

ABORDAGEM HÍBRIDA NO ENSINO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS: INTEGRAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO FÍSICO, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E MODELAGEM 3D

José Luciano da Fonseca Filho¹, Gislene Micarla Borges Lima¹, Layza Vitoria Nogueira de Oliveira¹, Arthur Vitor Tavares de Andrade¹, Athaanderson Edson Matias dos Santos¹

*¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Angicos, Brasil
(jose.filho09436@alunos.ufersa.edu.br)*

Resumo: O ensino de Física no Brasil enfrenta desafios na integração de teoria e prática. Este trabalho apresenta a sistematização de uma proposta didática com experimento físico e uma versão equivalente em simulador computacional para o ensino de associações em série, paralelo e mistas. Também foi realizada a modelagem 3D do aparato experimental e a análise de sua viabilidade. Os resultados indicam que um design modular otimizaria a fabricação e favorece a reprodutibilidade do kit didático, constituindo uma alternativa promissora para a democratização de atividades experimentais no ensino de Física.

Palavras-chave: Circuitos elétricos, Ensino de Física, Simulação computacional, modelagem 3D

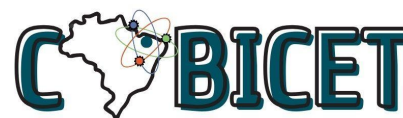
INTRODUÇÃO

O cotidiano é permeado por circuitos elétricos. Quando um morador acende uma lâmpada sem que as demais se apaguem, quando o ferro elétrico continua aquecendo mesmo após o secador de cabelo ser desligado, ou quando um aparelho queimado não interrompe o funcionamento dos demais, todas essas situações expressam, de forma silenciosa, um princípio físico fundamental: a ligação em paralelo, configuração adotada universalmente nas instalações elétricas residenciais. Compreender por que essa escolha é feita, e não outra, é um dos objetivos centrais do ensino de circuitos elétricos. No entanto, esse entendimento raramente é alcançado pelos estudantes brasileiros da educação básica, pois o ensino no Brasil, ainda é, em grande medida, reduzido à aplicação mecânica de fórmulas desconectadas das situações reais que as motivam (MOREIRA, 2021).

Para superar essa lacuna entre a teoria escolar e a prática cotidiana, torna-se imperativo dominar os fundamentos dessas configurações. Nesse sentido, a distinção entre ligação em série e ligação em paralelo é um dos conceitos mais estruturantes do eletromagnetismo básico, e também um dos mais frequentemente mal compreendidos. Na ligação em série, a mesma corrente percorre todos os elementos do circuito e a tensão total se distribui entre eles. Isso

significa que, em uma instalação residencial com lâmpadas ligadas em série, cada uma receberia apenas uma fração da tensão da rede — operando abaixo de suas condições nominais, com brilho reduzido e rendimento comprometido. Mais grave ainda: se uma das lâmpadas queimasse, o circuito seria interrompido e todas as demais se apagariam simultaneamente. Esse comportamento, familiar a quem já lidou com cordões de luzes de árvore de Natal, ilustra com clareza as limitações da ligação em série para uso residencial (GREF, 1993). Na ligação em paralelo, por outro lado, todos os elementos estão conectados diretamente entre os fios fase e neutro da instalação, submetidos à mesma tensão da rede. Cada aparelho recebe a tensão para a qual foi projetado e opera em suas condições nominais, independentemente dos demais. A corrente total que circula pelo ramal principal é a soma das correntes individuais de cada aparelho, o que explica por que a fiação principal precisa suportar uma corrente maior do que os ramos individuais, e por que a escolha do calibre do fio e do fusível adequado depende diretamente da potência total instalada (GREF, 1993).

Essa diferença de comportamento entre as duas configurações não é apenas técnica, ela é conceitual. Entender o por que a tensão se divide na ligação em série e se mantém constante na ligação em paralelo; por que a corrente é a mesma em série e se divide em paralelo; por que a resistência equivalente cresce em



série e diminui em paralelo, esses são os nós conceituais que o estudante precisa desatar para compreender o funcionamento de qualquer circuito elétrico, seja ele doméstico ou industrial. É justamente nesses nós que o ensino tradicional falha, como apontou Feynman ao observar que estudantes brasileiros respondiam corretamente às perguntas formuladas nos termos decorados, mas não conseguiam aplicar os mesmos conceitos diante de uma situação concreta (MOREIRA, I. C., 2018). No contexto dos circuitos, isso se traduz no estudante que calcula a resistência equivalente de uma associação em paralelo com destreza, mas não sabe explicar por que o ferro elétrico continua funcionando quando a lâmpada queima.

A superação dessa lacuna passa, inevitavelmente, pela dimensão experimental. É no contato direto com o fenômeno, montando um circuito, medindo tensões e correntes, modificando resistências e observando o que muda, que o estudante constrói uma compreensão que vai além da memorização de fórmulas. Uma abordagem contextualizada desse conteúdo pode ser encontrada em materiais didáticos que partem de situações reais para construir os conceitos. Nessa perspectiva, destaca-se o trabalho do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF), cujo volume dedicado ao eletromagnetismo propõe um ensino voltado para a compreensão dos fenômenos elétricos presentes no cotidiano, partindo de situações como o funcionamento de eletrodomésticos e a distribuição de energia elétrica residencial para construir progressivamente os conceitos de tensão, corrente, resistência e potência elétrica (GREF, 1993). Essa concepção pedagógica, que coloca o contexto real como ponto de partida e não como mero exemplo ilustrativo, é o que Moreira (2021) identifica como condição fundamental para a aprendizagem significativa: as situações precisam fazer sentido para o aprendiz, e as primeiras delas devem partir de seu entorno imediato.

No entanto, a realidade das escolas brasileiras impõe um obstáculo recorrente a essa abordagem: a ausência ou precariedade de laboratórios de física. Como aponta Moreira (2021), é comum que laboratórios existam nas escolas e permaneçam fechados, subutilizados, ou que simplesmente não existam, e a justificativa para um ensino sem atividades experimentais recai, quase sempre, sobre essa ausência de infraestrutura. É nesse cenário que os simuladores computacionais emergem como uma alternativa pedagógica concreta. Por meio dessas ferramentas, o estudante pode construir circuitos virtuais em série, em paralelo ou mistos e manipular componentes como resistores, lâmpadas, fontes de tensão e amperímetros em tempo real. Ao modificar parâmetros e observar imediatamente os efeitos sobre

as grandezas do sistema, o discente experimenta o rigor da prática sem a dependência de bancadas, fios ou multímetros físicos (MOREIRA, 2021).

A questão que se coloca, entretanto, é se a experiência proporcionada pelo simulador é pedagogicamente equivalente à experiência com o experimento físico real. Montar um circuito com componentes concretos, sentir a resistência dos fios, observar o brilho real de uma lâmpada, medir com um multímetro físico, envolve uma dimensão sensorial e manipulativa que o ambiente virtual não replica integralmente. Por outro lado, o simulador oferece vantagens que o experimento físico dificilmente proporciona: a possibilidade de modificar instantaneamente qualquer parâmetro, visualizar grandezas invisíveis como corrente e tensão de forma gráfica e simultânea, testar hipóteses sem risco de danos a equipamentos e repetir situações quantas vezes forem necessárias. Ambas as abordagens, portanto, apresentam potencialidades e limitações distintas que merecem ser investigadas de forma sistemática.

É nesse contexto que a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) orienta, por meio da habilidade **EM13CNT107**, que os estudantes realizem previsões qualitativas e quantitativas sobre o funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos com base nos processos de transformação e condução de energia, e, por meio da habilidade **EM13CNT308**, que investiguem e analisem o funcionamento de equipamentos elétricos para compreender as tecnologias contemporâneas e avaliar seus impactos sociais, culturais e ambientais (BRASIL, 2018). Ambas apontam para uma abordagem que alia conceituação física, experimentação e reflexão crítica. Essa perspectiva é reforçada pela habilidade **EM13CNT106**, que orienta a avaliação de tecnologias e soluções para demandas que envolvem geração, distribuição e consumo de energia elétrica, considerando eficiência energética e impactos socioambientais (BRASIL, 2018), dimensão diretamente contemplada quando o estudante analisa uma instalação residencial real e discute a escolha de seus componentes.

O presente artigo apresenta, portanto, uma proposta instrumental multifacetada para o ensino de circuitos elétricos: uma sequência didática com experimento físico, utilizando componentes simples como resistores, lâmpadas, pilhas e multímetros, cujo *design* conceitual foi planejado e analisado via *software* de modelagem tridimensional para futura fabricação por manufatura aditiva, e uma sequência equivalente com simulador online de circuitos, construída sobre os mesmos objetivos conceituais no simulador de circuitos de código aberto Falstad

(disponível de forma pública online). Ambas partem da compreensão das características das ligações em série, em paralelo e mista em contextos residenciais concretos, em consonância com a abordagem contextualizada proposta pelo GREF (1993). O objetivo imediato é descrever e sistematizar as duas propostas como alternativas didáticas viáveis para o ensino de circuitos elétricos na educação básica e em disciplinas de Física Geral em cursos de exatas e engenharia, evidenciando como a modelagem 3D computacional atua na viabilidade e escalabilidade de protótipos educacionais. Em perspectiva futura, as duas abordagens poderão ser confrontadas empiricamente, por meio de pesquisa com estudantes, para investigar se são igualmente potentes no que se refere ao processo de aprendizagem, ou se cada uma apresenta vantagens específicas para determinados perfis de estudantes, contextos institucionais ou objetivos de aprendizagem.

MATERIAL E MÉTODOS

A proposta didática apresentada neste artigo foi construída em duas frentes complementares: uma proposta experimental física e uma equivalente utilizando o simulador *online* de circuitos Falstad. Ambas as propostas foram elaboradas sobre os mesmos parâmetros elétricos e as mesmas configurações de circuito, de modo que possam ser utilizadas de forma independente ou conjunta, e que seus resultados possam ser futuramente confrontados em uma investigação sobre a equivalência pedagógica entre as duas abordagens.

A proposta experimental física foi construída sobre uma placa de Fibra de Madeira com densidade Média (MDF), escolhida como base por ser um material de baixo custo, leve, fácil de manusear e suficientemente rígido para estabilizar os componentes. As lâmpadas utilizadas são do tipo E10, com tensão nominal de 2,5 V e potência nominal de 0,75 W. A tensão nominal corresponde ao valor de tensão para o qual a lâmpada foi projetada para operar em suas condições ideais, abaixo desse valor ela brilha com menos intensidade; acima, o filamento pode se romper. A potência nominal indica a taxa de conversão de energia elétrica em luz e calor quando a lâmpada opera na tensão de projeto. A partir desses dois valores é possível calcular a resistência elétrica R do filamento em operação, dada por:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(2,5)^2}{0,75} \approx 8,33\Omega \quad (1)$$

e a corrente nominal, dada por:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{0,75}{2,75} = 0,3A \quad (2)$$

A escolha das lâmpadas como elementos centrais do circuito é fundamentalmente didática: o brilho de cada lâmpada funciona como um indicador visual e imediato das grandezas elétricas que a percorrem, dispensando em um primeiro momento o uso de instrumentos de medição e permitindo que o estudante desenvolva uma intuição qualitativa sobre o comportamento do circuito antes de avançar para a análise quantitativa. O tipo de sistema foi escolhido para que fosse feito o manuseio dos equipamentos sem riscos de choques elétricos que possam gerar perigos.

Cada lâmpada é fixada em um soquete do tipo E10, que possui dois terminais metálicos garantindo o contato elétrico com os pólos da lâmpada e servindo como ponto de conexão com o restante do circuito, como mostrado na Figura 1. Os soquetes foram fixados na placa de MDF de forma distribuída (Figura 2), de modo a permitir que as conexões entre eles sejam realizadas por diferentes caminhos, viabilizando as múltiplas configurações previstas na proposta.



Figura 1. Modelo de lâmpada E10 utilizada. Fonte: Autoria própria.

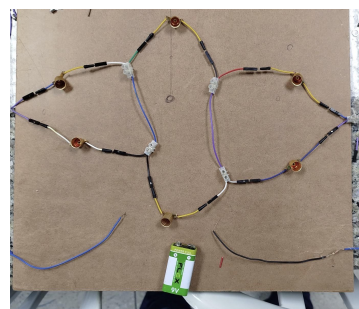
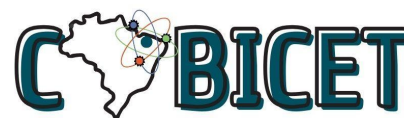


Figura 2. Circuito com soquetes no MDF. Fonte: autoria própria.



As conexões entre os componentes foram feitas por fios de diferentes cores: azul, amarelo, preto, branco, roxo, vermelho e verde, cujos terminais foram protegidos com tubos de isolamento. A variação de cores cumpre uma função didática: ela permite que o estudante rastreie visualmente o caminho percorrido pela corrente em cada configuração, identificando com clareza quais elementos estão no mesmo ramo do circuito e quais estão em ramos distintos. Os nós de conexão entre os fios são realizados por blocos de bornes de parafuso e cabeças de jumper macho e fêmea, que permitem fixar e soltar os fios com facilidade, sem necessidade de solda. É por meio desses conectores que o estudante reconecta os fios para modificar a configuração do circuito, tornando visível e manipulável aquilo que nos esquemas teóricos aparece apenas como um nó abstrato, o ponto onde os caminhos do circuito se dividem ou se unem. A alimentação do circuito é fornecida por uma bateria de 9V, contudo, podem ser utilizados outros valores de tensão. A escolha se justifica pela segurança para manipulação em ambiente educacional, pela compatibilidade com as lâmpadas E10 de 2,5 V quando a tensão é distribuída entre os elementos nas configurações em série ou mistas, e pelo baixo custo e ampla disponibilidade do componente. A placa conta ainda com um ponto específico para a inserção de um resistor externo, que permite ao estudante introduzir uma resistência adicional em série ou em paralelo com as lâmpadas, explorando conceitos como queda de tensão, divisão de corrente e potência dissipada em diferentes pontos do circuito.

O elemento central da proposta física não é nenhum componente isolado, mas a concepção da placa como um sistema modular de reconfiguração de circuitos. Diferentemente de um circuito fixo, a placa foi projetada para que o estudante possa, a partir dos mesmos componentes físicos, construir diferentes configurações: série, paralelo e mista, reconectando os fios nos pontos de junção definidos pelos conectores borboleta. Quando o estudante desconecta um fio de um conector e reconecta-o em outro ponto, alterando a topologia do circuito e observando imediatamente a mudança no brilho das lâmpadas, ele está construindo, de forma concreta e sensorial, a compreensão de que a configuração das conexões determina o comportamento elétrico do sistema. A sequência de uso da placa foi organizada do arranjo mais simples ao mais complexo. Em um primeiro momento, uma única lâmpada é conectada à fonte de 9V, servindo como referência para todas as comparações subsequentes. Em seguida, duas ou mais lâmpadas são conectadas em série, e o estudante é convidado a prever o que ocorrerá com o brilho de cada uma antes de fechar o circuito. A observação de que o brilho diminui, porque cada lâmpada recebe

apenas uma fração da tensão total, firma a compreensão do princípio da divisão de tensão em série. A retirada de uma das lâmpadas, que apaga todas as demais, é outro momento de forte impacto conceitual, que conecta diretamente à situação familiar dos cordões de luzes de árvore de Natal (GREF, 1993). Na sequência, as mesmas lâmpadas são reconectadas em paralelo, e o estudante pode observar que o brilho de cada uma se mantém independentemente do número de elementos ligados e que a retirada de uma não afeta as demais, reproduzindo, em escala reduzida, o comportamento de uma instalação elétrica residencial. Por fim, são propostas configurações mistas com arranjos variáveis, nas quais o estudante é desafiado a prever o comportamento de cada lâmpada antes de montar o circuito. A divergência entre a previsão e o resultado observado, quando ocorre, é o momento mais rico do ponto de vista da aprendizagem, pois força a revisão do modelo mental construído pelo estudante e estimula a busca por uma explicação mais precisa (MOREIRA, 2021).

A proposta com o simulador Falstad foi desenvolvida de forma paralela e equivalente à proposta física, utilizando os mesmos parâmetros elétricos: fonte de 9V e lâmpadas com resistência de aproximadamente $8,33 \Omega$. O Falstad é uma ferramenta computacional gratuita, de acesso online, que permite a construção, simulação e análise de circuitos elétricos em tempo real diretamente no navegador, sem necessidade de instalação de *software* ou cadastro. O simulador oferece uma interface visual intuitiva na qual o usuário insere componentes e os conecta por meio de fios desenhados diretamente na tela. Uma vez montado o circuito, a simulação é executada automaticamente e o fluxo de corrente é representado por partículas animadas que percorrem os fios em tempo real, em verde quando a corrente flui em um sentido, em amarelo quando flui no sentido oposto, permitindo que o estudante visualize o comportamento das grandezas elétricas em cada parte do circuito. Ao clicar sobre qualquer componente, o simulador exibe os valores de tensão, corrente e potência sobre aquele elemento, tornando a leitura das grandezas parte natural da interação com o circuito.

No ambiente do Falstad, foram construídas as mesmas configurações previstas na proposta física: circuito simples com lâmpadas, ligação em série, ligação em paralelo e configurações mistas com arranjos variáveis. As imagens obtidas durante o desenvolvimento da proposta ilustram três dessas configurações, todas alimentadas pela fonte de 9V. Na primeira configuração, apresentada na Figura 3, observa-se um arranjo no qual lâmpadas conectadas em paralelo no ramo central são associadas em série

com lâmpadas nos ramos laterais, o fluxo de corrente animado permite visualizar com clareza a divisão da corrente nos nós do circuito e sua recombinação ao retornar à fonte.

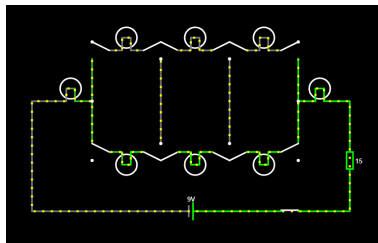


Figura 3. Primeira configuração no Falstad. Fonte: autoria própria

Nas configuração seguinte, uma topologia distinta produz diferença visível no brilho das lâmpadas entre os ramos, evidenciando que elementos em diferentes posições do circuito misto estão submetidos a tensões distintas, fenômeno que no experimento físico se manifesta pela diferença de brilho e que no simulador é confirmado numericamente pelos valores exibidos ao clicar em cada elemento presente na Figura 4.

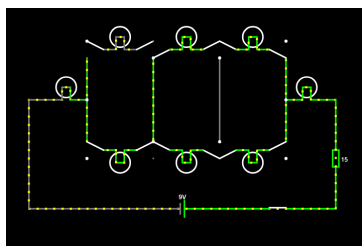


Figura 4. Segunda configuração no Falstad. Fonte: autoria própria

Na terceira configuração, as lâmpadas centrais conectadas em série entre si apresentam brilho claramente reduzido em relação às lâmpadas dos ramos laterais, ilustrando de forma direta o efeito da divisão de tensão na ligação em série e contrastando com o comportamento das lâmpadas em paralelo no mesmo circuito da Figura 5.

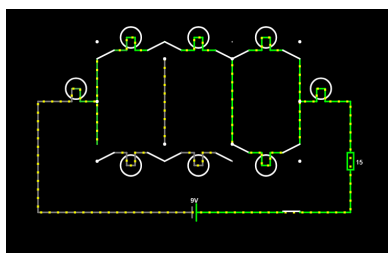


Figura 5. Terceira configuração no Falstad. Fonte: autoria própria

A correspondência entre os parâmetros das duas propostas é um elemento metodológico deliberado: ela permite que o estudante confronte, em qualquer momento, os resultados obtidos no simulador com os resultados observados na placa física, identificando convergências e eventuais divergências decorrentes de fatores como a resistência interna da bateria, a variação da resistência do filamento com a temperatura ou as imperfeições das conexões físicas. Esse confronto entre o modelo simulado e o fenômeno real é, em si mesmo, um objeto de aprendizagem de grande valor, pois evidencia que os modelos matemáticos que descrevem os circuitos são aproximações da realidade, e não a realidade em si (MOREIRA, 2021). O simulador oferece ainda a possibilidade de modificar instantaneamente qualquer parâmetro do circuito, alterar o valor da resistência, mudar a tensão da fonte, adicionar ou remover elementos, e observar imediatamente o efeito sobre todas as grandezas simultaneamente, estimulando uma postura investigativa baseada na formulação e teste de hipóteses. O experimento físico, por sua vez, oferece uma dimensão sensorial e manipulativa que o ambiente virtual não replica: o estudante sente a resistência dos conectores, observa o aquecimento real das lâmpadas e lida com as variabilidades inerentes aos componentes reais.

Apesar de a primeira versão em placa de MDF se mostrar eficiente como um protótipo inicial de validação conceitual, a análise de sua viabilidade para aplicação em larga escala no ambiente escolar revelou limitações logísticas e de reprodutibilidade. A dependência de processos manuais de corte, furação e fixação artesanal do MDF dificulta a replicação idêntica desse aparato por outros docentes ou instituições de ensino. Diante desse desafio de viabilidade pedagógica e tecnológica, a vertente física do projeto expandiu-se para a modelagem digital e o estudo de sua viabilidade por manufatura aditiva, visando a democratização e a padronização do projeto.

O processo de transposição do modelo físico para o ambiente digital foi realizado por meio do *software* de modelagem tridimensional Tinkercad. A escolha desta ferramenta justifica-se por sua interface intuitiva, o que permite que qualquer educador possa acessar, modificar ou replicar o *design* original. No Tinkercad, foram modeladas versões virtuais da estrutura do projeto, respeitando estritamente as dimensões dos componentes reais descritos anteriormente. Para a materialização física desses componentes, utilizou-se como base as especificações da impressora 3D Anet ET4. Durante a fase de parametrização para a modelagem 3D, foram mapeados os requisitos de produção do protótipo, incluindo as dimensões finais de cada

peça, a estimativa de peso do material consumido e o tempo projetado de impressão. Essa análise revelou um importante fator de otimização: a modelagem da placa como uma estrutura única e monolítica resultaria em um tempo de impressão excessivamente longo e em um alto risco de empenamento da peça, além de demandar maior volume de suportes descartáveis de filamento.

Como solução técnica para essa limitação, o projeto passou por um processo iterativo de *design* que resultou na criação de quatro modelos digitais distintos. Os dois primeiros modelos desenvolvidos basearam-se na concepção de uma peça única e monolítica com os encaixes integrados diretamente na base (Figura 6). Embora mantivessem a integridade visual da placa original em MDF, os testes de fatiamento digital dessas versões iniciais mostraram que a sua produção seria totalmente inviável devido ao tamanho total do bloco que excedeu o tamanho da mesa da impressora. Buscando mitigar esse tempo de impressão, o terceiro modelo tridimensional avançou para uma estrutura fragmentada em duas partes independentes, apresentadas na Figura 7..

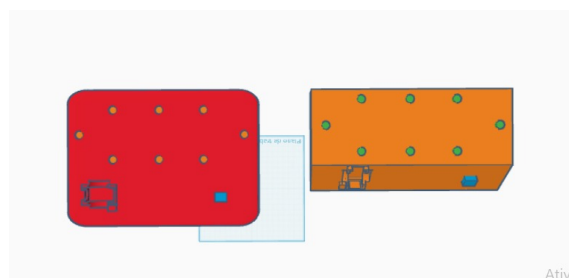


Figura 6. Modelos 3D em peça única 1 e 2. Fonte: autoria própria

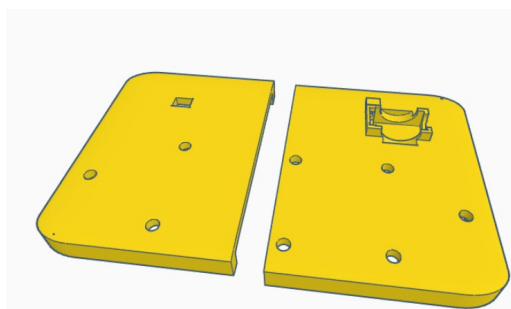


Figura 7. Terceiro modelo 3D dividido em duas partes. Fonte: autoria própria

Apesar do avanço, a divisão em apenas duas partes ainda se mostrou insuficiente para resolver os riscos de empenamento e a incompatibilidade com mesas de impressão de pequeno porte. Assim, concebeu-se o quarto modelo estudado, estruturado como um

sistema completamente modular composto por 14 partes encaixáveis (Figura 8). Essa configuração distribui-se em: duas peças destinadas especificamente para abrigar as lâmpadas dos cantos da placa; seis peças menores para as lâmpadas posicionadas na região central; uma peça dedicada ao compartimento de pilha; uma peça para o interruptor; e, por fim, quatro paredes estruturais que cercam e travam o conjunto de peças encaixáveis (Tabela 1).

Tabela 1. Dados de último modelo

Módulo/peça	quantidade	tempo total estimado	Estimativa de Consumo de material (g)
Interruptor	1	44min	8g
Encaixe de pilha	1	3h03min	31g
Módulo de lâmpada menor	6	5h54min	54g
Módulo de lâmpada de canto	2	2h42min	28g
Parede Traseira	1	56min	11g
Parede lateral	2	3h50min	32g
Parede Frontal	1	2h1min	23g
Total do Conjunto	14	20h	187g

Fonte: autoria própria



Figura 8. Modelo 3D final modular composto por 14 partes. Fonte: autoria própria

A análise dos parâmetros de fatiamento demonstrou que essa fragmentação extrema em 14 peças reduziria drasticamente o tempo total de execução na impressora 3D e minimizaria o desperdício de filamento. Além de gerar economia de insumos e otimização de tempo, essa abordagem modular

confere ao projeto um caráter de escalabilidade, permitindo que diferentes peças sejam impressas simultaneamente em mais de uma máquina, ou que módulos danificados sejam substituídos individualmente pelos estudantes, consolidando a manufatura aditiva como uma via promissora para a produção de kits didáticos de baixo custo.

Essas diferenças entre as abordagens investigadas, a simulação computacional, o protótipo físico artesanal em MDF e o projeto modular customizável por impressão 3D, não constituem limitações isoladas, mas características que se tornam profundamente complementares. Elas justificam a investigação futura sobre seus efeitos distintos e combinados no processo de aprendizagem, investigação esta que este artigo se propõe a subsidiar ao apresentar e correlacionar essas propostas de forma sistemática e comparável.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da transposição do aparato didático do ambiente físico-artesanal em MDF para a manufatura aditiva revelou que o *design* do modelo tridimensional e a estratégia de fatiamento exercem um impacto direto na viabilidade econômica e logística do projeto. O protótipo inicial em peça única, embora preservasse a identidade visual da placa original, mostrou-se teoricamente inviável nos testes de fatiamento digital devido à incompatibilidade com a área útil de impressão estimada para máquinas padrão. Essa limitação física exigiu uma evolução iterativa no *design* tridimensional, cujas métricas estimadas de produção (via *software* de fatiamento) estão sistematizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Evolução de Design Tridimensional.

Modelo estrutural	Status/viabilidade e técnica	Tempo total estimado	Estimativa de Consumo de material (g)
Peça única (monolítica)	Inviável (Excede a área da mesa)	-	-
Dividido em Duas Partes	Viável, mas ineficiente	2d 9h 5min	519g
Modular Final (14 Partes)	Ideal (Otimizado)	20h	187g

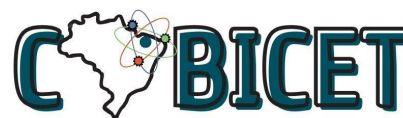
Fonte: autoria própria

Os dados da Tabela 2 evidenciam que a primeira tentativa de fragmentação do circuito em duas partes resultaria em um processo de produção altamente ineficiente e arriscado para o ambiente escolar. Sob o ponto de vista temporal, as projeções indicam que a fabricação completa do modelo de duas partes demandaria em torno de 57 horas ininterruptas de funcionamento da máquina (2 dias, 9 horas e 5 minutos), expondo o processo a longos períodos de suscetibilidade a falhas técnicas, queda de energia ou fadiga do equipamento. Além disso, o consumo total de 519 gramas de filamento representa mais da metade de um carretel padrão de 1 kg, elevando o custo unitário do kit didático e limitando a sua reprodutibilidade por professores com restrições orçamentárias. Esse cenário projetado de alto consumo e tempo excessivo decorre da previsão de grandes volumes de suportes descartáveis de filamento somada ao tamanho das peças a serem impressas.

Em contrapartida, a transição para o modelo final estruturado em 14 peças encaixáveis representou, em ambiente de simulação, uma otimização significativa. Uma modelagem orientada à fragmentação gerou uma estimativa de tempo total de execução para apenas 20 horas e um consumo calculado de material para 187 gramas, uma economia de aproximadamente 63,9% em filamento e de 64,9% no tempo de impressão quando comparado ao modelo de duas partes. Ao mitigar os riscos de empenamento, o último *design* apresentado conferiu escalabilidade ao projeto, o que permitirá, futuramente, que diferentes módulos sejam distribuídos e impressos simultaneamente em múltiplas máquinas de pequeno porte. Sob a ótica prática da rotina escolar, essa modularidade introduz uma grande vantagem de manutenção: caso um componente sofra desgaste ou quebra durante o manuseio dos estudantes, o docente pode substituir e reimprimir individualmente apenas o módulo afetado, sem a necessidade de descartar e refazer uma estrutura massiva.

CONCLUSÃO

A sistematização da proposta didática apresentada neste trabalho permitiu estruturar duas abordagens complementares para o ensino de circuitos elétricos, uma baseada na experimentação física e outra na utilização de simuladores computacionais, ambas fundamentadas nos mesmos parâmetros elétricos e objetivos conceituais. Além disso, a análise do processo de modelagem 3D e dos parâmetros de manufatura aditiva evidenciou que a modularização do aparato constitui um fator determinante para sua viabilidade de produção, reprodutibilidade e manutenção, resultando em ganhos expressivos na redução do tempo de impressão e do consumo de material. Dessa forma, é estabelece-se uma base para futuras investigações voltadas ao confronto



entre a implementação didática do experimento físico e do simulador, possibilitando a análise das potencialidades e limitações de cada metodologia na compreensão dos conceitos de circuitos elétricos e no processo de aprendizagem dos estudantes.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Educação Tutorial e a Fundação de Amparo à Pesquisa no Rio Grande do Norte pelo suporte financeiro, professores e colegas que contribuíram para a realização da pesquisa de extensão e do trabalho completo.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, DF: MEC, 2018.

GREF – GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Motores elétricos. In: COPELLI, Anna Cecília et al. **Leituras de Física: Eletromagnetismo**. Coordenação de Luís Carlos de Menezes e Yassuko Hosoume. São Paulo: Instituto de Física da USP, 1998. Leitura 14, p. 53-56. Disponível em <https://fep.if.usp.br/~profis/arquivo/gref/blocos/eletro3.pdf>. Acesso em: 29 maio 2026.

MOREIRA, Ildeu de Castro. Feynman e suas conferências sobre o ensino de física no Brasil. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, e4203, 2018

MOREIRA, Marco Antonio. Desafios no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, supl. 1, e20200451, 2021.