

# Plataforma Educacional para Simulação de Circuitos Dinâmicos

Celso Vinícius S. Fernandes<sup>1</sup>, Pedro Henrique P. Dias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)  
Divinópolis – MG – Brasil

<sup>2</sup>Bacharelado em Engenharia de Computação

celso.23@aluno.cefetmg.br, pedrodias@aluno.cefetmg.br

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um website educacional interativo para simulação de circuitos dinâmicos, utilizando tecnologias web modernas como HTML, CSS e JavaScript. A plataforma permite aos usuários inserir valores de resistência, capacitância, condição inicial, escolher a organização do circuito e simular seu comportamento, gerando gráficos de degrau, diagrama de Bode e Lugar Geométrico das Raízes. Destinado a estudantes e entusiastas, a aplicação web pode facilitar a visualização e compreensão dos conceitos de controle de sistemas dinâmicos, e se destaca como uma ferramenta promissora para o ensino e aprendizado em cursos de Engenharia de Computação.*

## 1. Introdução

As disciplinas que abordam a modelagem de circuitos elétricos são uma parte integral da estrutura curricular em Engenharia de Computação. No entanto, não se trata de um conteúdo trivial. A modelagem desses circuitos exige conhecimentos profundos em cálculo e eletromagnetismo. Diante dos desafios enfrentados por esses estudantes na assimilação de conceitos de circuitos dinâmicos, surge a motivação para este trabalho, o desenvolvimento de uma plataforma web interativa de simulação. A justificativa para tal iniciativa decorre da necessidade identificada na literatura, que aponta para uma carência de ferramentas didáticas que aliem teoria à prática, enfatizando a importância de recursos educacionais que proporcionem uma aprendizagem mais engajadora [Marques and Gonçalves 2021].

Este artigo tem como objetivo introduzir uma nova aplicação destinada a simulação dinâmica de circuitos, uma ferramenta crucial que emerge para auxiliar na visualização e compreensão do comportamento de modelos dinâmicos. Com o foco em melhorar tanto a compreensão teórica quanto prática dos alunos, a relevância desta ferramenta proposta pode se destacar no cenário educacional. Ao permitir simulações interativas, a aplicação não só apoia o ensino de conceitos complexos, mas também tem potencial para engajar os alunos de maneira efetiva no processo de aprendizagem.

Os resultados alcançados apresentam capacidade para indicar um avanço significativo na forma como os conceitos são apreendidos pelos estudantes. Para tanto, este projeto está estruturado em 5 seções. A Seção 2 discute o problema e a relevância do estudo, seguida pela Seção 3 que detalha a metodologia empregada. Ademais, a Seção 4 analisa os resultados obtidos e discorre sobre eles. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho,



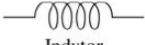
apontando direções futuras de pesquisa e reiterando a contribuição deste estudo para o ensino de Engenharia de Computação.

## 2. Referencial Teórico

Na Engenharia de Computação, o domínio dos fundamentos teóricos que regem os circuitos elétricos e as técnicas de controle é crucial para inovação e solução de problemas complexos. Este referencial teórico sintetiza os conceitos-chave necessários para a compreensão e manipulação de sistemas eletrônicos, enfocando a aplicabilidade em circuitos elétricos e controle. Discute-se as leis primordiais que direcionam o funcionamento dos circuitos elétricos, com ênfase nos circuitos RC, e sua resposta a variações de entrada, exploradas através da função degrau. Métodos de análise e projeto de controle, como o Diagrama de Bode e o LGR, também serão abordados, sublinhando sua relevância para garantir estabilidade e desempenho adequados.

### 2.1. Circuitos Elétricos

Circuitos elétricos constituem a "espinha dorsal" dos sistemas eletrônicos e de controle. São sistemas que permitem a transferência e a manipulação de energia elétrica por meio de componentes interconectados, como resistores, capacitores e indutores. O estudo de circuitos elétricos envolve a análise de leis fundamentais, como as Leis de Ohm e Kirchhoff, que governam a relação entre tensão, corrente e resistência, conforme ilustrado na Figura 1.

Componente	Tensão-corrente	Corrente-tensão	Tensão-carga	Impedância $Z(s) = V(s)/I(s)$	Admitância $Y(s) = I(s)/V(s)$
 Capacitor	$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$	$v(t) = \frac{1}{C} q(t)$	$\frac{1}{Cs}$	$Cs$
 Resistor	$v(t) = Ri(t)$	$i(t) = \frac{1}{R} v(t)$	$v(t) = R \frac{dq(t)}{dt}$	$R$	$\frac{1}{R} = G$
 Indutor	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau$	$v(t) = L \frac{d^2 q(t)}{dt^2}$	$Ls$	$\frac{1}{Ls}$

Observação: O seguinte conjunto de símbolos e unidades é utilizado neste livro:  $v(t)$  – V (volts),  $i(t)$  – A (ampères),  $q(t)$  – Q (coulombs),  $C$  – F (farads),  $R$  –  $\Omega$  (ohms),  $G$  – S (siemens),  $L$  – H (henrys).

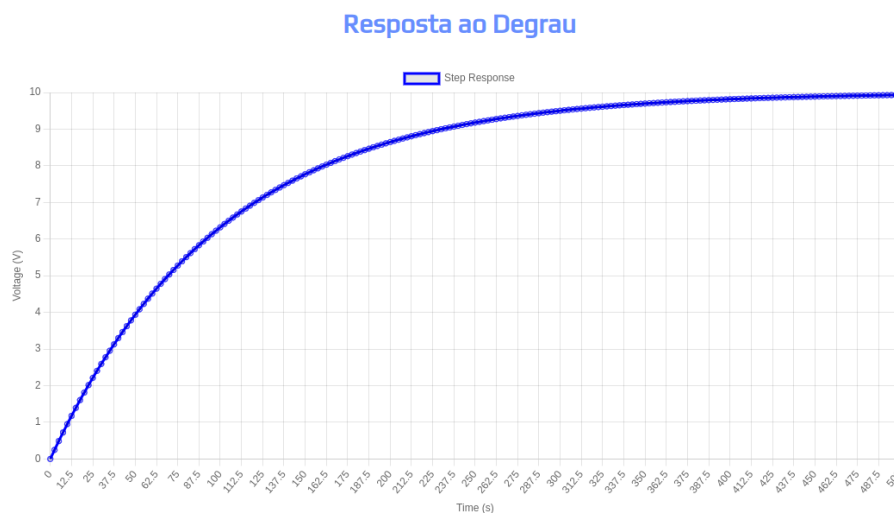
**Figura 1. Relações tensão-corrente, tensão-carga e impedância para capacitores, resistores e indutores[Nise 2017]**

#### 2.1.1. Circuitos RC

Os circuitos RC são formados pela combinação de resistores (R) e capacitores (C), e são usados para criar filtros e temporizadores, entre outras aplicações. Em um circuito RC, a tensão em um capacitor não muda instantaneamente, mas sim de forma exponencial, o que é descrito pela constante de tempo  $\tau$ . Esta constante de tempo é uma métrica chave para circuitos RC, pois ela quantifica o tempo necessário para que o capacitor carregue até certa porcentagem da diferença entre a sua tensão inicial e final, ou para descarregar até certa parte da sua carga total. A análise de circuitos RC é complexa e depende da configuração específica do circuito (em série ou em paralelo).

## 2.2. Função Degrau

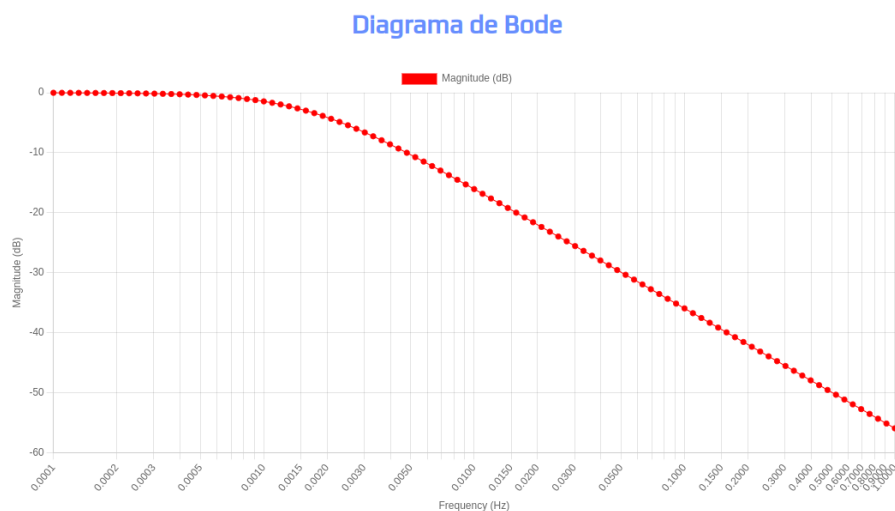
Na análise de circuitos e sistemas de controle, a função degrau é frequentemente utilizada como uma entrada de teste para avaliar a resposta do sistema. Ela representa uma mudança súbita de um nível de tensão ou corrente de um valor estável para outro, geralmente de zero para um valor constante. A resposta de um sistema à função degrau é crítica para entender como o sistema reage a mudanças e para projetar sistemas que possam alcançar rapidamente um novo estado de equilíbrio após uma perturbação, como ilustrado na Figura 2.



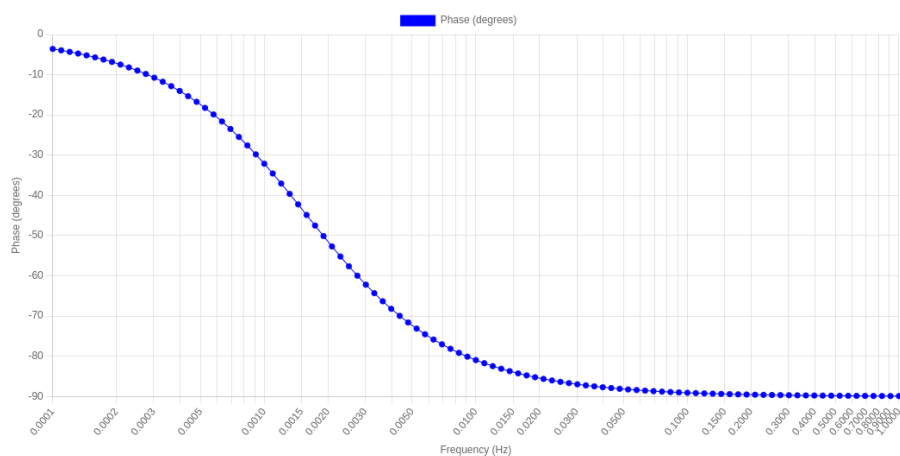
**Figura 2. Exemplo de simulação da Resposta ao Degrau diante de um circuito RC[Vinicius and Dias 2023].**

## 2.3. Diagrama de Bode

O Diagrama de Bode é uma representação gráfica que é amplamente utilizada na engenharia para analisar a resposta em frequência de sistemas lineares e invariantes no tempo. Ele permite aos engenheiros prever como um sistema reagirá a diferentes frequências de entrada, o que é fundamental para o projeto de sistemas de controle e comunicação. O diagrama consiste em duas partes: o gráfico de magnitude, que mostra a atenuação ou amplificação do sinal em decibéis (dB) em relação à frequência (Hz), e o gráfico de fase (graus), que mostra a mudança de fase entre a entrada e a saída, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4.



**Figura 3. Exemplo de simulação da magnitude do Diagrama de Bode diante de um circuito RC[Vinícius and Dias 2023].**

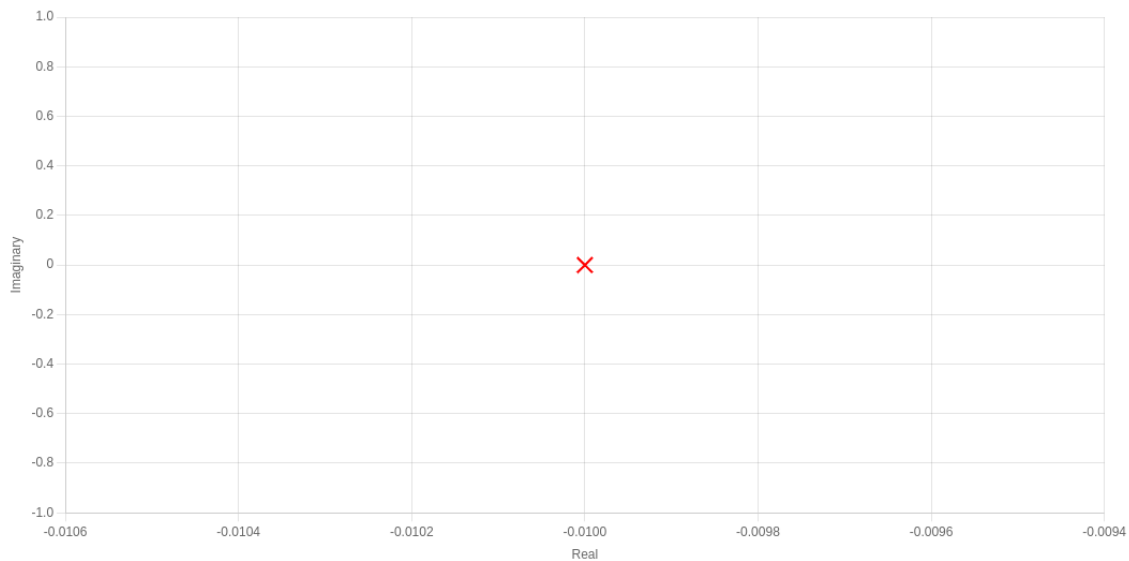


**Figura 4. Exemplo de simulação da phase do Diagrama de Bode diante de um circuito RC[Vinícius and Dias 2023].**

## 2.4. Lugar Geométrico das Raízes (LGR)

O Lugar Geométrico das Raízes é uma abordagem gráfica para o projeto e análise de sistemas de controle. Ele permite visualizar as mudanças nos polos de um sistema de controle em resposta a variações em seus parâmetros. Esta técnica é fundamental para garantir a estabilidade e a resposta dinâmica desejada de um sistema. Esta técnica é particularmente útil para o projeto de controladores, permitindo ajustar os parâmetros do sistema para alcançar a resposta desejada, segundo a Figura 5.

## Lugar Geométrico das Raízes



**Figura 5. Exemplo de simulação do LGR diante de um circuito RC[Vinícius and Dias 2023].**

### 3. Metodologia

As funcionalidades foram projetadas para facilitar o entendimento teórico-prático, com uma interface que promove a experimentação. Elaborou-se então, o design dessa aplicação com uma interface simplificada que oferece ao usuário campos de input para definir a resistência, capacitância e condição inicial, seguidos pela seleção visual entre seis configurações de circuitos e um botão para iniciar a simulação, culminando-se na geração de gráficos descritivos.

Com a responsividade como um princípio central de design, assegurou-se a compatibilidade da aplicação com uma variedade de dispositivos com diferentes resoluções, garantindo o acesso universal. Baseou-se a escolha da paleta de cores, com o azul predominante, por conta de sua associação com segurança e clareza, para reforçar a compreensão e a confiabilidade. Desenvolveram-se protótipos iniciais para otimizar a disposição dos elementos de controle, enquanto o logotipo original foi criado para manter a identidade visual consistente em todas as plataformas.

O sucesso do projeto será medido pela implementação efetiva dessas funcionalidades e pela precisão e clareza das visualizações gráficas, que devem apoiar o aprendizado em Controle de Sistemas Dinâmicos.

#### 3.1. Levantamento de Requisitos

Na fase de levantamento de requisitos, o *brainstorming* definiu que a aplicação web deveria permitir aos usuários inserir dados e configurar circuitos RC para gerar gráficos de degrau, Bode e LGR, enfatizando a funcionalidade e a eficiência. A validade dos requisitos foi atestada através da comparação com padrões estabelecidos por softwares renomados, como o MATLAB[MathWorks 2023]. A documentação do desenvolvimento foi realizada no GitHub[Microsoft 2023], proporcionando um histórico detalhado de *commits*

para cada funcionalidade implementada. Embora a estética fora avaliada um requisito não-essencial, também teve atenção adequada.

### 3.2. Seleção de Tecnologias

Com base nos requisitos levantados, a escolha das tecnologias para o desenvolvimento da plataforma foi direcionada pela busca de compatibilidade abrangente e facilidade de uso. Nesse sentido, foram selecionadas as linguagens fundamentais da web: HTML5, para a estruturação do conteúdo, CSS3, para a estilização e design responsivo, e JavaScript(ES6), pela sua versatilidade e ampla adoção na interatividade do cliente. Adicionalmente, incorporou-se a biblioteca "Chart.js" para a geração de gráficos dinâmicos e intuitivos, e a biblioteca "Math.min.js" para o processamento de operações matemáticas complexas, facilitando a implementação das funcionalidades de simulação dos circuitos. Desenvolveu-se o projeto utilizando Visual Studio Code, proporcionando uma codificação eficiente e organizada. Realizou-se o *deploy* com o Vercel, garantindo uma hospedagem otimizada e acessível.

### 3.3. Escolha e Implementação dos Circuitos

A seleção das configurações dos circuitos na plataforma foi cuidadosamente planejada para cobrir as variações mais comuns encontradas em contextos educacionais e práticos de Engenharia de Computação. A gama de circuitos disponíveis para simulação inclui arranjos em série e paralelo, tanto para circuitos RC quanto CR, entre outras configurações essenciais. No total são seis variantes ilustradas. A plataforma emprega algoritmos em JavaScript que aproveitam a biblioteca 'Math.min.js', utilizada para realizar cálculos matemáticos necessários nas simulações dos circuitos.

#### 3.3.1. Circuito 1

O Circuito 1 representa um arranjo RC em série clássico, fundamental para o entendimento de circuitos de primeira ordem. A figura abaixo ilustra este circuito, e a equação correspondente define sua função de transferência, que descreve a relação entre a tensão de saída no capacitor e a tensão de entrada da fonte.

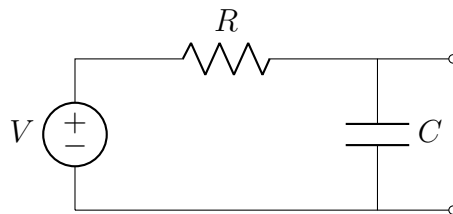


Figura 6.

$$H(s) = \frac{V_C(s)}{V_F(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (1)$$

### 3.3.2. Circuito 2

O Circuito 2 apresenta uma configuração CR em série, que é um caso inverso do Circuito 1, com o capacitor na fonte e o resistor em série com a carga. Este circuito é particularmente útil para entender a resposta de sistemas que exibem características de filtros passa-alta.

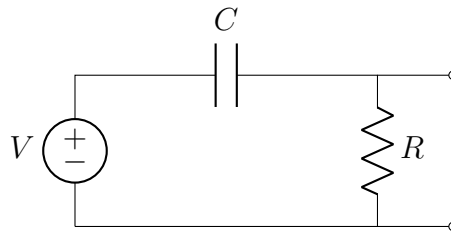


Figura 7.

$$H(s) = \frac{V_R}{V_F} = \frac{1}{1 + \frac{1}{CRs}} \quad (2)$$

### 3.3.3. Circuito 3

No Circuito 3, temos um circuito RC, onde o resistor e o capacitor estão dispostos em paralelo. Esta configuração oferece uma perspectiva diferente das propriedades de carga e descarga do capacitor, tornando-se uma ferramenta valiosa para estudos de transientes e estabilidade.

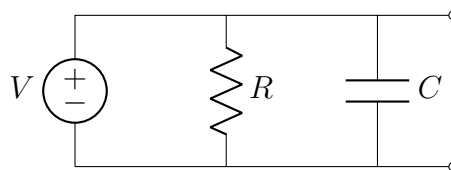
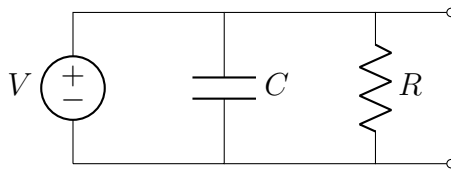


Figura 8.

$$H(s) = \frac{V_C}{V_F} = 1 \quad (3)$$

### 3.3.4. Circuito 4

O Circuito 4 é um arranjo em paralelo CR, que é uma variação do Circuito 3, invertendo a posição do resistor e do capacitor. A análise deste circuito ajuda os estudantes a compreenderem como as características do filtro passa-baixa são afetadas pela ordem dos componentes.

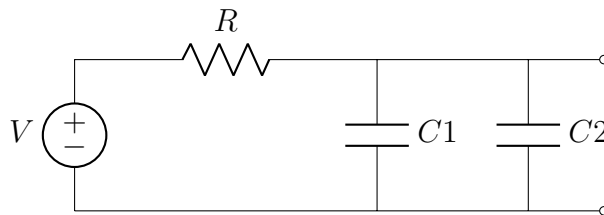


**Figura 9.**

$$H(s) = \frac{V_R}{V_F} = 1 \quad (4)$$

### 3.3.5. Circuito 5

Este circuito é uma extensão do Circuito 1, incluindo dois capacitores em série, C1 e C2. Esta configuração é comum em aplicações que necessitam de uma constante de tempo ajustável ou em estudos de circuitos acoplados.

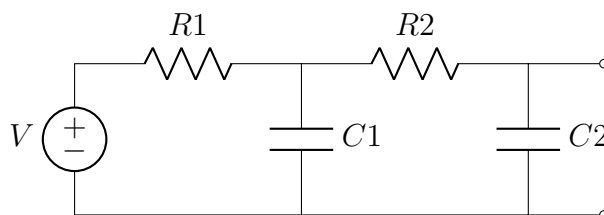


**Figura 10.**

$$\frac{Y}{X} = \frac{V_{C_2}}{V_F} = \frac{1}{RC_2(C_1 + 1)s + 1} \quad (5)$$

### 3.3.6. Circuito 6

O Circuito 6 é o mais complexo entre os apresentados, com dois resistores, R1 e R2, e dois capacitores, C1 e C2, em uma configuração mista. Esse circuito permite a análise de sistemas de ordem superior e é fundamental para o estudo avançado de dinâmica de sistemas e teoria de controle.

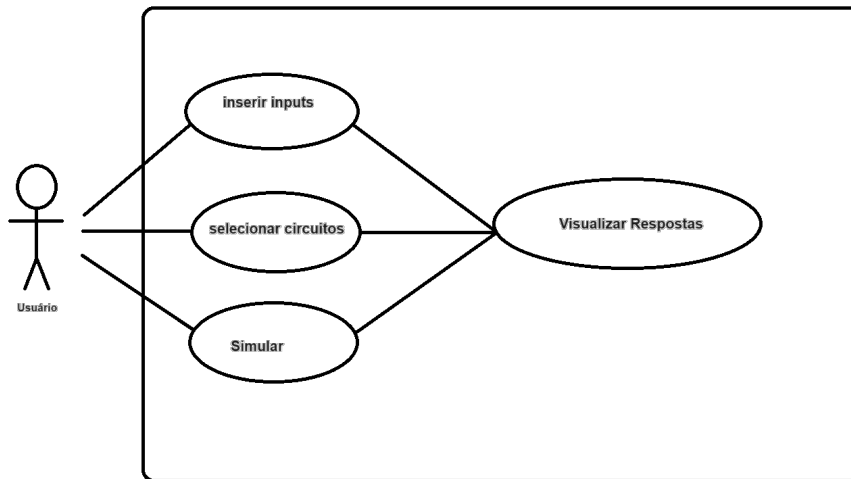


**Figura 11.**



$$\frac{Y}{X} = \frac{V_{C_2}}{V_F} = \frac{1}{R_1 C_1 C_2 s^2 + C_2 (R_1 + R_2) s + 2} \quad (6)$$

### 3.4. Diagrama de Casos de Uso



**Figura 12. Diagrama de Casos de Uso da aplicação**

Código	Nome	Descrição
RF001	Inserir Input	Permite ao usuário inserir os valores de resistência, capacitância e condição inicial
RF002	Selecionar Circuitos	Permite ao usuário escolher dentre os circuitos disponíveis para simular os valores do input
RF003	Simular	Gera os resultados com base no RF001 e RF002

**Tabela 1. Tabela de descrição de casos de uso do projeto.**

### 3.5. Testes e Validação

A fase de testes e validação da plataforma seguiu uma abordagem prática e detalhada buscando assegurar a confiabilidade das funcionalidades implementadas. Inicialmente, as funcionalidades básicas foram testadas pelos próprios desenvolvedores, que executaram uma série de simulações destinadas a verificar a integridade da aplicação e a exatidão das respostas dos circuitos. Esta etapa preliminar foi crucial para identificar e corrigir falhas imediatas antes de avançar para a fase de validação externa.

Para a validação dos gráficos gerados, a estratégia adotada envolveu uma comparação com os padrões estabelecidos por softwares de simulação de circuitos amplamente reconhecidos na área, como o MATLAB[MathWorks 2023]. Ao confrontar os resultados obtidos pela plataforma desenvolvida com aqueles gerados por esses sistemas consolidados, atestou-se certa similaridade nas simulações realizadas, mas também alguns aspectos para refinamento nos algoritmos de simulação.

## 4. Resultados e Discussão

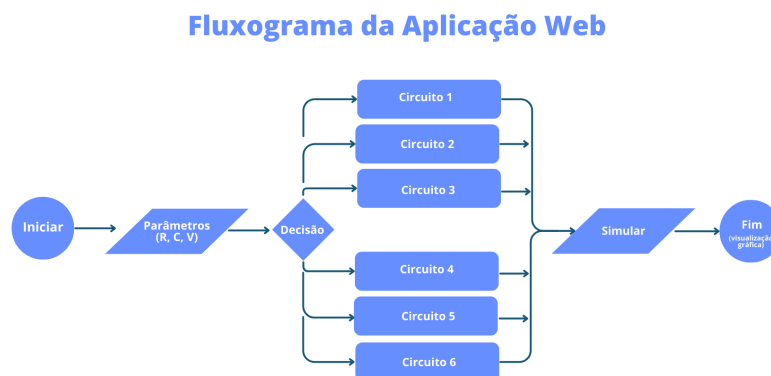
Os resultados alcançados refletem a confluência entre a necessidade identificada na seção de contextualização e a aplicação prática das estratégias delineadas na metodologia. A plataforma foi desenvolvida e testada em uma máquina com capacidade de processamento adequada, detalhada nas parametrizações do sistema, assegurando que as simulações fossem executadas sem atrasos, mantendo a integridade e a confiabilidade dos dados.

### 4.1. Modelo e Reprodução

A fim de atestar a transparência e a reprodutibilidade dos resultados apresentados neste estudo, todo o código-fonte e a documentação detalhada deste estudo estão disponíveis em um repositório GitHub público. O diretório "src/" contém os scripts HTML, CSS e JavaScript usados para a análise, permitindo que outros pesquisadores validem, reproduzam ou expandam a pesquisa. A URL do repositório Git é fornecida na seção de Referências[Vinícius and Dias 2023] deste artigo.

### 4.2. Fluxograma

O fluxo de uso da plataforma segue uma lógica intuitiva, confirmada pelo fluxograma de interação do usuário, ilustrado na Figura 13. Após acessar a plataforma, uma interface clara permite a manipulação dos parâmetros (resistência, capacitância e condição inicial) e seleção de configurações dos circuitos, clicando no botão 'Simular' o usuário é levado a uma representação gráfica imediata. As telas de simulação exibem os resultados em gráficos de degrau, Bode e LGR, alinhados com as expectativas e oferecendo uma visão tangível das teorias de circuitos.



**Figura 13.** Imagem com o fluxograma sugerido para a aplicação web desenvolvida

### 4.3. Análise Comparativa

Nesta etapa, apresenta-se uma análise comparativa para avaliar a precisão dos resultados obtidos pela plataforma desenvolvida. Três conjuntos de figuras são apresentados, cada um composto por um par de gráficos: um gerado pelo MATLAB e o outro pela aplicação web desenvolvida. À esquerda, as figuras geradas pelo MATLAB servem como referência devido à sua ampla aceitação na comunidade acadêmica e precisão comprovada. À direita, as figuras correspondentes geradas pela plataforma ilustram a simulação dos mesmos circuitos sob condições idênticas.

A Figura 14 compara a resposta em degrau dos circuitos, uma métrica essencial para avaliar a dinâmica do sistema a uma mudança súbita de entrada. A Figura 15 examina os diagramas de Bode, que são fundamentais para entender a resposta em frequência de um sistema. Por fim, a Figura 14 apresenta o Lugar Geométrico das Raízes (LGR), que proporciona percepções sobre a estabilidade e a resposta dinâmica do sistema.

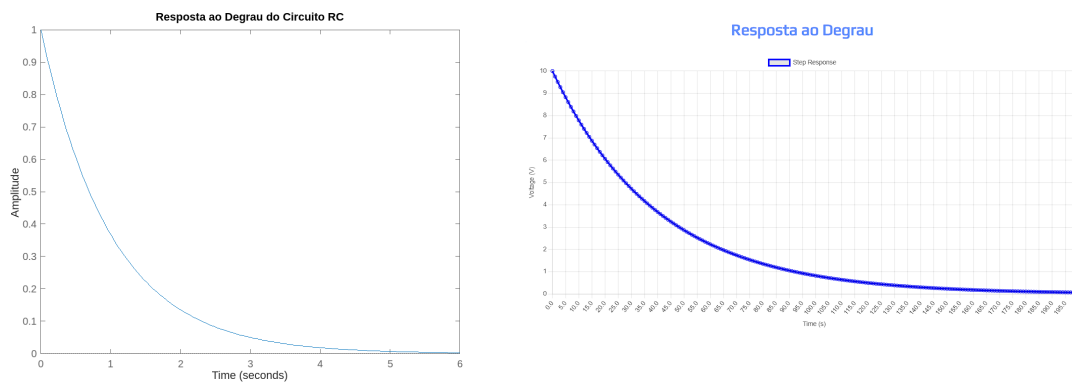


Figura 14. Comparação do Degrau

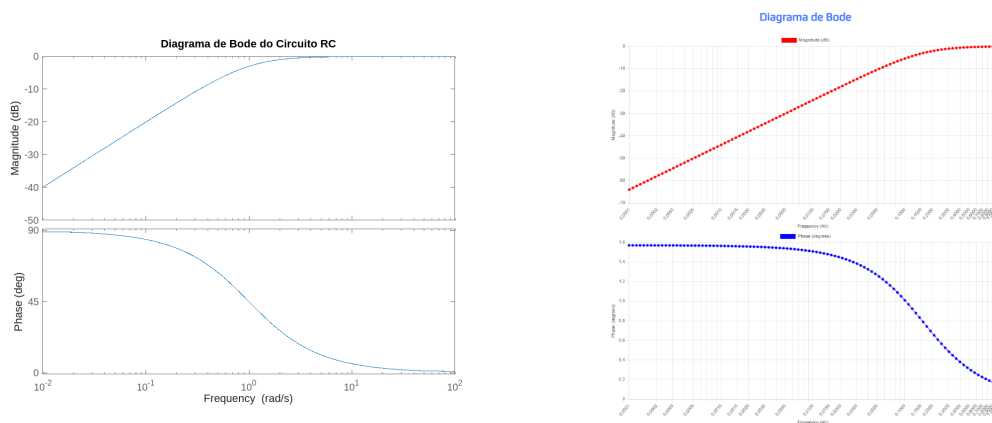
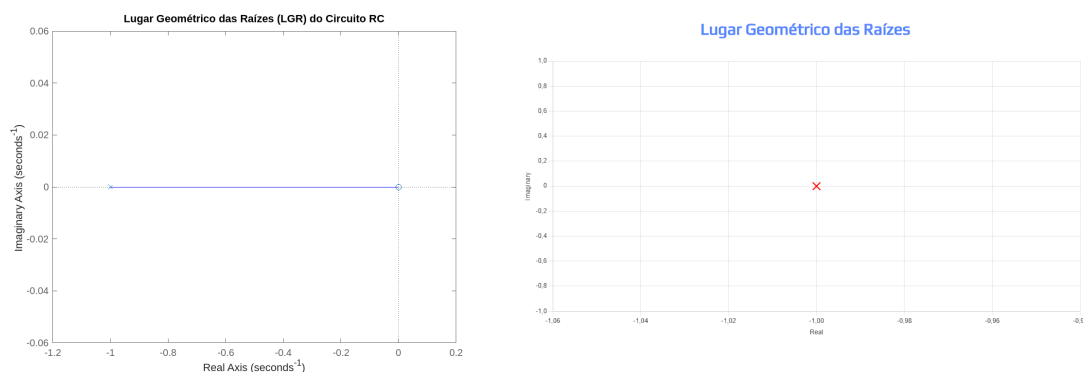


Figura 15. Comparação do Degrau



**Figura 16. Comparação do Degrau**

A análise comparativa mostra que a aplicação foi moderadamente bem-sucedida em identificar resultados que correspondem às expectativas, embora seja importante considerar a variação da escala, já que, por vezes, os resultados, mesmo que corretos, aparecem em perspectivas distintas. No entanto, é importante ressaltar uma limitação do projeto: a necessidade de aprofundar a verificação das validações dos cálculos para garantir uma precisão ainda mais segura.

## 5. Conclusão

Nota-se que este estudo alcançou seu objetivo inicial de desenvolver uma aplicação web interativa para a simulação de circuitos, servindo como uma ponte entre o referencial teórico e as abordagens metodológicas empregadas. A aplicação foi capaz de reproduzir resultados consistentes com as hipóteses teóricas, demonstrando sua eficácia como ferramenta de ensino.

No entanto, o estudo apresentou limitações, como a necessidade de uma análise mais aprofundada da precisão dos cálculos em comparação com padrões estabelecidos. Para trabalhos futuros, sugere-se a expansão da aplicação para incluir uma gama mais ampla de simulações de circuitos e a integração de funcionalidades que permitam análises mais complexas, abordando assim as lacunas identificadas neste estudo.

## Referências

- Marques, S. C. and Gonçalves, G. E. (2021). *O ensino e a compreensão de física como ferramenta didática para as simulações em plataformas de ensino*. Appris, Curitiba, 1 edition.
- MathWorks (2023). *MATLAB - Math. Graphics. Programming*. The MathWorks, Inc., Estados Unidos, 1 edition.
- Microsoft (2023). *Social Code Hosting*. Microsoft, Estados Unidos, 1 edition.
- Nise, N. S. (2017). *Engenharia de Sistemas de Controle*. LTC, Rio de Janeiro, 7 edition.
- Vinícius, C. and Dias, P. (2023). *Modelagem de circuitos dinâmicos*. <https://github.com/celzin/Plataforma-Educacional-Circuitos>. Acesso em: 08 dez. 2023.