

Ferramentas de apoio para a disciplina de Linguagens Formais e Autômatos: uma proposta de uso

Pedro Paiva, Maurício Souza, Ricardo Terra

Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Lavras (UFLA)
Lavras – MG – Brasil

p.paiva.pdo@gmail.com, {mauricio.ronny,terra}@ufla.br

Abstract. *Formal Languages and Automata (FLA) is a classic course in computer science curricula, but it can be challenging due to its theoretical and mathematical nature. This study, therefore, proposes a strategy for using tools centered around the idea that digital educational resources enhance the potential and effectiveness of traditional teaching and learning processes. In summary, we mapped the functionalities provided by six tools to the 28 content topics commonly covered in the course. We argue that Automata Tutor, JFLAP, and LFAweb are complementary and can be used together. Automata Tutor for exercise application, JFLAP for simulation algorithms, and LFAweb for transformation algorithms.*

Resumo. *Linguagens Formais e Autômatos (LFA) é um componente clássico em ementas de cursos na área da computação, porém desafiador devido à natureza teórica e matemática dos conteúdos. Este estudo, portanto, propõe uma estratégia de uso de ferramentas centrado na ideia de que recursos educacionais digitais expandem o potencial e a eficácia do processo de ensino e aprendizagem tradicional. Em síntese, mapeou-se as funcionalidades providas por seis ferramentas com os 28 conteúdos recorrentemente abordados na disciplina. Conclui-se que Automata Tutor, JFLAP e LFAweb são complementares e podem ser usadas em conjunto. Automata Tutor para aplicação de exercícios, JFLAP para algoritmos de simulação e LFAweb para algoritmos de transformação.*

1. Introdução

A disciplina de Linguagens Formais e Autômatos (LFA) possui grande relevância nos cursos de computação, dado que estuda conceitos importantes para a formação profissional na área [Chesnevar et al. 2004] e dá suporte para disciplinas como Compiladores e Inteligência Artificial [Dognini and Raabe 2003]. Em contrapartida, é desafiador por parte dos professores ensinarem e difícil para alunos aprenderem a teoria dos autômatos e as linguagens formais devido a natureza matemática dos conteúdos [Vijayalaskhmi and Karibasappa 2012].

É comum que os conteúdos programáticos e didáticos da disciplina sejam ensinados usando uma abordagem tradicional, centrada no professor, com aulas expositivas que oferecem pouca diferenciação e inovação [Ramos 2009]. No entanto, essa abordagem pode limitar a exploração de novas perspectivas que poderiam contribuir significativamente para a qualidade do ensino e aprendizagem. Entende-se que recursos educacionais

digitais expandem o potencial e a eficácia do processo de ensino e aprendizagem tradicional, uma vez que a utilização correta desses recursos propicia o aprendizado lúdico do estudante [Cascini and Campos 2015].

Diante disso, o objetivo do trabalho é propor uma estratégia de uso de ferramentas que podem apoiar o processo de ensino e aprendizagem de LFA, com a intenção de otimizar esse processo durante o curso da disciplina. A elaboração da proposta consiste em: (i) analisar os conteúdos presentes nos livros didáticos e ementas de LFA das principais universidades do país; (ii) buscar ferramentas que auxiliam no ensino e aprendizagem de LFA e (iii) analisar como as ferramentas disponíveis apoiam os principais conteúdos.

Além desta seção introdutória, o restante do trabalho é organizado na estrutura descrita a seguir. A Seção 2 estabelece os principais conceitos e escopo da disciplina de LFA. A Seção 3 define as questões de pesquisa que norteiam o estudo realizado e apresenta os procedimentos e métodos aplicados durante a execução da pesquisa. A Seção 4 apresenta os resultados obtidos para as questões de pesquisa definidas. A Seção 5 propõe uma estratégia de uso de ferramentas para apoiar professores na condução da disciplina LFA. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais do trabalho.

2. A disciplina de Linguagens Formais e Autômatos

Linguagens Formais e Autômatos é uma importante área da computação que aborda modelos matemáticos que possibilitam a especificação e reconhecimento de linguagens, suas propriedades e características [Sudkamp 2007]. Essa área é considerada clássica no contexto da computação, uma vez que seus principais resultados foram obtidos nas décadas de 1960 e 1970 [Ramos 2009].

Sua base de conhecimento é dividida em duas subáreas, a teoria dos autômatos e a teoria das linguagens formais, as quais eram consideradas independentes até a década de 60. A partir de pesquisas e resultados obtidos, principalmente pelo linguista Noam Chomsky em 1956, que essas duas subáreas foram unidas e se tornaram indissociáveis uma da outra [Ramos 2009]. O trabalho de Chomsky foi de prover sistemas formais para geração de palavras sintaticamente corretas [Sudkamp 2007], conhecido como Hierarquia de Chomsky. A Figura 1 ilustra a hierarquia e a associação entre as duas subáreas [Sudkamp 2007].

Tipo	Linguagem	Gramática	Máquina aceitadora
Tipo 0	Linguagem Recursivamente Enumerável (LRE)	Gramática Irrestrita (GI)	Máquina de Turing (MT)
Tipo 1	Linguagem Recursiva (LREC)	Gramática Sensível ao Contexto (GSC)	Autômato Linearmente Limitado (ALL)
Tipo 2	Linguagem Livre de Contexto (LLC)	Gramática Livre de Contexto (GLC)	Autômato com Pilha (AP)
Tipo 3	Linguagem Regular (LR)	Gramática Regular (GR)	Autômato Finito (AF)



↑
Maior poder computacional
Menos restritiva

Figura 1. Hierarquia de Chomsky

3. Métodos

O objetivo geral deste estudo consiste em identificar um conjunto de ferramentas para apoiar o processo de ensino e aprendizagem da disciplina de LFA e propor uma estratégia de uso para essas ferramentas. A contribuição esperada é a otimização do ensino e aprendizagem dos conteúdos trabalhados durante a disciplina de LFA. Desta forma, três questões de pesquisa foram definidas para apoiar o alcance desse objetivo:

- **QP1.** *Quais conteúdos são mais recorrentes no contexto de ensino de LFA?* O objetivo é encontrar nas ementas das universidades e em livros didáticos quais são os conteúdos de ensino e como são trabalhados em LFA.
- **QP2.** *Quais as ferramentas disponíveis para o ensino e aprendizagem de LFA?* O objetivo é encontrar ferramentas que auxiliem o ensino e aprendizagem de LFA.
- **QP3.** *Como as ferramentas disponíveis apoiam os conteúdos de ensino de LFA?* O objetivo é mapear como as características e funcionalidades de cada ferramenta auxiliam nos conteúdos de LFA.

Para responder a estas questões de pesquisa e contemplar o objetivo geral definido, o estudo foi organizado em quatro etapas, conforme o processo ilustrado na Figura 2.

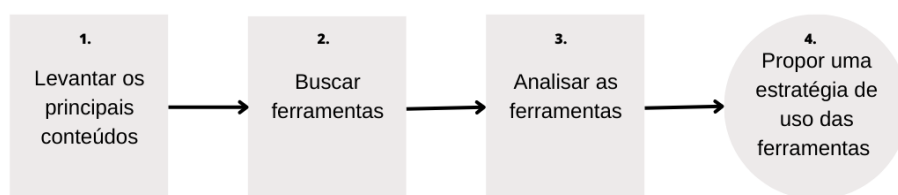


Figura 2. Processo de execução da pesquisa

A Etapa 1 se relaciona à QP1, levantando os principais conteúdos trabalhados no ensino de LFA nos livros didáticos e nas cinco melhores universidades brasileiras, nos cursos de Ciência da Computação e Sistemas de Informação [Symonds 2022]. A Etapa 2 está relacionada à QP2, buscando ferramentas que auxiliam o ensino e aprendizagem de LFA. A Etapa 3 objetiva responder à QP3 mapeando de qual maneira as ferramentas obtidas na Etapa 2 contemplam os conteúdos obtidos na Etapa 1. Por fim, a Etapa 4 apresenta uma proposta de estratégia de uso das ferramentas obtidas na Etapa 2 no intuito de otimizar o ensino e aprendizagem dos conteúdos levantados na Etapa 1.

4. Resultados

Esta seção apresenta os resultados para as questões de pesquisa definidas para a condução deste estudo.

4.1. QP1: Quais conteúdos são mais recorrentes no contexto de ensino de LFA?

Para a identificação dos conteúdos relacionados ao ensino de LFA, foram consideradas as ementas das cinco melhores universidades do Brasil nos cursos de Ciência da Computação e Sistemas de Informação [USP 2023, UNESP 2023, UNICAMP 2023, UFMG 2023, UFRGS 2023], conforme o *QS World University Rankings* [Symonds 2022] e os principais livros de apoio à disciplina [Sudkamp 2007, Hopcroft and Ullman 1969].

A Tabela 1 sintetiza os principais conteúdos trabalhados no ensino de LFA. A Hierarquia de Chomsky é utilizada para facilitar a organização da tabela, pois as ementas mostram uma forte tendência de as universidades terem o conteúdo programático em ordem decrescente dos níveis hierárquicos. A coluna ID adota o seguinte padrão: T[0-3][M—G][0-9]{1,2}. Iniciada por T seguida do número 0, 1, 2 ou 3 representando o nível hierárquico, seguida de “M” ou “G” representando respectivamente Máquina ou Gramática e, por fim, um número identificador. As colunas seguintes apresentam o nome do conteúdo, a descrição e a marcação de ● caso a ementa da universidade aborde de maneira explícita ou ○ caso apenas dê indícios.

Tabela 1. Principais conteúdos práticos de LFA

ID	Nome	Descrição	USP	UFMG	UNICAMP	UNESP	UFRGS
T3M1	Operadores regulares	Executar operadores regulares em AFs	○	●	○	○	●
T3M2	AF → ER	Converter AF para expressão regular	○	○	○	○	○
T3M3	ER → AF	Converter expressão regular para AF	○	○	○	○	○
T3M4	AFND- λ → AFD	Converter AFND- λ para AFD	○	○	○	○	○
T3M5	AFs	Simular AFs	●	●	○	●	●
T3M6	Máquina de Mealy	Simular máquina de Mealy	○	○	○	○	○
T3M7	Máquina de Moore	Simular máquina de Moore	○	○	○	○	○
T3M8	Completar	Tornar total a função de transição do AF	○	○	○	○	○
T3M9	Minimização	Tornar o número de estados do AF mínimo	○	●	○	○	○
T3G1	Verificador de palavra	Verificar se a palavra pertence à gramática	○	○	○	○	○
T3G2	Identificador gramática	Identificar qual tipo de gramática	○	○	○	○	○
T2M1	AP	Simular APs	●	●	○	●	●
T2G1	Árvore de derivação	Exibir árvore de derivação de uma palavra	●	○	○	○	○
T2G2	Derivação mais à esquerda	Exibir derivação mais à esquerda de uma palavra	●	○	○	○	○
T2G3	Símbolo inicial não recursivo	Remover a recursividade do símbolo inicial	○	○	○	○	○
T2G4	Remoção de produções vazias	Remover produções vazias (λ) da gramática	○	○	○	○	○
T2G5	Remoção de regras de cadeia	Remover regras de cadeia do tipo $A \rightarrow B$	○	○	○	○	○
T2G6	Remoção de símbolos inúteis	Remover produções que não são alcançáveis ou que não geram símbolos terminais	○	○	○	○	○
T2G7	Remoção de recursão direta à esquerda	Remover recursão direta à esquerda	○	○	○	○	○
T2G8	Remoção de recursão direta e indireta à esquerda	Remover recursão direta e indireta à esquerda	○	○	○	○	○
T2G9	GLC → AP	Converter GLC para AP	○	○	○	○	○
T2G10	FNC	Converter GLC para Forma Normal de Chomsky	○	○	○	○	○
T2G11	FNG	Converter GLC para Forma Normal de Greibach	○	○	○	○	○
T2G12	CYK	Executar o algoritmo de CYK	○	○	○	○	○
T2G13	Ambiguidade	Verificar se a gramática é ambígua	●	○	○	○	○
T1M1	ALL	Simular ALL	●	○	○	○	○
T0M1	MT	Simular MT	●	●	○	●	○
T0M2	Variantes MT	Simular variantes da MT	○	●	○	○	○

Todas as universidades levadas em consideração no estudo abordam os conteúdos de LFA, porém a maior parte dos conteúdos não são tratados de forma explícita nas ementas. Ademais, observa-se que o maior foco de atividades práticas estão nos níveis 3 e 2 da hierarquia. Ainda, é possível notar que, no nível 3, o principal foco está relacionado com a construção de máquinas e o nível 2 mais voltado para construção de gramáticas.

4.2. QP2: Quais as ferramentas disponíveis para o ensino e aprendizagem de LFA?

Para responder a questão de pesquisa QP2, foram realizadas buscas por artigos científicos que abordem ferramentas para o ensino de LFA e buscas ad hoc por ferramentas desse tipo. Para as buscas por artigos científicos foi utilizado o *Google Scholar*, em uma pes-

quisa não estruturada, usando as seguintes palavras chave: “*formal languages and automatas tools*”, “*formal languages tools*”, “*automata tools*” e “*linguagens formais e autômatos ferramentas*”. Foram considerados artigos em língua portuguesa ou inglesa, que tenham sido publicados entre os anos de 2015 e 2022, que contemplem pelo menos 25% dos conteúdos obtidos na Etapa 1 e que mencionem ferramentas para serem testadas. As buscas ad hoc foram realizadas no *Google* com as mesmas palavras chave.

Foram identificadas quatro ferramentas a partir de artigos científicos: Automata Tutor [D’Antoni et al. 2020], CMSimulator [Chuda et al. 2015], JFLAP [Rodger and Finley 2006] e LFApp [Pereira and Terra 2018]. Além disso, as buscas ad hoc resultaram em mais duas ferramentas: Automata [AUTOMATA 2023] e LFAWeb [LFAweb 2023]. Assim, foram identificadas seis ferramentas. Uma breve descrição de cada ferramenta é dada a seguir.

1) Automata¹: Biblioteca Python que tem como intuito prover estruturas e algoritmos sobre AFs, APs e MTs [AUTOMATA 2023]. A ferramenta não possui interface gráfica, com isso, diferentemente das outras ferramentas descritas a seguir, todas as funcionalidades são executadas via código. Possui uma documentação que apresenta todas as funções de forma clara e objetiva, facilitando o uso.

2) Automata Tutor²: Ferramenta educacional *web* voltada para auxiliar estudantes a aprenderem conceitos básicos de LFA e professores a proporem exercícios e acompanhar o desenvolvimento do aluno [D’Antoni et al. 2020]. A ferramenta fornece *feedback* instantâneo para cada exercício resolvido. A ferramenta está disponível em língua inglesa.

3) CMSimulator³: Ferramenta educacional para dispositivos móveis com intuito de auxiliar alunos e professores no processo de ensino e aprendizagem de LFA [Chuda et al. 2015]. CMSimulator é uma ferramenta com foco maior em testes relacionados a máquinas e gramáticas. Oferece suporte de salvar e carregar arquivos no formato XML e simular resposta passo a passo. Apesar de possuir funcionalidade para a realização de exercícios, essa funcionalidade só está disponível para usuários logados, e durante a realização da pesquisa, não foi possível ter acesso aos exercícios devido a um erro apresentado pela ferramenta. A ferramenta está disponível em língua inglesa.

4) JFLAP⁴: Ferramenta *desktop* desenvolvida na Universidade de Duke com intuito de auxiliar o ensino e aprendizagem de LFA [Rodger and Finley 2006]. JFLAP é a ferramenta mais completa entre os trabalhos analisados, com suporte a manipulação de máquinas e gramáticas, salvar e carregar arquivos no formato XML, realizar múltiplos testes, simular respostas passo a passo e salvar imagem da tela. A ferramenta conta com uma página *web* com tutoriais de uso, propostas de exercícios, artigos, história da ferramenta e dados estatísticos de uso. A ferramenta está disponível em língua inglesa.

5) LFApp⁵: Ferramenta para dispositivos móveis voltada para estudantes praticarem e aprenderem conceitos de LFA [Pereira and Terra 2018]. A ferramenta apoia a manipulação de máquinas e gramáticas, que contam com o suporte de exibir resposta

¹<https://github.com/caleb531/automata>

²<https://automata-tutor.model.in.tum.de>

³<https://play.google.com/store/apps/details?id=fitstu.gulis.cmsimulator>

⁴<https://www.jflap.org>

⁵<https://play.google.com/store/apps/details?id=org.ufla.lfapp>

passo a passo e mostrar o histórico de uso. Além disso possui o diferencial de exibir os algoritmos que foram aplicados a cada resolução, o que pode ser relevante no meio acadêmico. A ferramenta está disponível em língua portuguesa e inglesa.

6) LFAWeb⁶: É uma evolução da ferramenta LFApp voltada ao ambiente *web* [LFAweb 2023]. LFAweb tem o intuito de fornecer as mesmas funcionalidades da ferramenta predecessora porém em um ambiente mais abrangente. A ferramenta apresenta duas telas distintas para manipulação de máquinas e gramáticas, as quais contam com o suporte de salvar e carregar arquivos (formato DOT para máquinas e TXT para gramáticas), exibir histórico de uso, simular respostas passo a passo e exibir o algoritmo aplicado a cada resolução. A ferramenta está disponível em língua portuguesa e inglesa.

Todas as ferramentas analisadas possuem suporte acadêmico. Quanto ao suporte a criação de exercícios, as ferramentas Automata Tutor e CMSimulator fornecem suporte a aplicação de exercícios. Automata Tutor fornece ao professor funcionalidades para criação, aplicação e correção de exercícios. Apesar da CMSimulator apontar o suporte a exercícios, erros da ferramenta impossibilitaram o uso desta funcionalidade durante a execução desta pesquisa. As ferramentas JFLAP, LFApp e LFAweb podem ser usadas pelo professor como ambiente para realização de atividades práticas, embora não tenham funcionalidades específicas para gerenciar a aplicação de exercícios. A página *web* do JFLAP, por exemplo, fornece sugestões de como estruturar exercícios com apoio da ferramenta. Quanto ao suporte de testes, CMSimulator e JFLAP se destacam por apresentarem funções que executam testes em múltiplas entradas ao mesmo tempo. Por fim, LFApp e LFAweb se destacam por exibir os algoritmos que foram executados a cada resolução, o que acredita-se ser relevante para o aprendizado acadêmico.

As ferramentas Automata, LFAweb, Automata Tutor e JFLAP apresentam indícios de ainda receberem manutenção. Por outro lado, a ferramenta LFApp foi descontinuada. Para tentar contornar os problemas técnicos com a ferramenta CMSimulator, os autores desta pesquisa tentaram contato por e-mail com os desenvolvedores da ferramenta, porém não houve retorno. Logo, não há indícios de que a CMSimulator continua sendo mantida.

4.3. QP3: Como as ferramentas disponíveis apoiam os conteúdos de ensino de LFA?

Para responder a essa questão de pesquisa, usou-se as ferramentas identificadas no resultado da QP2 e buscou-se por indícios de cobertura dos conteúdos resultantes da QP1.

Inicialmente, uma versão executável da ferramenta é obtida, caso não seja publicamente acessível pela Internet. Posteriormente, cada conteúdo é testado em cada uma das ferramentas. Para uma análise justa, os testes são sempre os mesmos. A análise busca entender qual a cobertura da ferramenta em relação aos conteúdos levantados.

Após isso, são analisadas as seguintes características de cada ferramenta: *fins didáticos*, i.e., ferramentas que possuem respostas passo a passo para melhor entender os algoritmos aplicados; *plataforma de uso*, i.e., em quais dispositivos a ferramenta pode ser utilizada: *mobile*, *desktop* ou *web*; *última atualização*, i.e., ano da última atualização; *exercícios disponíveis*, i.e., ferramentas que possuem exercícios disponíveis.

A Tabela 2 sintetiza os resultados, apresentando a marcação ● para as ferramentas

⁶lfaweb.dcc.ufla.br/

que apresentam indícios de cobrir totalmente determinado conteúdo e a marcação ◐ para as ferramentas que apresentam evidências de cobrir parcialmente determinado conteúdo.

Tabela 2. Comparativo das ferramentas

ID	Nome	Automata	Automata Tutor	CMSimulator	JFLAP	LFApp	LFAweb
T3M1	Operadores regulares	●			◐	◐	◐
T3M2	AF → ER	●			●		
T3M3	ER → AF	●	●		●	●	●
T3M4	AFND-λ → AFD	●	●	●	●	●	●
T3M5	AFs	●	●	●	●	●	●
T3M6	Máquina de Mealy				●		
T3M7	Máquina de Moore				●		
T3M8	Completar				●	●	●
T3M9	Minimização	●	●		●	●	●
T3G1	Verificador de palavra		●	●	●	●	●
T3G2	Identificador gramática		●	●	●	●	●
T2M1	AP	●	●	●	●	●	
T2G1	Árvore de derivação		●	●	●	●	●
T2G2	Derivação mais à esquerda		●		●	●	●
T2G3	Símbolo inicial não recursivo				●	●	●
T2G4	Remoção de produções vazias				●	●	●
T2G5	Remoção de regras de cadeia				●	●	●
T2G6	Remoção de símbolos inúteis				●	●	●
T2G7	Remoção de recursão direta à esquerda				●	●	●
T2G8	Remoção de recursão direta e indireta à esquerda				●	●	●
T2G9	GLC → AP				●	●	●
T2G10	FNC		●		●	●	●
T2G11	FNG					●	●
T2G12	CYK		●		●	●	●
T2G13	Ambiguidade				●	●	●
T1M1	ALL	●		●	●	●	
T0M1	MT	●		◐	●	●	
T0M2	Variantes MT	●			●	●	

No nível 3 da Hierarquia de Chomsky, a ênfase é dada principalmente aos conteúdos voltados para máquinas, e as ferramentas oferecem uma ampla cobertura, sendo que construção de AFs e transformação AFND-λ para AFD apresentam 100% de cobertura. Além disso, conteúdos como Transformação de ER para AF (T3M3), Minimização (T3M9), Verificador de palavra (T3G1) e Identificador de gramática (T3G2) estão disponíveis em 5 das 6 ferramentas.

No nível 2, a ênfase é dada principalmente aos conteúdos voltados para gramáticas. LFApp e LFAweb se destacam por abranger completamente os conceitos de gramática. A ferramenta JFLAP deixa de cobrir apenas o conteúdo de transformação para Forma Normal de Greibach (T2G11). Por outro lado, Automata, Automata Tutor e CMSimulator apresentam uma cobertura limitada, sugerindo que essas ferramentas são mais voltadas para o estudo de máquinas.

No nível 1, apenas um conteúdo (T1M1) é analisado e a ferramenta LFAweb é a única que não oferece cobertura desse conteúdo. No nível 0 da hierarquia, a ênfase é em MTs e suas variantes e Automata, JFLAP, LFApp se destacam oferecendo cobertura total.

Conclui-se que JFLAP, LFAApp e LFAweb são ferramentas completas que provêm funcionalidades tanto para máquinas quanto para gramáticas. Por um lado, JFLAP é a mais completa com cobertura de 96% aos conteúdos. Por outro lado, as ferramentas Automata, Automata Tutor e CMSimulator têm maior foco em máquinas, simulações e conteúdos básicos de gramáticas.

5. Proposta de uma estratégia de uso para as ferramentas

Esta seção propõe uma estratégia de uso das ferramentas a fim de otimizar o ensino e aprendizagem de LFA. Em suma, as respostas da QP3 são sintetizadas em três principais critérios: *Cobertura de conteúdos*, separada em níveis da hierarquia; *Respostas passo a passo*; e *Exercícios disponíveis*. Esses critérios são escolhidos de modo a focar em ferramentas completas e/ou que promovem um melhor ambiente educacional. É importante salientar que a proposta não tem como objetivo minimizar o número de ferramentas aplicadas, mas maximizar o apoio no ensino e aprendizagem da disciplina.

As ferramentas CMSimulator e LFAApp não são recomendadas devido à falta de atualizações e possíveis *bugs* que podem afetar o seu uso. Automata é uma ferramenta com foco em desenvolvedores, desse modo não é recomendada para o ensino aprendizagem, mas pode ser utilizada em outras áreas do conhecimento. Por outro lado, as ferramentas Automata Tutor, JFLAP e LFAweb compõem um grupo que abrange todos os conteúdos da disciplina e oferecem funcionalidades que podem ser adequadas para diferentes perfis de alunos e professores. A Figura 3 sintetiza a cobertura dos conteúdos apenas pelas ferramentas Automata Tutor, JFLAP e LFAweb. É importante notar que os conteúdos exclusivos de uma dada ferramenta complementam a figura utilizando a respectiva cor da legenda.

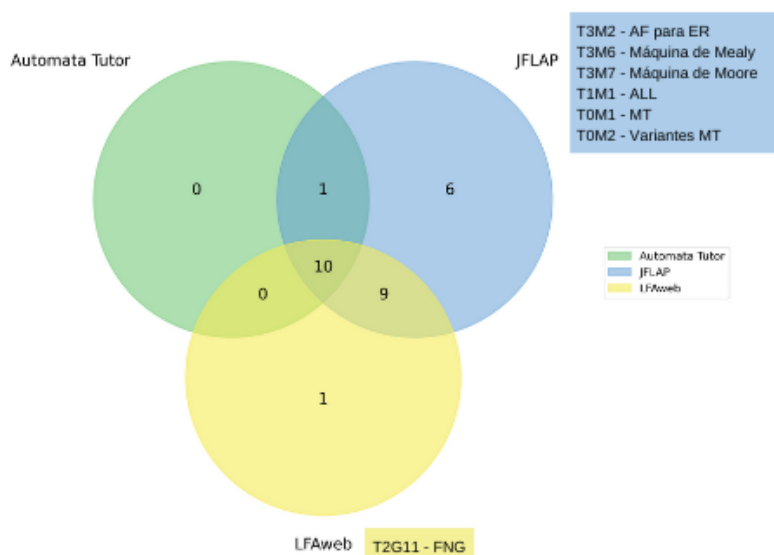


Figura 3. Diagrama de Venn ilustrando a cobertura de conteúdos pelas ferramentas incluídas na estratégia

Para professores que ministram aulas com conteúdos práticos, as ferramentas JFLAP e LFAweb são as melhores escolhas. Apesar de necessitar a instalação, JFLAP possui um conjunto de funcionalidades que contemplam de maneira didática os conteúdos

relacionados a simulações de AFs, APs, MTs e gramáticas. Em relação às máquinas, além de exibir passo a passo o processamento da palavra, a ferramenta também exibe a árvore de execução. Em relação à gramática, a ferramenta exibe a derivação da palavra via árvore ou tabela.

A ferramenta LFAweb, por outro lado, não se destaca pelas simulações de máquinas e gramáticas, mas sim, pelos algoritmos de transformação. Em relação às máquinas, os algoritmos de transformação exibem a solução passo a passo com o auxílio de uma tabela. LFAweb fornece uma tela com algoritmos de transformação gramatical, onde as soluções são feitas passo a passo.

Para professores que aplicam exercícios, Automata Tutor é a melhor ferramenta apesar de não contemplar todos os conteúdos. A ferramenta oferece suporte ao professor para gerenciar completamente a aplicação de exercícios. Apesar disso, JFLAP também pode ser usada para essa finalidade, já que conta com uma página *web* com sugestões de como estruturar exercícios com apoio da ferramenta. Além do mais, com relação às máquinas, é possível exportar e importar no formato XML e conta com a funcionalidade de equivalência de máquinas, que pode ser útil aos professores na correção dos exercícios.

O diagrama de Venn, ilustrado pela Figura 3, revela a importância da ferramenta na disciplina, uma vez que apenas o JFLAP contempla os conteúdos relacionados às máquinas de Mealy e Moore. Além disso, o diagrama também reporta que a união de JFLAP e LFAweb cobrem completamente 27 dos 28 conteúdos, excluindo apenas operadores regulares que é coberto parcialmente. É importante ressaltar que dos 27 conteúdos 19 são cobertos pelas duas ferramentas, 6 são cobertos exclusivamente pelo JFLAP, 1 exclusivamente pelo LFAweb e 1 coberto pela JFLAP e Automata Tutor.

Diante desse cenário, propõe-se a utilização contínua das ferramentas JFLAP e LFAweb ao longo de um curso de LFA, oferecendo flexibilidade para utilizá-las de forma independente ou combinada. Além disso, para complementar essa abordagem, sugere-se o uso da ferramenta Automata Tutor para a aplicação e gerenciamento de exercícios. A Tabela 3 propõe a recomendação de uso das ferramentas para cada conteúdo. A marcação de ● indica que a ferramenta é recomendada para abordar o conteúdo. É importante ressaltar que Automata Tutor é recomendada para todos os conteúdos que ela abrange, devido ao gerenciamento de exercícios.

6. Conclusão

Este artigo propôs uma análise sobre ferramentas que apoiam o processo de ensino-aprendizagem de LFA. Para isto, foram identificados 28 conteúdos comumente abordados na disciplina de LFA e foram identificadas seis ferramentas que fornecem recursos para cobrir tais conteúdos. A partir da análise das ferramentas, este estudo sugere que a integração das ferramentas Automata Tutor, JFLAP e LFAweb pode ser uma abordagem promissora para otimizar o processo de ensino e aprendizagem da disciplina. Automata Tutor é recomendada para aplicação de exercícios, especialmente para LR. O uso de JFLAP e LFAweb é recomendado durante todo o curso da disciplina e JFLAP no contexto de simulações e LFAweb em transformações.

Considerando os resultados parciais obtidos, sugere-se que o desenvolvimento de uma nova ferramenta siga os seguintes três requisitos: (i) tenha a amplitude de cobertura

Tabela 3. Recomendação de uso da ferramenta por conteúdo

ID	Nome	Automata Tutor	JFLAP	LFAweb
T3M1	Operadores regulares		●	●
T3M2	AF \rightarrow ER		●	
T3M3	ER \rightarrow AF	●	●	
T3M4	AFND- λ \rightarrow AFD	●		●
T3M5	AFs	●	●	
T3M6	Máquina de Mealy		●	
T3M7	Máquina de Moore		●	
T3M8	Completar		●	●
T3M9	Minimização	●		●
T3G1	Verificador de palavra	●	●	●
T3G2	Identificador gramática	●	●	●
T2M1	AP	●	●	
T2G1	Árvore de derivação	●	●	
T2G2	Derivação mais a esquerda	●		●
T2G3	Símbolo inicial não recursivo			●
T2G4	Remoção de produções vazias			●
T2G5	Remoção de regras de cadeia			●
T2G6	Remoção de produções inúteis			●
T2G7	Remoção de recursão direta à esquerda			●
T2G8	Remoção de recursão direta e indireta à esquerda			●
T2G9	GLC \rightarrow AP		●	
T2G10	FNC	●	●	●
T2G11	FNG			●
T2G12	CYK	●	●	●
T2G13	Ambiguidade			●
T1M1	ALL		●	
T0M1	MT		●	
T0M2	Variantes MT		●	

de conteúdos como JFLAP; (ii) tenha um ambiente de gerenciamento de exercícios como Automata Tutor; e (iii) seja uma plataforma *web* responsiva, garantindo portabilidade, assim como Automata Tutor e LFAweb. Esses requisitos são considerados elementos chave para assegurar a robustez da ferramenta no contexto educacional de LFA.

As principais contribuições deste trabalho são: (i) proposta de uma estratégia de uso de ferramentas com o objetivo de otimizar o ensino e aprendizagem de LFA e (ii) uma análise de conteúdos e ferramentas relacionadas a LFA, que pode servir de roteiro para a construção de novas ferramentas ou atualização de ferramentas já existentes.

Trabalhos futuros incluem: (i) conduzir avaliação da melhora no ensino e aprendizagem com a utilização da estratégia proposta; (ii) propor um projeto de *frontend* utilizando a biblioteca Automata; (iii) estudar os motivos que causam a ausência de ferramentas atualizadas para dispositivos móveis e (iv) replicar o estudo, porém com base em ementas de universidades de fora do Brasil.

Referências

- AUTOMATA (2023). Automata. Disponível em: <https://github.com/caleb531/automata>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- Cascini, D. and Campos, S. (2015). Avaliação de jogos educacionais multiusuários: Uma revisão sistemática da literatura. In *XXVI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE)*, page 519.
- Chesnevar, C. I., González, M. P., and Maguitman, A. G. (2004). Didactic strategies for promoting significant learning in formal languages and automata theory. *ACM SIGCSE Bulletin*, 36(3):7–11.
- Chuda, D., Trizna, J., and Kratky, P. (2015). Android automata simulator. In *9th International Conference on e-Learning (ICEEL)*, pages 80–84.
- Dognini, M. J. and Raabe, A. L. A. (2003). Eduling-software educacional para linguagens regulares. In *XIV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE)*, pages 216–225.
- D’Antoni, L., Helfrich, M., Kretinsky, J., Ramneantu, E., and Weininger, M. (2020). Automata Tutor v3. In *32nd International Conference on Computer-Aided Verification (CAV)*, pages 3–14.
- Hopcroft, J. E. and Ullman, J. D. (1969). *Formal languages and their relation to automata*. Addison-Wesley Longman Publishing.
- LFAweb (2023). LFAweb. Disponível em: <http://lfaweb.dcc.ufba.br>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- Pereira, C. H. and Terra, R. (2018). A mobile app for teaching formal languages and automata. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(5):1742–1752.
- Ramos, M. V. M. (2009). Ensino de linguagens formais e autômatos em cursos superiores de computação. *Revista de Computação e Tecnologia (ReCeT)*, 1(1):22–34.
- Rodger, S. H. and Finley, T. W. (2006). *JFLAP: an interactive formal languages and automata package*. Jones & Bartlett Learning.
- Sudkamp, T. A. (2007). *Languages And Machines: An Introduction to the theory of Computer Science*. Pearson Education, 3 edition.
- Symonds, Q. Q. (2022). Qs world university rankings by subject 2022: Computer science and information systems. Disponível em: <https://www.topuniversities.com/university-rankings/university-subject-rankings/2022/computer-science-information-systems>. Acesso em: 09 jan. 2023.
- UFMG (2023). Ementa - fundamentos da teoria da computação. Disponível em: <https://ufmg.br/cursos/graduacao/2377/91205/60493>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- UFRGS (2023). Grade curricular ciência da computação. Disponível em: http://www.ufrgs.br/ufrgs/ensino/graduacao/cursos/exibeCurso?cod_curso=305. Acesso em: 15 fev. 2023.
- UNESP (2023). BCC - estrutura curricular. Disponível em: <https://www.fc.unesp.br#!/departamentos/computacao/cursos-de-graduao/bacharelado-em-ciencia-da-computacao/estrutura-curricular/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

UNICAMP (2023). Catálogo dos cursos de graduação. Disponível em: <https://www.dac.unicamp.br/sistemas/catalogos/grad/catalogo2021/disciplinas/mc.html#disc-mc322>. Acesso em: 15 fev. 2023.

USP (2023). Ementa - teoria da computação e linguagens formais. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br/jupiterweb/obterDisciplina?sgldis=SCC0205&verdis=3>. Acesso em: 15 fev. 2023.

Vijayalaskhmi, M. and Karibasappa, K. (2012). Activity based teaching learning in formal languages and automata theory-an experience. In *2nd International Conference on Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA)*, pages 1–5.