

Rosa Binary: Uma Ferramenta para Auxílio no Ensino da Síntese de Circuitos Digitais

Rodrigo R. Oliveira, Laura Quevedo Jurgina e
Leomar Soares da Rosa Júnior

¹Programa de Pós-Graduação em Computação
Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) – Pelotas – RS – Brasil

{rdroliveira, lqjurgina, leomarjr}@inf.ufpel.edu.br

Abstract. *This paper presents an educational tool aimed at supporting the teaching of digital circuit synthesis. It integrates Boolean expression minimization via the Quine-McCluskey algorithm with physical circuit construction on a logic grid, using the A* algorithm for automatic connection routing. Developed in Java with a Swing-based interface, the tool fosters the articulation between symbolic reasoning and structural representation through interactive visualization. Twenty undergraduate students participated in the activity; seventeen completed all stages and answered the evaluation questionnaire. Analysis combining descriptive statistics and thematic categorization revealed satisfactory usability and a positive perception of the tool's effectiveness in supporting conceptual learning.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma ferramenta educacional voltada ao ensino da síntese de circuitos digitais. A proposta integra a minimização de expressões booleanas, via algoritmo de Quine-McCluskey, com a montagem física de circuitos sobre uma grade lógica, empregando o algoritmo A* para o traçado automático das conexões. A aplicação, desenvolvida em Java com interface Swing, busca promover a articulação entre raciocínio simbólico e representação estrutural por meio de visualização interativa. Vinte estudantes participaram da atividade, sendo que 17 concluíram todas as etapas e responderam ao questionário de avaliação. A análise dos dados, combinando estatística descritiva e categorização temática, evidenciou usabilidade satisfatória e percepção positiva quanto ao apoio à aprendizagem dos conceitos envolvidos.*

1. Introdução

A síntese de circuitos digitais constitui um conteúdo central em disciplinas de Lógica Digital, presentes em cursos de Computação, Engenharia Elétrica e áreas correlatas. Essa temática abrange a formulação algébrica de funções booleanas, sua simplificação por técnicas formais e a posterior implementação estrutural por meio de elementos lógicos [Gururaj et al. 2024, Jiménez-Hernández et al. 2020]. Dominar essas etapas exige do estudante não apenas compreensão simbólica, mas também a habilidade de transpor abstrações para representações físicas coerentes, o que configura um desafio pedagógico persistente.

Para lidar com essa complexidade, recursos computacionais têm sido incorporados ao ensino, com o objetivo de tornar mais acessível a transição entre teoria e prática.

Ambientes como o WinLogiLab permitem a construção e simulação de circuitos lógicos em interfaces gráficas simplificadas, sendo reconhecidos como úteis para a introdução aos conceitos fundamentais [Hacker and Sitte 2004]. Entretanto, essas ferramentas frequentemente se concentram na montagem final do circuito, sem contemplar visualmente as transformações intermediárias que envolvem a minimização lógica e o raciocínio algorítmico.

Nesse contexto, o algoritmo de Quine-McCluskey representa uma abordagem sistemática para a simplificação de funções booleanas, organizando mintermos em grupos com base na quantidade de bits e identificando implicantes primos por combinação iterativa [Sasao 2012]. Sua sequência lógica clara o torna adequado ao uso educacional. Mattos et al. [2018] propuseram uma aplicação que implementa esse algoritmo com interface visual passo a passo, permitindo maior compreensão dos procedimentos simbólicos. No entanto, a aplicação não contempla a etapa posterior de montagem estrutural, mantendo-se restrita ao domínio algébrico.

A transição da lógica simbólica para a estrutura física do circuito requer não apenas a disposição dos elementos lógicos em um espaço bidimensional, mas também o roteamento eficiente das conexões. Esse processo pode ser modelado como um problema de busca em grafos, no qual algoritmos como o A* são utilizados para determinar o menor caminho entre nós, evitando colisões e otimizando a distância percorrida. Essa abordagem é comum em ferramentas voltadas ao ensino de algoritmos, como as desenvolvidas por Patil et al. [Patil et al. 2022], Rathod et al. [Rathod et al. 2024] e Trivedi et al. [Trivedi et al. 2023], que demonstraram o uso didático da visualização animada em problemas de ordenação e busca.

Este artigo apresenta o *Rosa Binary*, um Recurso Digital de Aprendizagem (RDA) projetado para apoiar o ensino de síntese de circuitos digitais por meio da integração entre visualização algorítmica e montagem interativa. A ferramenta é dividida em dois módulos interdependentes: o primeiro dedicado à simplificação de expressões booleanas com base no algoritmo de Quine-McCluskey; o segundo voltado à simulação da montagem do circuito em uma matriz gráfica com roteamento automático via algoritmo A*. A proposta busca favorecer a compreensão integrada entre abstração lógica e representação espacial, promovendo maior engajamento e raciocínio estruturado.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os fundamentos teóricos e os principais trabalhos relacionados; a Seção 3 descreve os módulos e funcionalidades da ferramenta *Rosa Binary*; a Seção 4 detalha o delineamento metodológico da avaliação empírica; a Seção 5 discute os resultados obtidos com base nos dados quantitativos e qualitativos; por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

A compreensão do problema abordado neste trabalho exige o domínio de dois conjuntos de conhecimentos complementares: os fundamentos técnicos da síntese lógica e do traçado físico de circuitos, e a análise crítica de ferramentas educacionais que exploram esses domínios. Assim, esta seção está dividida em duas partes. Na primeira, são apresentados os conceitos relacionados à simplificação de expressões booleanas e à visualização de algoritmos em contextos educacionais. Na segunda, são discutidos trabalhos relaci-

onados e ferramentas existentes, com foco em suas abordagens técnicas, limitações e contribuições ao ensino de circuitos digitais.

2.1. Fundamentos da Síntese Lógica e Visualização

A síntese de circuitos digitais envolve a transformação de expressões booleanas em estruturas físicas otimizadas. Essa conversão requer técnicas sistemáticas de minimização lógica e organização topológica dos componentes. Sasao [2012] descreve o algoritmo de Quine-McCluskey como um método tabular exaustivo que identifica implicantes primos por meio da análise combinatória de mintermos. Sua aplicação em contextos educacionais se justifica pela natureza determinística e pela clareza sequencial das etapas envolvidas.

Mattos et al. [2018] propuseram uma ferramenta didática que representa graficamente as etapas do algoritmo, permitindo aos estudantes acompanhar visualmente o agrupamento e a seleção dos implicantes essenciais. Essa abordagem amplia o entendimento do processo lógico, mas permanece restrita à manipulação simbólica, sem tratar da síntese estrutural.

Do ponto de vista da implementação física, o roteamento de conexões em um circuito digital pode ser modelado como um problema de busca em grafos. Algoritmos como o A* são empregados para calcular caminhos viáveis entre pontos de uma matriz lógica, considerando restrições de ocupação e custo. Patil et al. [2022] utilizaram esse algoritmo em uma ferramenta educacional para visualização de ordenação e busca, demonstrando que a apresentação animada dos caminhos percorridos facilita a compreensão de estratégias heurísticas. Rathod et al. [2024] e Trivedi et al. [2023] seguiram abordagens semelhantes, com foco na simulação visual de algoritmos em ambientes acessíveis a estudantes do ensino superior.

A articulação entre simplificação lógica e representação gráfica de circuitos ainda é pouco abordada em recursos educacionais. O domínio visual da execução algorítmica, aliado à explicitação das decisões envolvidas na montagem de circuitos, constitui um campo relevante para o desenvolvimento de ferramentas voltadas ao ensino da lógica digital.

2.2. Trabalhos Relacionados e Análise Crítica

Dentre os recursos voltados ao ensino da lógica digital, destacam-se ferramentas como WinLogiLab e LogicFlow. Hacker e Sitte [2004] descrevem o WinLogiLab como um ambiente de simulação de circuitos que permite ao estudante construir portas lógicas e testar sua funcionalidade em tempo real. Embora funcional para a introdução ao tema, o sistema não explicita os critérios de minimização das expressões nem oferece suporte ao entendimento algorítmico do processo.

LogicFlow, descrito por Jurgina et al. [2020], busca apoiar o ensino de circuitos combinacionais por meio de uma interface gráfica com recursos de manipulação e verificação de expressões booleanas. No entanto, o sistema não incorpora mecanismos de traçado físico nem simulação de roteamento, o que limita sua utilidade na etapa final de síntese.

Outras ferramentas, como Karma [Klock et al. 2010], oferecem suporte à aprendizagem de funções booleanas com base em interfaces visuais e simulação. Contudo,

não apresentam divisão modular entre simplificação e estrutura física, nem exploram algoritmos de busca. YPEDUC, proposto por Medeiros [2019], adota uma abordagem metodológica ágil para o desenvolvimento de software educativo, mas não se aplica diretamente ao domínio da lógica digital.

Em relação à síntese estrutural, SwitchCraft, descrito por Callegaro et al. [2010], propõe um ambiente para a geração de redes de transistores a partir de expressões booleanas. Embora tecnicamente robusta, sua interface e propósito não foram concebidos para o uso educacional, carecendo de elementos visuais explicativos e didáticos.

Do ponto de vista da avaliação de recursos educacionais, Tarda et al. [2020] propõem uma taxonomia para análise de recursos digitais com base em critérios de interatividade, feedback e clareza. Pereira et al. [2016] argumentam que a avaliação de software educativo requer instrumentos combinados que levem em conta tanto a usabilidade quanto os objetivos pedagógicos. A maioria das ferramentas analisadas não apresenta fundamentação em modelos de avaliação estruturados, o que compromete sua aplicabilidade como recursos formais de apoio didático.

A partir dessa análise, observa-se que as soluções existentes tendem a focar isoladamente em aspectos lógicos ou estruturais da síntese de circuitos, sem integrar os dois domínios em um ambiente único e orientado à aprendizagem. Essa lacuna é o que o *Rosa Binary* busca preencher ao propor uma ferramenta que vincula, em uma mesma interface, a minimização lógica e a simulação do traçado físico, com foco na clareza educacional e na visualização interativa. A Tabela 1 sintetiza os principais aspectos das ferramentas discutidas. Para fins de comparação, são considerados os seguintes critérios: M = Minimização booleana, VM = Visualização da minimização, F = Montagem física do circuito, R = Roteamento com A*, IG = Interface gráfica, AE = Avaliação educacional.

Tabela 1. Comparativo entre ferramentas educacionais para ensino de circuitos digitais

Ferramenta	M	VM	F	R	IG	AE
WinLogiLab	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
LogicFlow	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não
Karma	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não
SwitchCraft	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não
MiniBool	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não
Ferramenta NCL	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
YPEDUC	Não	Não	Não	Não	Não	Sim

3. Rosa Binary

A ferramenta *Rosa Binary* foi concebida como um Recurso Digital de Aprendizagem (RDA) voltado ao apoio no ensino de síntese de circuitos digitais, com ênfase na articulação entre a lógica simbólica e sua expressão estrutural em circuitos físicos. A proposta parte da premissa de que a aprendizagem de conceitos como minimização booleana e montagem de circuitos pode ser fortalecida pela mediação de interfaces que combinem manipulação simbólica com exploração visual e espacial.

Implementada em linguagem Java e com interface desenvolvida por meio da biblioteca Swing, a aplicação funciona de forma autônoma em ambientes locais, sem necessidade de conexão com banco de dados remoto ou autenticação de usuários. Essa característica facilita sua adoção em contextos acadêmicos diversos, incluindo laboratórios com infraestrutura limitada.

A arquitetura da ferramenta foi organizada em dois módulos interdependentes. O primeiro módulo trata da minimização de expressões booleanas a partir do algoritmo de Quine-McCluskey. O usuário fornece como entrada uma função booleana na forma de soma de mintermos. A aplicação executa automaticamente todas as etapas do algoritmo: agrupamento inicial por número de bits iguais a 1, combinação de termos adjacentes, marcação dos termos já utilizados, construção da tabela de implicantes primos e identificação dos implicantes essenciais. O processo de minimização ocorre internamente, mas o resultado final é apresentado de forma clara no painel da interface, possibilitando ao estudante verificar a redução da expressão original e inferir sobre sua eficiência lógica.

Esse resultado simbólico serve de base para o segundo módulo, que simula a montagem física do circuito correspondente. A interface de montagem consiste em uma grade de células, projetada para equilibrar liberdade de manipulação com restrição espacial suficiente para induzir escolhas estruturais conscientes. O estudante posiciona manualmente as portas lógicas (E, OU, NÃO), além de entradas, saídas e obstáculos, compondo uma topologia que traduza a lógica previamente simplificada.

A Figura 1 mostra a legenda utilizada pela interface, que indica a codificação visual de cada elemento da grade. A uniformização dos ícones e a padronização cromática dos símbolos contribuem para a identificação rápida dos componentes e sua função no circuito.

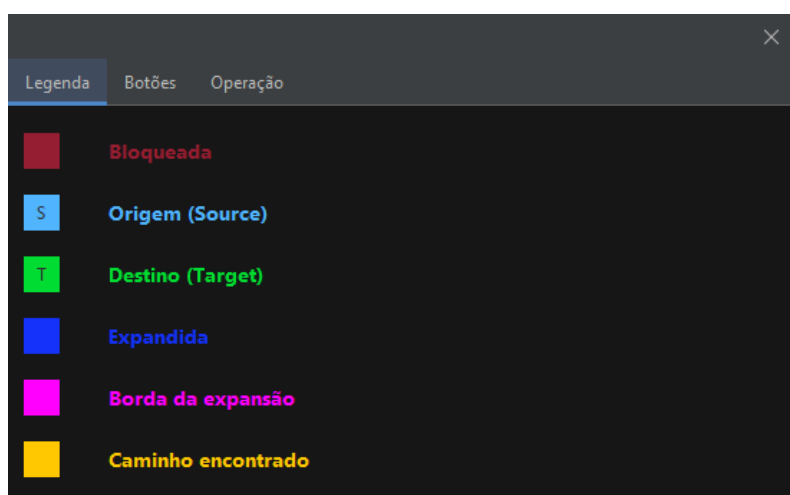


Figura 1. Rosa Binary/Pathfinding/Legenda

Para apoiar o processo de interação, o sistema oferece uma tela de ajuda acessível diretamente na interface principal, conforme ilustrado na Figura 2. Essa funcionalidade fornece explicações sobre o comportamento dos botões e a sequência lógica de montagem, favorecendo a autonomia do estudante durante o uso.

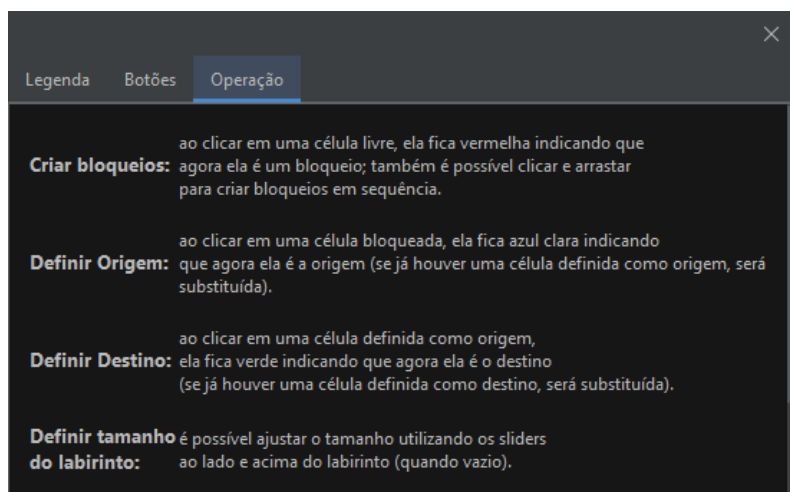


Figura 2. Rosa Binary/Pathfinding/Ajuda sobre operação

A interface de montagem é operacionalizada por meio de botões funcionais intuitivos, como demonstrado na Figura 3. A escolha dos componentes, seu posicionamento e a remoção de elementos são realizados por cliques diretos, sem necessidade de comandos textuais. Esse modelo de interação favorece o uso em contextos introdutórios, incluindo estudantes com pouca familiaridade com linguagens de programação.

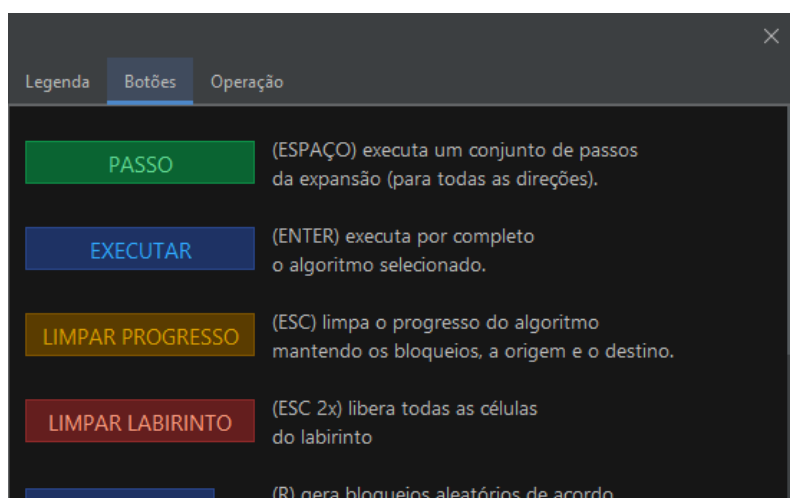


Figura 3. Rosa Binary/Pathfinding/Descrição dos botões

Após a montagem, o sistema executa o roteamento automático entre os nós terminais por meio do algoritmo A^* . Esse algoritmo, baseado em heurísticas, identifica o caminho de menor custo entre dois pontos, considerando a ocupação da matriz e a presença de obstáculos. O traçado é desenhado sobre a grade, utilizando cores diferenciadas para indicar o percurso das conexões.

A Figura 4 apresenta um exemplo de circuito com os caminhos gerados. Essa visualização permite ao estudante verificar se a montagem respeita a lógica pretendida e se os componentes estão corretamente interligados.

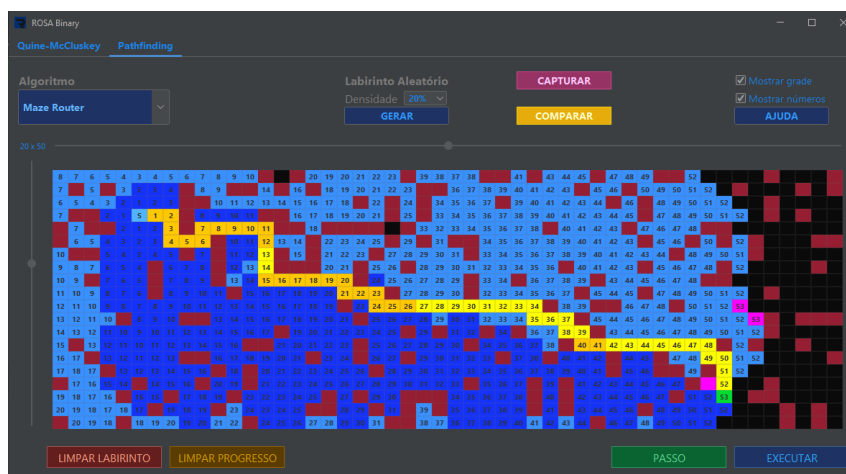


Figura 4. Visualização final do circuito digital representado na matriz com todas as conexões traçadas.

O projeto da ferramenta evita propositalmente a montagem automática do circuito com base na expressão minimizada. Essa decisão metodológica busca reforçar a compreensão ativa, forçando o estudante a reinterpretar a estrutura lógica em termos espaciais. Ao responsabilizar o usuário pela tradução entre linguagem simbólica e disposição física, o sistema promove o desenvolvimento de habilidades como abstração, análise de rotas e construção de raciocínio estruturado.

Do ponto de vista pedagógico, a ferramenta combina três dimensões que tendem a ser tratadas de forma isolada em recursos similares: representação simbólica, manipulação manual e validação visual automatizada. Essa integração permite ao estudante circular entre diferentes formas de representação, exercitando competências cognitivas variadas em um ambiente único, com feedback imediato e interface acessível.

4. Metodologia

Esta seção descreve os procedimentos adotados no desenvolvimento e avaliação da ferramenta *Rosa Binary*, considerando tanto os aspectos técnicos de concepção do sistema quanto o delineamento empírico aplicado para investigar sua recepção por parte dos estudantes em ambiente real de aprendizagem. A pesquisa foi estruturada em duas frentes complementares: (i) o desenvolvimento incremental da aplicação, fundamentado em requisitos pedagógicos e técnicos; e (ii) a avaliação empírica do recurso com estudantes de graduação, com base em critérios estabelecidos na literatura de tecnologia educacional.

4.1. Concepção e Desenvolvimento

A ferramenta foi concebida por uma equipe interdisciplinar, integrando competências de Engenharia de Computação, Ciência da Computação e Educação. A implementação foi realizada em linguagem Java, adotando a biblioteca gráfica Swing para o desenvolvimento da interface. A escolha por tecnologias de execução local, com baixo consumo de recursos computacionais, buscou garantir acessibilidade em diferentes ambientes institucionais.

O escopo funcional do sistema foi delineado a partir de dois módulos centrais. O primeiro, voltado à lógica simbólica, implementa o algoritmo de Quine-McCluskey para a

minimização de expressões booleanas. A estrutura algorítmica foi codificada para operar com entrada direta em forma de mintermos, realizando de forma automatizada as etapas de agrupamento por número de bits 1, combinação binária de termos adjacentes, marcação dos termos utilizados, geração da tabela de implicants primos e seleção dos implicants essenciais. O resultado da minimização é exibido na interface textual, permitindo ao usuário realizar comparações com a forma original da expressão.

O segundo módulo permite a construção visual de circuitos digitais a partir da expressão minimizada. A interface simula uma grade bidimensional de células, sobre a qual o estudante pode posicionar elementos como portas lógicas, entradas, saídas e obstáculos. Após a montagem, o sistema executa o traçado automático das conexões com base no algoritmo A*, respeitando a topologia da matriz e buscando rotas viáveis entre os terminais conectados. O feedback visual é exibido em tempo real na grade, utilizando traçados gráficos sobrepostos.

O processo de desenvolvimento seguiu uma abordagem iterativa, com ciclos incrementais de implementação e testes. Protótipos parciais foram validados por meio de testes de unidade e sessões exploratórias com monitores da disciplina, que forneceram sugestões sobre a disposição dos botões, clareza das mensagens e usabilidade geral da interface. A integração entre os módulos foi planejada para permitir o uso sequencial do sistema: primeiro a simplificação algorítmica, depois a construção física.

4.2. Fundamentação dos Critérios Avaliativos

A construção do instrumento de avaliação baseou-se em dois referenciais teóricos complementares. O primeiro é a taxonomia proposta por Tarda et al. [2020], que apresenta critérios para análise de recursos digitais centrados em interatividade, clareza da interface, feedback e alinhamento pedagógico. Esses elementos orientaram a formulação de itens voltados à avaliação da funcionalidade didática da ferramenta. O segundo referencial, de Pereira et al. [2016], contribuiu com diretrizes para a elaboração de instrumentos mistos, contemplando questões fechadas e abertas, de modo a captar percepções quantitativas e qualitativas dos estudantes.

O questionário aplicado foi composto por seis questões fechadas, formuladas com base em uma escala Likert de cinco pontos (de 1 – “discordo totalmente” a 5 – “concordo totalmente”). Essas questões foram distribuídas em quatro dimensões avaliativas: clareza da interface, coerência funcional, contribuição à aprendizagem e facilidade de uso. A redação dos itens procurou evitar ambiguidade e redundância, assegurando independência entre os aspectos avaliados.

Além das questões fechadas, o instrumento incluiu duas perguntas abertas, destinadas a identificar percepções não previstas nas escalas estruturadas. Os estudantes puderam relatar, por escrito, dificuldades encontradas, sugestões de aprimoramento, pontos positivos da experiência e comentários gerais sobre a aplicação. As respostas foram registradas durante a mesma sessão em que ocorreu o uso da ferramenta.

4.3. Delineamento da Avaliação Empírica

A avaliação foi conduzida em uma disciplina obrigatória de Lógica Digital, pertencente ao currículo do curso de Engenharia de Computação em uma universidade pública federal do sul do Brasil. A aplicação do instrumento ocorreu durante o semestre letivo, em

um laboratório de informática com estações individuais de trabalho. O ambiente permitia o uso autônomo da ferramenta, com suporte docente disponível para esclarecimentos operacionais.

Participaram da atividade 20 estudantes regularmente matriculados na disciplina. Desses, 17 concluíram todas as etapas da proposta e preencheram integralmente o questionário de avaliação. Os participantes já haviam sido expostos a conteúdos formais de álgebra booleana, mapas de Karnaugh e construção de circuitos básicos, o que os qualificava para interagir de forma autônoma com as funcionalidades da ferramenta.

A sessão teve duração de aproximadamente 90 minutos e foi organizada em quatro etapas: (i) contextualização teórica do tema e explicação sobre o propósito da ferramenta; (ii) instrução inicial sobre o funcionamento da aplicação; (iii) uso individual e livre do *Rosa Binary* para resolver um problema proposto com base em expressão booleana; e (iv) preenchimento do questionário avaliativo.

Todos os procedimentos foram realizados em conformidade com a legislação brasileira vigente sobre pesquisa envolvendo seres humanos. A participação foi voluntária, com garantia de anonimato, e os dados coletados foram utilizados exclusivamente para fins acadêmicos. Os participantes foram informados sobre seus direitos antes do início da atividade.

A análise dos dados quantitativos envolveu o cálculo de médias e desvios padrão para cada item da escala. A consolidação das informações permitiu uma visão geral da recepção da ferramenta em relação aos critérios avaliados. As respostas abertas foram analisadas por categorização temática, com base na identificação de regularidades nos enunciados e agrupamento por similaridade semântica. Essa análise buscou compreender como os estudantes interpretaram o valor didático do recurso e quais elementos foram percebidos como obstáculos ou pontos fortes da aplicação.

5. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta a análise das respostas coletadas após a utilização do *Rosa Binary* em uma atividade prática. O foco da avaliação recai sobre aspectos funcionais e pedagógicos da ferramenta, incluindo a clareza da interface, facilidade de uso, apoio à aprendizagem e interesse demonstrado pelos estudantes.

O instrumento aplicado combinou questões objetivas em escala Likert e perguntas abertas. As questões fechadas foram organizadas para captar a percepção dos estudantes quanto ao uso da ferramenta em diferentes dimensões, enquanto as abertas permitiram a manifestação espontânea de opiniões sobre sua aplicabilidade, pontos positivos e limitações observadas. A análise dos dados seguiu abordagem descritiva para os itens fechados e categorização temática para os relatos textuais.

A Tabela 2 apresenta as médias e os desvios padrão obtidos nos seis itens avaliativos. Todas as médias ficaram acima de 4,3 em uma escala de 1 a 5, com destaque para a atratividade da atividade (4,7) e o desejo de uso de ferramentas semelhantes em outras disciplinas (4,6). O menor valor médio foi associado à clareza da interface (4,3), com maior variação entre as respostas (desvio padrão de 0,8), sugerindo diferenças individuais quanto à familiaridade ou adaptação inicial.

Tabela 2. Médias e desvios padrão das avaliações pelos estudantes

Item avaliado	Média	Desvio Padrão
O sistema é fácil de utilizar.	4,4	0,7
A interface gráfica é clara e intuitiva.	4,3	0,8
A ferramenta contribui para compreender a minimização de expressões booleanas.	4,6	0,6
O traçado automático das conexões ajudou a entender a estrutura dos circuitos.	4,5	0,7
O uso da ferramenta tornou a aula mais interessante.	4,7	0,5
Gostaria de utilizar ferramentas similares em outras disciplinas.	4,6	0,6

As respostas às questões abertas foram agrupadas em três categorias principais: *interface amigável*, *compreensão do conteúdo* e *engajamento na atividade*. Comentários sobre a facilidade de navegação e clareza dos elementos visuais foram frequentes, destacando a organização da interface e a presença de ajuda contextual como fatores que favoreceram o uso autônomo. Relatos como “os botões estavam bem localizados” e “foi possível usar sem ajuda” ilustram essa percepção.

Na dimensão de compreensão conceitual, estudantes indicaram que a visualização do circuito gerado a partir da expressão minimizada favoreceu o entendimento do processo de síntese. Foram relatadas experiências de reconhecimento das relações entre os termos lógicos e sua correspondência com os elementos físicos do circuito. A montagem manual foi mencionada como uma etapa que exigiu interpretação ativa da lógica envolvida.

Em relação ao engajamento, alguns participantes expressaram que a atividade proporcionou maior interesse do que abordagens tradicionais. A possibilidade de interagir com a ferramenta e observar os efeitos do roteamento automático foi apontada como um fator motivador. Embora essas manifestações tenham caráter subjetivo, contribuem para indicar a receptividade da proposta.

Entre as limitações técnicas observadas, destacaram-se a ausência de mensagens de erro durante a montagem e a rigidez da matriz para construção do circuito. A primeira foi apontada como um obstáculo à detecção de falhas por parte dos estudantes durante o uso. A segunda, embora não inviabilize o funcionamento, impõe restrições ao dimensionamento de circuitos mais extensos. Essa configuração fixa da matriz reflete uma decisão de design voltada ao controle do espaço e da complexidade em contextos introdutórios, mas pode ser revista em versões futuras.

A análise integrada dos dados mostra que a proposta do *Rosa Binary*, ao articular abstração simbólica, montagem manual e validação automática, apoiou a exploração ativa dos conceitos de lógica digital. Os resultados são compatíveis com os critérios de análise sugeridos por Tarda et al. [2020], particularmente em termos de interatividade, clareza funcional e alinhamento com objetivos educacionais. A ferramenta se apresenta como um recurso promissor para apoiar o ensino técnico em contextos que demandam visualização e manipulação de estruturas lógicas.

6. Considerações Finais

Este artigo apresentou o desenvolvimento e a avaliação do *Rosa Binary*, um Recurso Digital de Aprendizagem voltado ao ensino de síntese de circuitos digitais. A ferramenta integra dois módulos complementares: um voltado à minimização de expressões booleanas, com base no algoritmo de Quine-McCluskey, e outro destinado à simulação da montagem física de circuitos, com traçado automático por meio do algoritmo A*. A proposta busca apoiar a compreensão de conceitos formais e operacionais da lógica digital, articulando representação simbólica, construção manual e validação visual.

A avaliação empírica com estudantes de Engenharia de Computação indicou que o uso da ferramenta favoreceu a compreensão das etapas envolvidas na síntese lógica e contribuiu para tornar a atividade pedagógica mais interativa. Os dados obtidos mostram que a clareza da interface, a visualização gráfica das conexões e a organização dos elementos foram percebidas como facilitadoras do processo de aprendizagem. O roteamento automático foi interpretado como um suporte útil para a verificação do circuito construído.

As limitações apontadas pelos estudantes, como a ausência de mensagens de erro em tempo real e a rigidez do tamanho da matriz, indicam oportunidades para evolução técnica do sistema. A impossibilidade de uso em navegadores também representa uma limitação, especialmente em contextos que demandam maior acessibilidade ou integração com plataformas de ensino.

Com base nessas observações, propõem-se como trabalhos futuros a implementação de validação automática da montagem em tempo real, o redimensionamento dinâmico da matriz e a reestruturação do código-fonte para uso em navegadores, por meio de tecnologias compatíveis com JavaScript. Também é viável considerar a integração com ambientes virtuais de aprendizagem, com registro das interações dos usuários para fins de acompanhamento didático.

Ao exigir que os estudantes realizem a transposição entre diferentes formas de representação — expressão simbólica, montagem física e traçado validado —, o *Rosa Binary* se configura como um recurso que contribui para o desenvolvimento de competências analíticas e espaciais no contexto do ensino técnico. Sua aplicação demonstra que abordagens baseadas em visualização ativa e construção manual podem favorecer o entendimento de conceitos fundamentais da lógica digital quando ancoradas em objetivos pedagógicos claros e sustentadas por soluções funcionais de interface.

Referências

- Callegaro, V., Marques, F. S., Klock, C. E., Rosa Júnior, L. S., Ribas, R. P., and Reis, A. I. (2010). Switchcraft: a framework for transistor network design. In *23rd Symposium on Integrated Circuits and System Design*, pages 49–53. ACM.
- Gururaj, M. H., Malleshappa, N., Nayak, S. N., Vadenapur, D. F., and Puradaswamy, B. P. M. (2024). Investigating the effects of software tool based learning model for minimizing the given boolean expression in computer science/digital electronics. *Education and Information Technologies*, 29:13787–13811.
- Hacker, C. and Sitte, R. (2004). Interactive teaching of elementary digital logic design with winlogilab. *IEEE Transactions on Education*, 47(2):196–203.

- Jiménez-Hernández, E. M., Oktaba, H., Díaz-Barriga, F., and Piattini, M. (2020). Using web-based gamified software to learn boolean algebra simplification in a blended learning setting. *Computer applications in Engineering Education*.
- Junior, O. O. B., Aguiar, Y. P. C., and Moura, H. P. (2020). Taxonomia para avaliação de recursos digitais de aprendizagem: Proposição e análise da adequação por especialistas. In *XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2020)*.
- Jurgina, L. Q., Zanandrea, R., Rosa Júnior, L. S., and Marques, F. S. (2020). Logicflow: Uma ferramenta para o auxílio de ensino-aprendizagem de circuitos digitais. In *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2020)*, pages 322–331.
- Klock, C. E., Ribas, P. R., and Reis, A. I. (2010). Karma: um ambiente para o aprendizado de síntese de funções booleanas. 18(2):33–42.
- Mattos, H., Souza, T., Vega, A., and Saade, D. (2018). Ferramenta didática interativa utilizando a linguagem ncl: Algoritmo de quine-mccluskey.
- Medeiros, A. F. (2019). Ypeduc: Uma adaptação de metodologia Ágil para o desenvolvimento de software educativo. In *XXX Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2019)*, pages 379–388.
- Patil, S. M., Joshi, A., Sawant, N., and Jagdale, A. (2022). Web-based visualization tools to demonstrate the working of sorting and pathfinding algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 184(12):13–20.
- Pereira, W. S., Filho, R. J., Silva, W. R. A., Silva, R. S. T., Dantas, V. F., and Aguiar, Y. P. C. (2016). Validação de uma abordagem combinada para avaliação de software educativo: avanços e desafios. *Revista Tecnologias na Educação*, 16.
- Rathod, S., Mishra, A., Patil, A., Dhanawade, A., and Dalvi, G. (2024). Visualization and comparative simulation of pathfinding, searching and sorting algorithms. *Journal of Engineering Education Transformations*, 38(2):96–105.
- Sasao, T. (2012). *Switching Theory for Logic Synthesis*. Springer Science & Business Media, New York, NY, USA.
- Trivedi, A., Pandey, K., Gupta, V., and Jha, M. K. (2023). Algorhythm – a sorting and path-finding visualizer tool to improve existing algorithms teaching methodologies. In *2023 13th International conference on Cloud Computing, Data Science and Engineering (Confluence)*, pages 158–163. IEEE XPlore.