

Teoria dos autômatos no ensino de computação: Uma Revisão Sistemática

Julia Veiga da Silva¹, Simone Andre' da Costa Cavalheiro¹, Luciana Foss¹

¹Centro de Desenvolvimento Tecnológico - Universidade Federal de Pelotas (UFPel)
CEP 96.010-610 - Pelotas - RS - Brasil

{jvsilva, simone.costa, lfoss}@inf.ufpel.edu.br

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura que investiga abordagens para o ensino da teoria dos autômatos na educação em computação. A Teoria dos Autômatos, uma área fundamental da Ciência da Computação, essencial para a compreensão de linguagens formais e compiladores, é cada vez mais reconhecida por sua importância em contextos educacionais. Este estudo examina como a Teoria dos Autômatos é , avaliada, integrada e ensinada tanto no ensino superior quanto no fundamental e médio. A análise revela vários métodos inovadores e tradicionais usados para aumentar o envolvimento e a compreensão dos alunos, incluindo ferramentas e jogos educacionais. No entanto, as descobertas destacam a falta de métodos de avaliação padronizados nas práticas atuais, bem como uma lacuna nas abordagens no contexto do ensino fundamental e médio.

1. Introdução

A teoria dos autômatos é o estudo de dispositivos de computação abstratos, geralmente chamados de "máquinas" [Hopcroft et al. 2001]. Ela facilita a modelagem e a análise precisa dos comportamentos computacionais de forma abstrata. Essa teoria é uma parte fundamental da Ciência da Computação, fornecendo a base teórica para várias áreas, incluindo linguagens formais [Hopcroft e Ullman 1969] e compiladores [Mogensen 2024]. Apesar de sua importância, os cursos teóricos de ciência da computação geralmente apresentam desafios consideráveis para os alunos, resultando em altas taxas de reprovação nas aulas introdutórias. Esses desafios decorrem principalmente da natureza abstrata dos conceitos teóricos apresentados, que podem ser difíceis de entender sem o apoio instrucional adequado.

Algumas abordagens foram adotadas para enfrentar esses desafios e aprimorar a experiência de aprendizado. O aprendizado cognitivo [Knobelsdorf et al. 2014], o método Moore [Coppin et al. 2009] e a integração de questões teóricas de computação nos currículos do ensino médio [del Vado V'irseda 2020] estão entre as estratégias destinadas a melhorar a compreensão e o envolvimento dos alunos. No entanto, a eficácia e a implementação dessas abordagens variam, o que leva à necessidade de uma exploração sistemática de como a Teoria dos Autômatos é abordada, avaliada e integrada à Educação em Computação, especialmente no nível K-12. Este artigo tem o objetivo de abordar esses aspectos por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (SLR). Especificamente, ele investiga três questões principais de pesquisa:

1. Como a teoria dos autômatos está sendo abordada no ensino de computação?
2. Como a teoria dos autômatos está sendo avaliada no ensino de computação?
3. Como a teoria dos autômatos está sendo integrada e ensinada no ensino fundamental e médio?

O restante deste documento está organizado da seguinte forma: A Seção 2 discute trabalhos relacionados, situando o artigo no contexto da Teoria de Autômatos na Educação em Computação; a Seção 3 descreve os métodos que seguimos para conduzir a SLR; a Seção 4 apresenta nossas descobertas; a Seção 5 discute os resultados; a Seção 6 conclui o artigo com sugestões para pesquisas futuras.

2. Trabalho relacionado

Um estudo semelhante fornece uma análise abrangente dos simuladores de autômatos usados para fins educacionais nas últimas cinco décadas, enfatizando sua função no ensino da Teoria dos Autômatos nas universidades [Chakraborty et al. 2011]. O estudo categoriza esses simuladores em dois tipos amplos com base em seus paradigmas de design: simuladores baseados em linguagem e centrados em visualização.

Os autores identificaram várias tendências no desenvolvimento e no uso de simuladores de autômatos. Apesar da grande variedade de ferramentas existentes, novos simuladores são continuamente bem-vindos, cada um oferecendo princípios e utilidades exclusivos. A evolução das ferramentas de desenvolvimento de software, como o JFLAP [Procopiuc et al. 1996], influenciou significativamente os recursos do simulador, principalmente no suporte a gráficos. Os desenvolvedores geralmente publicam descrições detalhadas de suas ferramentas na literatura referenciada, garantindo acessibilidade e usabilidade a longo prazo para o ensino e o desenvolvimento de outras ferramentas.

Embora a disponibilidade na Web facilite o acesso generalizado, ela apresenta desafios de rastreabilidade se os endereços da Web forem alterados sem a documentação correspondente na literatura. Técnicas avançadas de gráficos e animação são frequentemente empregadas para aumentar a eficácia educacional, e o feedback dos alunos é crucial para melhorias contínuas. Embora a maioria dos simuladores esteja em inglês, a disponibilidade em outros idiomas expandiu seu alcance para uma comunidade de usuários mais ampla.

Por fim, o artigo [Chakraborty et al. 2011] defende a pesquisa contínua e a integração de simuladores de autômatos na educação, reconhecendo seu papel significativo no ensino e na aprendizagem da Teoria dos Autômatos. Esse trabalho está intimamente relacionado ao nosso estudo, pois analisa de forma abrangente os simuladores de autômatos usados no ensino nas últimas cinco décadas. No entanto, ele foi publicado em 2011 e se concentra apenas em ferramentas de simulação de autômatos, não abordando outras abordagens multidisciplinares relevantes para a educação contemporânea em Teoria de Autômatos.

3. Métodos

Seguimos uma diretriz proposta para SLR em Engenharia de Software [Kitchenham 2004], que sugere três fases principais: Planejamento da revisão, incluindo a identificação da necessidade de uma revisão e o desenvolvimento de um protocolo de revisão; Condução da revisão, incluindo a seleção de estudos, a extração de dados e a síntese; e Relatório da revisão, para o qual seguimos as diretrizes PRISMA [Page et al. 2021].

O protocolo de revisão foi construído com base nas questões de pesquisa apresentadas na introdução. As bases de dados e os mecanismos de busca escolhidos foram selecionados para atingir aqueles especializados em educação (ERIC) e computação/STEM (IEEE Xplore, ACM e SOL), além do Portal de Periódicos da CAPES.

Para levar em conta os bancos de dados pesquisados, inclusive os brasileiros, e capturar um número maior de estudos sem sair do escopo do trabalho, desenvolvemos as seguintes sequências de pesquisa usando palavras relacionadas a "autômatos" e "educação em computação":

- ("transition system" OR "state machine" OR "automaton" OR "automata" OR "automata theory") AND ("computer education" OR "computing education" OR "computer science education" OR "k-12");
- ("sistema de automato" OR "máquina de estado" OR "autômato" OR "autômatos" OR "teoria dos autômatos") AND ("ensino de automato" OR "ensino de autômatos" OR "ensino fundamental" OR "ensino médio").

Aplicamos filtros específicos em cada banco de dados de acordo com os recursos disponíveis para garantir a relevância e a qualidade dos artigos incluídos nesta SLR. No banco de dados ERIC, restringimos

resultados apenas para artigos revisados por pares. No IEEE Xplore, filtramos os resultados incluindo apenas conferências e periódicos. Na ACM Digital Library, a busca a artigos de pesquisa publicados nos últimos cinco anos devido ao grande número de artigos retornados. No SOL, selecionamos anais de eventos e periódicos publicados em inglês e português. Por fim, no banco de dados da CAPES, restringimos a pesquisa a artigos escritos em inglês e português.

Os estudos foram selecionados por meio de uma triagem inicial de títulos e resumos. A excluiu todos os artigos que atendiam aos seguintes critérios de exclusão:

1. Não estar em um contexto educacional, ou seja, não estar relacionado ao ensino-aprendizagem;
2. Estar em um contexto educacional, mas não na área de computação;
3. Autômatos/Teoria dos Autômatos não é um dos tópicos abordados na obra;
4. Apenas mencionar Automata/Automata Theory sem apresentá-lo como tema principal;
5. Ser uma duplicata (já analisada em outros bancos de dados de pesquisa);
6. Não ser um artigo (outro tipo de documento, como um relatório, texto, capítulo de livro, pôster etc.).

Procuramos recuperar os artigos completos de todos aqueles que passaram pela fase de triagem ou cujos títulos e resumos eram insuficientes para determinar se o estudo deveria ser incluído. Por fim, repetimos a análise dos textos completos para selecionar os artigos a serem incluídos na revisão. O processo de extração de dados, orientado pela resposta às nossas perguntas de pesquisa, consistiu em codificar os estudos selecionados de acordo com sua abordagem (usando jogos, ferramentas digitais, aulas teóricas, experimentos ou métodos de ensino), ferramenta (o nome do jogo, atividade ou ferramenta usada, se houver), conceitos envolvidos, público (ensino fundamental e médio e/ou ensino superior), país e avaliação (pré/pós-teste, pesquisas ou questionários).

4. Resultados

Nossa pesquisa retornou 392 documentos; 27 foram removidos por serem duplicados, 311 foram excluídos com base nos critérios de exclusão durante a triagem do título e do resumo e outros 15 foram excluídos na análise do texto completo. Além disso, sete documentos foram removidos porque não foi possível acessar seus textos completos. A Figura 1 detalha os resultados da pesquisa usando o fluxograma PRISMA [Page et al. 2021]. Os estudos selecionados estão listados com suas respectivas abordagens, ferramentas, conceitos, públicos, países e formulários de avaliação levados em consideração na Tabela 1.

Para melhorar a clareza da tabela e facilitar a leitura, foram usadas as seguintes abreviações para os conceitos apresentados: FM (Formal Languages); AT (Automata Theory); DFA (Deterministic Finite Automata); NFA (Nondeterministic Finite Automata); PDA (Pushdown Automata); NPDA (Nondeterministic Pushdown Automata); TM (Turing Machines); FSM (Finite State Machines); RegEx (Regular Expressions); e CFG (Context-Free Grammar).

Tabela 1: Estudos que abordam a teoria dos autômatos no ensino de computação

Estudo	Abordagem	Ferramenta/Recurso	Conceitos abordados	Público	País	Avaliação
[Isayama et al. 2016]	Jogo digital	Automata Puzzle	DFA	K-12	Japão	de registros de jogo; pós-teste personalizado
[Castro- Schez et al. 2009]	Ferramenta educacional	SELFA	FL e AT	Ensino superior	Espanha	Questionário personalizado
[Cogliati et al. 2005]	Ferramenta educacional	Livro hipertexto sobre a teoria da computação	FL e AT	Ensino superior	Estados Unidos	Nenhum

Continua na próxima página

Estudo	Abordagem	Ferramenta/Recurso	Conceitos abordados	Público	País	Avaliação
[Habiballa e Kmet' 2004]	Experimento	Comparação entre métodos de construtivistas e tradicionais	FL e AT	Ensino superior	Público tcheco Re-	Pós-teste personalizado
[Holly et al. 2022]	Jogo digital	Xadrez - Quebra-cabeça - Simulação	Máquinas de estado	Ensino superior	Áustria	Tarefas na ferramenta; questionários personalizados pré, pós e de carga de trabalho
[Dengel 2018]	Ambiente virtual educacional	Caça ao tesouro VR	FSM	Ensino superior e ensino fundamental e médio	Alemanha	Nenhum
[Budiselic et al. 2007]	Ferramenta educacional	RegExpert	RegEx e NFA-epsilon FSM,	Ensino superior	Croácia	Nenhum
[Maurer 2021]	Aula teórica	"Fundamentos da ciência da computação"	PDA e TM	Ensino superior	Estados Unidos	Nenh
[Hartmann et al. 2001]	Experimento	Kara	FSM	Ensino superior e ensino fundamental e médio	Suíça	um
[Dengel 2020]	Ferramenta educacional	Computador da computação Replugged	FSM		Alemanha	Nenh
[Cogumbreiro e Blike 2022]	Ferramenta educacional	Gidayu	NFA e (N)PDA	K-12	Estados Unidos	um
[Bežakova' et al. 2022]	Ferramenta educacional	DAVID, um ex-funcionário da JFLAP	DFA, NFA, RegEx, CFG, e PDAs	Ensino superior	Estados Unidos	Pesquisa personalizada
[Mohammed et al. 2021]	Experimento	eTextbook com ferramentas integradas	DFA, NFA, PDA e TM	Ensino superior	Estados Unidos	Pré e pós-teste personalizados
[Dey et al. 2020]	Aplicativo móvel	Suporte a ambientes de aprendizagem assíncronos com várias representações de MT	TM	Ensino superior	Estados Unidos	Nenhum
[Neto e Terra 2016]	Jogo digital	LFApp	FL	Ensino superior	Estados Unidos	Pesquisa personalizada; Notas e análise das submissões dos deveres de casa
[Honda et al. 2023]	Ferramenta educacional	Automóveis	DFA	Ensino superior	Brasil	Pós-teste personalizado; pesquisa de opinião
[Jovanovic' et al. 2021]	Ferramenta educacional	ComVis Finite Au- tomata	Autômatos finitos	Ensino superior	Sérvia e Índia	Pesquisa de opinião opcional personalizada
[Cavalcante et al. 2004].	Ferramenta educacional / experimento	JFLAP 4.0	TM de várias fitas, sistemas L, formações gramaticais e tipos de análise	Ensino superior	Estados Unidos	Nenhum
[Hung e Rodger 2000]	Método de ensino	JFLAP e Pa'te' novos recursos	RegEx, NFA (JFLAP); Árvore de análise para gramáticas irrestritas (Pa'te')	Ensino superior	Estados Unidos	Questionário MEEGA+
[Chesnevar et al. 2004]	Ferramenta educacional	Estratégias didáticas para promover aprendizagem significativa	FL e AT	Ensino superior	Estados Unidos / Espanha	Pesquisa Likert
[Gramond e Rodger 1999]	Ferramenta educacional	JFLAP	LF e AT	Ensino superior	Estados Unidos	Questionário de avaliação personalizado
[Rodger et al. 1997]		JFLAP, Pa'te', e PumpLemma	Autômatos finitos, PDA e TM (JFLAP); Análise de análise de gramática e CFGs para a transformação da forma normal de Chomsky (Pa'te'); Como provar que linguagens específicas não são regulares (PumpLemma)	Ensino superior	Estados Unidos	Nenhum
						Nenhum (feedback empírico)
						Nenhum (feedback informal)
						Nenhum

Continua na próxima página

Estudo	Abordagem	Ferramenta/Recurso	Conceitos abordados	Público	País	Avaliação
[Korte et al. 2007]	Ferramenta educacional	Ferramenta educacional de criação de jogos	Autômatos de estado finito, RegEx e TM	Ensino superior	Escócia	Nenhum (observações informais)
[Wagenknecht and Friedman 1998]	Método de ensino	Linguagem de programação Scheme	Autômatos não determinísticos e uni- versais	Ensino superior	-	Entrevistas individuais personalizadas
[McDonald 2002]	Ferramenta educacional	Animação interativa de autômatos pushdown	PDA	Ensino superior	Estados Unidos	
[Grinder 2002].	Ferramenta educacional	Animação de autômatos	(N)DFA	Ensino superior	Estados Unidos	Nenh
[Grinder 2003].	Ferramenta educacional	Animador de automação de estado finito	(N)DFN	Ensino superior	Estados Unidos	um
[Robinson et al. 1999]	Ferramenta educacional	Kit de ferramentas de computabilidade Java (JCT)	Autômatos finitos e TM	Ensino superior	Estados Unidos	Nenh
[Vieira et al. 2004].	Ferramenta educacional		RegEx, Regular, (N)DFA e Máquinas Moore e Mealy	Ensino superior	Brasil	um
[Dershowitz e Dowek 2016].	Método de ensino	Emulador de idiomas	TM	Ensino superior e ensino fundamental e médio	-	Testes personalizados (e em papel e lápis)
		Modelos de computação para TM				Feedback informal
						Teste informal e feedback
						Nenhum

4.1. Como a teoria dos autômatos está sendo abordada no ensino de computação?

A teoria dos autômatos é abordada no ensino de computação por meio de vários métodos inovadores e tradicionais para aumentar o envolvimento e a compreensão dos alunos. Ferramentas interativas Gidayu [Cogumbreiro and Blike 2022], JFLAP [Gramond and Rodger 1999] e RegEx- pert [Budiselic et al. 2007] incorporam visualizações e simulações para ajudar os alunos a compreender conceitos complexos, como Autômatos Finitos Determinísticos, Autômatos Finitos Não Determinísticos, Autômatos Pushdown e Máquinas de Turing. Jogos educacionais e aplicativos móveis, incluindo Automigos [Honda et al. 2023] e LFApp [Neto e Terra 2016], empregam a gamificação para tornar o processo de aprendizagem mais envolvente. Ferramentas de realidade virtual, como Treasure Hunt VR [Dengel 2018], oferecem experiências imersivas para visualizar máquinas de estado finito e outros conceitos de autômatos.

Os métodos e didáticos tradicionais, como palestras e estratégias de ensino estruturadas, continuam a promover substancialmente o aprendizado de linguagens formais e assuntos de autômatos. Além disso, métodos de ensino inovadores, como modelos bidimensionais de computação, são usados para ensinar máquinas de Turing [Dershowitz e Dowek 2016], abordando tanto alunos do ensino superior quanto do ensino fundamental e médio.

4.2. Como a teoria dos autômatos está sendo avaliada no ensino de computação?

A avaliação da Teoria dos Autômatos no ensino de computação emprega um conjunto de métodos para avaliar o aprendizado dos alunos e a eficácia das abordagens de ensino. No entanto, a maioria dos estudos não teve avaliações formais ou se baseou em avaliações personalizadas ou desenvolvidas pelo próprio aluno. Alguns dos métodos de avaliação mais formais incluem pesquisas e questionários, como o MEEGA+ [Petri et al. 2016] e pesquisas do tipo Likert [DeVellis 2003], que coletam feedback dos alunos sobre suas experiências de aprendizagem. Os pré e pós-testes são ocasionalmente usados para medir o impacto de intervenções educacionais específicas. As métricas tradicionais, como as notas dos alunos e os trabalhos de casa, fornecem uma linha de base para a avaliação, enquanto o feedback informal dos alunos oferece percepções adicionais de suas experiências de aprendizado. Apesar da diversidade dos métodos de avaliação, há uma dependência significativa de abordagens de avaliação personalizadas/desenvolvidas pelo próprio aluno e adaptadas a contextos educacionais específicos, refletindo a necessidade de métodos de avaliação mais padronizados nesse campo.

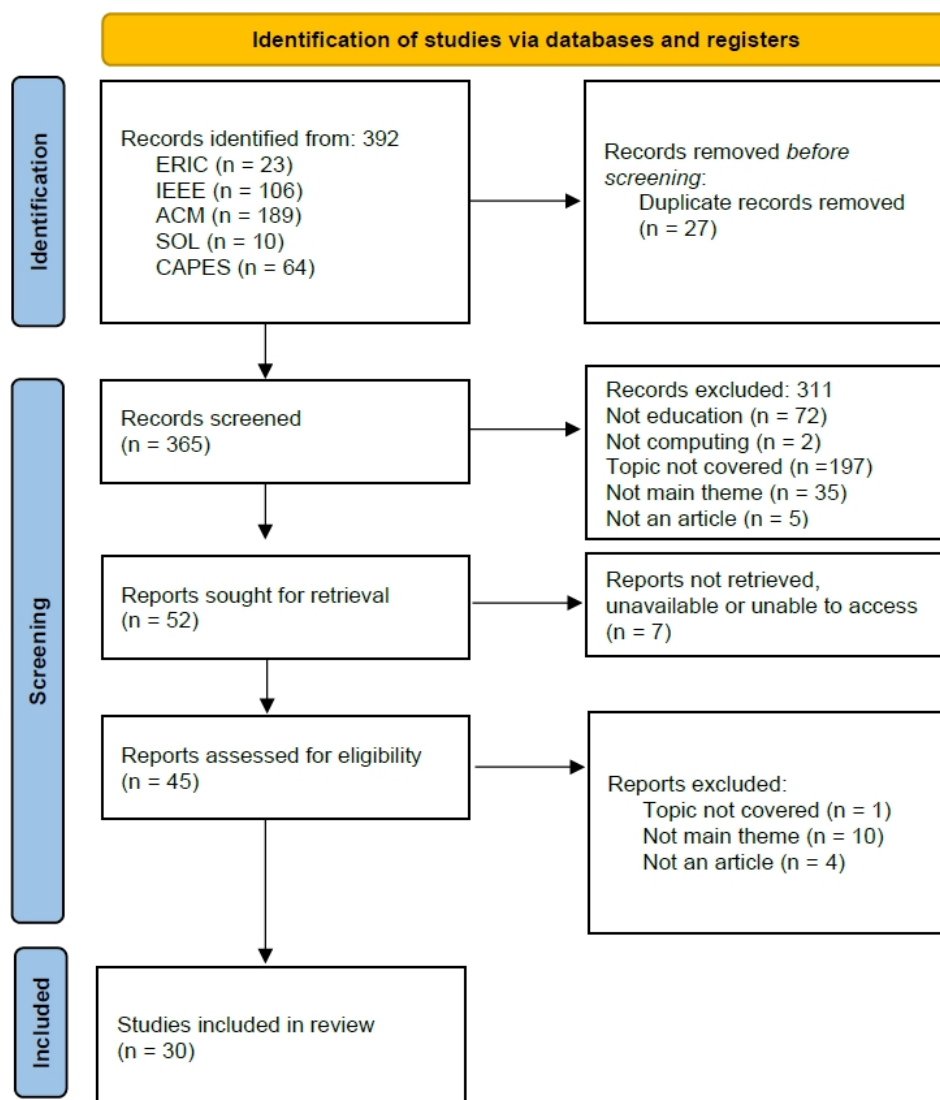


Figura 1. Fluxograma PRISMA da revisão

4.3. Como a teoria dos autômatos está sendo integrada e ensinada no ensino fundamental e médio?

A teoria dos autômatos está sendo integrada e ensinada no ensino fundamental e médio, principalmente por meio de jogos digitais e ferramentas interativas criadas para tornar os conceitos abstratos mais acessíveis aos alunos mais jovens. Por exemplo, no Japão, o jogo Automata Puzzle [Isayama et al. 2016] foi projetado especificamente para alunos do ensino fundamental e médio (9 a 12 anos de idade), com foco no ensino de Autômatos Finitos Determinísticos. Na Suíça, a ferramenta educacional Kara [Hartmann et al. 2001] é usada para ensinar máquinas de estado finito em diferentes níveis educacionais, incluindo o ensino fundamental e médio. Na Alemanha, o Treasure Hunt VR [Dengel 2018] oferece um ambiente de realidade virtual inovador e imersivo no qual os alunos do ensino fundamental e médio podem explorar e aprender sobre máquinas de estado finito. Além disso, o Computer Science Replugged [Dengel 2020], uma coleção de atividades de aprendizagem gratuitas, ensina conceitos de ciência da computação, incluindo a teoria dos autômatos, por meio de atividades envolventes. Esses métodos destacam a importância das experiências interativas e imersivas para tornar assuntos complexos, como a teoria dos autômatos, acessíveis aos alunos mais jovens.

4.4. Alguns exemplos

Esta subseção apresenta alguns dos trabalhos mais relevantes identificados durante a SLR. Os trabalhos foram selecionados com base em critérios como inovação nas abordagens educacionais, impacto relatado no aprendizado dos alunos e uso de ferramentas interativas e tecnologias avançadas. Os trabalhos selecionados fornecem uma visão abrangente das diversas estratégias usadas para ensinar Teoria dos Autômatos na Educação em Computação.

O primeiro estudo, apresentado por Cavalcante et al. (2004), introduz a ferramenta JFLAP 4.0, desenvolvida para criar um curso visual e interativo sobre Teoria dos Autômatos. O JFLAP 4.0 permite que os alunos interajam visualmente com autômatos, gramáticas e máquinas de Turing, facilitando a compreensão de conceitos complexos. Essa nova versão abrange tópicos de onze capítulos de um curso de Linguagens Formais e Autômatos, incluindo novos recursos, como máquinas de Turing com várias fitas, sistemas L, transformações de gramática e diferentes tipos de análise. O JFLAP 4.0 também oferece novas abordagens para conversão entre autômatos finitos não determinísticos e expressões regulares e para correspondência e comparação de autômatos. Utilizada em cursos na Duke University, a ferramenta provou ser eficaz, fornecendo um meio prático e interativo para o ensino da Teoria dos Autômatos.

A avaliação da ferramenta JFLAP 4.0 na Duke University, especificamente no curso CPS 140 durante a primavera de 2003, revelou um feedback positivo dos alunos. Dos 33 alunos, todos acharam o JFLAP fácil de usar. Dos 27 alunos que não consultaram a documentação de ajuda, os 6 que o fizeram consideraram-na útil. Quando perguntados sobre sua preferência entre criar autômatos finitos usando o JFLAP ou desenhá-los no papel, 17 alunos preferiram usar o JFLAP, 12 preferiram desenhar no papel primeiro e depois testar no JFLAP e 2 preferiram apenas o papel. A Figura 2 mostra um exemplo do JFLAP 4.0.

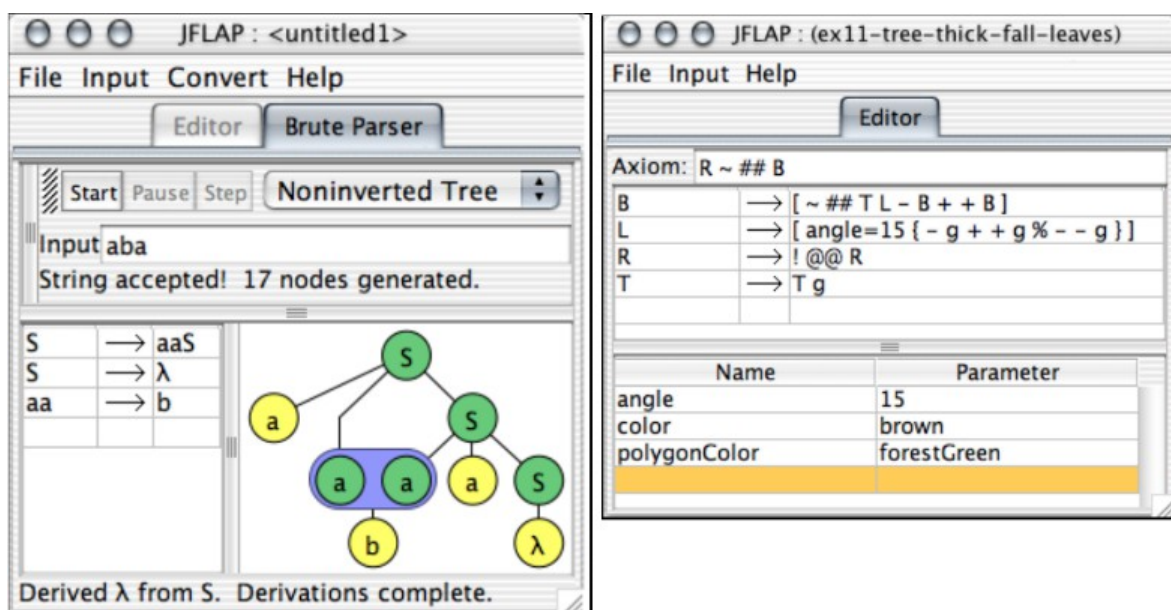


Figura 2. Ferramenta educacional do JFLAP 4.0. Fonte: [Cavalcante et al. 2004]

O segundo estudo apresenta o sistema de software educacional Kara [Hartmann et al. 2001], que permite que os alunos programem uma joaninha virtual usando máquinas de estado finito. Os alunos sequenciam comandos para cada estado da joaninha, fazendo a transição para o próximo estado no final de cada sequência. Eles também podem ramificar a execução com base em entradas de "sensores" na joaninha, como a detecção de árvores ou folhas. O Kara inclui extensões como o TuringKara para máquinas de Turing e o JavaKara para facilitar a transição para linguagens de programação do mundo real.

como o Java.

Amplamente utilizado na Alemanha, Áustria e Suíça, o Kara é empregado desde o ensino fundamental até o superior para ensinar programação de forma motivadora. Os iniciantes apreciam sua simplicidade e a consideram propícia para aprender conceitos de programação antes de avançar para linguagens mais tradicionais. A Figura 3 mostra um exemplo da ferramenta educacional Kara.

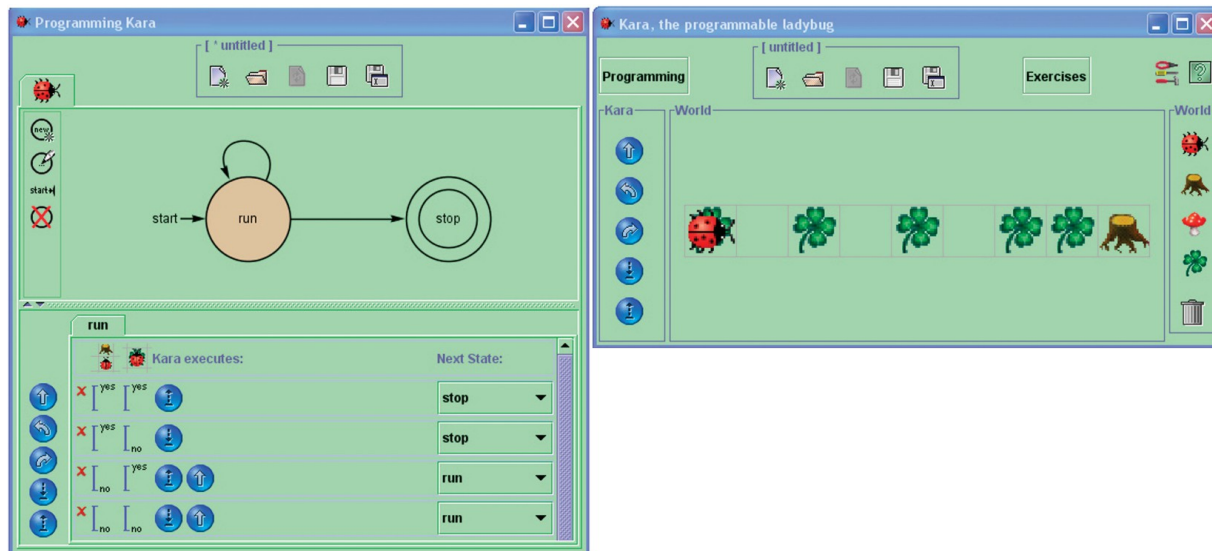


Figura 3. Ambiente de programação Kara (esquerda) e placa (direita). Fonte: [Kiesmu" ller 2009]

O terceiro estudo propõe um livro eletrônico integrado para o ensino de linguagens formais e autômatos [Mohammed et al. 2021]. Utilizando a plataforma OpenDSA, o eTextbook combina texto, visualizações, simuladores e muitos exercícios interativos por meio da biblioteca JSAV. A ferramenta, chamada OpenFLAP, reimplementa e expande partes do JFLAP, oferecendo exercícios autoavaliados que testam a capacidade dos alunos de criar Autômatos Finitos Determinísticos, Finitos Não Determinísticos, Autômatos Pushdown e Máquinas de Turing, bem como exercícios de proficiência que exigem a aplicação de algoritmos.

A avaliação da ferramenta incluiu estudos comparativos para testar a hipótese de que o eTextbook aumenta a interação do aluno e oferece mais oportunidades de prática. Os resultados indicaram que os alunos que usaram o eTextbook integrado tiveram um desempenho melhor do que o grupo de controle que usou um livro-texto tradicional. O feedback dos alunos foi positivo, destacando a utilidade dos exercícios autoavaliados. Assim, o artigo conclui que o eTextbook com visualizações e exercícios autoavaliados melhora efetivamente a compreensão dos alunos sobre Linguagem Formal e Autômatos, propondo futuras expansões e aprimoramentos das funcionalidades do OpenFLAP e do eTextbook. A Figura 4 mostra um exemplo do recurso.

O quarto trabalho apresenta o Automigos, um jogo educacional projetado para facilitar o aprendizado de tópicos complexos de computação, especificamente Autômatos Finitos Determinísticos [Honda et al. 2023]. O jogo emprega a teoria de aprendizagem construtivista de Jean Piaget e tem como objetivo aprimorar a compreensão dos alunos por meio da gamificação. O processo de design envolve uma sequência metódica de etapas, incluindo concepção, gamificação e avaliação, para garantir que o conceito educacional seja efetivamente integrado à mecânica do jogo.

O Automigos foi recebido de forma positiva por seu público-alvo, com comentários favoráveis sobre a estética, a mecânica e a diversão geral do jogo. No entanto, algumas preocupações foram observadas

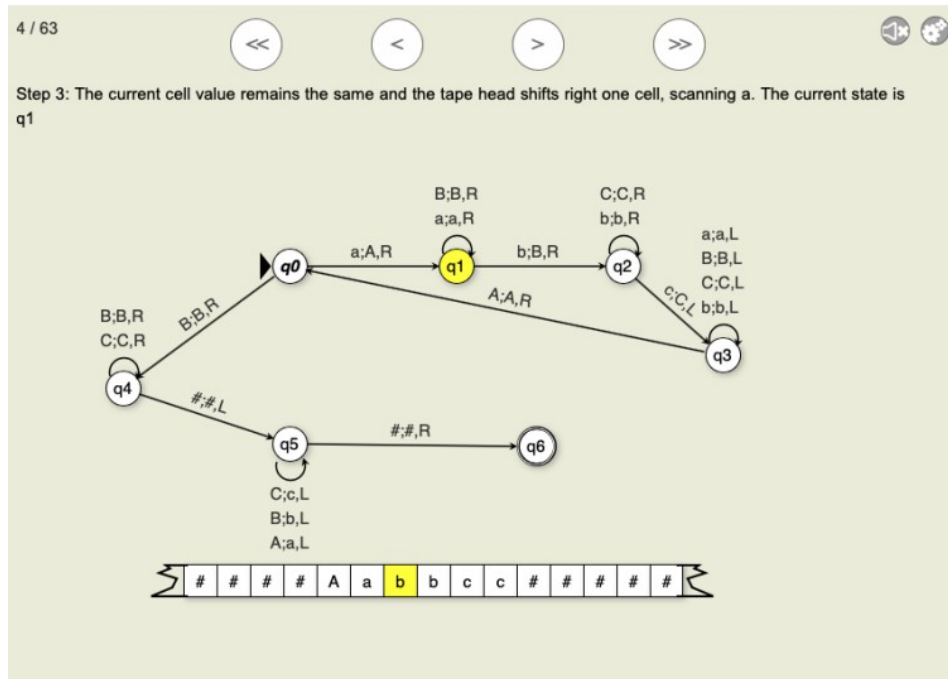


Figura 4. Exemplo de uma máquina de Turing aceitando uma string. Fonte: [Mohammed et al. 2021]

com relação à clareza das regras e à compreensão do conteúdo. O estudo destaca os desafios da criação de jogos educacionais que ensinam tópicos complexos de forma eficaz, enfatizando a importância da avaliação completa e do design iterativo para equilibrar o valor educacional e o envolvimento. O Automigos representa um esforço significativo para tornar conceitos computacionais abstratos mais acessíveis e envolventes para os alunos por meio de ferramentas educacionais inovadoras. A Figura 5 mostra um exemplo do jogo.

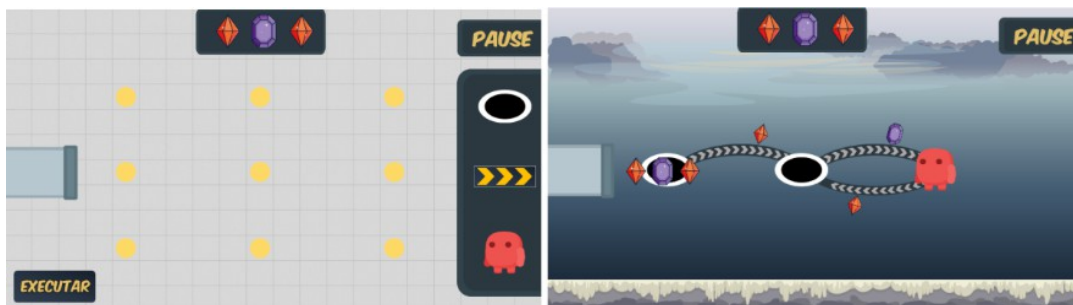


Figura 5. Jogo educacional Automigos. Fonte: [Honda et al. 2023]

5. Discussão

Os resultados do SLR destacam o uso de ferramentas interativas e gamificação para ensinar conceitos da Teoria dos Autômatos. Os educadores podem aumentar efetivamente o envolvimento e a compreensão dos alunos integrando simulações interativas e elementos de jogos ao currículo. Essas abordagens tornam os conceitos teóricos abstratos mais tangíveis e promovem ambientes de aprendizado ativo em que os alunos podem experimentar, visualizar e compreender intuitivamente ideias complexas. Além disso, a gamificação das atividades de aprendizado incentiva a competição, a colaboração e a motivação inerente entre os alunos, o que pode melhorar os resultados do aprendizado e as taxas de retenção nessa área fundamental da ciência da computação.

Por outro lado, a avaliação do ensino da Teoria dos Autômatos revela alguns desafios. Embora vários métodos sejam empregados para avaliar o aprendizado do aluno e a eficácia das abordagens de ensino, muitos estudos não têm avaliações formais ou dependem muito de avaliações personalizadas/desenvolvidas pelo próprio aluno. Isso indica uma necessidade significativa de desenvolver métodos de avaliação mais padronizados e universalmente aplicáveis para garantir uma avaliação consistente e abrangente dos resultados da aprendizagem dos alunos.

Além disso, a integração da Teoria dos Autômatos no ensino fundamental e médio ressalta a importância de adaptar as ferramentas e os métodos educacionais aos níveis cognitivos e estilos de aprendizado dos alunos mais jovens. O sucesso dos jogos digitais e das ferramentas de realidade virtual nesse contexto sugere que as experiências de aprendizagem interativas e imersivas são particularmente eficazes para os alunos do ensino fundamental e médio.

Por exemplo, no Brasil, as atualizações recentes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [Brasil 2022] incluíram um apêndice dedicado ao ensino de computação, descrevendo o conteúdo essencial para o ensino fundamental e médio. Apesar desses avanços, ainda há uma falta significativa de pesquisas e iniciativas educacionais que abordem especialmente a Teoria dos Autômatos para alunos do ensino fundamental e médio no Brasil. Questões como a disponibilidade de recursos adequados e o treinamento de professores precisam ser abordadas para integrar esses métodos de ensino de forma eficaz.

6. Conclusão

Este trabalho analisou como a teoria dos autômatos está sendo ensinada na educação em computação. As abordagens atuais para o ensino da teoria dos autômatos na em computação, especialmente no ensino fundamental e médio, demonstram uma mudança significativa em direção a métodos mais interativos e envolventes. Embora essas inovações tenham apresentado resultados promissores na melhoria da compreensão e do envolvimento dos alunos, o campo ainda enfrenta desafios na padronização dos métodos de avaliação. Pesquisas futuras devem se concentrar no desenvolvimento e na validação de ferramentas de avaliação mais padronizadas e na exploração do impacto de longo prazo desses métodos inovadores de ensino nos resultados de aprendizagem dos alunos em Teoria de Autômatos.

Além disso, mesmo com o apêndice que trata da inclusão da computação na BNCC, poucos trabalhos abordam especificamente esse tópico no contexto brasileiro. Essa lacuna na literatura ressalta a necessidade de mais pesquisas e iniciativas educacionais voltadas para a integração efetiva de conceitos e habilidades de computação no currículo nacional. O desenvolvimento de recursos que se alinham às necessidades e aos desafios educacionais locais pode facilitar a implementação da Educação em Computação em todo o país, promovendo a alfabetização digital e preparando os alunos para as demandas de uma sociedade impulsionada pela tecnologia. Os esforços nesse sentido são fundamentais para promover a igualdade educacional e capacitar as futuras gerações com competências computacionais essenciais.

Referências

- Balakrishnan, I., Fluet, K., Hemaspaandra, E., Miller, H., e Nunez, D. E. (2022). Effective Succinct Feedback for Intro CS Theory: A JFLAP Extension. Em *Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education - Volume 1, SIGCSE 2022*, página 976-982, Nova York, NY, EUA. Association for Computing Machinery.
- Brasil (2022). Normas sobre Computação na Educação Básica. http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=182481-texto-referencia-normas-sobre-computacao-na-educacao-basica&category_slug=abril-2021-pdf&Itemid=30192. Online. Acessado em março de 2024.

- Budiselic, I., Sribljic, S. e Popovic, M. (2007). RegExpert: uma ferramenta para visualização de expressões regulares. Em *EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool"*, páginas 2387-2389.
- Castro-Schez, J. J., del Castillo, E., Hortolano, J., e Rodriguez, A. (2009). Designing and Using Software Tools for Educational Purposes: FLAT, um estudo de caso. *IEEE Transactions on Education*, 52(1):66-74.
- Cavalcante, R., Finley, T., e Rodger, S. H. (2004). Um curso visual e interativo de teoria de autômatos com o JFLAP 4.0. Em *Proceedings of the 35th SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 140-144.
- Chakraborty, P., Saxena, P. C., e Katti, C. P. (2011). Fifty Years of Automata Simulation (Cinquenta anos de simulação de autômatos): A Review. *ACM Inroads*, 2(4):59-70.
- Chesnevar, C. I., Gilez, M. P., e Maguitman, A. G. (2004). Didactic Strategies for Promoting Significant Learning in Formal Languages and Automata Theory (Estratégias didáticas para promover o aprendizado significativo em linguagens formais e teoria de autômatos). *Boletim ACM SIGCSE*, 36(3):7-11.
- Cogliati, J. J., Goosey, F. W., Grinder, M. T., Pascoe, B. A., ROSS, R. J. e Williams, C. J. (2005). Realizing the Promise of Visualization in the Theory of Computing (Realizando a promessa da visualização na teoria da computação). *J. Educ. Resour. Comput.*, 5(2):5-es.
- Cogumbreiro, T. e Blike, G. (2022). Gidayu: Visualizing Automaton and Their Computations. Em *Proceedings of the 27th ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education Vol. 1*, ITiCSE '22, página 110-116, Nova York, NY, EUA. Associação para Máquinas de Computação.
- Coppin, C. A., Mahavier, W. T., May, E. L. e Parker, E. (2009). *O Método Moore: A Pathway to Learner-Centered Instruction (Um caminho para a instrução centrada no aluno)*. Número 75. MAA.
- del Vado V'irseda, R. (2020). Dos resultados de impossibilidade matemática do currículo do ensino médio à ciência da computação teórica. Em *Proceedings of the 20th Koli Calling International Conference on Computing Education Research*, páginas 1-5.
- Dengel, A. (2018). Buscando os tesouros do ensino teórico da ciência da computação: Realidade virtual educacional para a visualização de máquinas de estado finito. Em *2018, Conferência Internacional do IEEE sobre Ensino, Avaliação e Aprendizagem para Engenharia (TALE)*, páginas 1107-1112.
- Dengel, A. (2020). Qual é a importância da imersão para o aprendizado em jogos de reinserção em ciência da computação? Em *Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, SIGCSE '20, página 1165-1171, Nova York, NY, EUA. Association for Computing Machinery.
- Dershowitz, N. e Dowek, G. (2016). Universality in Two Dimensions (Universalidade em duas dimensões). *Journal of Logic and Computation*, 26(1):143-167.
- DeVellis, R. F. (2003). *Scale Development (Desenvolvimento de escalas): Theory and Applications*. Sage London, 13:0-176.
- Dey, P. P., Sinha, B. R., e Amin, M. (2020). Apoio a alunos assíncronos com múltiplos Representations. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 36(2):108-116.
- Gramond, E. e Rodger, S. H. (1999). Using JFLAP to Interact with Theorems in Automata Theory (Usando JFLAP para interagir com teoremas na teoria dos autômatos). Em *The Proceedings of the Thirtieth SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 336-340.

- Grinder, M. T. (2002). Animating Automata: A Cross-Platform Program for Teaching Finite Automata (Animando Autômatos: Um Programa Multiplataforma para o Ensino de Autômatos Finitos). Em *Proceedings of the 33rd SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 63-67.
- Grinder, M. T. (2003). A Preliminary Empirical Evaluation of the Effectiveness of a Finite State Automaton Animator (Avaliação empírica preliminar da eficácia de um animador de autômato de estado finito). *Boletim da ACM Sigcse*, 35(1):157-161.
- Habiballa, H. e Kmet', T. (2004). Theoretical Branches in Teaching Computer Science (Ramos teóricos no ensino da ciência da computação). *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 35(6):829- 841.
- Hartmann, W., Nievergelt, J., e Reichert, R. (2001). Kara, Finite State Machines, and the Case for Programming as Part of General Education (Kara, máquinas de estado finito e o caso da programação como parte da educação geral). Em *Proceedings IEEE Symposia on Human-Centric Computing Languages and Environments (Cat. No.01TH8587)*, páginas 135-141.
- Holly, M., Tscherko, J.-H., e Pirker, J. (2022). Uma simulação interativa de quebra-cabeça de xadrez para o ensino de ciência da computação. Em 2022, 8ª Conferência Internacional da Rede de Pesquisa em Aprendizagem Imersiva (iLRN), páginas 1-5.
- Honda, F., Pires, F., Pessoa, M., e Oliveira, E. (2023). Automigos: Llearning Design para o de Auto^matos Finitos Determin'isticos. In *Anais do XXXI Workshop so- bre Lla~ o em Com~ o*, pages 545-556, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Hopcroft, J. E., Motwani, R., e Ullman, J. D. (2001). Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation (Introdução à teoria dos autômatos, linguagens e computação). *ACM Sigact News*, 32(1):60-65.
- Hopcroft, J. E. e Ullman, J. D. (1969). *Formal Languages and their Relation to Automata (Linguagens formais e sua relação com os autômatos)*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., EUA.
- Hung, T. e Rodger, S. H. (2000). Increasing Visualization and Interaction in the Automata Theory Course (Aumentando a visualização e a interação no curso de teoria de autômatos). *Boletim ACM SIGCSE*, 32(1):6-10.
- Isayama, D., Ishiyama, M., Relator, R., e Yamazaki, K. (2016). Educação em ciência da computação para alunos do ensino fundamental e médio: Teaching the Concept of Automata (Ensinando o conceito de autômatos). *ACM Trans. Comput. Educ.*, 17(1).
- Li, N., Mei, D., Shi, S., Li, Z., e Chakraborty, P. (2021). Ensino de conceitos relacionados a autômatos finitos usando o ComVis. *Aplicativos de computador na educação em engenharia*, 29(5):994-1006.
- Keller, U. (2009). Diagnosing Learners' Problem-solving Strategies Using Learning Environments with Algorithmic Problems in Secondary Education (Diagnosticando as estratégias de resolução de problemas dos alunos usando ambientes de aprendizagem com problemas algorítmicos no ensino médio). *ACM Transactions on Computing Education (TOCE)*, 9(3):1-26.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews [Procedimentos para realizar revisões sistemáticas]. *Keele, Reino Unido, Keele University*, 33(2004):1-26.
- Knobelsdorf, M., Kreitz, C., e Böhne, S. (2014). Teaching Theoretical Computer Science Using a Cognitive Apprenticeship Approach (Ensino de ciência da computação teórica usando uma abordagem de aprendizado cognitivo). Em *Proceedings of the 45th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 67-72.
- Korte, L., Anderson, S., Pain, H., e Good, J. (2007). Learning by Game-Building: A Novel Approach to Theoretical Computer Science Education (Uma nova abordagem para o ensino teórico da ciência da computação). Em *Proceedings of the 12th Annual SIGCSE Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*, páginas 53-57.

- Maurer, P. M. (2021). Teoria da ciência da computação de um ponto de vista prático. Em *2021, Conferência Internacional sobre Ciência da Computação e Inteligência Computacional (CSCI)*, páginas 920-924.
- McDonald, J. (2002). Interactive Pushdown Automata Animation (Animação interativa de autômatos pushdown). Em *Proceedings of the 33rd SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 376-380.
- Mogensen, T.. (2024). *Introduction to Compiler Design*. Springer Nature.
- Mohammed, M., Shaffer, C. A., e Rodger, S. H. (2021). Teaching Formal Languages with Visualizations and Auto-Graded Exercises (Ensinando Linguagens Formais com Visualizações e Exercícios Auto-Gradados). Em *Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education, SIGCSE '21*, página 569-575, Nova York, NY, EUA. Association for Computing Machinery.
- Neto, J. e Terra, R. (2016). LFApp: Um Aplicativo Móvel para o Ensino de Linguagens Formais e Auto^matos. In *Anais do XXIV Workshop sobre Teoria da Computação*, pages 2196-2205, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., et al. (2021). The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews (Uma Diretriz Atualizada para Relatar Revisões Sistemáticas). *Bmj*, 372.
- Petri, G., von Wangenheim, C. G., e Borgatto, A. F. (2016). MEEGA+: Evolução de um modelo para a avaliação de jogos educacionais. *INCoD/GQS*, 3:1-40.
- Procopiuc, M., Procopiuc, O., e Rodger, S. H. (1996). Visualization and Interaction in the Computer Science Formal Languages Course with JFLAP (Visualização e interação no curso de linguagens formais de ciência da computação com JFLAP). Em *Technology-Based Re- Engineering Engineering Education Proceedings of Frontiers in Education FIE'96 26th Annual Conference*, volume 1, páginas 121-125. IEEE.
- Robinson, M. B., Hamshar, J. A., Novillo, J. E., e Duchowski, A. T. (1999). A Java-based Tool for Reasoning About Models of Computation Through Simulating Finite Automata and Turing Machines (Uma ferramenta baseada em Java para raciocinar sobre modelos de computação por meio da simulação de autômatos finitos e máquinas de Turing). Em *The Proceedings of the Thirtieth SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 105-109.
- Rodger, S. H., Bilska, A. O., Leider, K. H., Procopiuc, M., Procopiuc, O., Salemme, J. R. e Tsang, E. (1997). A Collection of Tools for Making Automata Theory and Formal Languages Come Alive (Uma coleção de ferramentas para dar vida à teoria dos autômatos e às linguagens formais). Em *Proceedings of the Twenty-Eighth SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, páginas 15-19.
- Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., e Vieira, N. J. (2004). Language Emulator, a Helpful Toolkit in the Learning Process of Computer Theory (Emulador de linguagem, um kit de ferramentas útil no processo de aprendizado de teoria da computação). *ACM Sigcse Bulletin*, 36(1):135-139.
- Wagenknecht, C. e Friedman, P. D. (1998). Teaching Nondeterministic and Universal Automata Using Scheme. *Computer Science Education*, 8(3):197-227.