

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 Junior¹, Andrey Ricardo Pimentel²

¹Campus Jandaia do Sul – Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Jandaia do Sul – PR – Brasil

²Departamento de Informática – Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Curitiba – PR – Brasil

robertino@ufpr.br, andrey@inf.ufpr.br

Abstract. *The executive system, composed of cognitive flexibility, inhibition, and working memory, is essential for planning, focusing, and controlling impulses. Inhibition — the focus of this study — enables individuals to resist distractions and regulate behavior, although it is rarely stimulated in schools. To this end, the CaFE-TaMTIn approach was developed, integrating a tangible interface, multiple representations, and intelligent tutoring aspects. Validated by a study with seven teachers and an experiment involving 19 public school students from Jandaia do Sul, Brazil, the results show improvements in inhibitory control, especially among students with lower initial levels, indicating that the approach contributes to the development of tools to train executive functions.*

Resumo. *O sistema executivo, composto por flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho, é fundamental para planejar, focar e controlar impulsos, sendo que a inibição — foco deste estudo — permite resistir a distrações e controlar comportamentos, embora pouco estimulada na escola. Para isso, foi criada a abordagem CaFE-TaMTIn, que integra interface tangível, múltiplas representações e aspectos de tutor inteligente. Validado por um estudo com sete professores e um experimento com 19 estudantes da rede pública de Jandaia do Sul/PR, os resultados mostram melhora no controle inibitório, especialmente dos alunos com menores índices, indicando que a abordagem contribui para o desenvolvimento de ferramentas para capacitar funções executivas.*

1. Introdução

A tríade funcional da aprendizagem, composta pelas funções cognitivas, conativas e executivas, por meio de sua interatividade e inseparabilidade, sustenta o processo da aprendizagem humana [Fonseca 2014]. O sistema executivo é responsável por ações essenciais do cotidiano, como pensar antes de agir, resolver desafios, pensar sob ângulos diferentes, evitar distrações, organizar atividades, planejar e manter o foco [Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância 2016]. Suas funções são organizadas em três componentes básicos: flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho [Miyake and Friedman 2012, Archambeau and Gevers 2018, Miyake et al. 2000].

Na perspectiva cultural e escolar, as funções executivas são pouco estimuladas, o que faz com que muitas crianças e adolescentes, que enfrentam desafios para obter melhor desempenho na aprendizagem, apresentem tais funções de forma mal adaptada, deficitária ou frágil [Fonseca 2014]. Contudo, quando flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho são devidamente instigadas, desenvolvem-se habilidades executivas mais complexas, como planejamento, tomada de decisão, resolução de problemas e raciocínio [Krause 2020], tornando-se fundamental que sejam estimuladas no contexto educacional.

Ferramentas tecnológicas podem ser aliadas na criação de estratégias voltadas ao desenvolvimento das funções executivas [Loures et al. 2020]. Seu uso no ambiente escolar favorece a construção de conhecimento, estimula a criatividade dos estudantes e permite que novos conceitos sejam formados de maneira mais dinâmica e facilitada [Klein et al. 2020]. Apesar disso, muitas dessas ferramentas ainda se apoiam em dispositivos tradicionais, como teclado e mouse, o que limita a interação simultânea dos alunos e dificulta a manipulação direta dos objetos [Scarlato et al. 2002]. Nesse contexto, as interfaces tangíveis do usuário (TUI – *Tangible User Interface*) surgem como alternativas mais adequadas, permitindo a manipulação física de objetos, o que se alinha naturalmente às práticas infantis de aprendizagem por meio do uso de elementos como blocos, quebra-cabeças e materiais concretos [González-González et al. 2019].

Considerando que os alunos necessitam de diferentes suportes instrucionais ao longo da aprendizagem [Rau et al. 2019], e que o desenvolvimento das funções executivas — em especial o controle inibitório — é essencial, que ferramentas tecnológicas favorecem o processo educativo e que objetos manipuláveis são eficazes no ensino, formula-se a seguinte questão: “*É possível e eficaz combinar sistemas tutores inteligentes, interfaces tangíveis e múltiplas representações externas na capacitação das funções executivas?*”. Dessa forma, este artigo apresenta a abordagem CaFE-TaMTIn (Capacitação das Funções Executivas, Tangíveis, Multi-representacional e Tutores Inteligentes), que integra esses elementos com o objetivo de potencializar as funções executivas dos estudantes.

2. Abordagem CaFE-TaMTIn

A arquitetura clássica de sistemas tutores inteligentes (STI) é composta por quatro componentes principais: módulo de domínio, módulo do estudante, módulo tutorial e interface de usuário. O conceito de “aspectos” de STI refere-se à utilização de componentes específicos dessa arquitetura, sem a necessidade de implementar todo o sistema. Dentro desta abordagem, o modelo de domínio tem como função verificar se as respostas dos estudantes estão corretas e, em caso de erro, identificar seu tipo, possibilitando um *feedback* apropriado. O modelo tutorial, com base nesse diagnóstico, fornece o *feedback* adequado, escolhe a representação externa mais apropriada e ajusta os níveis de dificuldade do jogo conforme o índice de controle inibitório do estudante.

O modelo do estudante constrói um perfil dinâmico e adaptativo com base em informações como acertos e erros nas atividades, índice de controle inibitório inicial (obtido no pré-teste), rastreamento desse índice em tempo real e estado afetivo do aprendiz, personalizando a experiência de aprendizado. A possibilidade de utilizar seletivamente aspectos da arquitetura de STI confere maior flexibilidade e adaptabilidade no desenvolvimento de sistemas baseados em interfaces tangíveis e múltiplas representações externas,

otimizando o suporte ao desenvolvimento das funções executivas dos estudantes.

A Figura 1 apresenta a abordagem CaFE-TaMTIn, na qual o aprendiz interage por meio de uma interface gráfica, que exibe os desafios, e de uma interface tangível, utilizada para indicar as respostas. Após a interação, o sistema identifica o estado afetivo do aprendiz e avalia a resposta, seguindo dois fluxos: se correta, gera *feedback*, seleciona uma representação externa adequada, ajusta o nível de dificuldade e apresenta a intervenção na interface gráfica; se incorreta, realiza o mesmo processo considerando o tipo de erro, permitindo que o aprendiz continue a interação de forma adaptativa. Nesse último caso, o núcleo da abordagem é acionado, o núcleo da abordagem é acionado para avaliar as funções executivas do aprendiz e identificar o erro, definindo o *feedback*, escolhendo a representação externa mais adequada e, se necessário, ajustando o nível de dificuldade antes de propor a atividade seguinte na interface gráfica.

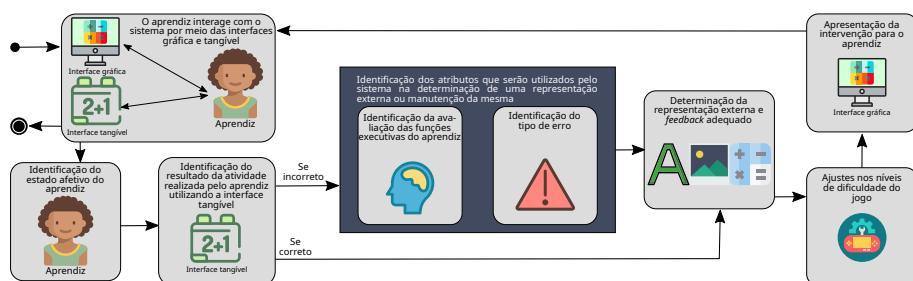


Figura 1. Abordagem CaFE-TaMTIn.

A interface gráfica consiste em um jogo educativo voltado ao ensino de conceitos matemáticos, como adição, subtração, análise combinatória e propriedades de números pares e ímpares, utilizando múltiplas representações externas. As plataformas baseadas em jogos com representações dinâmicas e multimodais fortalecem a interação dos alunos com os elementos do problema [Ke and Clark 2020], facilitando sua compreensão e resolução. Ademais, a existência de relação entre funções executivas e elementos dos jogos, como mecânicas e níveis de dificuldade (*level design*), contribui para o desenvolvimento dessas funções [Krause et al. 2020].

A interface tangível é composta por uma superfície que reconhece blocos físicos numerados, utilizando tecnologias como marcadores visuais com *webcam* para comunicação com o STI. A resolução dos desafios ocorre pela manipulação desses blocos sobre a superfície. Essa escolha se justifica por ser uma ferramenta que explora a espacialidade, é de fácil uso [Sharlin et al. 2004] e amplia as possibilidades representacionais, favorecendo a aprendizagem [Price et al. 2008].

A identificação dos estados afetivos dos aprendizes, potencialmente relevante para a promoção de intervenções que favoreçam o aprendizado [Iepsen et al. 2012], é realizada por meio da análise de expressões faciais capturadas por câmera, utilizando uma rede neural profunda [Toisoul et al. 2021]. Esse modelo permite inferir tanto a emoção quanto os valores de valência e ativação, os quais são utilizados para determinar o quadrante emocional [Gottardo and Pimentel 2018]. Esse quadrante é definido com base nas dimensões de valência (que varia de tristeza a alegria) e ativação (de sonolência à agitação) [Bradley and Lang 1994, Gottardo and Pimentel 2018], sendo os quadrantes QN para neutro, Q1 para construção, Q2 para dúvida, Q3 para desmotivação e Q4 para

reconstrução. A escolha pelas expressões faciais como fonte de dados justifica-se pela forte correlação entre características faciais e estados emocionais [McDaniel et al. 2007], pela relevância da comunicação não verbal no contexto educacional [Reis et al. 2018] e pela viabilidade técnica, uma vez que não exige o uso de equipamentos de alto custo [Bosch et al. 2014].

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 and Zuccheri 2005]. Presente ao longo da trajetória escolar de estudantes de diferentes idades e níveis de desempenho [Leite et al. 2012], o erro pode ocorrer por diversos motivos: má interpretação da tarefa, desconhecimento de termos matemáticos, seleção inadequada de informações, uso incorreto de operações, dificuldades com gráficos ou expressões algébricas, ou mesmo pela não conclusão de atividades [Wijaya et al. 2014]. Diante disso, o erro não deve ser negligenciado, pois, dependendo do contexto, o tempo necessário para que o aprendiz tente novamente pode ser significativo, exigindo uma reestruturação cognitiva [Marczal et al. 2016].

Assim, a identificação do tipo de erro é baseada na arquitetura para remediação de erros [Leite et al. 2012], que possibilita classificar os erros cometidos pelos aprendizes durante a resolução das atividades e fornecer intervenções mais adequadas por meio de múltiplas representações externas. Essa abordagem foi escolhida por permitir a revisão de fatos, regras e conceitos esquecidos, favorecendo uma remediação mais eficaz.

O nível inicial de capacidade de controle inibitório (CCI) dos estudantes é determinado a partir dos testes padronizados de Stroop e Flanker [Barzykowski et al. 2021b], sendo a classificação em grupos (baixo, médio ou alto CCI). Além disso, os objetos de uma TUI podem ser mapeados para fornecer dados aos sistemas computacionais durante a interação dos usuários com a interface. Com base em seis variáveis identificadas na literatura, foi possível rastrear o controle inibitório em jogos digitais educacionais, por meio da coleta de dados de interação dos estudantes. Para rastrear outros componentes das funções executivas, são necessários estudos adicionais. Os dados coletados incluem data e hora (*timestamp*), tempo de reação, resposta fornecida, acertos e erros. Ademais, foram criadas categorias de erros para cada atividade, permitindo a diferenciação entre os erros cometidos em cada resposta errônea.

Dessa forma temos $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$ o conjunto de 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 é representada por $R_{sp} = \{r_1, r_2, \dots, r_{|R_{sp}|}\}$, sendo cada resposta r_i pertencente ao conjunto de respostas corretas C_p ou incorretas W_p . O subconjunto de respostas corretas é dado por $RC_{sp} = R_{sp} \cap C_p$, e o de incorretas, por $RW_{sp} = R_{sp} \cap W_p$. As subseções a seguir apresentam as variáveis de rastreamento do controle inibitório.

2.1. Erros de impulsividade

Erros de impulsividade ocorrem quando o indivíduo responde rapidamente sem considerar a resposta adequada, revelando falhas no controle inibitório [Machado et al. 2020, Rivero 2016, Diamond 2013]. Para identificá-los, os erros cometidos por um estudante na fase p são ordenados por tempo de reação (RWO_{sp}). O primeiro quartil ϕ_p serve como limite para classificar erros impulsivos, definidos pelo subconjunto $VF_{sp} = \{r_i \in RWO_{sp} \mid t(r_i) \leq \phi_p\}$. Considera-se que há ocorrência de erros de impulsividade

($IE_{sp} = \text{true}$) quando $|VF_{sp}|$ é múltiplo de 3.

2.2. Insistir no mesmo erro

Indivíduos com disfunção executiva podem apresentar dificuldade em inibir comportamentos repetitivos, persistindo nos mesmos erros [Henry and Bettenay 2010, Machado et al. 2020]. Para identificar essa insistência, os erros de um estudante em uma fase do jogo (RW_{sp}) são organizados por ordem cronológica. Considera-se que há ocorrência de insistência no mesmo erro ($ISE_{sp} = \text{true}$) quando as duas últimas respostas fornecidas pelo estudante em uma fase do jogo são erros consecutivos e idênticos, ou seja, $r_{|RW_{sp}|} \in RW_{sp}$ e $r_{|RW_{sp}|} = r_{|RW_{sp}|-1}$.

2.3. Cometer erros mais comuns

Indivíduos com baixa capacidade de controle inibitório tendem a apresentar dificuldades na resolução de problemas, pois têm menos capacidade de resistir a estímulos externos e recordar informações preegressas [Peng et al. 2021]. Esse conhecimento prepotente pode ser identificado por meio do erro mais comum [Machado et al. 2020] cometido em cada fase do jogo, calculado pela contagem de ocorrências em RW_p , sendo $mca = \arg \max_{r \in RW_p} \text{count}(r, RW_p)$. Considera-se que há ocorrência do erro mais comum ($MCE_{sp} = \text{true}$) quando sua quantidade atinge um múltiplo de três, ou seja, $\text{count}(mca, RW_{sp}) \bmod 3 = 0$.

2.4. Tempo de resolução de problema

Existe uma relação direta entre o tempo de resolução de problemas e a capacidade de controle inibitório, onde indivíduos com menor controle tendem a levar mais tempo para suprimir respostas impulsivas e alcançar a resposta correta [Diamond 2013, Rivero 2016, Galarza et al. 2020]. Para cada fase do jogo, define-se um tempo máximo (τ_p) e o subconjunto que representa os erros de tempo de resolução excedido é dado por $RTE_{sp} = \{r_i \in RW_{sp} \mid t(r_i) \geq \tau_p\}$. Caso o estudante cometa três erros consecutivos com tempo de reação acima desse limite — ou seja, $r_{|RW_{sp}|} \in RTE_{sp}$ e $r_{|RW_{sp}|} = r_{|RW_{sp}|-1}$ e $r_{|RW_{sp}|} = r_{|RW_{sp}|-2}$ —, considera-se que houve problema relacionado ao tempo de resolução ($PRT_{sp} = \text{true}$).

2.5. Número de tentativas

Há uma relação direta entre a capacidade de controle inibitório e o número de tentativas necessárias para resolver um problema, visto que estudantes com menor controle tendem a adotar um comportamento de tentativa e erro até alcançar a resposta correta [Rivero 2016, Galarza et al. 2020]. Considera-se que há excesso no número de tentativas ($NA_{sp} = \text{true}$) quando o estudante acumula cinco respostas incorretas em uma mesma fase do jogo ($|RW_{sp}| \bmod 5 = 0$).

2.6. Eficiência

Estudantes com bom controle inibitório tendem a manter o foco, resistir a distrações e regular impulsos, o que favorece maior eficiência na resolução de atividades, refletida em mais respostas corretas [Mourão Junior and Melo 2011]. A eficiência (EF) é calculada pela razão entre respostas corretas e o total de respostas fornecidas [Rivero 2016], em que $EF = \frac{RC_{sp}}{R_{sp}}$, sendo classificada em baixa (0,0–0,33), média (0,34–0,66) e alta (0,67–1,0).

3. O Jogo do 15

O jogo utilizado neste estudo, denominado Jogo do 15¹, foi escolhido por contemplar diversos fundamentos matemáticos já trabalhados com os estudantes, além de possibilitar seu desdobramento em diferentes fases. A versão desenvolvida consiste em uma plataforma tangível com blocos numerados, construída com objetos de baixo custo (canos de PVC e impressão 3D), além de uma interface gráfica em Python. Conta com uma *webcam* superior para reconhecer os blocos, uma placa Arduino Uno R3 para captar o acionamento dos botões e outra *webcam* direcionada ao estudante para identificar seu estado afetivo. O reconhecimento dos blocos foi treinado com YOLOv4 no Google Colab, utilizando imagens etiquetadas no LabelImg. Dois *ring lights* foram utilizados para otimizar o reconhecimento da plataforma e do estudante. A interface foi desenvolvida com PyGame, OpenCV, PyTorch e Telemetrix.

Foram desenvolvidas quatro fases utilizando a abordagem CaFE-TaMTIn. Em cada uma delas, durante a execução do jogo, a identificação das variáveis de rastreamento do controle inibitório permitiu a adequação ao índice de capacidade de controle inibitório (ICCI) do estudante, inferido previamente pelos testes padronizados. Assim, com base nos três níveis de ICCI (baixo, médio e alto), foram realizados ajustes para adaptar o jogo às necessidades do estudante. Cada fase conta com um tutorial, além de dicas e *feedbacks* apresentadas pela personagem virtual Monique.

A Fase 1 apresenta desafios de adição e subtração com resultados entre 1 e 9. O estudante realiza o cálculo, posiciona o bloco correspondente no tabuleiro e pressiona o botão verde na plataforma para validar a resposta. Inicialmente, são exibidas operações com dois termos; após cinco acertos consecutivos, passam a ser exibidas operações com três termos. Na Fase 2, o estudante deve encontrar oito combinações diferentes de três números entre 1 e 9 que somem 15, sem repetições. Cada acerto revela visualmente a combinação correspondente, facilitando o acompanhamento do progresso.

Na Fase 3, o estudante joga contra a personagem virtual Monique, alternando jogadas para escolher blocos de 1 a 9 e formar somas 15. Cada desafio permite até duas combinações corretas, com seis desafios no total. Já a Fase 4 simula um quadrado mágico: o estudante deve organizar os blocos numerados conforme as instruções da personagem, buscando somas 15 nas linhas, colunas e diagonais. A cada solução, um novo arranjo é proposto, com aumento gradual da complexidade. A validação da resposta pode ocorrer a cada inserção de bloco ou ao final da organização.

4. Resultados e discussão

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 o protocolo CAAE 70297523.5.0000.0102, e aprovada pelo parecer nº 6.214.532.

4.1. Estudo Preliminar - Professores

Este estudo teve como objetivo avaliar as funcionalidades do jogo, validar as instruções, os *feedbacks* e a coleta automática de dados, além de identificar possíveis erros e falhas. Também buscou avaliar a interface tangível e o funcionamento da plataforma.

¹Disponível em: <https://github.com/robertinosantiago/cafetamtin>

O público-alvo deste estudo foi composto por professores universitários. Participaram sete docentes, sendo cinco homens e duas mulheres, com idades entre 25 e 55 anos ($M = 37,7$; $DP = 8,94$). Quanto às áreas de atuação, foram três professores de Computação, três de Matemática e um de Engenharia. Durante a interação dos participantes com o jogo tangível, foram realizadas observações nas quais o observador registrava os comportamentos e eventos relevantes. A observação permite identificar problemas, ampliar a compreensão sobre os conceitos envolvidos e analisar as relações e aplicações associadas ao fenômeno estudado [Mónico et al. 2017].

Foram identificados erros relacionados tanto ao software quanto ao hardware durante os testes. No software, os principais problemas envolveram a dificuldade dos jogadores em entender quando remover os blocos do tabuleiro, o tempo muito curto para resolução das atividades, confusão nas mensagens do tutorial da fase 2, remoção precoce dos blocos na fase 3, excesso de desafios existentes na fase 3 e desconhecimento sobre a funcionalidade dos botões da plataforma. Para resolver esses pontos, foram adicionadas mensagens e explicações no tutorial, ampliado o tempo para resolução, reduzida a quantidade de desafios e incluídas legendas explicativas. No hardware, problemas de reconhecimento incorreto tanto dos blocos numerados quanto do estado afetivo foram solucionados com melhorias na iluminação e reposicionamento das câmeras. Além disso, um bug que causava encerramento abrupto do programa durante mensagens longas do tutor foi corrigido. Cabe ressaltar que as alterações no software foram realizadas de forma gradual, após a conclusão da participação de cada professor ou professora.

4.2. Experimento - Estudantes

Participaram do experimento 27 estudantes do 8º e 9º anos do ensino fundamental II da rede pública de Jandaia do Sul/PR, em 2024, dos quais 19 foram incluídos na análise após exclusões por faltas, desistência e dados não confiáveis nos testes padronizados (Flanker e Stroop). A amostra final teve idades entre 12 e 15 anos ($M=13,4$; $DP=0,7$), com 13 meninos e seis meninas, sendo 12 do 8º ano e sete do 9º ano. Todos os participantes assinaram o Termo de Assentimento Livre e Esclarecido, e seus responsáveis, o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

O experimento consistiu nas seguintes etapas: a) pré-teste, com os testes de Stroop e Flanker; b) primeira rodada do Jogo do 15; c) segunda rodada do Jogo do 15; d) pós-teste, novamente com os testes de Stroop e Flanker. Houve um intervalo de uma semana entre cada etapa. Durante as rodadas do jogo, os estudantes foram recebidos individualmente em espaços reservados na escola — a biblioteca e uma sala de aula —, ambos livres de pessoas não participantes. Nos pré e pós-testes, os estudantes realizaram os testes na biblioteca, em grupos de quatro, cada um utilizando um notebook individualmente.

Ambos os testes (Flanker e Stroop) foram implementados no software Psytoolkit [Stoet 2010, Stoet 2017], que permite sua execução via navegador web. Calculou-se o efeito de interferência de cada teste [Barzykowski et al. 2021b], considerando a diferença entre os tempos médios das tentativas incongruentes e congruentes, dividida pela média dos tempos congruentes — quanto menor esse valor, maior a capacidade inibitória. Os efeitos foram calculados separadamente para Flanker e Stroop, padronizados em escores Z e, em seguida, combinados pela média, resultando no ICCI de cada estudante, permitindo classificá-los em três grupos de ICCI (baixo, médio e alto) de tamanho aproximadamente igual.

Os estudantes foram distribuídos em três grupos: ICCI Alto (n=6; $M=-0,78$; $DP=0,19$), ICCI Médio (n=6; $M=-0,08$; $DP=0,25$) e ICCI Baixo (n=7; $M=0,74$; $DP=0,11$), conforme as pontuações padronizadas dos efeitos de interferência. Uma ANOVA unidirecional sobre a média do efeito de interferência nos testes de Stroop e Flanker indicou diferenças significativas entre os grupos ($F(2, 35) = 9,214$; $p = 0,00061$), confirmado a distinção dos níveis de controle inibitório. A Figura 2 compara os efeitos de interferência no pré e pós-teste. No grupo ICCI Baixo, 85,71% reduziram a interferência no Flanker e 28,57% no Stroop. No grupo ICCI Médio, 66,67% apresentaram redução em ambos os testes. Já no grupo ICCI Alto, 33,33% reduziram no Flanker e 16,67% no Stroop, indicando ganhos mais expressivos nos grupos com menor controle inibitório inicial. Cabe ressaltar que, quanto menor a taxa de interferência, maior será a capacidade inibitória do indivíduo [Barzykowski et al. 2021a].

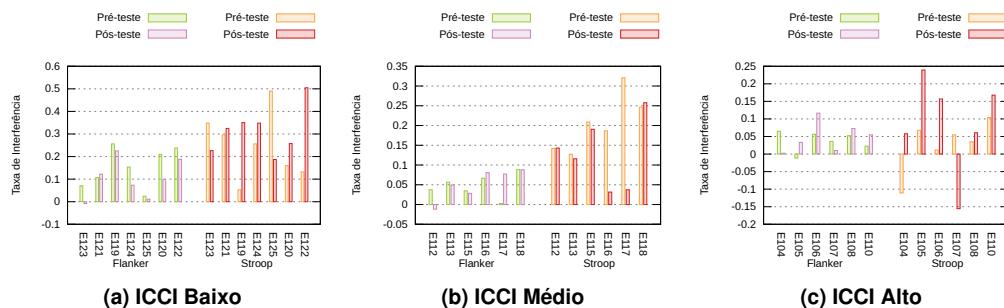


Figura 2. Taxa de interferência dos pré e pós-testes de Flanker e Stroop

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk, aplicado às diferenças dos valores do teste de Flanker (pré e pós-teste), indicou distribuição normal em todos os grupos (ICCI Baixo: $p = 0,9426$; ICCI Médio: $p = 0,4098$; ICCI Alto: $p = 0,4845$). Para o teste de Stroop, a normalidade foi confirmada nos grupos ICCI Baixo ($p = 0,869$) e ICCI Alto ($p = 0,07357$), mas não no grupo ICCI Médio ($p = 0,03718$).

O teste t pareado para o Flanker indicou diferença significativa no grupo ICCI Baixo ($t = 3,03$; $p = 0,023$), com melhora no pós-teste. Nos grupos ICCI Médio ($t = -0,26$; $p = 0,805$) e ICCI Alto ($t = -0,61$; $p = 0,571$), não houve diferença significativa. Para o Stroop, não foram encontradas diferenças significativas em nenhum grupo: ICCI Baixo ($t = -0,75$; $p = 0,479$), ICCI Alto ($t = -1,02$; $p = 0,353$) e ICCI Médio, analisado pelo teste de Wilcoxon ($V = 18$; $p = 0,156$).

4.2.1. Fase 1

Na primeira rodada da Fase 1 do jogo, foram registradas 190 respostas, das quais 129 (67,89%) permitiram a identificação do estado afetivo via *webcam*, enquanto 61 (32,11%) não puderam ser analisadas por obstruções, como mãos no rosto ou má posição. O quadrante neutro (QN) foi o mais frequente, com 113 ocorrências (87,60%), seguido pelo quadrante Q1 (construção), com 14 (10,85%), e pelo quadrante Q2 (dúvidas), com 2 (1,55%), padrão semelhante ao observado em estudos anteriores [Gottardo and Pimentel 2018, Ascarì et al. 2020]. Na primeira rodada da Fase 1 (Figura 3(a)), as maiores mudanças de quadrante ocorreram entre QN e Q1 nos três grupos, com

destaque para a transição de Q2 para Q1 no grupo ICCI Baixo. Essas mudanças são importantes para evitar ciclos viciosos de estados afetivos negativos [D'Mello et al. 2007], que ocorrem quando os alunos permanecem repetidamente nos quadrantes Q2 e Q3 [Gottardo 2018].

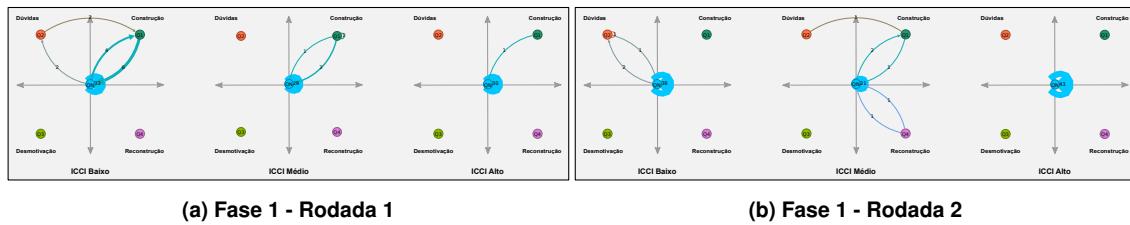


Figura 3. Mudança de quadrantes da Fase 1

A Figura 4 apresenta a inferência do ICCI durante a Fase 1, com estudantes dos grupos ICCI Baixo, Médio e Alto iniciando, respectivamente, nos níveis 1, 2 e 3 do *level design*. A cada jogada, o ICCI era inferido e a fase ajustada. Observa-se que, durante a primeira rodada, todos os estudantes mantiveram-se no nível inicial ou avançaram para um nível superior, indicando desenvolvimento na capacidade de controle inibitório.

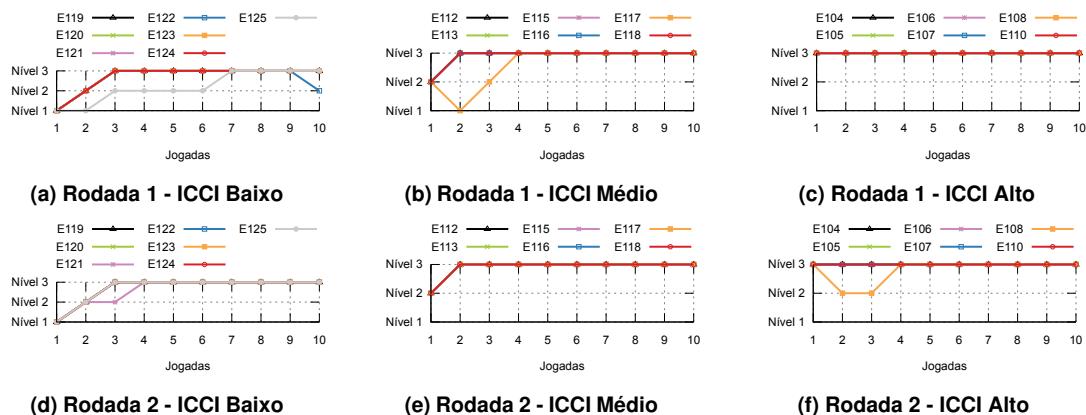


Figura 4. Índice da capacidade do controle inibitório inferido durante as jogadas da Fase 1

Na segunda rodada da Fase 1, foram registradas 190 respostas, das quais 130 (68,42%) permitiram a inferência do estado afetivo. Predominou o quadrante QN (neutro), com 122 (93,84%) registros, seguido por três (2,31%) no Q1 (construção), quatro (3,08%) no Q2 (dúvidas) e uma (0,77%) no Q4 (reconstrução), sem ocorrências no Q3 (desmotivação). Como observado na Figura 3(b), não houve ciclos viciosos. No grupo ICCI Baixo, ocorreram mudanças entre QN e Q2, com uma reincidência em Q2. No grupo ICCI Médio, as mudanças foram entre QN e Q1, QN e Q4 (satisfação, alívio e esperança) e de Q2 para Q1. No grupo ICCI Alto, não houve mudanças de quadrantes. Nesta rodada, que não considerou dados da rodada anterior, os estudantes dos grupos ICCI Baixo, Médio e Alto iniciaram, respectivamente, nos níveis 1, 2 e 3. Assim como na primeira rodada, todos demonstraram evolução no controle inibitório, mantendo-se no nível inicial (Figura 4(f)) ou avançando para o nível 3 (Figuras 4(d) e 4(e)).

4.2.2. Fase 2

Na primeira rodada da Fase 2, foram registradas 219 respostas, das quais 169 (77,17%) permitiram a inferência do estado afetivo e 50 (22,83%) não, principalmente por má posição frente à *webcam* ou obstrução do rosto. Predominou o quadrante QN (neutro), com 139 (82,25%) registros, seguido por Q1 (construção) com 23 (13,61%), Q2 (dúvidas) com 6 (3,55%) e Q4 (reconstrução) com 1 (0,59%). Não houve registros no quadrante Q3 (desmotivação). Em relação às mudanças de quadrante das emoções, as principais mudanças ocorreram entre QN e Q1 nos grupos ICCI Baixo e Médio, além de uma troca entre QN e Q4 no grupo Baixo. No grupo ICCI Alto, destacaram-se as mudanças entre QN e Q2, além de QN e Q1. Ressalta-se que os quadrantes Q1 e Q2 são desejáveis no contexto educativo [D'Mello et al. 2007, Ascari et al. 2020] e não foram identificados ciclos viciosos nessa fase. Sobre a inferência do ICC, os estudantes iniciaram no nível em que finalizaram a Fase 1, possibilitando ajustes de *level design* diferentes dentro do mesmo grupo. Observou-se maior alternância de nível nos grupos ICCI Baixo e Médio. Ao final, 57,14% dos estudantes do grupo Baixo, 50% do Médio e 83,33% do Alto mantiveram ou ascenderam de nível.

Durante a segunda rodada da Fase 2, foram registradas 192 respostas, com inferência do estado afetivo em 146 (76,04%) casos. Em 46 (23,96%) registros, a inferência não foi possível devido ao posicionamento do estudante ou mão na frente do rosto. O quadrante predominante foi QN (neutro), com 137 (93,84%) ocorrências, seguido por Q1 (construção) com 6 (4,11%) e Q2 (dúvidas) com 3 (2,05%). Não houve registros nos quadrantes Q3 e Q4. Quanto às mudanças de quadrantes na segunda rodada da Fase 2, não foram identificados ciclos viciosos. O grupo ICCI Baixo apresentou mudanças semelhantes entre QN para Q1 e Q2; o grupo ICCI Médio teve mudanças entre QN e Q2; e o grupo ICCI Alto entre QN e Q1. Nesta rodada, relativo à inferência do ICCI, todos os estudantes do grupo ICCI Alto permaneceram no nível mais alto. No grupo ICCI Baixo, 85,71% mantiveram ou avançaram a um nível superior ao inicial, enquanto no ICCI Médio essa proporção foi de 66,67%.

4.2.3. Fase 3

A Fase 3, por sua dinâmica de jogo contra a tutora Monique, foi a que registrou o maior número de respostas, totalizando 799 na primeira rodada. Nessa fase, os estudantes informavam números para formar ou impedir a soma 15, o que demandou maior interação. Destas respostas, 562 (70,34%) permitiram inferir o estado afetivo e mapear o quadrante; em 237 (29,66%) não foi possível. Conforme nas fases anteriores e em estudos anteriores [Gottardo and Pimentel 2018, Ascari et al. 2020], o quadrante QN (neutro) predominou com 449 (79,89%) registros, seguido pelo Q1 (construção) com 99 (17,62%) e Q2 (dúvidas) com 14 (2,49%). Não foram registrados dados nos quadrantes Q3 e Q4. Nas mudanças de quadrantes desta fase, as maiores ocorreram entre QN e Q1 para os três grupos. Também foram observadas trocas entre QN e Q2 nos grupos, além de mudanças de Q2 para Q1 nos grupos ICCI Médio e Baixo. Destaca-se a reincidência do quadrante Q1, indicando interesse e engajamento dos estudantes. Relativo à inferência do ICCI nesta rodada, houve variação no número de jogadas devido a erros e perdas de vidas, levando alguns a repetir a fase. No grupo ICCI Baixo, 85,71% mantiveram ou subiram de nível;

no ICCI Médio, todos permaneceram ou avançaram; e no ICCI Alto, 66,67% mantiveram ou subiram de nível.

Na segunda rodada da Fase 3, foram registradas 576 respostas, com 426 (73,96%) em que foi possível inferir o estado afetivo. O quadrante predominante foi o QN (neutro), com 375 (88,03%) ocorrências, seguido por 38 (8,92%) no Q1 (construção) e 12 (2,82%) no Q2 (dúvidas). Houve uma (0,23%) resposta no Q3 (desmotivação) e nenhuma no Q4 (reconstrução). Relativas às mudanças de quadrantes nesta fase, o grupo ICCI Baixo apresentou alterações entre QN e Q1, QN e Q2, além de Q2 para Q1 e QN para Q3 — este último possivelmente associado à frustração por precisar repetir a fase. No grupo ICCI Médio, predominaram mudanças entre QN e Q1, além de trocas entre QN e Q2 e entre Q1 e Q2, com reincidências em Q1. No grupo ICCI Alto, as mudanças ocorreram principalmente entre QN e Q1. Em relação à inferência do ICCI desta rodada, observou-se discrepância no número de jogadas nos grupos ICCI Baixo e Alto, pois alguns estudantes precisaram repetir a fase devido à perda de vidas, assim como na primeira rodada. No grupo ICCI Baixo, 85,71% dos estudantes permaneceram ou subiram de nível. No ICCI Médio, 66,67% mantiveram ou elevaram seu nível, enquanto no ICCI Alto esse percentual foi de 83,33%.

4.2.4. Fase 4

Na primeira rodada da Fase 4, foram registradas 183 respostas, sendo possível inferir o estado afetivo em 118 (64,48%) delas. O quadrante QN (neutro) teve maior ocorrência, com 103 (87,29%) registros, seguido do Q1 (construção), com 12 (10,17%), e do Q2 (dúvidas), com 3 (2,54%). Não houve registros nos quadrantes Q3 e Q4. Relativo às mudanças de quadrantes das emoções desta rodada, as principais mudanças ocorreram entre QN e Q1 nos grupos ICCI Baixo e Médio. No grupo Baixo, também houve transições de QN para Q2. No grupo Alto, registraram-se mudanças de QN para Q2 e de Q1 para QN. Houve reincidências no quadrante Q1 em todos os grupos. Sobre a inferência do ICCI desta rodada, os estudantes iniciaram no mesmo nível de *level design* da fase anterior. Houve discrepância no número de jogadas nos grupos ICCI Baixo e Médio devido à perda de vidas por erros, exigindo repetição da fase. No grupo Baixo, 71,43% dos estudantes mantiveram ou elevaram seu nível. Nos grupos Médio e Alto, esse índice foi de 83,33%.

Na segunda rodada da Fase 4, foram registradas 166 respostas, sendo possível inferir o estado afetivo em 109 (65,66%) delas. O quadrante QN (neutro) predominou com 97 (88,89%) registros, seguido pelo Q1 (construção) com 10 (9,17%) e Q2 (dúvidas) com 2 (1,83%). Não houve registros nos quadrantes Q3 e Q4. Sobre as mudanças de quadrantes das emoções desta fase, a principal mudança de quadrante nos três grupos foi entre QN e Q1. No grupo ICCI Baixo, houve mudança de Q1 para Q2; no grupo ICCI Alto, entre QN e Q2, com reincidências no Q1. Em relação à inferência do ICCI desta fase, 71,43% dos estudantes do grupo ICCI Baixo, 83,33% do grupo ICCI Médio e 66,67% do grupo ICCI Alto permaneceram ou avançaram de nível. Observou-se discrepância no grupo ICCI Alto devido à estratégia de um estudante, que optou por resolver o quadrado mágico de forma parcial.

4.3. Ameaças à validade dos experimentos

Uma limitação da pesquisa refere-se ao tamanho reduzido da amostra (n=19) e à distribuição dos estudantes entre os grupos, o que pode ter comprometido a identificação de diferenças estatísticas e a generalização dos resultados. Soma-se a isso a realização do experimento na biblioteca da escola, ambiente sujeito a ruídos externos em momentos de troca de aula e intervalos. Recomenda-se a realização de novos experimentos com um número maior de participantes, em diferentes áreas do conhecimento e em ambientes mais controlados quanto a interferências sonoras.

Outras ameaças à validade incluem o possível efeito Hawthorne, que se refere à mudança de atitude dos participantes quando sabem que estão sendo observados, mitigado com o uso de câmeras fora do campo de visão, e a alta taxa de respostas sem inferência do estado afetivo, causada pelo posicionamento dos estudantes (mão no rosto ou fora do enquadramento da *webcam*) e pelas limitações do modelo de reconhecimento. Além disso, a utilização de um único jogo, focado apenas em conceitos matemáticos, restringe as conclusões. Portanto, sugere-se ampliar os estudos com diferentes jogos tangíveis e conteúdos variados, a fim de analisar de forma mais abrangente o impacto sobre o controle inibitório.

5. Considerações finais

O sistema executivo, responsável por ações como planejar, manter o foco e resistir a distrações [Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância 2016], é composto por três funções básicas: flexibilidade cognitiva, inibição e memória de trabalho [Miyake and Friedman 2012, Archambeau and Gevers 2018, Miyake et al. 2000]. Este estudo foca na inibição, que permite controlar impulsos e ignorar distrações [Fitó 2012]. No contexto escolar, essas funções são pouco estimuladas, impactando negativamente o desempenho dos alunos [Fonseca 2014]. Assim, a pesquisa propôs a abordagem CaFE-TaMTIn, que combina sistemas tutores inteligentes, interfaces tangíveis e múltiplas representações externas para estimular as funções executivas, especialmente o controle inibitório, por meio do Jogo do 15 — um jogo tangível construído com materiais de baixo custo e tecnologias como Arduino e reconhecimento do estado afetivo por *webcams*.

A abordagem foi validada em duas etapas: um estudo preliminar com sete professores, que permitiu ajustar funcionalidades, interface e detectar falhas; e um experimento com 19 estudantes do ensino fundamental. Os resultados mostraram avanços significativos na capacidade de controle inibitório, especialmente entre os alunos com menores índices iniciais, indicando que a combinação de tecnologias tangíveis, múltiplas representações e aspectos de tutores inteligentes é eficaz nesse processo. Além de trabalhar o controle inibitório, o jogo também contribuiu para o aprendizado de conceitos matemáticos, como adição, subtração, análise combinatória e propriedades dos números.

As principais contribuições incluem a criação de uma abordagem que apoia o desenvolvimento de ferramentas para capacitar funções executivas e o desenvolvimento de um jogo tangível que melhora o controle inibitório. Para trabalhos futuros, sugere-se ampliar o modelo para incluir flexibilidade cognitiva e memória de trabalho, incorporar recursos auditivos para melhorar a experiência do usuário, além de realizar estudos sobre usabilidade e impacto do jogo em diferentes contextos educacionais.

Referências

- Archambeau, K. and Gevers, W. (2018). (how) are executive functions actually related to arithmetic abilities? In Henik, A. and Fias, W., editors, *Heterogeneity of Function in Numerical Cognition*, chapter 16, pages 337–357. Academic Press.
- Ascari, S., Gottardo, E., and Pimentel, A. (2020). Mafint: Modelo afetivo de intervenção tutorial para ambientes virtuais de aprendizagem. In *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*, pages 832–841, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Barzykowski, K., Hajdas, S., Radel, R., Niedźwieńska, A., and 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., and Radel, R. (2021b). An inquisit-web protocol for calculating composite inhibitory control capacity score: An individual differences approach. *MethodsX*, 8:101530.
- Bosch, N., Chen, Y., and D'Mello, S. (2014). It's written on your face: Detecting affective states from facial expressions while learning computer programming. In *Intelligent Tutoring Systems*, pages 39–44. Springer International Publishing.
- Bradley, M. M. and 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.
- 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 Cecilia Souto Vidigal - FMCSV, São Paulo, first edition. Redação Joana Simões de Melo Costa... [et al.].
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1):135–168.
- D'Mello, S., Picard, R. W., and Graesser, A. (2007). Toward an affect-sensitive autotutor. *IEEE Intelligent Systems*, 22(4):53–61.
- Fiori, C. and Zuccheri, L. (2005). An experimental research on error patterns in written subtraction. *Educational Studies in Mathematics*, 60(3):323–331.
- 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.
- 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., and 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.
- González-González, C. S., Guzmán-Franco, M. D., and 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. and 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.
- Henry, L. A. and Bettenay, C. (2010). The assessment of executive functioning in children. *Child and Adolescent Mental Health*, 15(2):110–119.
- Iepsen, E., Bercht, M., and 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).
- Ke, F. and Clark, K. M. (2020). Game-based multimodal representations and mathematical problem solving. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 18(1):103–122.
- Klein, D. R., Canevesi, F. C. S., Feix, A. R., Gresele, J. F. P., and 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).
- Krause, K., Hounsell, M., and 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.
- Leite, M., Pimentel, A., and 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).
- Loures, D. A. M., Brandão, P. M. F., da Silva Vieira, A. M., and 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., and Tazouti, Y. (2020). *An Approach to Model Children's Inhibition During Early Literacy and Numeracy Acquisition*, page 203–207. Springer International Publishing.
- Marczal, D., Direne, A., Pimentel, A. R., Maschio, E., and 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.
- McDaniel, B., DMello, S., King, B., Chipman, P., Tapp, K., and Graesser, A. (2007). Facial features for affective state detection in learning environments. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, volume 29, pages 467–472.

- Miyake, A. and 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., and 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.
- Mourão Junior, C. A. and 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., and Parreira, P. (2017). A observação participante enquanto metodologia de investigação qualitativa. In Costa, A. P., Tuzzo, S., and Brandão, C., editors, *Atas do 6º Congresso Ibero-Americano em Investigação Qualitativa*, volume 3, pages 724–733, Salamanca. Ludomedia.
- Peng, Y., Lu, Y., and Qin, J. (2021). The relationship between inhibitory control and working memory and its underlying neural mechanism. In *Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Mental Health and Humanities Education (ICMHHE 2021)*, icmhhe-21. Atlantis Press.
- Price, S., Sheridan, J. G., Falcao, T. P., and Roussos, G. (2008). Towards a framework for investigating tangible environments for learning. *International Journal of Arts and Technology*, 1(3/4):351–368.
- Rau, M. A., Zahn, M., Misback, E., and Burstyn, J. (2019). Adaptive support for representation skills in a chemistry ITS is more effective than static support. In Isotani, S., Millán, E., Ogan, A., Hastings, P., McLaren, B., and Luckin, R., editors, *Artificial Intelligence in Education*, pages 432–444, Cham. Springer International Publishing.
- Reis, H., Maillard, P. J., and 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.
- 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.
- Scarlatos, L. L., Landy, S. S., Breban, J., Horowitz, R., and Sandberg, C. (2002). TR-2002004: On the effectiveness of tangible interfaces in collaborative learning environments. Technical report, City University of New York, New York.
- Sharlin, E., Watson, B., Kitamura, Y., Kishino, F., and Itoh, Y. (2004). On tangible user interfaces, humans and spatiality. *Personal Ubiquitous Comput.*, 8(5):338–346.
- 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.

- Toisoul, A., Kossaifi, J., Bulat, A., Tzimiropoulos, G., and Pantic, M. (2021). Estimation of continuous valence and arousal levels from faces in naturalistic conditions. *Nature Machine Intelligence*, 3(1):42–50.
- Wijaya, A., van den Heuvel-Panhuizen, M., Doorman, M., and Robitzsch, A. (2014). Difficulties in solving context-based pisa mathematics tasks: An analysis of students' errors. *The Mathematics Enthusiast*, 11(3):555–584.