou, M. (2011). Automatic generation of emotions in tutoring agents for affective e-learning in medical education. *Expert Systems with Applications*, 38(8):9840–9847.
- Alves, A. G., Chaves, J. E. e Cordeiro, A. M. (2020). Interface tangível com material dourado em jogo digital de aprendizagem de matemática. Em *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2020)*. Sociedade Brasileira de Computação.
- Ampatzoglou, A., Bibi, S., Avgeriou, P., Verbeek, M. e Chatzigeorgiou, A. (2019). Identifying, categorizing and mitigating threats to validity in software engineering secondary studies. *Information and Software Technology*, 106:201–230.
- Antle, A. N. e Wise, A. F. (2013). Getting down to details: Using theories of cognition and learning to inform tangible user interface design. *Interacting with Computers*, 25(1):1–20.
- Archambeau, K. e Gevers, W. (2018). (how) are executive functions actually related to arithmetic abilities? Em Henik, A. e Fias, W., editores, *Heterogeneity of Function in Numerical Cognition*, capítulo: 16, páginas 337–357. Academic Press.
- Arfé, B., Vardanega, T. e Ronconi, L. (2020). The effects of coding on children’s planning and inhibition skills. *Computers & Education*, 148:103807_1–103807_16.
- Ascari, S., Gottardo, E. e Pimentel, A. (2020). Mafint: Modelo afetivo de intervenção tutorial para ambientes virtuais de aprendizagem. Em *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*, páginas 832–841, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Baddeley, A. (2010). Working memory. *Current Biology*, 20(4):R136–R140.
- Bailey, R., Barnes, S. P., Park, C., Sokolovic, N. e Jones, S. M. (2018). Executive function mapping project measures compendium: A resource for selecting measures related to executive function and other regulation-related skills in early childhood. Project Report 2018-59, Harvard University, Cambridge.
- Barzykowski, K., Hajdas, S., Radel, R., Niedźwieńska, A. e Kvavilashvili, L. (2021a). The role of inhibitory control and adhd symptoms in the occurrence of involuntary thoughts about the past and future: An individual differences study. *Consciousness and Cognition*, 95:103208.

- Barzykowski, K., Wereszczyński, M., Hajdas, S. e Radel, R. (2021b). An inquisit-web protocol for calculating composite inhibitory control capacity score: An individual differences approach. *MethodsX*, 8:101530.
- Basili, V. R. e Rombach, H. D. (1988). The tame project: Towards improvement-oriented software environments. *IEEE Transactions on software engineering*, 14(6):758–773.
- Begolli, K. N., Richland, L. E., Jaeggi, S. M., Lyons, E. M., Klostermann, E. C. e Matlen, B. J. (2018). Executive function in learning mathematics by comparison: incorporating everyday classrooms into the science of learning. *Thinking & Reasoning*, 24(2):280–313.
- Ben Ammar, M., Neji, M., Alimi, A. M. e Gouardères, G. (2010). The affective tutoring system. *Expert Systems with Applications*, 37(4):3013–3023.
- Bezerra Neto, R. N. e de Lima, R. W. (2016). Sistemas computacionais de tutoria inteligente: Uma revisão sistemática da literatura. Em Nunes, I. D. e Maia, D. L., editores, *Anais do Congresso Regional sobre Tecnologias na Educação*, páginas 277–286, Natal. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Blanchard, J., Gardner-McCune, C. e Anthony, L. (2020). Dual-modality instruction and learning: A case study in cs1. Em *Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, SIGCSE '20, páginas 818—824, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Bodemer, D. e Faust, U. (2006). External and mental referencing of multiple representations. *Computers in Human Behavior*, 22(1):27–42. Instructional Design for Effective and Enjoyable Computer-Supported Learning.
- Bolduc, J., Gosselin, N., Chevette, T. e Peretz, I. (2020). The impact of music training on inhibition control, phonological processing, and motor skills in kindergarteners: a randomized control trial. *Early Child Development and Care*, 191(12):1886–1895.
- Bosch, N., Chen, Y. e D'Mello, S. (2014). It's written on your face: Detecting affective states from facial expressions while learning computer programming. Em *Intelligent Tutoring Systems*, páginas 39–44. Springer International Publishing.
- Bradley, M. M. e Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1):49–59.
- Brocki, K. C. e Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: A dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology*, 26(2):571–593.
- Browne, R. A. V., Costa, E. C., Sales, M. M., Fonteles, A. I., Moraes, J. F. V. N. d. e Barros, J. d. F. (2016). Efeito agudo do exercício aeróbio vigoroso sobre o controle inibitório em adolescentes. *Revista Paulista de Pediatria*, 34(2):154–161.
- Carbonneau, K. J., Marley, S. C. e Selig, J. P. (2013). A meta-analysis of the efficacy of teaching mathematics with concrete manipulatives. *Journal of Educational Psychology*, 105(2):380–400.
- Carlson, R. A., Khoo, B. H., Yaure, R. G. e Schneider, W. (1990). Acquisition of a problem-solving skill: Levels of organization and use of working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 119(2):193–214.

- Carlson, S. M. e Moses, L. J. (2001). Individual differences in inhibitory control and children's theory of mind. *Child Development*, 72(4):1032–1053.
- Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância (2016). *Funções executivas e desenvolvimento infantil: habilidades necessárias para a autonomia: estudo III*. Série Estudos do Comitê Científico - NCPI. Fundação Maria Cecília Souto Vidigal - FMCSV, São Paulo, first edition. Redação Joana Simões de Melo Costa... [et al.].
- Cook, M. P. (2006). Visual representations in science education: The influence of prior knowledge and cognitive load theory on instructional design principles. *Science Education*, 90(6):1073–1091.
- Corso, H. V., Sperb, T. M., de Jou, G. I. e Salles, J. F. (2013). Metacognição e funções executivas: relações entre os conceitos e implicações para a aprendizagem. *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, 29(1):21–29.
- Coste, C., Agar, N., Petitfour, E., Quinette, P., Guillery-Girard, B., Azouvi, P. e Piolino, P. (2011). Exploring the roles of the executive and short-term feature-binding functions in retrieval of retrograde autobiographical memories in severe traumatic brain injury. *Cortex*, 47(7):771–786.
- Cox, R. e Brna, P. (1995). Supporting the use of external representations in problem solving: The need for flexible learning environments. *Journal of Artificial intelligence in Education*, 6:239–302.
- Crepaldi, M., Colombo, V., Mottura, S., Baldassini, D., Sacco, M., Cancer, A. e Antonietti, A. (2020). Antonyms: A computer game to improve inhibitory control of impulsivity in children with attention deficit/hyperactivity disorder (adhd). *Information*, 11(4):230.
- Cristiano, L. B. (2018). O controle inibitório em crianças e adolescentes bilíngues do município de Curitiba- pr. Dissertação, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati.
- da Silva, S. B. e Meucci, R. D. (2017). Brincando com matemática: uma alternativa educacional tangível e acessível ao ensino básico. *Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística*, 6(4):14–21.
- Dalmon, D., Isotani, S. e Brandão, L. (2010). Melhorando a geometria interativa com o uso de tutores rastreadores de padrões: igeom e ctat. *Anais do Workshop de Informática na Escola*, 1(1):1413–1416.
- Davis, R. L., Orta Martinez, M., Schneider, O., MacLean, K. E., Okamura, A. M. e Blikstein, P. (2017). The haptic bridge: Towards a theory for haptic-supported learning. Em *Proceedings of the 2017 Conference on Interaction Design and Children*, IDC '17, páginas 51–60, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- de Santana, A. N., Roazzi, A. e Melo, M. R. A. (2020). Os três componentes executivos básicos e o desempenho matemático escolar. *Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos*, 101(259).
- de Vries, E. (2012). Learning with external representations. Em Seel, N. M., editor, *Encyclopedia of the Sciences of Learning*, páginas 2016–2019. Springer, Boston.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1):135–168.

- Dresch, A., Lacerda, D. P. e Antunes Júnior, J. A. V. (2015). *Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia*. Métodos de Pesquisa. Bookman Editora, Porto Alegre.
- D'Mello, S., Picard, R. W. e Graesser, A. (2007). Toward an affect-sensitive autotutor. *IEEE Intelligent Systems*, 22(4):53–61.
- Eriksen, B. A. e Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1):143–149.
- Ertl, B., Kopp, B. e Mandl, H. (2008). Supporting learning using external representations. *Computers & Education*, 51(4):1599–1608.
- Falcão, T. e Gomes, A. (2007). Interfaces tangíveis para a educação. *Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE)*, 1(1):579–589.
- Fan, M., Antle, A. N. e Cramer, E. S. (2016). Design rationale: Opportunities and recommendations for tangible reading systems for children. Em *Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children, IDC '16*, páginas 101–112, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Fiori, C. e Zuccheri, L. (2005). An experimental research on error patterns in written subtraction. *Educational Studies in Mathematics*, 60(3):323–331.
- Fischetti, E. e Gisolfi, A. (1990). From computer-aided instruction to intelligent tutoring systems. *Educational Technology*, 30(8):7–17.
- Fitó, A. S. (2012). *Por que é Tão Difícil Aprender?: o Que São e Como Lidar Com os Transtornos de Aprendizagem*. Coleção psicologia, família e escola. Paulinas, São Paulo.
- Follmer, D. J. e Sperling, R. A. (2020). The roles of executive functions in learning from multiple representations and perspectives. Em Meter, P. V., List, A., Lombardi, D. e Kendeou, P., editores, *Handbook of Learning from Multiple Representations and Perspectives*, capítulo: 18, páginas 297–313. Routledge, New York.
- Fonseca, V. d. (2014). Papel das funções cognitivas, conativas e executivas na aprendizagem: uma abordagem neuropsicopedagógica. *Revista Psicopedagogia*, 31:236–253.
- Galarza, C. R., Acosta-Rodas, P., Ortiz-Granja, D., Lepe-Martínez, N., Del Valle, M., Ramos, V. e Bolaños-Pasquel, M. (2020). The role of inhibitory control in the ability to solve problems of university students. *Revista Ecuatoriana de Neurologia*, 29(1):47–52.
- Giordani, P., Cipriani, E., Fabiano, S., Moroni, C., Ravazzani, S., Di Renzo, M. R. e Mormino, S. (2012). Multimedia educational pills (meps) for corporate training: Methodology and cases. Em *2012 IEEE 12th International Conference on Advanced Learning Technologies*, páginas 427–429.
- Giraffa, L. e Khols-Santos, P. (2023). Inteligência artificial e educação: conceitos, aplicações e implicações no fazer docente. *Educação em Análise*, 8(1):116–134.
- González-González, C. S., Guzmán-Franco, M. D. e Infante-Moro, A. (2019). Tangible technologies for childhood education: A systematic review. *Sustainability*, 11(10).

- Gottardo, E. (2018). *Inferência de estados afetivos em ambientes educacionais : proposta de um modelo híbrido baseado em informações cognitivas e físicas*. Tese, Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Informática, Curitiba.
- Gottardo, E. e Pimentel, A. (2018). Reconhecimento e adaptação à dinâmica de estados afetivos relacionados à aprendizagem. *Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE)*, 29(1):1223.
- Hansen, J. e Richland, L. E. (2020). Teaching and learning science through multiple representations: Intuitions and executive functions. *CBE—Life Sciences Education*, 19(4):1–15. PMID: 33259277.
- Henry, L. A. e Bettenay, C. (2010). The assessment of executive functioning in children. *Child and Adolescent Mental Health*, 15(2):110–119.
- Herbert, S. (2008). Where is the rate in the rule? *Australian Senior Mathematics Journal*, 22(2):28—36.
- Homer, B. D., Ober, T. M., Rose, M. C., MacNamara, A., Mayer, R. E. e Plass, J. L. (2019). Speed versus accuracy: Implications of adolescents’ neurocognitive developments in a digital game to train executive functions. *Mind, Brain, and Education*, 13(1):41–52.
- Hsu, Y.-S. e Wu, H.-K. (2015). Development and evaluation of technology-infused learning environments in taiwan. Em *Science Education Research and Practices in Taiwan*, páginas 211–232. Springer Singapore.
- Huff, M., Bauhoff, V. e Schwan, S. (2010). A closer look at the split attention effect: Integrated presentation formats for troubleshooting tasks. Em *Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences - Volume 1, ICLS '10*, páginas 174–181. International Society of the Learning Sciences.
- Husted, S., Ramirez-Corona, N., Lopez-Malo, A. e Palou, E. (2014). A creative experience for chemical, food, and environmental engineering students in a material balances course. Em *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, páginas 24.40.1–20.40.14, Indianapolis, IN, United states.
- Iepsen, E., Bercht, M. e Reategui, E. (2012). Detecção e tratamento do estado afetivo frustração do aluno na disciplina de algoritmos. *Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE)*, 1(1).
- Ishii, H. (2008). Tangible bits: Beyond pixels. Em *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '08, página xv–xxv, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Ishii, H. e Ullmer, B. (1997). Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. Em *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, páginas 234–241, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Jesus, A. D. (2009). Sistemas tutores inteligentes uma visão geral. *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação*, 2(2).

- Jiménez, S., Juárez-Ramírez, R., Castillo, V. H. e Armenta, J. J. T. (2018). *Affective Feedback in Intelligent Tutoring Systems*. Springer International Publishing, Cham.
- Ke, F. e Clark, K. M. (2020). Game-based multimodal representations and mathematical problem solving. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 18(1):103–122.
- Kitchenham, B. A. e Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Relatório Técnico 2.3, Software Engineering Group, EBSE Technical Report, Keele University and Department of Computer Science University of Durham, Keele and Durham.
- Klein, D. R., Canevesi, F. C. S., Feix, A. R., Gresele, J. F. P. e de Siqueira Wilhelm, E. M. (2020). Tecnologia na educação: evolução histórica e aplicação nos diferentes níveis de ensino. *Educere - Revista da Educação da UNIPAR*, 20(2).
- Knapp, K. e Morton, J. B. (2017). Executive functioning: A developmental cognitive neuroscience perspective. Em Hoskyn, M. J., Iarocci, G. e Young, A. R., editores, *Executive Functions in Children's Everyday Lives: A Handbook for Professionals in Applied Psychology*, capítulo: 2, páginas 9–20. Oxford University Press, New York.
- Krause, K., Hounsell, M. e Gasparini, I. (2020). Um modelo para inter-relação entre funções executivas e elementos de jogos digitais. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 28(0):596–625.
- Krause, K. K. G. (2020). *Jogos Digitais e Funções Executivas: funções executivas*. Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências, Matemática e Tecnologia, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville, 2 edition. Produto Educacional.
- Laburú, C. E. e Faria, R. (2018). Coordenação e multiplicidade representacional em uma atividade de função do 1º grau. *Revista Paranaense de Educação Matemática*, 7(13):61–86.
- Leite, M., Pimentel, A. e Pietruchinski, M. (2012). Remediação de erros baseada em múltiplas representações externas e classificação de erros aplicada a objetos de aprendizagem inteligentes. *Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE)*, 23(1).
- Lima, R. F. d., Travaini, P. P. e Ciasca, S. M. (2009). Amostra de desempenho de estudantes do ensino fundamental em testes de atenção e funções executivas. *Revista Psicopedagogia*, 26(80):188–199.
- Loures, D. A. M., Brandão, P. M. F., da Silva Vieira, A. M. e Silva, M. A. (2020). Funções executivas e as novas tecnologias digitais: Parceria de sucesso em prol da aprendizagem. *Humanidades & Inovação*, 7(5):264–271.
- Machado, G. M., Bonnin, G., Castagnos, S., Hoareau, L., Thomas, A. e Tazouti, Y. (2020). *An Approach to Model Children's Inhibition During Early Literacy and Numeracy Acquisition*, página 203–207. Springer International Publishing.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2):163–203.
- Maraver, M. J., Bajo, M. T. e Gomez-Ariza, C. J. (2016). Training on working memory and inhibitory control in young adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10:588_1–588_18.

- Marczal, D., Direne, A., Pimentel, A. R., Maschio, E. e Borille, A. C. (2016). Metodologia e software educacional para a investigação e remediação de erros conceituais em matemática. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 24(02):77.
- Marley, S. C. e Carbonneau, K. J. (2015). How psychological research with instructional manipulatives can inform classroom learning. *Scholarship of Teaching and Learning in Psychology*, 1(4):412–424.
- Marshall, P. (2007). Do tangible interfaces enhance learning? Em *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, página 163–170, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- McCloskey, G. e Perkins, L. A. (2012). *Essentials of Executive Functions Assessment*. Essentials of Psychological Assessment. Wiley.
- McDaniel, B., DMello, S., King, B., Chipman, P., Tapp, K. e Graesser, A. (2007). Facial features for affective state detection in learning environments. Em *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, volume 29, páginas 467–472.
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, páginas 276–282.
- Miyake, A. e Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1):8–14. PMID: 22773897.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. e Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1):49–100.
- Mohanani, R., Stringfellow, C. e Gupta, D. (2017). An emotionally intelligent tutoring system. Em *2017 Computing Conference*, páginas 1099–1107, London. IEEE.
- Mollahosseini, A., Hasani, B. e Mahoor, M. H. (2019). Affectnet: A database for facial expression, valence, and arousal computing in the wild. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 10(1):18–31.
- Moreno, S. e Farzan, F. (2015). Music training and inhibitory control: a multidimensional model. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337(1):147–152.
- Mourão Junior, C. A. e Melo, L. B. R. (2011). Integração de três conceitos: função executiva, memória de trabalho e aprendizado. *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, 27(3):309–314.
- Mónico, L., Alferes, V. R., Castro, P. A. D. e Parreira, P. (2017). A observação participante enquanto metodologia de investigação qualitativa. Em Costa, A. P., Tuzzo, S. e Brandão, C., editores, *Atas do 6º Congresso Ibero-Americano em Investigação Qualitativa*, volume 3, páginas 724–733, Salamanca. Ludomedia.
- Neuwirth, C. M. e Kaufer, D. S. (1989). The role of external representation in the writing process: Implications for the design of hypertext-based writing tools. Em *Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Hypertext*, HYPERTEXT '89, página 319–341, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

- Novak, J. (2017). *Desenvolvimento de games*. Cengage Learning, São Paulo, second edition.
- Nunes, A. L. P., Radicchi, A. O. e Botega, L. C. (2011). Interfaces tangíveis: Conceitos, arquiteturas, ferramentas e aplicações. Em Ribeiro, M. W. S. e Zorzal, E. R., editores, *Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências*, capítulo: 2, páginas 26–44. Editora SBC – Sociedade Brasileira de Computação, Uberlândia.
- Nwana, H. S. (1990). Intelligent tutoring systems: an overview. *Artificial Intelligence Review*, 4(4).
- Ochs, M. e Frasson, C. (2004). Emotionally intelligent tutoring systems (eits). Em *Proceedings of the Seventeenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS 2004)*, página 5, California. The AAAI Press.
- Paas, F. G. W. C. e Van Merriënboer, J. J. G. (1994). Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks. *Educ. Psychol. Rev.*, 6(4):351–371.
- Palmer, S. E. (1978). Fundamental aspects of cognitive representation. Em Rosch, E. e Lloyd, B., editores, *Cognition and Categorization*, capítulo: 9, páginas 259–303. Lawrence Elbaum Associates, Hillsdale.
- Pande, P. e Chandrasekharan, S. (2014). Integration of multiple external representations in chemistry: A requirements gathering study. Em *Proceedings of the 22nd International Conference on Computers in Education*, páginas 732–737, Nara, Japan.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. e Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3):45–77.
- Peng, Y., Lu, Y. e Qin, J. (2021). The relationship between inhibitory control and working memory and its underlying neural mechanism. Em *Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Mental Health and Humanities Education (ICMHHE 2021)*, icmhhe-21. Atlantis Press.
- Pimentel, M. (2018). Um pesquisador em computação em busca de um modo de fazer pensar pesquisas em informática na educação. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 26(01):51–69.
- Pimentel, M., Filippo, D. e Santoro, F. M. (2020). Design science research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação. Em JQUES, P. A., PIMENTEL, M., Sean, S. e BITTENCOURT, I., editores, *Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação: Concepção da Pesquisa*, volume 1 de *Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação*, capítulo: 5, páginas 1–29. SBC, Porto Alegre.
- Pires, E. U. (2014). *Desenvolvimento de um instrumento computadorizado para avaliar habilidades executivas em crianças. o jogo das cartas mágicas*. Tese (doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Plass, J. L., Chun, D. M., Mayer, R. E. e Leutner, D. (2003). Cognitive load in reading a foreign language text with multimedia aids and the influence of verbal and spatial abilities. *Computers in Human Behavior*, 19(2):221–243.

- Prain, V. e Waldrip, B. (2006). An exploratory study of teachers' and students' use of multi-modal representations of concepts in primary science. *International Journal of Science Education*, 28(15):1843–1866.
- Price, S., Sheridan, J. G., Falcao, T. P. e Roussos, G. (2008). Towards a framework for investigating tangible environments for learning. *International Journal of Arts and Technology*, 1(3/4):351–368.
- Radicchi, A., Nunes, A. e Botega, L. (2010). Proposta de desenvolvimento de interface tangível para aplicações de gerenciamento de emergências. *Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada (SVR)*.
- Rau, M. A. (2016). Pattern mining uncovers social prompts of conceptual learning with physical and virtual representations. Em Barnes, T., Chi, M. e Feng, M., editores, *Proceedings of the 9th International Conference on Educational Data Mining, EDM 2016*, páginas 478–483. International Educational Data Mining Society (IEDMS).
- Rau, M. A., Aleven, V. e Rummel, N. (2013). How to use multiple graphical representations to support conceptual learning? research-based principles in the fractions tutor. Em Lane, H. C., Yacef, K., Mostow, J. e Pavlik, P., editores, *Artificial Intelligence in Education*, páginas 762–765. Springer Berlin Heidelberg.
- Rau, M. A., Zahn, M., Misback, E. e Burstyn, J. (2019). Adaptive support for representation skills in a chemistry ITS is more effective than static support. Em Isotani, S., Millán, E., Ogan, A., Hastings, P., McLaren, B. e Luckin, R., editores, *Artificial Intelligence in Education*, páginas 432–444, Cham. Springer International Publishing.
- Reis, H., Maillard, P. J. e Isotani, S. (2018). Sistemas tutores inteligentes que detectam as emoções dos estudantes: um mapeamento sistemático. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 26(03):76–107.
- Rey-Mermet, A. e Gade, M. (2017). Inhibition in aging: What is preserved? what declines? a meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(5):1695–1716.
- Ribeiro, I. B., Assunção, P. B. d., Bernardo, L. D. e Raymundo, T. M. (2020). Treino de funções executivas com idosos sem déficit cognitivo: uma intervenção da terapia ocupacional. *Revista Kairós: Gerontologia*, 23(1):143–160.
- Rivero, T. S. (2016). *A construção de um método para o desenvolvimento de um videogame para treino de controle inibitório para adolescentes com Transtorno do Déficit de Atenção e Hiperatividade*. Tese (doutorado), Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.
- Robinson, D. H. (2002). Spatial text adjuncts and learning: An introduction to the special issue. *Educational Psychology Review*, 14(1):1–3.
- Rodić, L. D. e Granić, A. (2021). Tangible interfaces in early years' education: a systematic review. *Personal and Ubiquitous Computing*.
- Scarlatos, L. L. (2002). Ticle: using multimedia multimodal guidance to enhance learning. *Information Sciences*, 140(1):85–103. Interactive virtual environments and distance education.
- Scarlatos, L. L. (2006). Tangible math. *Interactive Technology and Smart Education*, 3(4):293–309.

- Scarlato, L. L., Landy, S. S., Breban, J., Horowitz, R. e Sandberg, C. (2002). Tr-2002004: On the effectiveness of tangible interfaces in collaborative learning environments. Relatório técnico, City University of New York, New York.
- Schank, P. e Hamel, L. (2004). Collaborative modeling: Hiding uml and promoting data examples in nemo. Em *Proceedings of the 2004 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW '04*, páginas 574–577, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Schneider, B., Jermann, P., Zufferey, G. e Dillenbourg, P. (2011). Benefits of a tangible interface for collaborative learning and interaction. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(3):222–232.
- Schwonke, R., Berthold, K. e Renkl, A. (2009). How multiple external representations are used and how they can be made more useful. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9):1227–1243.
- Schwonke, R., Ertelt, A. e Renkl, A. (2008). Fostering the translation between external representations: Does it enhance learning with an intelligent tutoring program? Em Zumbach, J., Schwartz, N., Seufert, T. e Kester, L., editores, *Beyond Knowledge: The Legacy of Competence*, páginas 117–119, Dordrecht. Springer Netherlands.
- Sharlin, E., Watson, B., Kitamura, Y., Kishino, F. e Itoh, Y. (2004). On tangible user interfaces, humans and spatiality. *Personal Ubiquitous Comput.*, 8(5):338–346.
- Somma, F., Rega, A. e Mennitto, A. (2019). Software-assisted learning in children with attention deficit hyperactivity disorder: A review. Em *EDULEARN19 Proceedings*, 11th International Conference on Education and New Learning Technologies, páginas 3004–3009. IATED.
- Souza, T. R., Campos, P. F., Almeida, M., Faria, V. M., Chaves, B. S., Faria, W. M., Neves, C. M. e Valentim-Silva, J. R. (2019). Exercício progressivo de curtíssima duração possui potente efeito sobre a memória de trabalho, controle inibitório e motricidade fina de adultos jovens sedentários. *Motricidade*, 15(S3):154–163.
- Stoet, G. (2010). Psytoolkit: A software package for programming psychological experiments using linux. *Behavior Research Methods*, 42(4):1096–1104.
- Stoet, G. (2017). Psytoolkit: A novel web-based method for running online questionnaires and reaction-time experiments. *Teaching of Psychology*, 44(1):24–31.
- Stottler, D. e Domeshek, E. (2005). Intelligent tutoring systems (itss): advanced learning technology for enhancing warfighter performance. Em *Proceedings of Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (IITSEC)*, páginas 1–7.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6):643–662.
- Suppalarkbunlue, W., Chutabhakdikul, N., Lertladaluck, K. e Moriguchi, Y. (2022). Promoting inhibitory control in preschool children through music-movement activities in the classroom. *Journal of Research in Childhood Education*, 37(2):275–291.
- Tiego, J., Testa, R., Bellgrove, M. A., Pantelis, C. e Whittle, S. (2018). A hierarchical model of inhibitory control. *Frontiers in Psychology*, 9.

- Toisoul, A., Kossaifi, J., Bulat, A., Tzimiropoulos, G. e Pantic, M. (2021). Estimation of continuous valence and arousal levels from faces in naturalistic conditions. *Nature Machine Intelligence*, 3(1):42–50.
- Tomlinson, B. J., Walker, B. N. e Moore, E. B. (2020). Auditory display in interactive science simulations: Description and sonification support interaction and enhance opportunities for learning. Em *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, páginas 1–12, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Tracey, D. e Morrow, L. (2017). *Lenses on Reading, Third Edition: An Introduction to Theories and Models*. Guilford Publications.
- Vainio, T., Hakkarainen, K. e Levonen, J. (2005). Visualizing complex medical phenomena for medical students. Em *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '05, página 1857–1860, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Van Dooren, W. e Inglis, M. (2015). Inhibitory control in mathematical thinking, learning and problem solving: a survey. *ZDM*, 47(5):713–721.
- Vieira, C., Magana, A. J., Falk, M. L. e Garcia, R. E. (2017). Writing in-code comments to self-explain in computational science and engineering education. *ACM Trans. Comput. Educ.*, 17(4).
- Wijaya, A., van den Heuvel-Panhuizen, M., Doorman, M. e Robitzsch, A. (2014). Difficulties in solving context-based pisa mathematics tasks: An analysis of students' errors. *The Mathematics Enthusiast*, 11(3):555–584.
- Woolf, B. P. (2010). *Student Modeling*, página 267–279. Springer Berlin Heidelberg.
- Wu, H. e Puntambekar, S. (2012). Pedagogical affordances of multiple external representations in scientific processes. *Journal of Science Education and Technology*, 21(6):754–767.
- Wu, H.-K., Lin, Y.-F. e Hsu, Y.-S. (2012). Effects of representation sequences and spatial ability on students' scientific understandings about the mechanism of breathing. *Instructional Science*, 41(3):555–573.
- Xu, D. (2005). Tangible user interface for children - an overview. Em *in Proceedings of the SIXTH Conference in the Department of Computing*, páginas 579–584.
- Young, A. R., Gurm, M. K. e O'Donnell, K. A. (2017). Assessing executive functions in young children. Em Hoskyn, M. J., Iarocci, G. e Young, A. R., editores, *Executive Functions in Children's Everyday Lives: A Handbook for Professionals in Applied Psychology*, capítulo: 3, páginas 21–37. Oxford University Press, New York.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21(2):179–217.
- Zhang, J. (2000). External representations in complex information processing tasks. Em Kent, A., editor, *Encyclopedia of library and information science*, volume 68, páginas 164–180. Marcel Dekker, Inc.
- Zhang, J. e Norman, D. A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18(1):87–122.

Zuckerman, O., Arida, S. e Resnick, M. (2005). *Extending Tangible Interfaces for Education: Digital Montessori-Inspired Manipulatives*, página 859–868. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA.

APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DOS BLOCOS NUMERADOS IMPRESSOS EM 3D

```

width = 28;
height = 28;
depth = 25;
font = "Open Sans Extrabold";
fontSize = width/2;

for(x=[0:1:4]) {
    translate([x*40,0,0]) {
        NumberBlock(str(x+1));
    }
}

for(x=[0:1:3]) {
    translate([x*40,70,0]) {
        NumberBlock(str(x+6));
    }
}

module NumberBlock(number) {
    difference() {
        translate([0, 0, 0]) {
            cube([width, height, depth]);
        }
        translate([5,5,5]) {
            cube([18,18,depth+1]);
        }
        translate([-1,25,20]) {
            cube([40,7,6]);
        }
        translate([-1,-4,20]) {
            cube([40,7,6]);
        }
        translate([-4,-1,20]) {
            cube([7,40,6]);
        }
        translate([25,-1,20]) {
            cube([7,40,6]);
        }
    }

    translate([width-fontSize,height-fontSize,3]) {
        rotate(a=[0,180,0]) {
            linear_extrude(height) {
                text(
                    number,
                    size=width/2,
                    font = font,
                    halign = "center",
                    valign="center",
                    $fn = 64
                );
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    if (number == "6") {
        translate([width-fontSize,4,3]) {
            rotate(a=[0,180,0]) {
                linear_extrude(height) {
                    text(
                        "_",
                        size=width/2,
                        font = font,
                        halign = "center",
                        valign="bottom",
                        $fn = 64
                    );
                }
            }
        }
    }

    }
    if (number == "9") {
        translate([width-fontSize,4,-25]) {
            linear_extrude(height) {
                text(
                    "_",
                    size=width/2,
                    font = font,
                    halign = "center",
                    valign="bottom",
                    $fn = 64
                );
            }
        }
    }

    }

    }
    difference() {
        translate([0,30,0]) {
            cube([width,height,10]);
        }
        translate([3,33,5]) {
            cube([22,22,depth+1]);
        }
    }
}

```

APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DA PARTE INFERIOR DA PLATAFORMA IMPRESSA EM 3D

```

columns = 4;
lines = 3;
span = 10;
width = 30;
height = 30;
depth = 30;
size = 10;

platformX = columns*width+columns*span+span;
platformY = lines*height+lines*span+span;

platform();

translate(v=[0,platformY+5,0]) {
    platform();
}

translate(v=[platformX+20,20,0]) {
    blockCenter();
}

module blockCenter() {
    translate(v=[span/2, span/4, depth*0.25]){
        rotate(a=[90,90,0]) {
            cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
        }
    }
    translate(v=[span+width+span, span/2, depth*0.25]){
        rotate(a=[0,90,0]) {
            cylinder(h=(size/3), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
        }
    }
    translate(v=[span+width+span/2, span+height+span*1.4, depth*0.25]){
        rotate(a=[90,90,0]) {
            cylinder(h=(size/2), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
        }
    }
    translate(v=[-span/3, span+height+span/2, depth*0.25]){
        rotate(a=[0,90,0]) {
            cylinder(h=(size/2), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
        }
    }
}

difference() {
    color([1,1,1])
    cube([span*2+width, span*2+height, size*1.5]);
    difference() {
        translate(v=[span,span, (size/2)]) {
            color("Green")
            cube([width,height,depth]);
        }
    }
}

```

```

difference() {
  translate(v=[span+(width/2)-2.51, span+(height/2)-2.51, 2]) {
    cube([5.2, 5.2, size]);
  }
}
difference() {
  translate(v=[span+width+span/2, span/1.6, depth*0.25]){
    rotate(a=[90,90,0]) {
      cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }
}
difference() {
  translate(v=[span+width+span/2, span+height+span/2, depth*0.25]){
    rotate(a=[0,90,0]) {
      cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }
}
difference() {
  translate(v=[span/2, span+height+span+1, depth*0.25]){
    rotate(a=[90,90,0]) {
      cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }
}
difference() {
  translate(v=[-span/3, span/2, depth*0.25]){
    rotate(a=[0,90,0]) {
      cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }
}
}

module platform() {
  translate(v=[platformX-1, span/2, depth*0.75]){
    rotate(a=[0,90,0]) {
      cylinder(h=(size/2), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }

  translate(v=[platformX-span/2, platformY-span/1.4, depth*0.25]){
    rotate(a=[90,90,0]) {
      cylinder(h=(size/2), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }
}

difference() {
  color([1,1,1])

  cube([platformX,platformY-size-1,depth]);

  difference() {
    translate(v=[span/2, platformY-span, depth*0.75]){
      rotate(a=[90,90,0]) {
        cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
      }
    }
  }
}

```

```

    }
  }
}

difference() {
  translate(v=[platformX-width-span-span/2, platformY-span, depth*0.25]){
    rotate(a=[90,90,0]) {
      cylinder(h=(size/1.5), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
    }
  }
}

difference() {
  for(x = [span:width+span:platformX-span]){
    for(y = [span:height+span:platformY-span]){
      translate(v=[x,y,(size/2)]) {
        color("Green")
        cube([width,height,size*2]);
      }

      translate(v=[x+(width/2)-2.51,y+(height/2)-2.51,2]) {
        cube([5.2, 5.2, size]);
      }
    }
  }
}

difference() {
  translate([span, span, size*1.5]){
    cube([platformX-span+1, platformY-span-span, size*3]);
  }
}

difference() {
  color("Green")
  translate(v=[0+(span/2), 0+(span/2), -size*2]){
    cylinder(h=(size*3), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
  }
}

difference() {
  color("Green")
  translate(v=[platformX-((span/2)), 0+(span/2), -size*2]){
    cylinder(h=(size*3), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
  }
}

difference() {
  color("Green")
  translate(v=[0+(span/2), platformY-span-((span/2)), -size*2]){
    cylinder(h=(size*3), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
  }
}

difference() {
  color("Green")
  translate(v=[platformX-((span/2)), platformY-span-((span/2)), -size*2]){
    cylinder(h=(size*3), r=(span/4)*1.1, $fn=100, center=false);
  }
}

```

}
}

APÊNDICE C – CÓDIGO-FONTE DA PARTE SUPERIOR DA PLATAFORMA IMPRESSA EM 3D

```

columns = 4;
lines = 3;
span = 10;
width = 30;
height = 30;
depth = 5;
size = 10;

platformX = columns*width+columns*span+span;
platformY = lines*height+lines*span+span;

translate(v=[width+span*3,0,0]) {
    platform(true);
}

rotate(a=[0,0,180]){
    translate(v=[-platformX,-platformY*1.7,0]) {
        platform();
    }
}

module platform(middle = false) {
    difference() {
        cube([platformX,platformY-span,depth]);

        for(x = [span:width+span:platformX-span]){
            for(y = [span:height+span:platformY-span]){
                translate(v=[x,y,-(size/2)])
                if (y == (lines-1)*height+(lines-1)*span+span)
                    if (middle == true && x == span)
                        cube([width,height,size*2]);
                    else
                        cube([width,height+span,size*2]);
                else
                    cube([width,height,size*2]);
            }
        }
    }

    if (middle) {
        difference() {
            translate(v=[platformX-span-span-width, platformY-span,0]) {
                cube([span*2+width, span*2+height, depth]);
            }
            difference() {
                translate(v=[platformX-span-width, platformY,-depth]) {
                    cube([width, height, size*2]);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

color("Green")
translate(v=[0+(span/2), 0+(span/2), depth]){
    cylinder(h=(size/2), r=(span/4), $fn=100, center=false);
}

color("Green")
translate(v=[platformX-((span/2)), 0+(span/2), depth]){
    cylinder(h=(size/2), r=(span/4), $fn=100, center=false);
}

color("Green")
translate(v=[0+(span/2), platformY-span-((span/2)), depth]){
    cylinder(h=(size/2), r=(span/4), $fn=100, center=false);
}

color("Green")
translate(v=[platformX-((span/2)), platformY-span-((span/2)), depth]){
    cylinder(h=(size/2), r=(span/4), $fn=100, center=false);
}
}

```