Politécnica UFRJ

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SIMULADOR 3D INTERATIVO PARA O ENSINO DE ELETRODINÂMICA

Rayssa Cristina de Almeida

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica e de Computação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadoras: Claudia Maria Lima Werner e Claudia Susie Rodrigues

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2026

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SIMULADOR 3D INTERATIVO PARA O ENSINO DE ELETRODINÂMICA

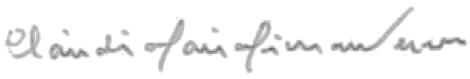
Rayssa Cristina de Almeida

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E INFORMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE COMPUTAÇÃO E INFORMAÇÃO

Autor:

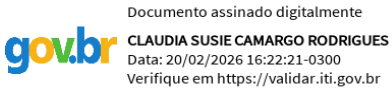
Rayssa Cristina de Almeida

Orientadora:



Claudia Maria Lima Werner, D. Sc.

Orientadora:

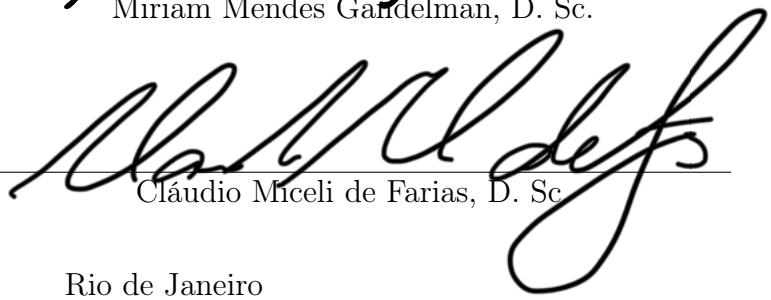


Claudia Susie Camargo Rodrigues, D. Sc.

Examinador:

Miriam Mendes Gandelman, D. Sc.

Examinador:



Cláudio Miceli de Farias, D. Sc.

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2026

Declaração de Autoria e de Direitos

Eu, *Rayssa Cristina de Almeida*, autora da monografia *Desenvolvimento e Avaliação de um Simulador 3D Interativo para o Ensino de Eletrodinâmica*, subscrevo para os devidos fins, as seguintes informações:

1. O autor declara que o trabalho apresentado na disciplina de Projeto de Graduação da Escola Politécnica da UFRJ é de sua autoria, sendo original em forma e conteúdo.

2. Excetuam-se do item 1. eventuais transcrições de texto, figuras, tabelas, conceitos e ideias, que identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos proprietários, quando necessárias.

3. O autor permite que a UFRJ, por um prazo indeterminado, efetue em qualquer mídia de divulgação, a publicação do trabalho acadêmico em sua totalidade, ou em parte. Essa autorização não envolve ônus de qualquer natureza à UFRJ, ou aos seus representantes.

4. O autor pode, excepcionalmente, encaminhar à Comissão de Projeto de Graduação, a não divulgação do material, por um prazo máximo de 01 (um) ano, improrrogável, a contar da data de defesa, desde que o pedido seja justificado, e solicitado antecipadamente, por escrito, à Congregação da Escola Politécnica.

5. O autor declara, ainda, ter a capacidade jurídica para a prática do presente ato, assim como ter conhecimento do teor da presente Declaração, estando ciente das sanções e punições legais, no que tange a cópia parcial, ou total, de obra intelectual, o que se configura como violação do direito autoral previsto no Código Penal Brasileiro no art.184 e art.299, bem como na Lei 9.610.

6. O autor é o único responsável pelo conteúdo apresentado nos trabalhos acadêmicos publicados, não cabendo à UFRJ, aos seus representantes, ou ao(s) orientador(es), qualquer responsabilização/ indenização nesse sentido.

7. Por ser verdade, firmo a presente declaração.

Rayssa Cristina de Almeida

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Escola Politécnica - Departamento de Eletrônica e de Computação
Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária
Rio de Janeiro - RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es).

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha mãe, Clara, minha avó, Maria Fátima, ao meu amor e aos meus amigos. À família que me construiu e à que eu construí.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um software de simulação 3D interativo, concebido como uma ferramenta pedagógica para o ensino de circuitos elétricos, que utiliza a tecnologia de realidade virtual. O objetivo principal é facilitar a compreensão dos conceitos fundamentais da Lei de Ohm ($V = R \cdot I$), como tensão, corrente e resistência, que são frequentemente abstratos para estudantes em fases iniciais de aprendizado. A aplicação foi desenvolvida utilizando o motor de jogos Unity e a linguagem de programação C#. O simulador permite que o usuário interaja com um circuito simples com componentes 3D, altere os parâmetros elétricos e observe em tempo real os efeitos dessas mudanças através de *feedback* visual intuitivo. O resultado foi um protótipo funcional que demonstra o potencial de ambientes virtuais interativos como um complemento eficaz aos métodos de ensino tradicionais, promovendo uma aprendizagem mais engajadora e menos suscetível a erros de interpretação.

A validação da ferramenta, conduzida através de um estudo de caso com usuários não familiarizados com simulações 3D, indicou resultados promissores tanto na usabilidade quanto na eficácia pedagógica. A análise comparativa entre pré e pós-testes demonstrou evolução na compreensão de conceitos abstratos, destacando-se a correção de concepções alternativas sobre a resistência de componentes reais e a independência de circuitos paralelos. A avaliação de experiência de usuário, baseada no modelo MEEGA+, apontou uma alta aceitação da interface e do potencial de engajamento da ferramenta.

Palavras-Chave: Simulação Computacional, Ensino de Física, Eletrodinâmica, Unity 3D, Aprendizagem Significativa.

ABSTRACT

This work presents the development of interactive 3D simulation software designed as a pedagogical tool for teaching electric circuits, leveraging virtual reality technology. The primary objective is to facilitate the comprehension of fundamental concepts related to Ohm's Law ($V = R \cdot I$), such as voltage, current, and resistance, which are often abstract for students in the early stages of learning. The application was developed using the Unity game engine and the C# programming language. The simulator allows users to interact with a simple circuit composed of 3D components, alter electrical parameters, and observe the effects of these changes in real-time through intuitive visual feedback. The result is a functional prototype that demonstrates the potential of interactive virtual environments as an effective complement to traditional teaching methods, promoting more engaging learning that is less prone to interpretation errors.

The validation of the tool, conducted through a case study with users who claimed to be unfamiliar with 3D simulations, indicated promising results regarding both usability and pedagogical effectiveness. Comparative analysis between pre- and post-tests demonstrated an improvement in the understanding of abstract concepts, highlighting the correction of alternative conceptions regarding the resistance of real components and the independence of parallel circuits. The user experience evaluation, based on the MEEGA+ model, indicated high acceptance of the interface and the tool's potential for user engagement.

Keywords: Physics Education, Computer Simulation, Electrodynamics, Unity 3D, Meaningful Learning.

SIGLAS

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

MEEGA - *Model for the Evaluation of Educational GAmes*

Sumário

1 Introdução **1**

1.1 Tema 1

1.2 Delimitação 2

1.3 Justificativa 2

1.4 Objetivos 3

1.5 Metodologia 3

1.6 Organização 4

2 Fundamentação teórica e tecnológica **5**

2.1 Desafios pedagógicos no ensino da eletrodinâmica 5

2.1.1 A fragmentação do ensino 6

2.1.2 Aprendizagem Mecânica vs. Significativa 6

2.1.3 Conceitos-chave (Ohm e Kirchhoff) 7

2.2 Simulações e ferramentas lúdicas como solução 9

3 Metodologia **11**

3.1 Desenvolvimento do protótipo 11

3.1.1 Estruturas de dados e lógica da simulação 11

3.2 Ciclo de desenvolvimento 13

3.3 Mudanças de planos e evolução do escopo 14

4 Desenvolvimento da proposta **16**

4.1 Ferramentas utilizadas 16

4.2 *Design* da interatividade e *feedback* pedagógico 17

4.3 Funcionamento da aplicação 18

5 Trabalhos relacionados **28**

5.1 PhET Interactive Simulations 28

5.2 EveryCircuit 29

5.3 CircuitLab 30

6 Avaliação **32**

6.1 Perfil dos participantes 33

6.2 Análise dos resultados de aprendizagem 34

6.3 Avaliação de usabilidade e experiência 35

6.3.1 *Design* e interface 35

6.3.2 Usabilidade e curva de aprendizado 36

6.3.3 Engajamento e valor percebido 37

6.3.4 *Feedback* qualitativo e limitações identificadas 38

6.4 Conclusão 39

7 Conclusões **40**

7.1 Contribuições 40

7.2 Lições aprendidas 41

7.3 Trabalhos futuros 42

Bibliografia **44**

A Termo de Consentimento Livre e Esclarecido **46**

B Roteiro de Atividades do Participante **49**

C Questionários **52**

Lista de Figuras

4.1 Circuito inicial. 18
4.2 Circuito simples montado com uma lâmpada acesa com brilho médio. 20
4.3 O mesmo circuito com duas pilhas, lâmpada mais brilhante e mais elétrons. 21
4.4 Circuito com tensão alta, interruptor fechado e sem fluxo (lâmpada queimada). 22
4.5 Circuito com duas pilhas, resistor em série e lâmpada com brilho fraco. 23
4.6 Circuito com uma lâmpada em um ramo e um segundo ramo paralelo vazio. 24
4.7 Duas lâmpadas idênticas em paralelo, brilhando com a mesma intensidade. 25
4.8 Circuito em paralelo demonstrando a divisão de corrente desigual. . . 26
4.9 A mesma configuração do circuito anterior, mas agora indicando o sentido convencional da corrente (do polo positivo para o negativo). . 27

5.1 Interface do aplicativo PhET Interactive Simulations. 29
5.2 Interface do aplicativo EveryCircuit. 30
5.3 Interface da ferramenta *web* CircuitLab. 31

Lista de Tabelas

6.1 Comparativo de desempenho conceitual (Pré vs. Pós-Teste, N=5) . . 34

Capítulo 1

Introdução

1.1 Tema

Este trabalho trata da intersecção entre tecnologia e educação, abordando o desenvolvimento de ferramentas digitais para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem. Em uma visão macroscópica, o projeto explora como ambientes virtuais e representações gráficas avançadas podem servir como suporte cognitivo para materializar fenômenos científicos que não são observáveis a olho nu.

A grande área de conhecimento na qual esta pesquisa se insere é a de Computação e Informática, especificamente na vertente de Informática na Educação e Tecnologias Educacionais aplicadas ao Ensino de Física.

Dentro desta área, o subconjunto de conhecimento específico é a aplicação de tecnologias de visualização tridimensional e simulação computacional interativa. O foco conteudista restringe-se à Eletrodinâmica, concentrando-se na modelagem e representação visual de circuitos elétricos de corrente contínua.

O problema a ser resolvido é a dificuldade de abstração e compreensão de conceitos fundamentais da eletrodinâmica — tais como tensão, corrente e resistência — por parte de estudantes. Identifica-se que essa barreira de aprendizado decorre da invisibilidade inerente aos fenômenos elétricos e da fragmentação existente entre o ensino teórico e o ensino prático.

1.2 Delimitação

O objeto de estudo é o desenvolvimento de um software educacional voltado para estudantes do ensino médio e do ciclo básico de engenharia. O escopo do simulador restringe-se a circuitos de corrente contínua (CC), abordando especificamente a Lei de Ohm e as Leis de Kirchhoff. O projeto foca na visualização qualitativa e quantitativa do fluxo de elétrons e no comportamento de componentes básicos (fonte de tensão, resistores, lâmpadas e fios), excluindo-se, nesta etapa, a simulação de componentes de corrente alternada (AC) ou semicondutores complexos. A validação será realizada quanto à usabilidade e ao ganho de aprendizado imediato, não se estendendo a análises longitudinais de retenção de conhecimento.

Por fim, é fundamental delimitar, também, a natureza da ferramenta: o simulador não se propõe a substituir a prática laboratorial física, onde as leis da natureza operam independentemente de algoritmos, mas sim a atuar como um recurso complementar de visualização. O ambiente virtual deve ser compreendido como um modelo idealizado para facilitar a entrada do aluno nesse universo complexo, constituindo uma tradução algorítmica de leis físicas. Sendo uma construção digital, a simulação está, portanto, sujeita a limitações de representação e eventuais inconsistências de software que diferem substancialmente das variâncias naturais inerentes a um experimento real.

1.3 Justificativa

A motivação para este projeto reside na necessidade de superar a fragmentação entre o conhecimento prático e o teórico no ensino de física. Conforme aponta Borges [1], o ensino tradicional muitas vezes reduz a ciência a um sistema abstrato de fórmulas, dificultando a compreensão real de fenômenos como a eletricidade. Para o estudante iniciante, conceitos como “diferença de potencial” são abstratos e desprovidos de contraparte tangível. A tecnologia de visualização 3D e os conceitos de Realidade Virtual (RV) surgem como ferramentas capazes de mitigar essa barreira. Segundo Fernandes et al. [2], a principal vantagem destas tecnologias reside na possibilidade de permitir que usuários explorem e compreendam estruturas complexas

por meio de uma experiência interativa.

De acordo com a teoria de Ausubel, apresentada por Moreira e Masini [3], a ocorrência da aprendizagem significativa depende fundamentalmente da existência, na estrutura cognitiva do usuário, de conceitos relevantes que funcionem como "pontos de ancoragem". Nesse sentido, a criação de um ambiente virtual que permita a visualização do fluxo de corrente e a manipulação direta de componentes justifica-se como fornecedor de pontos de ancoragem, que servem para conectar as novas informações à estrutura cognitiva do usuário, resultando numa aprendizagem significativa [3], permitindo que o aluno construa modelos mentais robustos.

1.4 Objetivos

O objetivo geral é, então, desenvolver e avaliar um protótipo de software de simulação 3D interativo, com propósito pedagógico, capaz de demonstrar visualmente os fundamentos da eletrodinâmica e auxiliar na superação de concepções alternativas sobre o funcionamento de circuitos elétricos. Desta forma, tem-se como objetivos específicos: (1) modelar e implementar um ambiente virtual em 3D utilizando o motor gráfico Unity [4]; (2) desenvolver algoritmos em linguagem C# [5] que apliquem as Leis de Ohm e Kirchhoff para calcular, em tempo real, as grandezas elétricas do circuito montado pelo usuário; (3) criar mecanismos de *feedback* visual imediato (animação de partículas e intensidade luminosa) que representem a corrente no circuito; (4) implementar uma interface de usuário intuitiva baseada no paradigma de "arrastar e soltar" (*drag-and-drop*) para a montagem de circuitos; e (5) realizar uma validação experimental com usuários para aferir a usabilidade da ferramenta e o impacto no aprendizado de conceitos específicos.

1.5 Metodologia

O desenvolvimento do trabalho seguirá uma abordagem de prototipagem incremental e iterativa, permitindo a evolução orgânica do software através de ciclos contínuos de fundamentação teórica, implementação, testes de validação e refinamento. O núcleo tecnológico do projeto será desenvolvido no motor gráfico Unity,

utilizando a linguagem C# para a programação da lógica e o software Blender [6] para a modelagem dos elementos 3D. A arquitetura do sistema adotará um modelo orientado a componentes (*Component-Based Architecture*), estruturado para garantir a modularidade e a escalabilidade do código. As responsabilidades do *software* serão segregadas com a implementação de classes específicas.

1.6 Organização

Esta monografia está organizada da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os desafios no ensino da eletrodinâmica e o uso de tecnologias de visualização na educação. A Seção 3 descreve a metodologia de desenvolvimento e o ciclo de prototipagem. A Seção 4 detalha o desenvolvimento da proposta, especificando as ferramentas (Unity, C#), e a arquitetura do software. A Seção 5 apresenta a avaliação realizada com os usuários e a discussão dos resultados obtidos. Por fim, a Seção 6 traz as conclusões, contribuições do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

Capítulo 2

Fundamentação teórica e tecnológica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e tecnológica que norteou o desenvolvimento do projeto. A revisão da literatura foi estruturada em duas frentes principais: a frente pedagógica, que investiga os desafios no processo de ensino-aprendizagem de conceitos Físicos como a eletrodinâmica e o papel de novas metodologias para superá-los; e a frente tecnológica, que analisa o estado da arte em plataformas de simulação e justifica as escolhas de ferramentas para a construção da solução proposta. Esta fase foi crucial para solidificar os requisitos do projeto e embasar as decisões de *design* e implementação.

2.1 Desafios pedagógicos no ensino da eletrodinâmica

O ensino da eletrodinâmica enfrenta barreiras intrínsecas significativas, sendo a principal delas a natureza abstrata e invisível dos fenômenos elétricos. Diferente da mecânica clássica com conceitos como velocidade e colisão, que são observáveis no cotidiano, o fluxo de elétrons e a diferença de potencial ocorrem em uma escala microscópica inacessível aos sentidos humanos. Essa invisibilidade cria um fosso cognitivo para o estudante, que muitas vezes é forçado a aceitar definições matemáticas sem ter uma representação mental concreta do processo físico subjacente.

2.1.1 A fragmentação do ensino

Um dos desafios centrais no ensino de física, especialmente em domínios que podem ser considerados abstratos como a eletrodinâmica, reside na forma como o conhecimento é tradicionalmente estruturado e apresentado aos alunos. Conforme aponta Borges [1], o ensino de ciências em escolas e universidades muitas vezes se assemelha a um sistema fechado, "preocupando-se mais com a apresentação das definições, conceitos e fórmulas que os alunos memorizam para resolver exercícios".

Esta abordagem, que prioriza a teoria em sua forma final, acaba por "destituir o conhecimento científico de seu contexto", reduzindo-o a um "sistema abstrato de definições, leis e fórmulas" [1]. O resultado direto dessa prática é a fragmentação do conhecimento, onde o estudante falha em "integrar conhecimento prático e conhecimento teórico". Seguindo essa linha de pensamento, para o aluno, a Lei de Ohm corre o risco de se tornar apenas uma equação a ser memorizada, em vez de um modelo que explica um fenômeno real e observável.

2.1.2 Aprendizagem Mecânica vs. Significativa

O presente trabalho se fundamenta nessa crítica. A eletricidade, por ser um fenômeno invisível, é particularmente suscetível a essa abordagem puramente teórica. O simulador proposto neste projeto final foi concebido para ser a "ponte" que Borges [1] defende. Ele busca ser uma das "oportunidades para que o ensino experimental e o ensino teórico se efetuem em concordância", permitindo ao estudante sair da passividade da fórmula e se tornar um agente ativo na experimentação. Ao visualizar o efeito de suas ações em tempo real (como alterar a voltagem e ver a lâmpada brilhar mais forte, por exemplo), o aluno pode construir uma intuição que integra a fórmula abstrata à observação prática, tornando a aprendizagem "mais interessante, motivadora e acessível".

O trabalho iniciou-se com uma revisão bibliográfica focada em duas frentes: a pedagógica, investigando os desafios no ensino das Leis de Ohm e Kirchhoff e o uso de ferramentas lúdicas na educação; e a tecnológica, analisando plataformas de simulação e motores de jogos. Esta fase foi crucial para solidificar os requisitos do

projeto e para a escolha das ferramentas de desenvolvimento.

A fragmentação do ensino, criticada por Borges [1], leva diretamente a um segundo problema pedagógico que a teoria da aprendizagem de David Ausubel, apresentada por Moreira e Masini [3], que diferencia de forma clara a Aprendizagem Mecânica e a Aprendizagem Significativa. Conforme o texto de 1982, a Aprendizagem Significativa é o processo no qual uma nova informação "se relaciona com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo". Em contrapartida, a Aprendizagem Mecânica ocorre quando a nova informação é adquirida com "pouca ou nenhuma associação com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva" [3]. Os autores citam textualmente "a simples memorização de fórmulas, leis e conceitos, em Física" como um exemplo típico de Aprendizagem Mecânica.

O fator-chave que impede a Aprendizagem Significativa é a ausência do que Ausubel chama de subsunçores (ou "ideias-âncora"). No caso da eletrodinâmica, o aprendiz muitas vezes não possui esses subsunçores para os conceitos abstratos de "tensão", "corrente" e "resistência". O livro questiona exatamente este ponto: "o que fazer quando estes subsunçores não existem?"

É nesta lacuna que o simulador proposto atua. Segundo Moreira e Masini [3], uma das respostas é que a "aprendizagem mecânica é sempre necessária quando um indivíduo adquire informação numa área de conhecimento completamente nova para ele". O software, então, funciona como uma ferramenta para prover a experiência empírico-concreta que o aluno precisa para a formação de conceitos inicial. Ao permitir que o aluno manipule o circuito e veja os resultados visuais, a ferramenta ajuda a construir os primeiros subsunçores, permitindo que o aluno supere a etapa de memorização arbitrária [3] e comece a construir uma Aprendizagem Significativa real.

2.1.3 Conceitos-chave (Ohm e Kirchhoff)

Para que o simulador pudesse representar com fidelidade o comportamento de um circuito, foi necessário implementar seu modelo matemático fundamental. Este modelo é baseado em duas das leis mais importantes da eletrodinâmica: a Lei de

Ohm e as Leis de Kirchhoff. A Lei de Ohm descreve a relação de proporcionalidade direta entre a diferença de potencial (tensão) aplicada a um condutor e a intensidade da corrente elétrica que o atravessa. Esta relação é quantificada pela resistência do condutor. A lei é expressa pela equação:

$$V = R \cdot I$$

Onde:

- V é a Tensão ou Diferença de Potencial, medida em Volts (V).
- R é a Resistência elétrica do componente, medida em Ohms (Ω).
- I é a Corrente elétrica, medida em Ampères (A).

A dificuldade de visualização aqui é imediata: nenhuma dessas três grandezas é diretamente observável. O simulador desenvolvido se propõe a ilustrar estas: a tensão (V) é representada pela quantidade de pilhas, a resistência (R) pela presença de componentes (lâmpadas, resistores, fio condutor), e a corrente é o fluxo animado de partículas. Enquanto a Lei de Ohm é suficiente para circuitos simples, a análise de circuitos mais complexos, com múltiplos caminhos e componentes, exige a aplicação das Leis de Kirchhoff [7]. A primeira Lei de Kirchhoff (Lei dos Nós ou LKC) afirma que a soma algébrica das correntes que entram em um nó (um ponto de junção no circuito) é igual a zero. Essencialmente, é uma declaração da conservação da carga:

$$\sum I = 0$$

Isso significa que a corrente total que flui para um nó deve ser igual à corrente total que flui para fora dele. A segunda Lei de Kirchhoff (Lei das Malhas ou LKT): Afirma que a soma algébrica das diferenças de potencial (tensões) ao longo de qualquer malha (caminho fechado) em um circuito é igual a zero. Esta é uma declaração da conservação da energia [7].

$$\sum V = 0$$

É na aplicação conjunta dessas leis que surge a maior dificuldade intuitiva para os estudantes, algo que o simulador busca abordar: a divisão da corrente em ramos

paralelos. Quando um aluno se depara com uma bifurcação, a intuição inicial, muitas vezes, é que a corrente "se divide ao meio". No entanto, pela Lei das Malhas, a diferença de potencial (V) deve ser idêntica em todos os ramos paralelos. Se um ramo tem uma lâmpada (baixa resistência, R_1) e outro ramo tem um resistor (alta resistência, R_2), a Lei de Ohm ($I = V/R$) obriga que as correntes sejam diferentes ($I_1 \neq I_2$) para que a tensão V se mantenha. Isso não é intuitivo. O aluno não "vê" por que a corrente "prefere" o caminho de menor resistência. O objetivo do simulador é tornar essa regra abstrata uma observação concreta, permitindo que o usuário veja a lâmpada do primeiro ramo brilhar mais intensamente.

2.2 Simulações e ferramentas lúdicas como solução

Diante do desafio de conectar o ensino teórico fragmentado (discutido na Seção anterior) à prática concreta, as simulações computacionais interativas surgem como soluções pedagógicas promissoras. As simulações funcionam, na prática, como "Laboratórios Virtuais": ambientes interativos, acessíveis e controlados, projetados para replicar experimentos e fenômenos científicos. A grande vantagem pedagógica desta abordagem, em comparação direta com os laboratórios físicos tradicionais, é a sua capacidade de remover barreiras logísticas e cognitivas. Enquanto um laboratório real pode ter custo elevado, disponibilidade limitada de bancadas e o risco de acidentes, o laboratório virtual oferece um ambiente acessível e seguro. A segurança da simulação permite que o estudante teste hipóteses livremente e explore os limites dos conceitos — por exemplo, fazendo a pergunta "o que acontece se eu aumentar a voltagem ao máximo?" — sem o medo de queimar componentes reais ou obter resultados errôneos por falha de equipamento. Conforme demonstrado por pesquisadores como Wieman, Adams e Perkins (2008) [8], da Universidade do Colorado, um laboratório virtual bem projetado foca a atenção do aluno diretamente nos modelos conceituais da física, permitindo a repetição imediata do experimento e a visualização de variáveis (como o fluxo de corrente) que são invisíveis no mundo real.

A teoria da Aprendizagem Significativa, conforme apresentada por Moreira e Masini (1982) [3], opõe-se a uma aprendizagem onde o indivíduo assume um "papel passivo", renunciando à "sua maneira pessoal de ver, compreender e agir". Uma

situação, ao contrário, torna-se significativa "quando o indivíduo decide de forma ativa, [...] pela sua própria elaboração e compreensão". É neste ponto que os elementos lúdicos (muitas vezes associados à gamificação) do simulador proposto se justificam pedagogicamente. O *design* da interação acaba por ser um mecanismo para criar as condições para a Aprendizagem Significativa. A teoria de Ausubel exige que "o aprendiz manifeste uma disposição de relacionar o novo material [...] a sua estrutura cognitiva". O *feedback* visual imediato, impresso pelo simulador, por exemplo, permite a "elaboração e compreensão". Como citado anteriormente com base em Moreira e Masini (1982) [3], a aprendizagem mecânica ocorre quando a nova informação é armazenada de forma "arbitrária", como a "simples memorização de fórmulas". O *feedback* visual imediato – a lâmpada brilhando, o fluxo de partículas se intensificando – funciona como o criador de conceitos relevantes. O aluno realiza uma ação e vê uma consequência imediata. Essa interação consciente constrói os primeiros "pontos básicos de ancoragem" – os subsunçores – permitindo que o conceito abstrato de tensão seja finalmente ancorado de forma a se tornar um aprendizado significativo.

Capítulo 3

Metodologia

A metodologia empregada para a concepção e construção do simulador de circuitos elétricos seguiu um modelo de prototipagem incremental. Isso permitiu que o projeto evoluísse organicamente com base em descobertas e testes contínuos. O processo foi dividido em etapas macro que se retroalimentavam: fundamentação teórica, desenvolvimento tecnológico e testes de validação.

3.1 Desenvolvimento do protótipo

A fase de desenvolvimento foi o cerne do projeto, onde os conceitos teóricos foram materializados em um produto interativo. A plataforma Unity [4] foi utilizada como motor de desenvolvimento principal, devido à sua robustez e vasta documentação. Toda a lógica da simulação, a interatividade dos componentes e a interface do usuário foram programadas utilizando a linguagem de programação C# [5]. Para a composição visual do ambiente, foram utilizados modelos tridimensionais de componentes elétricos, obtidos de repositórios online gratuitos. Esses modelos passaram por um processo de refinamento, otimização e adequação no software de modelagem 3D Blender [6], a fim de garantir a consistência ilustrativa da aplicação.

3.1.1 Estruturas de dados e lógica da simulação

Para gerenciar a complexidade do sistema, foi desenvolvida uma arquitetura orientada a objetos e baseada em componentes (*Component-Based Architecture*), nativa do Unity. A estrutura principal fundamenta-se na herança da classe `MonoBehaviour`,

permitindo a criação de *scripts* modulares que operam de forma cooperativa. A lógica foi distribuída entre classes com responsabilidades específicas:

- **Interação e topologia (`DraggableCloneBehaviour`)**: Foram implementadas classes como `BranchObjectsController` e `PrllWireController` para adicionar à estrutura do circuito. O desafio aqui foi criar um sistema de registro dinâmico: assim que um componente é conectado a um fio, ele deve ser identificado como parte do circuito e associado a um índice de malha específico (`wireIndex`), permitindo que o `CurrentController` calcule corretamente a divisão de corrente conforme as Leis de Kirchoff.

- **Interatividade e sistema de "arrastar e soltar" (*drag-and-drop*)**: Um dos maiores aprendizados técnicos foi a implementação da mecânica de adição de lâmpadas e resistores ao circuito, visível nos *scripts* `StaticCloneBehavior` e `DraggableCloneBehaviour`. A dificuldade residia em converter as coordenadas de tela (*mouse* ou toque) para o espaço tridimensional do mundo (*World Space*). A solução envolveu o uso de *Raycasting* (lançamento de raios) para detectar onde o usuário desejava soltar o componente. Para tornar essa interação fluida e evitar a frustração de ter que "mirar" em um fio muito fino, foram implementados paralelepípedos semitransparentes ao redor dos condutores, atuando como colisores (ou *hitboxes*). Esses volumes visuais serviram tanto como alvos facilitadores para o *Raycast* como para associação ao fio – cada colisor foi numerado de acordo com o fio onde estava posicionado, e o objeto anexado ao colisor teria o `wireIndex` associado a tal número. Assim, se garantiu que os componentes fossem detectados e se colocassem magneticamente à posição correta na bancada.

- **Manipulação de variáveis**: `ResistanceController`, `VoltageController` e `BatteryController` são os controladores que atuam como a interface de experimentação direta. O `VoltageController` e o `ResistanceController` capturam as interações na UI – como o ajuste de voltagem por meio do *slider* e o arraste dos resistores e lâmpadas pros fios – e atualizam os parâmetros da equação de Ohm. O `ResistanceController` calcula tanto a resistência total do circuito quanto as resistências de cada fio paralelo, levando em conta as

resistências integradas aos fios (3 Ohms cada fio) e às lâmpadas (2 Ohms cada lâmpada), bem como os resistores propriamente ditos (5 Ohms cada resistor). Já o `BatteryController` traduz o valor abstrato da tensão em uma representação visual concreta: através de *listeners* [9] no *slider* de voltagem, o *script* instancia mais pilhas no circuito à medida que a tensão é aumentada. Além disso, esse controlador gerencia a inversão de polaridade através de um botão dedicado, permitindo ao usuário inverter o sentido da fonte e observar a imediata reversão no sentido do fluxo de partículas ou da corrente convencionada, reforçando a compreensão vetorial da grandeza elétrica.

- **Motor matemático**: O `CurrentController` atua como o núcleo lógico da simulação, centralizando a aplicação da Lei de Ohm. Esse *script* recebe os dados de tensão e resistência do circuito através dos demais controladores e calcula a amperagem resultante em tempo real, propagando essa informação para os componentes visuais, o que garante que o *feedback* visual seja sempre coerente com a teoria física.

- ***Feedback* visual**: O componente `LampController` gerencia a intensidade luminosa das lâmpadas do circuito de forma proporcional à corrente, permitindo que o usuário visualize gradualmente os efeitos da Lei de Ohm. Além disso, implementou-se uma lógica de sobrecarga: quando a corrente se aproxima do limite suportado (`burnoutThreshold`), a lâmpada emite um sinal visual de alerta (piscando irregularmente) antes de "queimar" definitivamente e interromper a passagem de corrente do circuito. Essa funcionalidade ensina sobre as especificações nominais dos componentes e as consequências de excedê-las.

3.2 Ciclo de desenvolvimento

O processo de construção do protótipo não foi linear, mas sim cíclico e incremental, seguindo as etapas abaixo, repetidas continuamente:

- **Reflexão sobre a teoria**: Cada ciclo iniciava-se com o estudo aprofundado de um conceito físico específico. A fase inicial focou exclusivamente na Lei de Ohm para circuitos simples. Posteriormente, a necessidade de expandir

a simulação exigiu um retorno à teoria para o estudo das Leis de Kirchhoff, fundamentais para a implementação da lógica de nós e malhas.

- **Desenvolvimento e implementação**: Esta etapa consistiu na tradução dos modelos matemáticos e físicos para algoritmos em linguagem C# e sua integração com os *assets* 3D no motor Unity. Foi o momento de codificar os controladores (como o `VoltageController` e o `CurrentController`) e configurar a física dos componentes.

- **Teste do protótipo**: A simulação era executada para validar três pilares: a precisão numérica dos cálculos elétricos, a estabilidade do software (ausência de falhas críticas abruptas ou travamentos) e, crucialmente, a clareza da interação. Testes de usabilidade verificaram se a resposta visual (brilho, velocidade das partículas) era intuitiva para o usuário.

- **Aperfeiçoamento**: Com base nos resultados dos testes, o protótipo era refinado. *Bugs* eram corrigidos e a interface ajustada. Mais importante, novas funcionalidades eram adicionadas quando se mostravam pedagogicamente necessárias. Um exemplo claro dessa etapa foi a implementação de fios paralelos e lâmpadas em paralelo. Os testes indicaram que, para compreender a divisão de corrente (Kirchhoff), o aluno precisava comparar visualmente o brilho de lâmpadas em ramos distintos. Essa necessidade pedagógica guiou a evolução técnica do código para suportar topologias de circuito mais complexas do que as originalmente planejadas.

3.3 Mudanças de planos e evolução do escopo

Uma característica fundamental da metodologia de prototipagem é a capacidade de adaptar e evoluir o escopo do projeto. A concepção inicial do simulador era mais restrita: um circuito estático com uma lâmpada, no qual o usuário poderia apenas utilizar *sliders* na interface para alterar os valores de voltagem – adicionando pilhas – e de resistência total do circuito. No entanto, durante os ciclos iniciais de desenvolvimento, percebeu-se que uma interação mais direta e construtivista seria pedagogicamente mais rica. Assim, tomou-se a decisão de evoluir o projeto

para incluir a funcionalidade de "arrastar e soltar" (*drag-and-drop*), permitindo que o usuário montasse parte do circuito ativamente, posicionando resistores e novas lâmpadas neste.

Capítulo 4

Desenvolvimento da proposta

Este capítulo descreve a concepção e a implementação do simulador, focando em como as decisões técnicas foram subordinadas aos objetivos pedagógicos estabelecidos na fundamentação teórica. A proposta não se resume à codificação de um software, mas à construção de um ambiente de aprendizagem interativo projetado para agir como uma "ponte cognitiva" entre as equações abstratas da eletrodinâmica e a intuição física do estudante.

4.1 Ferramentas utilizadas

A principal ferramenta selecionada para o desenvolvimento do protótipo foi o motor de jogos Unity, como toda a lógica de programação implementada na linguagem C#. A plataforma Blender foi utilizada como ferramenta de apoio para o refinamento dos elementos 3D.

A escolha da plataforma se deveu a um conjunto de fatores estratégicos e técnicos que a tornaram ideal para os objetivos tanto presentes quanto futuros do projeto. A motivação inicial do projeto, alinhada à linha de pesquisa da orientação, era a criação de uma aplicação em Realidade Aumentada (RA) [10]. O Unity [4] é a plataforma líder de mercado para o desenvolvimento de experiências em RA e Realidade Virtual, com suporte nativo a *frameworks* como o AR Foundation [4]. Embora o escopo final do trabalho tenha sido focado em uma simulação 3D, a escolha do Unity foi estratégica, pois toda a base de código e a lógica do simulador foram construí-

das de forma a possibilitarem uma expansão para uma versão em RA em trabalhos futuros, sem a necessidade de migrar de tecnologia. Uma das maiores vantagens do Unity é a sua capacidade de compilar um único projeto para variadas plataformas e sistemas operacionais, como Windows, macOS, Android, iOS e WebGL. Essa flexibilidade permitiu que o desenvolvimento fosse realizado num ambiente (PC) e os testes de usabilidade e desempenho fossem feitos em outro (*tablet*), ampliando o público potencial da aplicação. O Unity possui uma vasta biblioteca de recursos, documentação abrangente e uma comunidade ativa de desenvolvedores – o que facilitou a solução de problemas técnicos durante o desenvolvimento. Por fim, a utilização de C# como linguagem de *script* é um diferencial importante. Sendo uma linguagem moderna, orientada a objetos e tipada, esta permitiu a construção de um código modular e manutenível.

Durante a fase de planejamento, outras plataformas foram consideradas. A UnrealEngine foi analisada, mas, embora seja graficamente muito poderosa, sua curva de aprendizado é mais acentuada e sua linguagem principal – C++ – ou sistema de Blueprints foram considerados menos ideais para a prototipagem rápida que o projeto exigia [4]. O motor de jogos Godot, de código aberto, também foi considerado por sua leveza [11], mas o ecossistema de recursos e o suporte consolidado do Unity para futuras aplicações em RA foram fatores decisivos para a escolha final.

4.2 *Design* da interatividade e *feedback* pedagógico

A arquitetura do software foi projetada para combater a aprendizagem mecânica, forçando o usuário a assumir um papel ativo. A aplicação não entrega respostas prontas, em vez disso responde às ações do usuário, incitando a observação e a reflexão. Um dos maiores desafios no ensino de eletricidade, conforme discutido na fundamentação teórica, é a invisibilidade da corrente elétrica. O simulador aborda isso através de dois mecanismos visuais principais: renderização de um fluxo contínuo de partículas, cuja densidade varia de acordo com a intensidade da corrente do circuito; e luminosidade variável das lâmpadas do circuito, prevista pela Lei de

Ohm. Ambas são controladas por *scripts* em C#.

4.3 Funcionamento da aplicação

O software desenvolvido é um laboratório virtual interativo, projetado para ser um ambiente de experimentação, algo como uma bancada de trabalho virtual. O princípio fundamental da ferramenta é dar ao usuário o controle direto sobre os parâmetros de um circuito elétrico, enquanto o sistema se encarrega de simular as consequências físicas dessas ações com base nas leis da física.

Para facilitar a visualização da dinâmica do simulador, um vídeo demonstrativo do funcionamento da aplicação está disponível neste link.

O usuário inicia com uma área de trabalho com um circuito simples formado por uma lâmpada, interruptor e caixa de bateria, conectados por um fio, conforme apresentado na Figura 4.1. Na área também estão uma lâmpada e um resistor que podem ser replicados e arrastados pelo usuário para o circuito.

Figura 4.1: Circuito inicial.

Fonte: A autora.

A interatividade se manifesta de duas maneiras principais:

- **Manipulação de tensão (V)**: O usuário pode aumentar ou diminuir a diferença de potencial total do circuito. Visualmente, isso é representado pelo surgimento ou desaparecimento de pilhas na caixa de bateria, que é a fonte de tensão.

- **Manipulação de resistência (R)**: A resistência total do circuito é uma combinação da resistência intrínseca dos componentes – lâmpadas e fios – e dos resistores que o usuário pode arrastar e soltar diretamente no circuito.

Uma vez que o circuito está fechado e os parâmetros são definidos, o software calcula continuamente a corrente elétrica (I) através de um algoritmo que é executado a cada quadro (frame). A implementação da Lei de Ohm ocorre em duas etapas principais, coordenadas pelos scripts `ResistanceController` e `CurrentController`. Primeiramente, o sistema mapeia a topologia do circuito, identificando componentes em série e em paralelo. Para cada ramo paralelo ativo (identificado pelo índice `wireIndex`), calcula-se a resistência individual comando-se a resistividade intrínseca do fio condutor, das lâmpadas e o valor dos resistores adicionados pelo usuário. Em seguida, obtém-se a resistência equivalente (R_{eq}) de todo o sistema através da soma inversa das resistências paralelas combinada com a resistência em série com a fonte de tensão.

Com o valor de R_{eq} determinado, o `CurrentController` aplica a lei de Ohm para obter a corrente total ($I_{tot} = V_{fonte}/R_{eq}$). Para simular a divisão de corrente prevista pelas leis de Kirchhoff em circuitos paralelos, o algoritmo realiza uma etapa adicional: calcula-se a queda de tensão específica sobre o bloco paralelo (V_p) subtraindo-se as perdas em série da tensão total. Com esse valor de V_p (que é igual para todos os ramos paralelos), o sistema aplica novamente a lei de Ohm individualmente para cada fio ($I_{ramo} = V_p/R_{ramo}$), determinando a fração de corrente em cada ramo.

Esse valor de corrente calculado é traduzido em um *feedback* visual imediato. As esferas azuis animadas percorrem os fios, simulando um fluxo de elétrons. A velocidade e a densidade do fluxo são diretamente proporcionais à intensidade da corrente. O brilho emitido pela lâmpada no circuito também aumenta ou diminui de acordo com a corrente que a atravessa. Dessa forma, a ferramenta permite que

o usuário experimente visualmente o efeito dos cálculos do circuito, compreendendo de forma intuitiva a relação de causa e efeito entre tensão, resistência e corrente.

Para ilustrar o potencial pedagógico da ferramenta, descreve-se a seguir um exemplo de uso em três diferentes cenários:

Cenário 1: Explorando a Lei de Ohm em um circuito simples

- **Passo 1: Montagem inicial.** O programa inicia na tela principal com o circuito simples. O usuário fecha o interruptor do circuito e arrasta o *slider* de voltagem para a direita, provocando o aumento da tensão neste. Imediatamente, a lâmpada acende e um fluxo moderado de esferas azuis – que representam os elétrons – começa a circular (Figura 4.2).

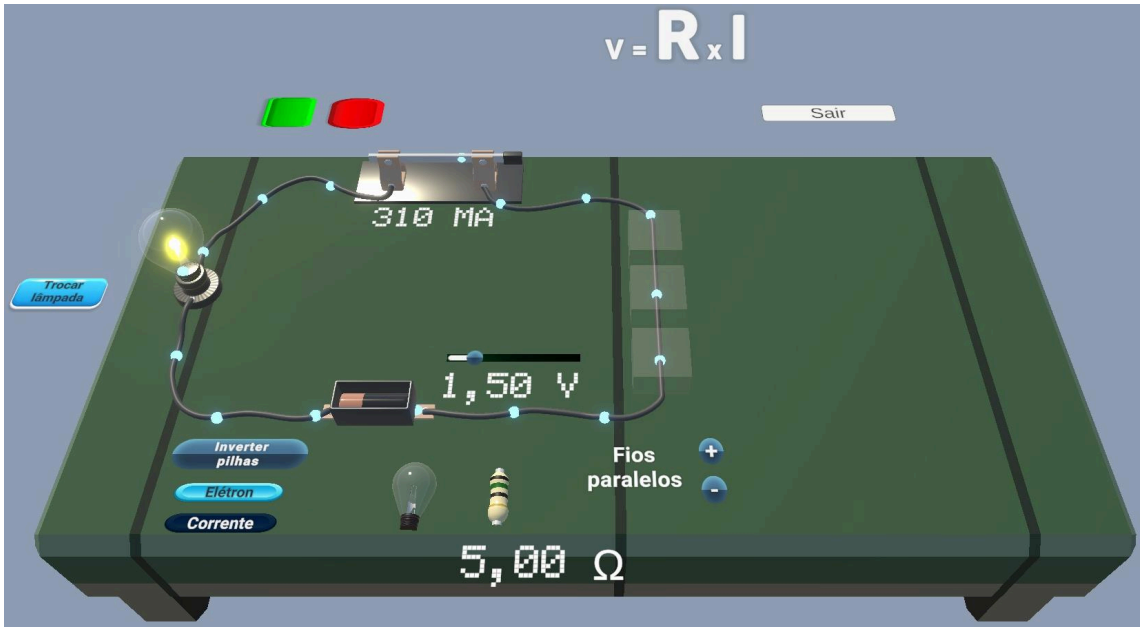


Figura 4.2: Circuito simples montado com uma lâmpada acesa com brilho médio.
Fonte: A autora.

- **Passo 2: Aumentando a tensão.** O usuário interage com o controle de tensão, aumentando seu valor (por exemplo, de 1,5 V para 3,0 V e, depois, de 3,0 V para 4,5 V). Visualmente, uma segunda pilha aparece na fonte – cada pilha é equivalente a 1,5 V. O sistema recalcula a corrente e, instantaneamente, o usuário observa que o brilho da lâmpada, bem como a densidade e velocidade do fluxo de elétrons, aumentam ligeiramente. Assim, o usuário visualiza que,

mantendo a resistência constante, a corrente é diretamente proporcional à tensão ($I \propto V$), conforme ilustrado na Figura 4.3.

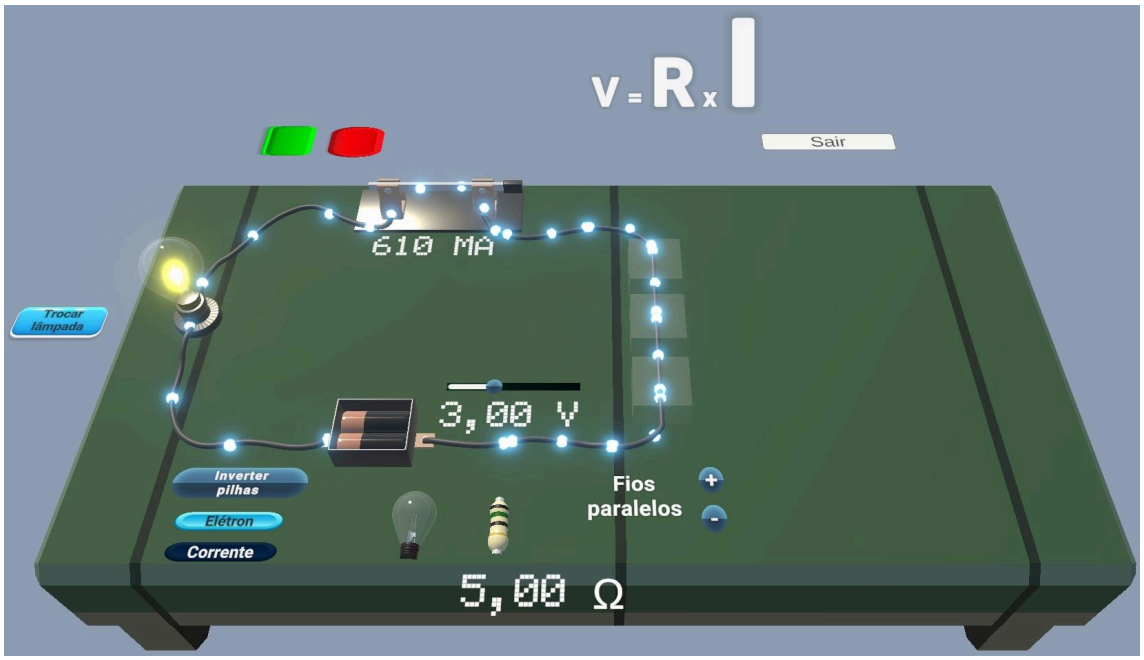


Figura 4.3: O mesmo circuito com duas pilhas, lâmpada mais brilhante e mais elétrons.

Fonte: A autora.

- **Passo 3: Simulando a queima de lâmpada.** O usuário aumenta a tensão para um valor elevado, fazendo a lâmpada atingir um brilho máximo e, em seguida, "queimar". É possível observar a lâmpada piscando logo antes de perder o brilho de vez. Imediatamente, o circuito é interrompido e o fluxo de partículas de corrente cessa em toda a malha. Assim, o usuário pode compreender visualmente o conceito de um circuito aberto em consequência prática de se exceder os limites de operação de um componente deste circuito (Figura 4.4).

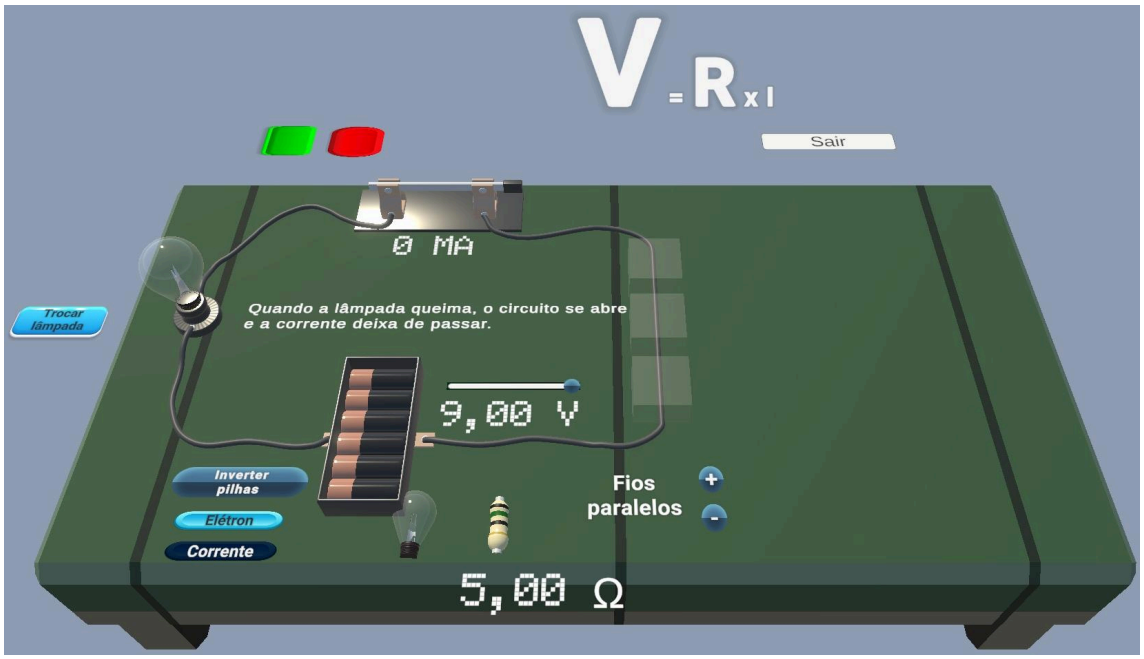


Figura 4.4: Circuito com tensão alta, interruptor fechado e sem fluxo (lâmpada queimada).

Fonte: A autora.

- **Passo 4: Adicionando um resistor.** Agora, o usuário arrasta um componente de resistor para qualquer um dos paralelepípedos transparentes no fio do circuito. No momento em que o resistor é conectado, a resistência total do circuito aumenta. O sistema recalcula a corrente e o usuário vê o efeito: o brilho da lâmpada é atenuado, assim como o fluxo de elétrons. Dessa forma, é demonstrado visualmente que, para uma mesma tensão, a corrente é inversamente proporcional à resistência ($I \propto 1/R$), como pode ser visto na Figura 4.5.

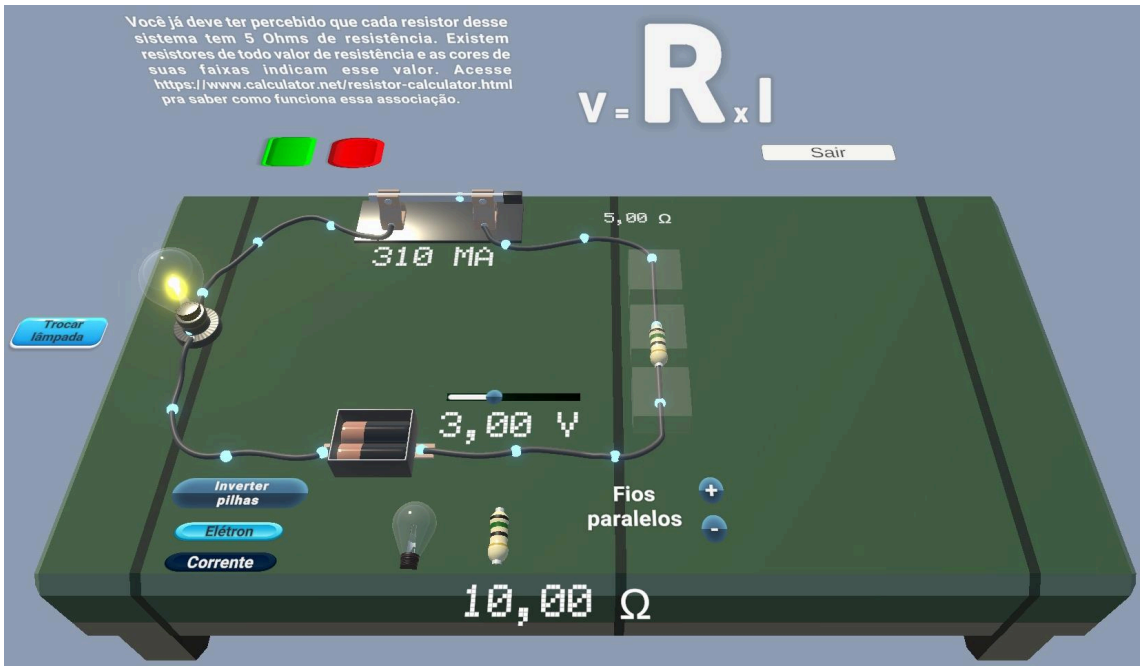


Figura 4.5: Circuito com duas pilhas, resistor em série e lâmpada com brilho fraco. **Fonte:** A autora.

Cenário 2: Visualizando a divisão de corrente em um circuito paralelo

- **Passo 5: Criando um circuito paralelo.** Partindo do circuito do passo 2, o usuário utiliza o botão de adição de fios paralelos para criar uma bifurcação, formando um segundo caminho paralelo ao da lâmpada original. Isso pode ser feito para um total de três fios paralelos, que irão compartilhar a mesma fonte de tensão (Figura 4.6).

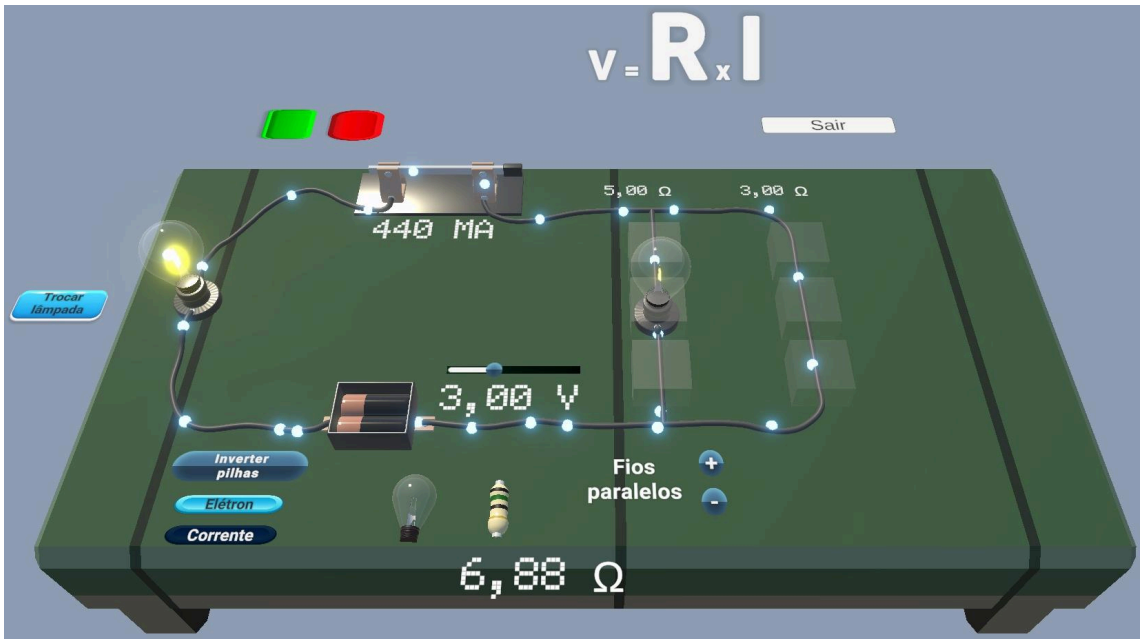


Figura 4.6: Circuito com uma lâmpada em um ramo e um segundo ramo paralelo vazio.

Fonte: A autora.

- **Passo 6: Adicionando componentes em paralelo.** O usuário arrasta uma segunda lâmpada, idêntica à original do circuito, para o novo ramo paralelo, resultando na configuração apresentada na Figura 4.7. O sistema agora recalcula a corrente total (que aumenta, pois a resistência equivalente diminui) e a divisão de corrente entre os ramos.

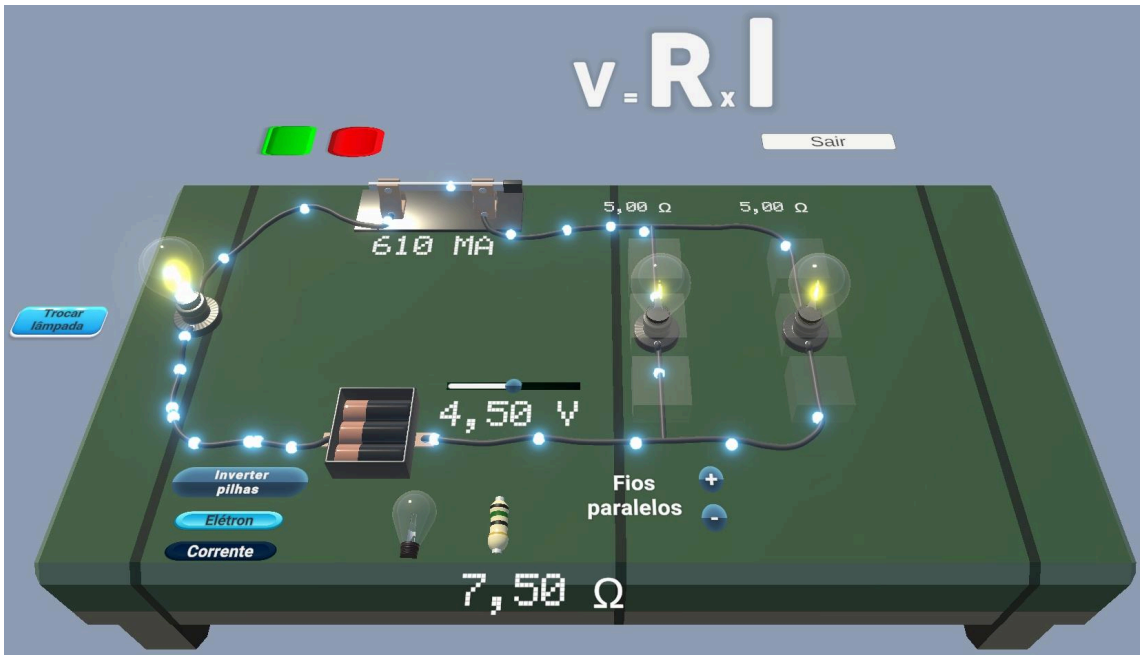


Figura 4.7: Duas lâmpadas idênticas em paralelo, brilhando com a mesma intensidade.

Fonte: A autora.

- **Passo 7: Observando a diferença de corrente.** Para esse experimento, o usuário arrasta um resistor e o adiciona em série com a segunda lâmpada (no segundo ramo). A resistência desse ramo se torna muito maior que a do primeiro. O resultado visual é muito importante: a primeira lâmpada continua brilhando intensamente, enquanto a segunda (que está com o resistor) é devidamente atenuada. O usuário visualiza de forma concreta o princípio da divisão de corrente em circuitos paralelos: a corrente "prefere" o caminho de menor resistência (Figura 4.8).

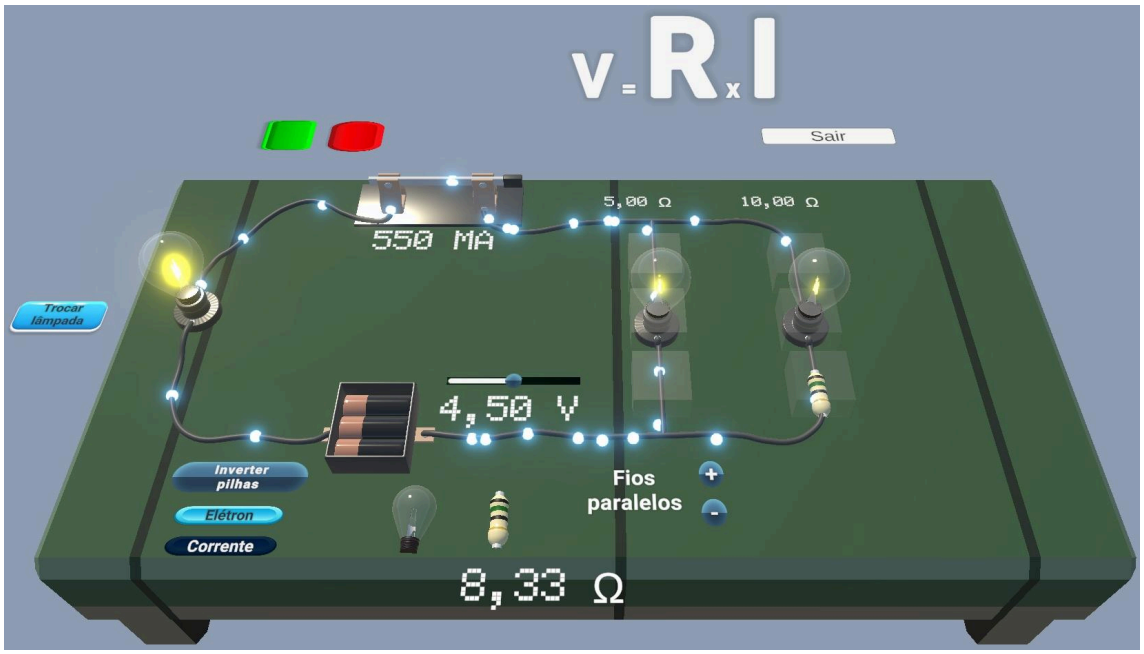


Figura 4.8: Circuito em paralelo demonstrando a divisão de corrente desigual.

Fonte: A autora.

Cenário 3: Diferenciando convenção e realidade física

- **Passo 8: Observando a diferença de sentido entre corrente convencional e fluxo de elétrons.** Utilizando o circuito simples ou paralelo, o usuário aciona o botão na interface para alternar do modo "Fluxo de elétrons" para "Fluxo de corrente convencional". A direção de todas as partículas animadas no circuito é instantaneamente invertida, além da aparência dos elementos do fluxo mudar de pequenas esferas azuis para setas direcionais vermelhas. No modo de fluxo de elétrons, que é o modo padrão com o qual o circuito é iniciado, o fluxo parte do terminal negativo – se dividindo em caso de fios paralelos – e retorna ao terminal positivo. Já no modo de fluxo de corrente convencional, o fluxo de setas é visto saindo do terminal positivo e fluindo em direção ao terminal negativo (Figura 4.9).

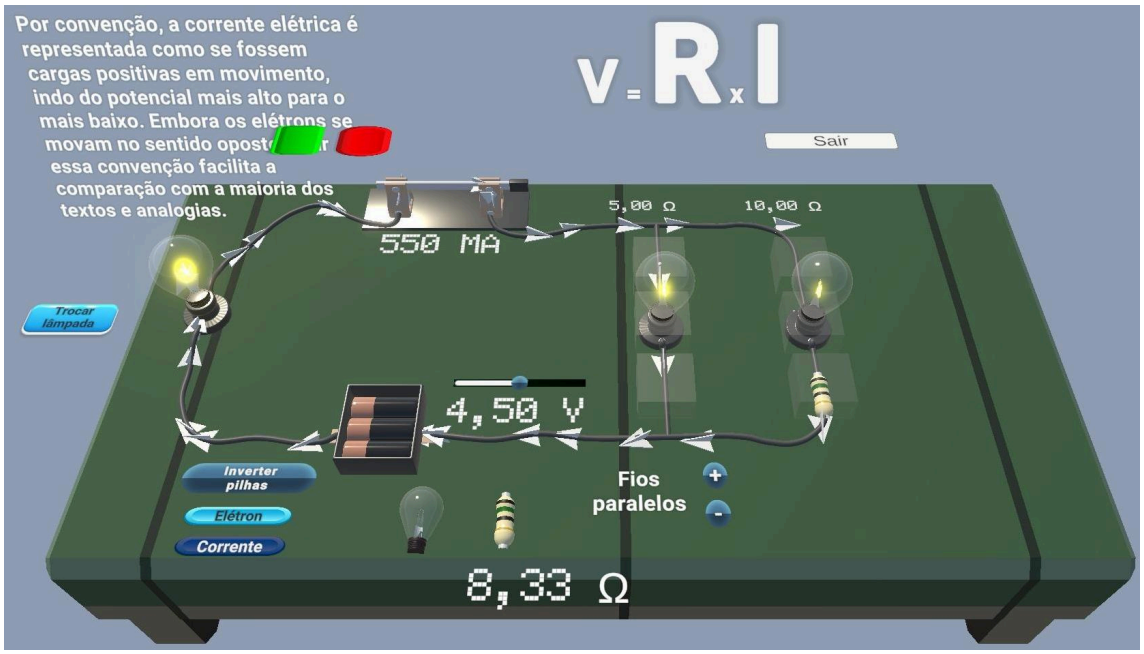


Figura 4.9: A mesma configuração do circuito anterior, mas agora indicando o sentido convencional da corrente (do polo positivo para o negativo).

Fonte: A autora.

O usuário nota que, apesar da inversão completa da direção do fluxo, absolutamente mais nada no circuito muda: o brilho da(s) lâmpada(s) permanece o mesmo e os valores calculados para corrente e resistência também. Assim, pode-se internalizar a distinção entre o modelo físico real (fluxo de elétrons) e a convenção histórica adotada por engenheiros e físicos (corrente convencional). A simulação torna explícito que a escolha do sentido é um modelo para análise e que ambos descrevem o mesmo fenômeno, levando aos mesmos resultados práticos.

Capítulo 5

Trabalhos relacionados

A utilização de simulações computacionais para o ensino de Física não é uma área nova, e diversas ferramentas de alta qualidade já foram estabelecidas. A análise desses trabalhos foi fundamental para identificar para identificar lacunas e oportunidades para a presente proposta. A comparação busca posicionar a proposta do trabalho, destacando as semelhanças, os diferenciais e o nicho pedagógico específico que visa atender, com foco numa experiência nativa para dispositivos móveis (Android e iOS).

Entre os principais trabalhos relacionados, destacam-se: PhET Interactive Simulations [12], EveryCircuit [13] e CircuitLab [14].

5.1 PhET Interactive Simulations

Sendo provavelmente a coleção de simulações mais conhecida, o PhET possui um excelente módulo de construção de circuitos, conforme ilustrado na Figura 5.1. Sua abordagem é em 2D, com foco em uma representação esquemática que é muito poderosa para a análise de circuitos complexos. O presente trabalho se diferencia ao propor uma abordagem em ambiente 3D, buscando maior imersão e uma representação mais próxima da aparência dos componentes reais.

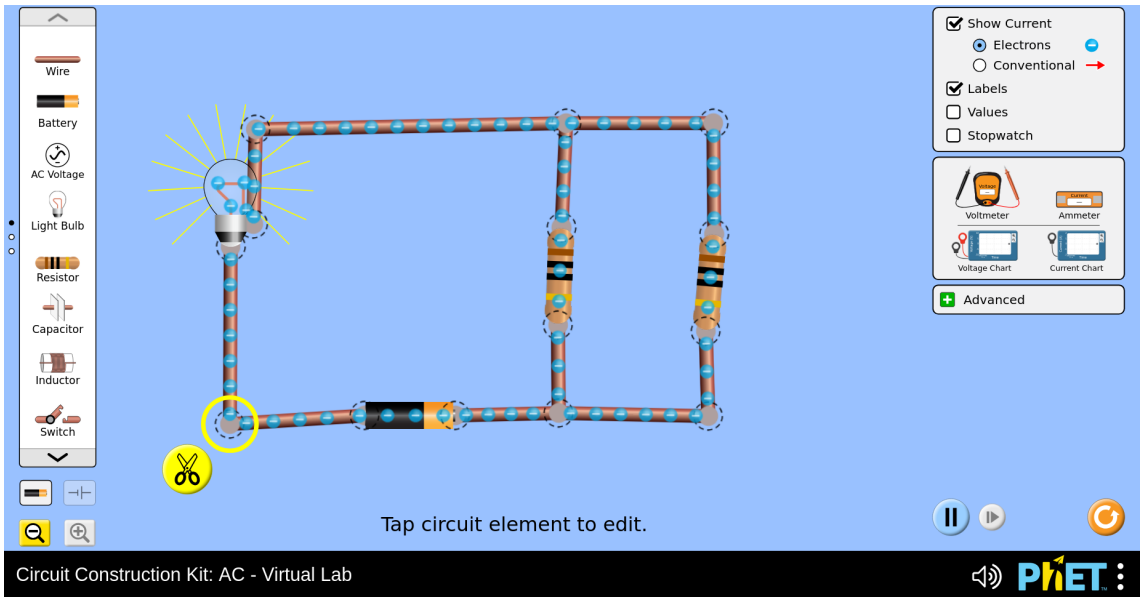


Figura 5.1: Interface do aplicativo PhET Interactive Simulations.

Fonte: PhET Interactive Simulations [12].

5.2 EveryCircuit

Esta é uma aplicação comercial de alta qualidade, também disponível para dispositivos móveis, que permite a simulação de circuitos com animações visuais de tensão e corrente. O EveryCircuit, no entanto, é mais orientado à eletrônica, abrangendo componentes avançados como transistores, osciloscópios e circuitos integrados. A proposta deste trabalho se distingue por ter um foco puramente pedagógico nos fundamentos da eletrodinâmica. O objetivo não é ser uma ferramenta de análise de circuitos complexos, mas sim um ambiente de descoberta para solidificar a intuição sobre as Leis de Ohm e Kirchhoff de forma lúdica e controlada (Figura 5.2).

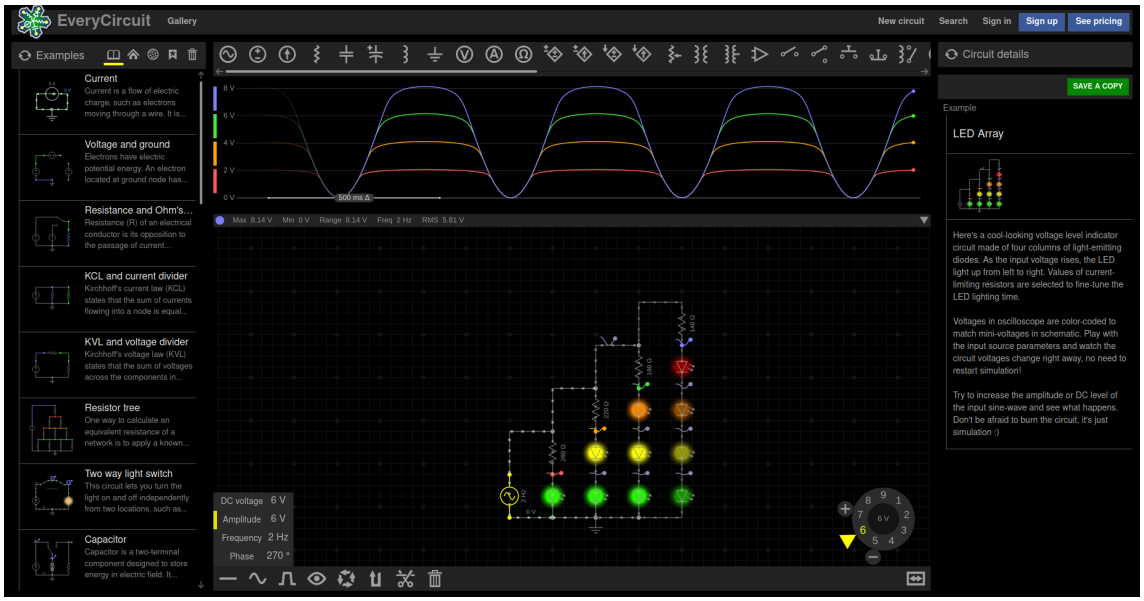


Figura 5.2: Interface do aplicativo EveryCircuit.

Fonte: EveryCircuit [13].

5.3 CircuitLab

O CircuitLab é uma ferramenta online robusta, focada em engenheiros, estudantes avançados e profissionais. A aplicação combina um editor de diagramas esquemáticos (Figura 5.3 com um simulador numérico preciso, capaz de gerar gráficos detalhados. As principais diferenças em relação ao presente projeto são o nível de abstração e o objetivo. O CircuitLab é uma ferramenta de análise quantitativa, enquanto que o aplicativo desenvolvido é um instrumento de aprendizagem qualitativa e intuitiva, no qual o foco está no *feedback* visual imediato para construir o entendimento conceitual que precede a análise matemática rigorosa.

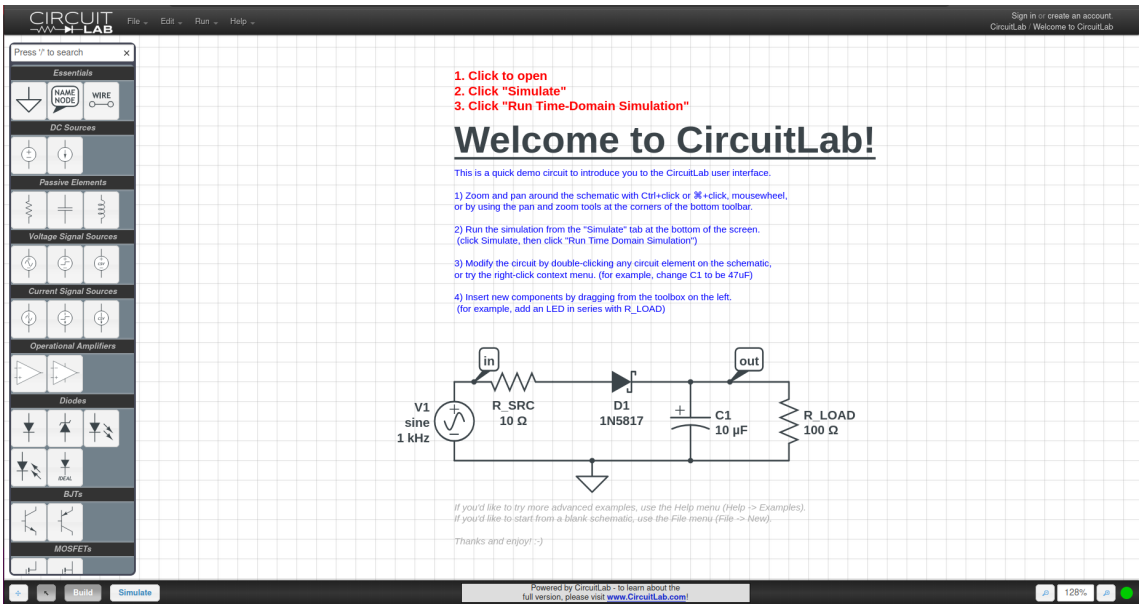


Figura 5.3: Interface da ferramenta *web* CircuitLab.

Fonte: CircuitLab [14].

A seleção das ferramentas analisadas foi realizada de forma *ad-hoc* e intencional, com o objetivo de compor uma amostra representativa das diferentes abordagens existentes no mercado atual. Os critérios de inclusão basearam-se na popularidade das plataformas e na distinção de seus focos pedagógicos e tecnológicos. Buscou-se cobrir três espectros distintos: a simulação educacional baseada na web (representada pelo PhET), a simulação nativa para dispositivos móveis com ênfase visual (EveryCircuit) e a simulação voltada para análise técnica e engenharia (CircuitLab).

Capítulo 6

Avaliação

Para validar a eficácia do simulador como ferramenta de apoio ao ensino, foi estruturado um protocolo de avaliação com usuários do sistema. O processo de coleta de dados consistiu na aplicação sequencial de um questionário de perfil demográfico, um pré-teste para aferição de conhecimento prévio e um pós-teste após a utilização da ferramenta.

O procedimento de coleta de dados ocorreu em sessões individuais, com duração média de 30 a 40 minutos, e seguiu rigorosamente a seguinte sequência metodológica:

1. **Acolhimento e ética:** Apresentação do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) e explicação dos objetivos da pesquisa.

2. **Caracterização:** Aplicação do **Questionário de perfil** para levantar dados demográficos e o nível de familiaridade prévia com tecnologias 3D e conceitos de física.

3. **Nivelamento:** Aplicação do **Pré-teste** conceitual para aferir o conhecimento prévio do participante sobre Eletrodinâmica antes de qualquer contato com a ferramenta.

4. **Intervenção (Uso do simulador):** O participante recebeu um *tablet* com o *software* instalado e foi convidado a realizar uma série de tarefas guiadas (detalhadas no Apêndice B). Estas tarefas evoluíram gradativamente, desde a montagem de um circuito simples até a criação de circuitos paralelos, incen-

tivando a observação dos fenômenos visuais (fluxo de partículas e brilho das lâmpadas).

5. **Verificação de aprendizagem:** Imediatamente após a interação, aplicou-se o **Pós-teste** (com questões análogas ao pré-teste) para mensurar a variação no entendimento dos conceitos.

6. **Avaliação de experiência:** Por fim, aplicou-se um questionário de usabilidade adaptado do modelo **MEEGA+ (Model for the Evaluation of Educational Games)**, proposto por Borgatto et al. [15], para avaliar aspectos como estética, facilidade de uso e engajamento.

O roteiro completo referente ao protocolo aplicado encontra-se detalhado no Apêndice B. Os instrumentos de avaliação (questionário de perfil, testes conceituais e formulário de avaliação), por sua vez, estão disponíveis no Apêndice C. Os resultados visam mensurar se a interação visual com o software contribuiu para a correção de concepções alternativas e para a construção de um modelo mental mais robusto sobre o funcionamento de circuitos elétricos.

6.1 Perfil dos participantes

O estudo de caso foi conduzido com um grupo de cinco participantes voluntários. A caracterização do grupo revela um perfil heterogêneo em termos de idade (variando de 18 a 32 anos) e escolaridade (de Ensino Médio incompleto a Superior completo), com uma leve predominância do gênero feminino (60% feminino, 40% masculino). Dois dados do perfil destacam-se em termos de relevância para a validação da interface: 100% dos participantes relataram nunca ter utilizado simuladores de circuito anteriormente (como PhET ou Tinkercad). Além disso, 80% dos participantes também afirmaram que "Nunca" tiveram o costume de utilizar simulações 3D. A maioria (80%) afirmou que "Nunca" costuma utilizar jogos ou simulações em 3D. Apenas uma participante relatou uso esporádico ("pelo menos uma vez por mês"). Este cenário é particularmente desafiador e valioso, pois submete a interface e os controles a usuários que não possuem uma "alfabetização" de jogos prévia, o que testa a intuitividade da ferramenta.

6.2 Análise dos resultados de aprendizagem

A eficácia pedagógica foi mensurada comparando-se o desempenho nos questionários conceituais antes e depois da interação com o software. A Tabela 6.1 apresenta a evolução dos acertos para o grupo de 5 participantes.

Tabela 6.1: Comparativo de desempenho conceitual (Pré vs. Pós-Teste, N=5)

Conceito Avaliado	**Pré-Teste**	**Pós-Teste**
Definição Formal da Lei de Ohm	60%	80%
Relação Inversa Resistência x Corrente	100%	80%
Sentido da Corrente (Convencional vs. Real)	60%	80%
Divisão de Corrente (Menor Resistência)	100%	80%
Independência de Ramos Paralelos	40%	60%
Resistência em Componentes Reais	80%	100%

A análise dos dados aponta para uma consolidação qualitativa do conhecimento, com as seguintes observações:

1. **Componentes reais:** O resultado mais contundente foi a compreensão plena de que componentes reais possuem resistência. No pré-teste, 80% já possuíam essa noção, mas após a interação com o simulador — onde a lâmpada atua explicitamente como uma carga resistiva — o índice alcançou **100% de acerto**. Isso confirma a eficácia da ferramenta em materializar propriedades físicas que muitas vezes são ignoradas em modelos ideais abstratos.

2. **Evolução em conceitos abstratos:** Houve um ganho de aprendizado (de 60% para 80%) tanto na definição formal da lei de Ohm quanto no entendimento do sentido da corrente. Este dado sugere que a manipulação prática dos componentes (adicionar pilhas, inverter polaridade) ajudou a dar sentido concreto à fórmula matemática e à convenção de fluxo, facilitando a internalização desses conceitos teóricos.

3. **Independência de ramos paralelos:** Este conceito, que apresentou o menor índice de acerto inicial (40%), obteve uma evolução para 60% no pós-teste.

Embora ainda seja um tópico desafiador, o aumento indica que a visualização da interrupção do fluxo em apenas um dos ramos (quando a lâmpada queima ou é removida) auxiliou parte dos alunos a corrigir a concepção equivocada de que os ramos são interdependentes.

4. **Flutuações estatísticas e atenção:** Nos tópicos "Relação Inversa Resistência x Corrente" e "Divisão de Corrente", observou-se uma redução numérica de 100% para 80%. Dado o tamanho reduzido da amostra ($N = 5$), onde a mudança de resposta de um único participante impacta o resultado em 20 pontos percentuais, essa variação não deve ser interpretada como uma falha pedagógica da ferramenta em "piorar" o conhecimento. É mais provável que reflita questões de atenção na leitura dos enunciados no pós-teste ou cansaço cognitivo ao final do experimento, visto que a grande maioria (80%) manteve o entendimento correto demonstrado no início.

6.3 Avaliação de usabilidade e experiência

A avaliação de usabilidade foi realizada através de uma adaptação do modelo MEEGA+, utilizando uma escala Likert de 5 pontos (1 = Discordo Totalmente a 5 = Concordo Totalmente). Para a análise dos dados, optou-se pelo uso da **Mediana** e da **Moda**, medidas de tendência central mais adequadas para escalas ordinais do que a média aritmética [16].

6.3.1 *Design* e interface

Esta dimensão do modelo MEEGA+ avalia a qualidade estética da ferramenta e a harmonia visual dos seus elementos. A atração visual refere-se ao impacto estético inicial e ao quanto a interface é agradável e convidativa ao usuário. Já a consistência avalia se a escolha de cores, fontes e modelos 3D segue um padrão uniforme e coerente, o que é essencial para evitar confusão cognitiva e facilitar a leitura. A estética e a coerência visual foram os pontos mais bem avaliados do projeto.

- **Atração Visual: Mediana 5,0** e **Moda 5**. Os participantes consideraram

o *design* atraente, com 60% da amostra (3 de 5 participantes) atribuindo a nota máxima (5 - Concordo Totalmente) e os 40% restantes atribuindo nota 4 (Concordo). A ausência de avaliações neutras ou negativas confirma a eficácia da identidade visual proposta.

- **Consistência: Mediana 5,0** e **Moda 5** para "As fontes (tamanho e estilo) utilizadas no simulador são legíveis" e "As cores utilizadas no simulador são compreensíveis". Houve unanimidade ou quase unanimidade nas notas máximas, indicando que a combinação de fontes, cores e elementos 3D foi percebida como harmoniosa e deliberada. Por último, a afirmação "Quando olhei pela primeira vez o simulador, eu tive a impressão de que seria fácil para mim" com Mediana 5,0 e comportamento bimodal (**Moda 2 e 5**) sugere uma polarização na percepção inicial. Isso indica que, enquanto parte do grupo percebeu a interface limpa como um convite à facilidade de uso, outra parcela pode ter se sentido intimidada pela novidade do ambiente virtual. Esse dado reforça a importância da implementação das 'tarefas guiadas' utilizadas no experimento para quebrar essa barreira inicial de apreensão tecnológica.

6.3.2 Usabilidade e curva de aprendizado

Esta categoria examina o esforço cognitivo exigido do usuário para interagir com o sistema. A "Facilidade de aprendizado" refere-se ao quão intuitiva é a compreensão inicial das mecânicas e regras do software, determinando a rapidez com que o usuário se torna apto a utilizá-lo.

Considerando que 80% dos usuários não eram jogadores de jogos 3D, os resultados de usabilidade foram satisfatórios, com as respostas concentrando-se nos valores positivos da escala.

- **Facilidade de aprendizado:** Para a afirmação "Eu precisei aprender poucas coisas para poder começar", obteve-se **Mediana 5,0** e **Moda 5**, indicando uma barreira de entrada baixa. Nas questões referentes à facilidade de uso, a **Mediana foi 4,0** e a **Moda 4** para "Aprender a usar este simulador foi fácil para mim" e **Mediana 4,0** e **Moda 5** para "Eu acho que a maioria das pessoas aprenderiam a usar este simulador rapidamente". Por último, **Mediana**

4,0 e **Moda 3 e 4** para "As regras do simulador são claras e compreensíveis". Isso indica que, embora a interface seja intuitiva, a mecânica de manipulação 3D em *tablets* exige um pequeno esforço cognitivo inicial para usuários leigos, concentrando as respostas no nível "Concordo" (4) em vez de "Concordo Totalmente" (5).

6.3.3 Engajamento e valor percebido

O engajamento reflete o nível de envolvimento e o valor educacional atribuído à ferramenta pelos usuários. Para organizar os dados restantes, esta seção foi dividida em três eixos: Relevância, Experiência de Fluxo e Impacto na Aprendizagem.

- **Relevância e Interesse:** Para a afirmação "O conteúdo do simulador é relevante para os meus interesses", obteve-se **Mediana 4,5** e **Moda 5**. A conexão com a matéria foi clara: "É claro para mim como o conteúdo do simulador está relacionado com a disciplina" obteve **Mediana 4,5** e **Moda 5**.

- **Experiência de Fluxo e Sentimentos:** A imersão foi avaliada sob dois aspectos. Quanto à perda de noção do tempo, a Mediana foi 3,5. Porém, para a afirmação "Eu esqueci sobre o ambiente ao meu redor enquanto usava este simulador", o resultado foi **Mediana 5,0** e **Moda 5**, indicando momentos de alta concentração. Além disso, a afirmação "O simulador não se torna monótono nas suas tarefas" obteve **Mediana 4,0** e **Moda 5**, sugerindo que a dinâmica manteve o interesse. O aspecto emocional foi reforçado pela afirmação "Completar as tarefas do simulador me deu um sentimento de realização", com **Mediana 5,0** e **Moda 5**.

- **Impacto Percebido na Aprendizagem:** Este foi o ponto mais forte da avaliação. Houve um consenso sobre a eficácia pedagógica da ferramenta. As afirmações "O simulador contribuiu para a minha aprendizagem na disciplina" e "O simulador é um método de ensino adequado para esta disciplina" obtiveram ambas **Mediana 5,0** e **Moda 5**. Mais notavelmente, quando perguntados "Eu prefiro aprender com este simulador do que de outra forma", a resposta foi contundente: **Mediana 5,0** e **Moda 5**.

6.3.4 *Feedback* qualitativo e limitações identificadas

O campo de respostas abertas forneceu percepções valiosas tanto sobre os acertos quanto sobre as oportunidades de refinamento da ferramenta. Pelo lado positivo, a interface foi elogiada por ser intuitiva e visualmente atrativa. Um participante destacou especificamente que *"a mudança no tamanho das letras foi muito útil e me ajudou a perceber como as mudanças no circuito influenciavam o resultado"*, validando a estratégia de *feedback* visual dinâmico adotada no projeto.

No entanto, foi relatado um problema de responsividade por parte de um usuário: *"Tem um texto grande que fica perto do botão verde que no meu tablet parte dele ficou tampado"*. A correção da escala da interface (UI) para diferentes resoluções de tela é uma prioridade para versões futuras.

Outra limitação apontada refere-se à navegação no ambiente 3D. Foi sugerido *"possibilitar ao usuário mexer a câmera/mudar a perspectiva"*. Esta demanda aponta para uma sinergia direta com a proposta futura de portabilidade para Realidade Aumentada (RA). Enquanto em uma tela 2D o controle de câmera exige toques complexos, na versão em RA a mudança de perspectiva ocorre naturalmente através do movimento físico do usuário ao redor da "bancada virtual", resolvendo a dificuldade relatada de forma orgânica e imersiva.

Além das questões de interface, foi detectada uma inconsistência na lógica de simulação dos circuitos paralelos. Observou-se um *bug* onde a adição do **primeiro fio paralelo** ocasiona uma diminuição indevida da corrente total. Teoricamente, a adição de um ramo paralelo oferece um caminho alternativo para o fluxo de elétrons, o que reduz a resistência equivalente (R_{eq}) do circuito. Pela Lei de Ohm ($I = V/R_{eq}$), uma menor resistência deveria resultar necessariamente no **aumento** da corrente total para uma mesma tensão. Curiosamente, este comportamento anômalo isolou-se na criação da primeira ramificação; ao adicionar-se o **segundo fio paralelo**, o sistema retomou o comportamento físico esperado. A correção deste algoritmo é essencial para garantir a precisão conceitual da ferramenta.

Por fim, houve uma demanda explícita por maior *gamificação* e direcionamento. Participantes sugeriram *"integrar as instruções do simulador e os desafios ao aplicativo"* e recomendaram *"algumas missões envolvendo a disciplina"*. Isso corrobora a decisão de incluir um "Modo Desafio" nos trabalhos futuros, transformando

a ferramenta de um laboratório livre para uma experiência guiada por objetivos claros.

6.4 Conclusão

Sob a ótica pedagógica, a ferramenta cumpriu o objetivo de atuar como um facilitador cognitivo. Um dado relevante do estudo foi a eliminação da concepção alternativa de que componentes como fios e lâmpadas não possuem resistência (20% de melhora na quantidade de acertos entre o pré e o pós-teste). Isso sugere que o *feedback* visual da lâmpada (cujo brilho varia) e das partículas (cuja velocidade e densidade mudam) foi eficiente em comunicar a física do sistema. Dado o tamanho reduzido da amostra, pode-se sugerir que, mesmo nos tópicos onde houve flutuação estatística negativa, a análise qualitativa não necessariamente aponta para um obstáculo na compreensão física, mas sim questões de atenção ou interpretação textual.

Sob a ótica da usabilidade, a análise estatística baseada em mediana e moda revelou uma excelente aceitação estética (Mediana 5,0 em consistência). A operação revelou desafios naturais para um público não familiarizado com ambientes virtuais, mas manteve uma Mediana de 4,0, indicando uma experiência positiva. O fato de 80% dos participantes nunca utilizarem jogos 3D explica a dificuldade relatada com o controle de câmera. No entanto, o alto índice de engajamento e satisfação (Mediana 5,0) demonstra que, uma vez superada a barreira inicial dos controles, a experiência torna-se gratificante.

Por fim, os problemas técnicos identificados (responsividade da UI e o *bug* no cálculo do primeiro fio paralelo) não impediram a validação conceitual, mas apontam claramente para a necessidade de refatoração do código. A demanda espontânea dos usuários por "missões" valida a proposta de trabalhos futuros de incluir elementos de gamificação para guiar o aprendizado de forma autônoma.

Capítulo 7

Conclusões

O presente trabalho percorreu uma trajetória de pesquisa e desenvolvimento motivada pelo desafio de tornar tangíveis os conceitos abstratos da eletrodinâmica. Partindo da identificação das lacunas no ensino tradicional e da análise de ferramentas correlatas, o projeto dedicou-se à construção de um simulador 3D interativo, nativo para dispositivos móveis, utilizando o motor gráfico Unity e a linguagem C#. A implementação técnica buscou integrar fidelidade física e apelo visual para criar um ambiente de experimentação interativo e lúdico. O ciclo encerrou-se com uma validação empírica junto a usuários, cujos resultados, analisados pelo método MEEGA+, confirmaram a viabilidade técnica do protótipo e seu potencial como ferramenta de apoio pedagógico. Com os objetivos centrais alcançados, este capítulo sintetiza as contribuições do estudo e aponta caminhos para sua evolução.

7.1 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo funcional de uma ferramenta pedagógica que materializa conceitos abstratos de eletricidade em um laboratório virtual interativo e tridimensional. O projeto serve como uma prova de conceito de que, utilizando tecnologias de desenvolvimento de jogos como o Unity, é possível criar ambientes de aprendizagem imersivos e eficazes, focados em dispositivos móveis. A contribuição se manifesta em uma base pedagógica, ao criar um ambiente seguro que incentiva a experimentação e aborda dificuldades de aprendizagem específicas; tecnológica, ao desenvolver uma base de código modular

e multiplataforma (Android/iOS) que serve como alicerce para futuras expansões, como a integração com Realidade Aumentada; e de acessibilidade, ao propor uma ferramenta que pode ser utilizada *offline* em dispositivos amplamente difundidos entre estudantes.

7.2 Lições aprendidas

O desenvolvimento do projeto representou um processo de aprendizado intenso, marcado por uma curva de aprendizado acentuada e pela necessidade de soluções criativas para desafios técnicos específicos. Um dos primeiros e mais significativos problemas encontrados foi como estruturar a lógica do circuito de uma forma que fosse ao mesmo tempo eficiente e escalável. Optou-se por uma arquitetura orientada a objetos, alinhada ao paradigma do Unity.

Nessa estrutura, a responsabilidade foi segmentada para evitar classes monolíticas. O `LampController` foi desenvolvido para gerenciar autonomamente o estado de cada lâmpada, encapsulando a lógica de variação da intensidade luminosa e o comportamento assíncrono de queima. O `VoltageController` e o `ResistanceController` assumiram o papel de interfaces de entrada, traduzindo as interações do usuário nos *sliders* para variáveis físicas. Já o `CurrentController` centralizou a lógica matemática, garantindo que a aplicação da Lei de Ohm fosse consistente em todo o sistema.

Outro desafio técnico notável foi a criação de um *feedback* visual para a corrente elétrica que fosse ao mesmo tempo informativo e performático. A ideia de animar as esferas ao longo de um caminho foi implementada utilizando o pacote *Unity Splines*. No entanto, a instanciação e destruição contínua de objetos a cada quadro geraria um alto custo computacional e fragmentação de memória. Para mitigar esse problema, adotou-se o padrão de projeto *Object Pool* [17]. Foi implementada uma técnica de reutilização de objetos no *script* `FlowController`, onde um número fixo de partículas é mantido em memória e reaproveitado ciclicamente, seguindo as diretrizes de otimização da plataforma [18]. Essa abordagem garantiu a fluidez da simulação mesmo em dispositivos móveis com recursos limitados.

Um obstáculo significativo de usabilidade surgiu na implementação da mecânica de construção do circuito. A transposição das coordenadas de tela (*mouse* ou toque 2D) para o posicionamento preciso de objetos no espaço tridimensional (*World Space*) revelou-se complexa. A primeira versão do sistema de "arrastar e soltar" resultava em imprecisão, frustrando a tentativa do usuário de conectar componentes aos fios. A solução, implementada nos scripts `DraggableCloneBehavior` e `StaticCloneBehavior`, envolveu o uso de *Raycasting* para projetar a intenção do usuário no cenário. Para aperfeiçoar essa interação, foi criado um sistema de acoplamento magnético (*snapping*), auxiliado por colisor expandidos (paralelepípedos semitransparentes) ao redor dos fios. Esses volumes invisíveis aumentaram a área de detecção, permitindo que os componentes se conectassem ao circuito de forma intuitiva e sem a necessidade de "mira" milimétrica.

Por fim, a gestão da topologia do circuito – saber quais componentes estão conectados e em qual configuração – exigiu o uso de estruturas de dados dinâmicas. O *script* `BranchObjectsController` foi estruturado utilizando listas (`List<GameObject>`) para registrar e agrupar componentes (como `lampsPerWire` e `resistorsPerWire`) associados a cada índice de fio. Essa abordagem permitiu que o sistema identificasse ramificações em paralelo e calculasse a divisão de corrente corretamente conforme as Leis de Kirchhoff sempre que um novo objeto fosse adicionado ou removido da cena.

7.3 Trabalhos futuros

À base deste trabalho pretende-se adicionar algumas expansões e novas linhas de pesquisa. As possibilidades de trabalhos futuros incluem:

- **Expansão de componentes e conceitos:** Adicionar novos componentes como capacitores, indutores, diodos e fontes de tensão alternada (AC) para ensinar conceitos de capacitância, indutância, retificação de corrente e bases de circuitos RLC. Além disso, incluir mais circuitos – em série ou paralelos – com diferentes fontes de tensão.

- **Gamificação e módulos de avaliação:** Implementar um modo "desafio",

onde os alunos acessam problemas para resolver (exemplos: “faça X mA de corrente fluirem pelo circuito utilizando os componentes disponíveis”; “evite que a lâmpada queime”) e um sistema de pontuação para aumentar o engajamento.

- **Validação estatística robusta:** Expandir a avaliação piloto (realizada neste trabalho com 5 participantes) para uma avaliação mais abrangente, envolvendo turmas completas do ensino médio ou do ciclo básico de engenharia. O objetivo é replicar a metodologia em uma amostra maior para obter dados estatisticamente robustos sobre o impacto da ferramenta no aprendizado.

- **Implementação em Realidade Aumentada (RA):** Retomar a ideia original do projeto, utilizando a base já construída no Unity. Uma versão em RA permitiria que o usuário projetasse a bancada de circuitos em uma mesa real, alterando os componentes virtuais a partir da manipulação de marcadores, elevando o nível de imersão e interatividade.

- **Visualização gráfica de dados:** Implementar uma interface de análise gráfica que plote a curva característica ($V \times I$) do circuito em tempo real. Esta funcionalidade serviria como um complemento à visualização atual da equação (onde as variáveis mudam de escala), oferecendo ao aluno uma representação matemática rigorosa da linearidade da Lei de Ohm e permitindo a interpretação da resistência como a inclinação da reta.

Referências Bibliográficas

[1] BORGES, A. T., "Novos rumos para o laboratório escolar de ciências", *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, pp. 291–313, 2002.

[2] FERNANDES, F., RODRIGUES, C. S., WERNER, C., "Dynamic Analysis of Software Systems through Virtual Reality". In: *Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), 19.*, pp. 331–340, Curitiba, 2017.

[3] MOREIRA, M. A., MASINI, E. F. S., *Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo, Editora Livraria da Física, 1982.

[4] Unity Technologies, "Unity Real-Time Development Platform", https://unity.com/, 2025, (Acesso em 10 nov. 2025).

[5] Microsoft Corporation, "C# documentation - C# Guide", 2025.

[6] Blender Foundation, "Blender - Free and Open Source 3D Creation Suite", 2025.

[7] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fundamentos de Física, Vol. 3: Eletromagnetismo*. 10th ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

[8] PERKINS, K., ADAMS, W., DUBSON, M., *et al.*, "PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics", *The Physics Teacher*, v. 44, pp. 18–23, jan 2006.

[9] Unity Technologies, "Scripting API: UnityEvent.AddListener", 2025.

[10] AZUMA, R. T., "A Survey of Augmented Reality", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, v. 6, n. 4, pp. 355–385, 1997.

[11] Godot Engine, "Godot Engine - Free and open source 2D and 3D game engine", https://godotengine.org/, 2025, (Acesso em 10 nov. 2025).

[12] University of Colorado Boulder, “PhET Interactive Simulations: Circuit Construction Kit”, 2025.

[13] MuseMaze, “EveryCircuit”, 2025.

[14] CircuitLab, Inc., “CircuitLab: Online Circuit Simulator & Schematic Editor”, 2025.

[15] PETRI, G., WANGENHEIM, C. G. V., BORGATTO, A. F., “MEEGA+: Um Modelo para a Avaliação de Jogos Educacionais para o ensino de Computação”, *Revista Brasileira de Informática na Educação - RBIE*, v. 27, n. 3, pp. 52–81, 2019.

[16] JAMIESON, S., “Likert scales: how to (ab)use them”, *Medical Education*, v. 38, n. 12, pp. 1217–1218, 2004.

[17] NYSTROM, R., *Game Programming Patterns*. Genever Benning, 2014. Disponível em: http://gameprogrammingpatterns.com/object-pool.html (Acesso em 25 nov. 2025).

[18] Unity Technologies, “Introduction to Object Pooling - Unity Learn”, https://learn.unity.com/tutorial/introduction-to-object-pooling, 2025, (Acesso em 25 nov. 2025).

Apêndice A

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

OBJETIVO DO ESTUDO:

O objetivo deste projeto é investigar o potencial de ferramentas de simulação 3D interativas no ensino de Física, especificamente no tópico de Eletrodinâmica (circuitos elétricos). A pesquisa busca avaliar o impacto da visualização tridimensional e a interação direta com componentes virtuais na compreensão de conceitos como tensão, corrente e resistência.

PROCEDIMENTO DO ESTUDO:

Se você decidir integrar este estudo, sua participação consistirá em uma sessão única com duração aproximada de 30 a 40 minutos. O procedimento envolve:

1. Responder a um breve questionário de perfil e conhecimentos prévios (Pré-Teste).

2. Utilizar o software de simulação desenvolvido em um *tablet*, realizando tarefas guiadas de montagem de circuitos elétricos.

3. Responder a um questionário final de conhecimentos (Pós-Teste) e de avaliação da experiência de uso.

RISCOS:

Os riscos envolvidos nesta pesquisa são mínimos e comparáveis aos de atividades cotidianas de estudo ou uso de dispositivos móveis. Você pode sentir um leve desconforto ou cansaço visual ao utilizar a tela do *tablet* ou ao responder às questões. Você pode desistir de preencher os questionários e/ou participar da pesquisa a qualquer momento, sem qualquer prejuízo, caso se sinta desconfortável ou por qualquer outro motivo.

BENEFÍCIOS:

Sua participação contribuirá diretamente para o desenvolvimento de novas tecnologias educacionais que podem beneficiar o ensino de Física. Embora não haja benefício financeiro direto, você terá a oportunidade de interagir com uma ferramenta inovadora que pode auxiliar na sua própria compreensão sobre circuitos elétricos.

CONFIDENCIALIDADE:

Todas as informações obtidas por meio desta pesquisa serão confidenciais e o sigilo sobre sua identidade é assegurado. Seus dados serão tratados de forma anônima e utilizados exclusivamente para fins acadêmicos. As respostas aos questionários serão analisadas de forma agregada, impossibilitando a identificação individual dos participantes.

DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS:

Os resultados do estudo farão parte de um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e poderão ser divulgados em publicações acadêmicas ou congressos científicos, sempre respeitando o anonimato dos participantes.

DÚVIDAS E RECLAMAÇÕES:

A pesquisa está sendo realizada no âmbito do curso de **Engenharia de Computação e Informação** da **Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)**. O pesquisador responsável está disponível para esclarecer quaisquer dúvidas.

Contato da Pesquisadora:

Nome: Rayssa Cristina de Almeida

E-mail: rayssa.almeida@poli.ufrj.br

Caso seja necessário, você também pode contatar as orientadoras responsáveis:

Orientadoras: Prof.ª Claudia Susie Rodrigues e Prof.ª Cláudia Werner

Você pode solicitar uma cópia deste termo para seus arquivos.

( ) De posse das informações acima, declaro que entendi os objetivos, riscos e benefícios de minha participação no estudo e concordo em participar voluntariamente.

Rio de Janeiro, _____ de _____ de 2025.

Participante (Nome): _____

Assinatura: _____

Apêndice B

Roteiro de Atividades do Participante

Este documento foi entregue impresso aos participantes para guiar a interação com o software.

Guia de Atividades

Bem-vindo!

Obrigada por participar deste teste. Hoje você vai utilizar um **Simulador de Circuitos Elétricos em 3D**.

Importante:

- Estamos avaliando o **aplicativo**, não você.
- Não se preocupe se algo der errado. Isso nos ajuda a identificar onde o software precisa melhorar.

Parte 1: Primeiros Passos

Antes de começarmos a mexer no simulador, por favor:

1. Leia e assine o **Termo de Consentimento**.
2. Responda ao **Questionário de Perfil**.

3. Responda ao **Questionário Inicial (Pré-Teste)**.

Parte 2: Usando o Simulador

A. Exploração Livre (3 minutos)

Explore a ferramenta livremente. Tente arrastar componentes, conectar fios e navegar pela tela para se acostumar com os controles.

B. Desafios Práticos

Tente realizar as tarefas abaixo, uma de cada vez.

Desafio 1: Luz! Monte um circuito simples que faça a lâmpada acender.

Desafio 2: Controlando a Intensidade. Sem diminuir a quantidade de baterias (voltagem), tente fazer a lâmpada brilhar **menos**. O que você precisa adicionar ou mudar no circuito?

Desafio 3: Testando os Limites. Aumente a voltagem (tensão) do circuito para o **máximo** possível usando o controle na tela. Observe o que acontece com a lâmpada e com as partículas.

Desafio 4: O Sentido da Corrente. Procure o botão que altera o modo de visualização do fluxo. Clique nele e observe: O que mudou na direção das partículas? O funcionamento da lâmpada mudou?

Desafio 5: Caminhos Paralelos. Crie uma bifurcação (dois caminhos) no circuito. No **caminho A**, coloque apenas uma lâmpada. No **caminho B**, coloque uma lâmpada **E** um resistor. Compare o brilho das lâmpadas e o fluxo de partículas.

Parte 3: Finalização

1. Devolva o *tablet* à pesquisadora.

2. Responda ao **Questionário Final (Pós-Teste)**.

3. Responda à **Pesquisa de Opinião** sobre o software.

Apêndice C

Questionários

Este apêndice apresenta os formulários utilizados para coleta de dados demográficos, conceituais e de usabilidade.

Questionário de Perfil

1. **Idade:** _____
2. **Gênero:** _____
3. **Ano escolar/período da faculdade:** _____
4. **Se está cursando ensino superior, especifique o curso:** _____
5. **O quanto você domina os conceitos básicos de Eletricidade (Lei de Ohm, Circuitos)?**

   ◯ Bastante

   ◯ Razoavelmente

   ◯ Pouco

   ◯ Nada

6. **Com qual frequência você costuma utilizar simuladors ou simulações em 3D?**

   ◯ Todos os dias

◯ Duas ou mais vezes por semana

◯ Uma vez por semana

◯ Pelo menos uma vez por mês

◯ Nunca

7. **Você já utilizou algum simulador de circuitos anteriormente (ex: PhET, Tinkercad, Falstad)?**

◯ Sim

◯ Não

8. **Em qual dispositivo você tem mais facilidade para interagir com aplicações 3D?**

◯ Computador (*Mouse*/Teclado)

◯ *Tablet*/Celular (*Touch*)

◯ Console

◯ Não tenho costume

2. Questionários de conhecimento (Pré e Pós-Teste)

1. **Questão 1: O que a Lei de Ohm estabelece fundamentalmente?**

   ◯ Que a corrente é consumida pelos resistores.

   ◯ A relação matemática entre Tensão, Corrente e Resistência ($V = R \cdot I$).

   ◯ Que a tensão é sempre constante em qualquer circuito.

   ◯ A soma das correntes em um nó é zero.

2. **Questão 2: Em um circuito simples, se mantivermos a tensão constante e aumentarmos a resistência, o que acontece com a corrente elétrica?**

   ◯ Aumenta.

   ◯ Diminui.

   ◯ Permanece a mesma.

   ◯ A corrente inverte o sentido.

3. **Questão 3: Qual é o sentido convencional da corrente elétrica utilizado em diagramas?**

   ◯ Do polo negativo para o positivo.

   ◯ Do polo positivo para o negativo.

   ◯ Aleatório.

   ◯ Não existe sentido definido.

4. **Questão 4: Em um circuito com apenas uma fonte de tensão, se uma lâmpada paralela queima, o que acontece com outra lâmpada paralela (se ambas são paralelas à fonte de tensão)?**

   ◯ Apaga também.

   ◯ Brilha mais fraco.

   ◯ Continua acesa independentemente.

   ◯ Queima imediatamente.

5. **Questão 5: Em um circuito paralelo, se a corrente elétrica tiver dois caminhos para seguir, um com resistência muito BAIXA e outro com resistência muito ALTA, como ela se comportará?**

   ◯ A corrente se dividirá igualmente entre os dois caminhos.

   ◯ A maior parte da corrente passará pelo caminho de MENOR resistência.

   ◯ A maior parte da corrente passará pelo caminho de MAIOR resistência.

   ◯ A corrente vai parar e não circulará por nenhum dos dois.

6. **Questão 6: Em um circuito elétrico real, como devemos considerar a resistência de componentes como fios condutores e lâmpadas incandescentes?**

   ◯ Eles não possuem resistência elétrica (resistência zero).

   ◯ Apenas os componentes chamados "resistores" possuem resistência; fios e lâmpadas não.

   ◯ Todos os componentes reais, incluindo o filamento da lâmpada e os fios, possuem alguma resistência elétrica.

   ◯ A resistência da lâmpada é infinita, por isso ela brilha.

Avaliação de Reação e Usabilidade (MEEGA+ Adaptado)

Objetivo: Avaliar a usabilidade, o *design* e a experiência do usuário com o software.
Escala: 1 (Discordo Totalmente) a 5 (Concordo Totalmente).

Design e Interface

1. **O *design* do simulador é atraente (interface, gráficos, tabuleiro, cartas, etc.).**

2. **Os textos, cores e fontes combinam e são consistentes.**

3. **As fontes (tamanho e estilo) utilizadas no simulador são legíveis.**

4. **As cores utilizadas no simulador são compreensíveis.**

** Para todas as questões acima, a escala de resposta é de (1) a (5).*

Usabilidade

5. **Eu precisei aprender poucas coisas para poder começar a usar o simulador.**
6. **Aprender a usar este simulador foi fácil para mim.**
7. **Eu acho que a maioria das pessoas aprenderiam a usar este simulador rapidamente.**
8. **Eu considero que o simulador é fácil de usar.**
9. **As regras do simulador são claras e compreensíveis.**
10. **Quando olhei pela primeira vez o simulador, eu tive a impressão de que seria fácil para mim.**
11. **A organização do conteúdo me ajudou a estar confiante de que eu iria aprender com este simulador.**

** Para todas as questões acima, a escala de resposta é de (1) a (5).*

Engajamento e Desafio

12. **Este simulador é adequadamente desafiador para mim.**
13. **O simulador oferece novos desafios (oferece novos obstáculos, situações ou variações) com um ritmo adequado.**
14. **O simulador não se torna monótono nas suas tarefas (repetitivo ou com tarefas chatas).**
15. **Completar as tarefas do simulador me deu um sentimento de realização.**
16. **É devido ao meu esforço pessoal que eu consigo avançar no simulador.**

17. **Me sinto satisfeito com as coisas que aprendi no simulador.**
18. **Eu me diverti com o simulador/foi uma experiência lúdica.**
19. **Eu estava tão envolvido no simulador que eu perdi a noção do tempo.**
20. **Eu esqueci sobre o ambiente ao meu redor enquanto usava este simulador.**

** Para todas as questões acima, a escala de resposta é de (1) a (5).*

Experiência de Aprendizagem

21. **O conteúdo do simulador é relevante para os meus interesses.**
22. **É claro para mim como o conteúdo do simulador está relacionado com a disciplina.**
23. **O simulador é um método de ensino adequado para esta disciplina.**
24. **Eu prefiro aprender com este simulador do que de outra forma (outro método de ensino).**
25. **O simulador contribuiu para a minha aprendizagem na disciplina.**
26. **O simulador foi eficiente para minha aprendizagem, em comparação com outras atividades da disciplina.**

** Para todas as questões acima, a escala de resposta é de (1) a (5).*

Perguntas Abertas (Qualitativas)

1. **Sugestões para versões futuras:**

---

2. **Qual foi a maior dificuldade que você encontrou ao usar o software (ex: controles, câmera, *bugs*)?**

---

3. **Do que você mais gostou?**