

LABORATÓRIO VIRTUAL 3D PARA TREINAMENTO EM PARTIDA DIRETA DE MOTORES TRIFÁSICOS: DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO POR ESPECIALISTAS

3D VIRTUAL LABORATORY FOR TRAINING IN DIRECT STARTING OF THREE-PHASE MOTORS: DEVELOPMENT AND EXPERT VALIDATION

LABORATORIO VIRTUAL 3D PARA ENTRENAMIENTO EN ARRANQUE DIRECTO DE MOTORES TRIFÁSICOS: DESARROLLO Y VALIDACIÓN POR EXPERTOS

Erick Aragão Gadelha de Oliveira¹, Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo², Franarilly Coelho da Silva³, Adriano Aron Freitas de Moura⁴

DOI: 10.54899/dcs.v23i93.5819

Recibido: 09/06/2026 | Aceptado: 11/06/2026 | Publicación en línea: 07/08/2026.

RESUMO

A consolidação da Indústria 4.0 intensificou a demanda por profissionais qualificados em automação e eletrotécnica, ao mesmo tempo em que expõe as limitações estruturais dos laboratórios físicos convencionais, como custo elevado, número reduzido de bancadas e riscos associados ao manuseio de sistemas elétricos energizados. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um laboratório virtual tridimensional para treinamento em partida direta de motores elétricos trifásicos, implementado na plataforma Unity 3D. O ambiente reproduz o Laboratório de Automação e Controle da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Caraúbas, e contempla duas práticas interativas: acionamento por botoeiras e acionamento via Controlador Lógico Programável (CLP) com programação em linguagem Ladder. A validação foi conduzida por sete especialistas da área de engenharia elétrica, automação e docência, por meio de questionário estruturado com escala Likert (1 a 5) avaliando cinco dimensões: fidelidade técnica, usabilidade da interface, interatividade e imersão, potencial didático, e aplicabilidade e expansão. Os resultados evidenciam elevada concordância quanto à fidelidade técnica ($M = 4,75$; $IVC = 0,96$) e ao potencial didático ($M = 4,68$; $IVC = 1,00$), com Índice de Validade de Conteúdo (IVC) global superior a 0,80 em quatro das cinco dimensões avaliadas. Os especialistas destacaram como pontos fortes a fidelidade dos modelos 3D, a segurança do ambiente virtual e o nível de interatividade. Como limitações, foram apontadas dificuldades na manipulação inicial dos cabos e a necessidade de expansão para outros tipos de acionamentos. Adicionalmente, identificou-se incompatibilidade do simulador com o sistema operacional macOS, o que inviabilizou a participação de um dos avaliadores inicialmente

¹ Bacharel em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: erick.oliveira64338@alunos.ufersa.edu.br

² Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: daniel.crisostomo@ufersa.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9752-688X>

³ Bacharel em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: franarilly.silva@alunos.ufersa.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1689-0217>

⁴ Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: adrianoaron@ufersa.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6547-7606>

convidados, sinalizando a necessidade de suporte multiplataforma em versões futuras. Os resultados validam o simulador como ferramenta pedagógica complementar ao laboratório físico, com potencial de replicação em diferentes contextos educacionais.

Palavras-chave: Laboratório Virtual. Simulador 3D. Unity 3D. Acionamento de Motores. Educação em Engenharia.

ABSTRACT

The consolidation of Industry 4.0 has intensified the demand for qualified professionals in automation and electrotechnics, while exposing the structural limitations of conventional physical laboratories, such as high costs, limited workstations, and risks associated with handling energized electrical systems. This paper presents the development and validation of a three-dimensional virtual laboratory for training in direct starting of three-phase electric motors, implemented on the Unity 3D platform. The environment reproduces the Automation and Control Laboratory of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Caraúbas campus, and encompasses two interactive practices: push-button actuation and actuation via Programmable Logic Controller (PLC) with Ladder language programming. Validation was conducted by seven specialists in electrical engineering, automation, and teaching, through a structured questionnaire with a Likert scale (1 to 5) evaluating five dimensions: technical fidelity, interface usability, interactivity and immersion, didactic potential, and applicability and expansion. Results show high agreement regarding technical fidelity ($M = 4.75$; $CVI = 0.96$) and didactic potential ($M = 4.68$; $CVI = 1.00$), with a global Content Validity Index (CVI) above 0.80 in four of the five dimensions evaluated. Specialists highlighted as strengths the fidelity of 3D models, the safety of the virtual environment, and the level of interactivity. Limitations included initial difficulties in cable manipulation and the need for expansion to other drive types. Additionally, incompatibility of the simulator with the macOS operating system was identified, which prevented one of the initially invited evaluators from participating, signaling the need for multiplatform support in future versions. The results validate the simulator as a complementary pedagogical tool to the physical laboratory, with replication potential in different educational contexts.

Keywords: Virtual Laboratory. 3D Simulator. Unity 3D. Motor Drive. Engineering Education.

RESUMEN

La consolidación de la Industria 4.0 ha intensificado la demanda de profesionales calificados en automatización y electrotecnia, al tiempo que expone las limitaciones estructurales de los laboratorios físicos convencionales, como el alto costo, el número reducido de puestos de trabajo y los riesgos asociados al manejo de sistemas eléctricos energizados. Este artículo presenta el desarrollo y la validación de un laboratorio virtual tridimensional para el entrenamiento en arranque directo de motores eléctricos trifásicos, implementado en la plataforma Unity 3D. El entorno reproduce el Laboratorio de Automatización y Control de la Universidad Federal Rural del Semiárido (UFERSA), campus Caraúbas, y comprende dos prácticas interactivas: accionamiento por pulsadores y accionamiento mediante Controlador Lógico Programable (CLP) con programación en lenguaje Ladder. La validación fue realizada por siete especialistas en ingeniería eléctrica, automatización y docencia, a través de un cuestionario estructurado con escala Likert (1 a 5) que evaluó cinco dimensiones: fidelidad técnica, usabilidad de la interfaz, interactividad e inmersión, potencial didáctico y aplicabilidad y expansión. Los resultados

evidencian alta concordancia en cuanto a fidelidad técnica ($M = 4,75$; $IVC = 0,96$) y potencial didáctico ($M = 4,68$; $IVC = 1,00$), con Índice de Validez de Contenido (IVC) global superior a 0,80 en cuatro de las cinco dimensiones evaluadas. Los especialistas destacaron como puntos fuertes la fidelidad de los modelos 3D, la seguridad del entorno virtual y el nivel de interactividad. Como limitaciones se señalaron dificultades iniciales en la manipulación de cables y la necesidad de expansión a otros tipos de accionamientos. Adicionalmente, se identificó incompatibilidad del simulador con el sistema operativo macOS, lo que impidió la participación de uno de los evaluadores inicialmente invitados, señalando la necesidad de soporte multiplataforma en versiones futuras. Los resultados validan el simulador como herramienta pedagógica complementaria al laboratorio físico, con potencial de replicación en diferentes contextos educativos.

Palabras clave: Laboratorio Virtual. Simulador 3D. Unity 3D. Accionamiento de Motores. Educación en Ingeniería.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A consolidação da Indústria 4.0 no ambiente produtivo tem impulsionado a crescente adoção de tecnologias de automação nos processos industriais. Nesse cenário, a demanda por profissionais qualificados nas áreas de automação, eletrotécnica e controle de sistemas elétricos tem se intensificado de forma expressiva (Fernandes, Rodrigues & Antunes, 2023). Diante desse contexto, atividades práticas voltadas à montagem e à operação de circuitos elétricos industriais assumem papel fundamental na formação técnica e acadêmica dos profissionais que atuarão nesse mercado.

Contudo, a realização de práticas como a partida direta de motores e a programação de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) em laboratórios físicos enfrenta limitações consideráveis. Entre os principais obstáculos estão o elevado custo de aquisição e manutenção dos equipamentos, a quantidade reduzida de bancadas disponíveis, a necessidade de supervisão constante durante as atividades e os riscos associados ao manuseio de sistemas elétricos energizados (Cipriani *et al.*, 2025).

Como alternativa a essas limitações, os ambientes virtuais de simulação se apresentam como solução viável e acessível. Nesses ambientes, não há necessidade de aquisição de equipamentos reais nem de gastos com manutenção, e o espaço físico deixa de ser um fator restritivo, uma vez que o acesso pode ser realizado por meio de computadores, tablets ou

dispositivos móveis. No entanto, embora diversos trabalhos abordem o uso de simuladores no ensino de engenharia e no treinamento técnico-industrial, parte dessas soluções ainda apresenta limitações quanto ao nível de interatividade, à fidelidade operacional e à capacidade de reproduzir procedimentos reais de montagem de circuitos elétricos (Negahban, 2024).

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho consistiu em desenvolver um laboratório virtual tridimensional para treinamento em partida direta de motores trifásicos, utilizando a plataforma Unity 3D. Como objetivos específicos, buscou-se: modelar os componentes industriais presentes em um laboratório de automação de forma fiel aos equipamentos reais; implementar mecanismos interativos de montagem e operação dos circuitos elétricos; desenvolver práticas de acionamento por botoeiras e por CLP; e validar o ambiente junto a especialistas da área por meio de instrumento psicométrico estruturado.

REFERENCIAL TEÓRICO

Ambientes Virtuais Interativos na Reprodução de Cenários Industriais

O avanço das tecnologias computacionais impulsionou a incorporação de ferramentas digitais nos processos de ensino e aprendizagem, consolidando os ambientes virtuais como recursos pedagógicos relevantes para a formação técnica e profissional (De Andrade, Lessa & Dos Santos, 2025). Nesse contexto, os ambientes virtuais interativos destacam-se pela capacidade de reproduzir cenários industriais com elevado nível de fidelidade operacional, permitindo que o usuário interaja com equipamentos e procedimentos de forma segura e controlada.

A modelagem e simulação computacional constituem metodologias consolidadas para a representação de sistemas complexos, possibilitando a análise do comportamento de processos em condições que seriam difíceis ou inviáveis de reproduzir fisicamente (Chwif & Medina, 2014). Quando aplicadas ao contexto educacional, essas técnicas permitem criar laboratórios virtuais que simulam o funcionamento de sistemas elétricos e de automação industrial, reduzindo a dependência de infraestrutura física e ampliando o acesso às práticas laboratoriais.

Além disso, a utilização de simuladores interativos em sala de aula ou em atividades pré-laboratoriais contribui para a aprendizagem ativa, na medida em que coloca o estudante como agente central do processo, estimulando a tomada de decisões, a observação de consequências e a correção de erros em um ambiente sem risco real (Martins *et al.*, 2020).

Simuladores Virtuais Aplicados ao Treinamento Técnico

O uso de simuladores virtuais no treinamento técnico tem se expandido em áreas que envolvem alto risco operacional, como a eletrotécnica, a automação industrial e a manutenção de sistemas energizados. Castro *et al.* (2014) desenvolveram um simulador voltado ao treinamento de eletricitistas em atividades de campo, utilizando modelagem tridimensional na plataforma ATreVEE 3D, com destaque para a possibilidade de repetição ilimitada das simulações, redução de custos e viabilidade de execução remota. Da Silveira Júnior, Raia e Rodrigues (2025) investigaram o uso de simuladores virtuais no ensino de física em cursos de engenharia a distância, demonstrando que a simulação contribui para a compreensão de fenômenos físicos e para o engajamento dos estudantes.

Embora os trabalhos citados abordem contextos disciplinares distintos, suas conclusões convergem para um ponto comum: simuladores virtuais bem projetados, com alto nível de interatividade e fidelidade ao ambiente real, potencializam a aprendizagem prática em situações nas quais o acesso ao laboratório físico é limitado, custoso ou arriscado.

A escolha do Unity 3D justifica-se por sua ampla adoção na comunidade acadêmica e industrial, pela disponibilidade de ferramentas nativas de modelagem tridimensional — como o ProBuilder —, pelo suporte à linguagem C# e pela possibilidade de distribuição sem custos de licenciamento para uso educacional, fatores que ampliam sua acessibilidade e replicabilidade em diferentes instituições de ensino.

Motores Industriais e Tipos de Partida

Os motores elétricos constituem um dos principais elementos dos sistemas industriais modernos, sendo responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica (Oliveira *et al.*, 2014). Entre os tipos mais utilizados na indústria destaca-se o motor de indução trifásico, amplamente empregado em razão de sua robustez construtiva e baixo custo de manutenção (Chapman, 2013; Umans, 2014).

Na partida direta, a tensão total da rede elétrica é aplicada diretamente aos terminais do motor no momento do acionamento (Silva, 2015), resultando em um pico de corrente que pode atingir entre seis e oito vezes o valor nominal (Macedo, 2021). O sistema é composto por dois subsistemas interdependentes: o circuito de força, integrado por disjuntores, fusíveis, contator e

relé térmico de sobrecarga, e o circuito de comando, que controla o acionamento e o desligamento do motor de forma segura (Filippo & Filippo, 2010).

Controlador Lógico Programável

O Controlador Lógico Programável (CLP) é um dispositivo eletrônico de controle industrial desenvolvido para substituir os sistemas de relés eletromecânicos convencionais, operando a partir de um ciclo de varredura que compreende leitura dos sinais de entrada, execução do programa de controle e atualização dos sinais de saída (Filippo & Filippo, 2010). A programação é padronizada internacionalmente pela norma IEC 61131-3, sendo a linguagem Ladder a mais amplamente utilizada no contexto do ensino técnico e de engenharia. A inclusão do CLP no currículo de cursos técnicos e de engenharia elétrica é considerada indispensável para a formação de profissionais aptos a atuar no ambiente industrial contemporâneo (Castro *et al.*, 2014; Martins *et al.*, 2020).

METODOLOGIA

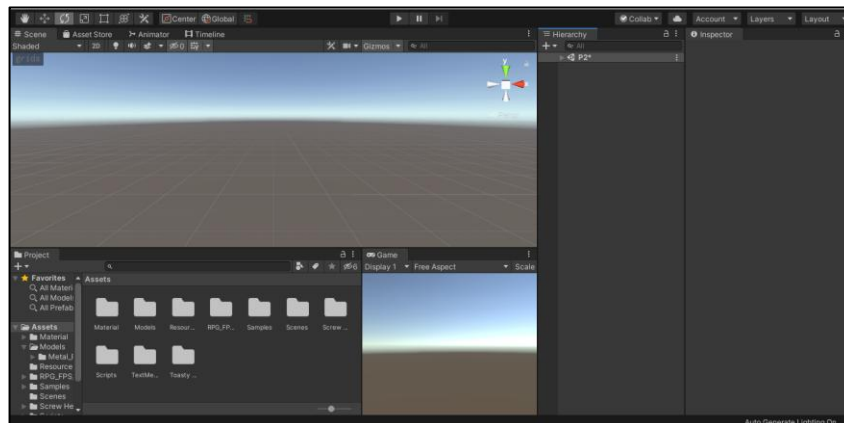
Unity 3D

O simulador foi desenvolvido na plataforma Unity, ambiente de desenvolvimento amplamente utilizado na criação de jogos, simulações e aplicações interativas em duas e três dimensões (Castro *et al.*, 2014; Da Silveira Júnior, Raia & Rodrigues, 2025). Foi adotada a versão 2019.4.27f1 (LTS — Long Term Support), o que garante estabilidade, suporte estendido e compatibilidade com as ferramentas utilizadas no projeto. Adicionalmente, o Unity oferece licença gratuita para uso educacional e sem fins lucrativos, viabilizando a replicação do simulador em outras instituições de ensino sem custos de licenciamento.

Destaca-se, contudo, que a versão desenvolvida apresenta compatibilidade exclusiva com o sistema operacional Windows, o que inviabilizou a participação de um dos especialistas inicialmente convidados para a avaliação, que dispunha apenas de computador com sistema macOS. Essa limitação deverá ser considerada para as próximas edições do simulador, com vistas à implementação de suporte multiplataforma.

Figura 1

Interface da plataforma Unity 3D, versão 2019.4.27f1, utilizada no desenvolvimento do simulador.

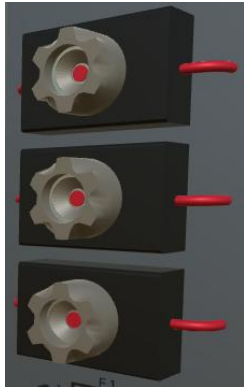


Modelagem

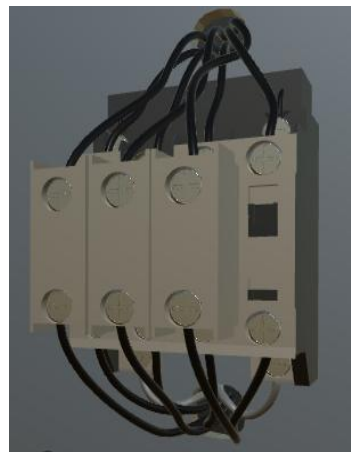
A modelagem do laboratório virtual foi baseada no Laboratório de Automação e Controle da UFERSA, campus Caraúbas, tomando como referência os equipamentos físicos disponíveis no ambiente real. Para a criação dos modelos tridimensionais, foi utilizada a ferramenta ProBuilder, extensão nativa do Unity que permite a modelagem de objetos a partir de primitivas geométricas, com possibilidade de subdivisão e edição de faces, arestas e vértices. A Tabela 1 apresenta a comparação entre os equipamentos reais e seus respectivos modelos tridimensionais.

Tabela 1

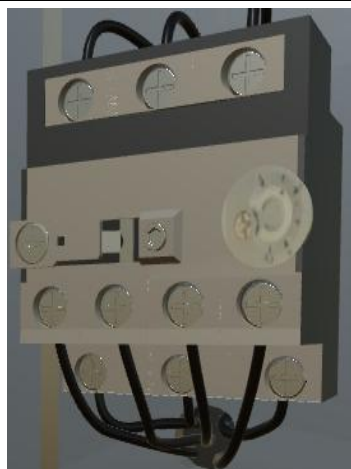
Comparação entre os equipamentos reais e modelados no ambiente virtual.

Equipamento Real	Modelo 3D Virtual
Fusíveis 	

Contator



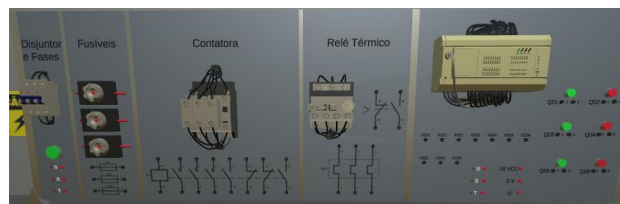
Relé térmico



CLP



Bancada dinâmica



Após a modelagem dos componentes, foi realizada a programação do comportamento de cada objeto no ambiente virtual utilizando a linguagem C#. A arquitetura de programação adotada seguiu o padrão orientado a componentes do Unity, implementando sistemas de detecção de interação por clique e por posicionamento do cursor (hover), sistemas de animação para representar o acionamento dos componentes eletromecânicos, e uma lógica de verificação sequencial das conexões elétricas realizadas pelo usuário.

Práticas do Laboratório Virtual

O laboratório virtual contempla duas práticas distintas, ambas voltadas ao acionamento direto de um motor trifásico. A primeira prática implementa o circuito de comando por meio de botoeiras, utilizando contatos normalmente abertos (NA) para o acionamento e normalmente fechados (NF) para o desligamento do motor. A segunda prática substitui o circuito de botoeiras pelo acionamento via CLP, no qual a lógica de controle é executada a partir de entradas digitais acionadas pelo usuário no ambiente virtual, reproduzindo o comportamento de um sistema de automação industrial programado em linguagem Ladder.

O fluxo de execução de cada prática segue uma sequência estruturada de etapas: identificação dos componentes, realização das conexões elétricas, acionamento dos dispositivos de proteção e operação do sistema de comando. O progresso do usuário é monitorado em tempo real por um menu interativo posicionado em uma das paredes do laboratório virtual, por meio de indicadores luminosos que sinalizam a conclusão de cada etapa.

Instrumento de Validação

A validação do simulador foi conduzida por especialistas mediante questionário estruturado elaborado para este estudo. O instrumento foi disponibilizado via Google Forms e composto por duas partes: a primeira destinada à caracterização do perfil dos avaliadores (formação, área de atuação, experiência profissional e familiaridade com as subáreas envolvidas); a segunda contendo 20 itens avaliativos organizados em cinco dimensões fidelidade técnica, usabilidade da interface, interatividade e imersão, potencial didático, e aplicabilidade e expansão, cada item respondido em escala Likert de cinco pontos (1 = Discordo totalmente a 5 = Concordo totalmente). O instrumento incluiu ainda dois campos abertos para registro de pontos fortes e

sugestões adicionais.

Para análise dos dados quantitativos, foram calculados a média (M) e o desvio padrão (DP) de cada item e de cada dimensão, além do Índice de Validade de Conteúdo (IVC), definido como a proporção de especialistas que atribuíram nota igual ou superior a 4 a cada item. Valores de IVC acima de 0,80 são amplamente aceitos na literatura como indicadores de concordância satisfatória entre avaliadores (Lynn, 1986).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O produto resultante deste trabalho é um laboratório virtual tridimensional desenvolvido na plataforma Unity 3D, destinado ao ensino de acionamento direto de motores elétricos trifásicos. O simulador reproduz o ambiente do Laboratório de Automação e Controle da UFRSA, campus Caraúbas, e contempla duas práticas interativas: o acionamento por botoeiras e o acionamento via CLP.

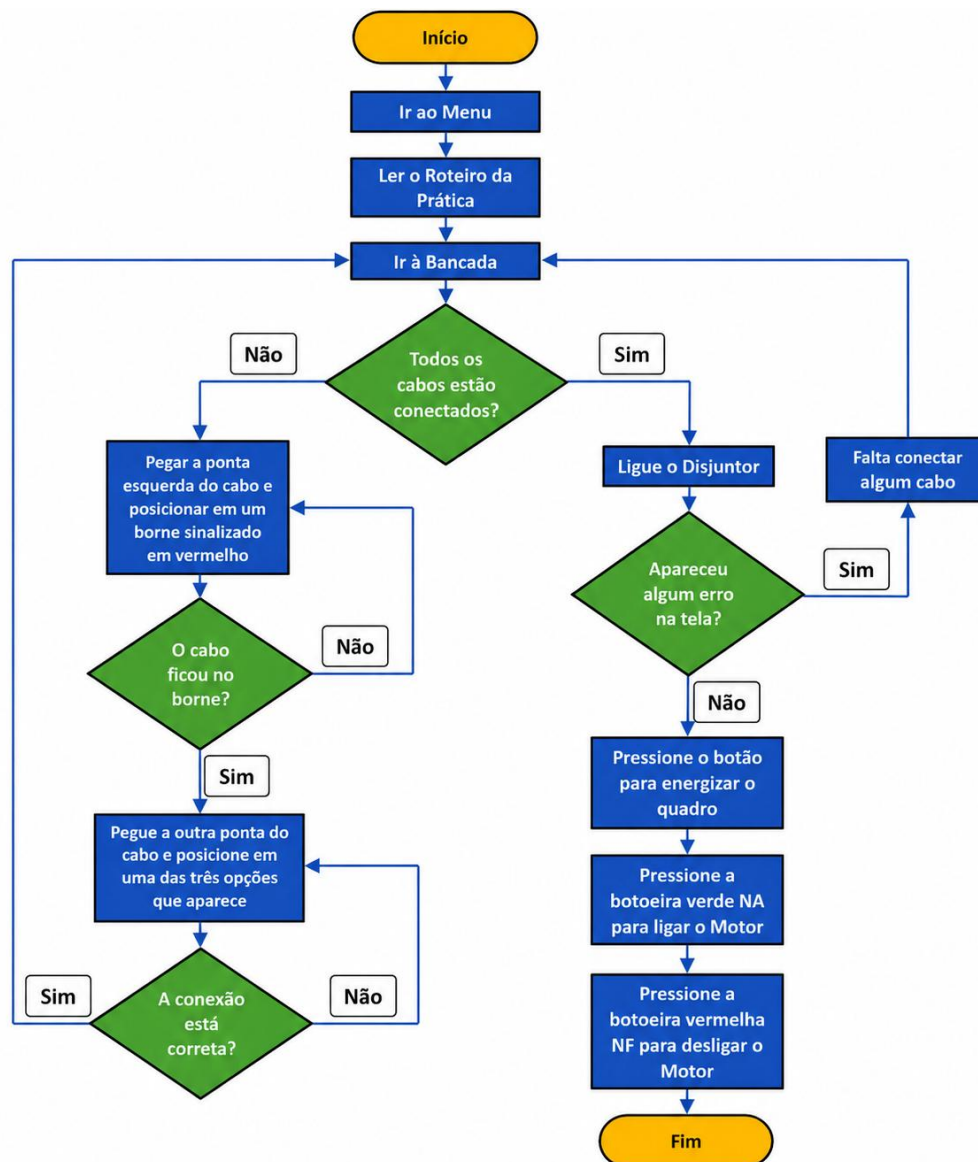
Partida Direta com Botoeiras

A primeira prática foi desenvolvida para reproduzir a montagem completa do circuito de partida direta, composto pelo circuito de força e pelo circuito de comando. No circuito de força, o usuário realiza a conexão sequencial dos cabos entre a rede elétrica, os fusíveis, o contator, o relé térmico e o motor trifásico. No circuito de comando, são realizadas as conexões das botoeiras normalmente aberta (NA) e normalmente fechada (NF), o selo pelo contato auxiliar NA do contator, a proteção térmica e a bobina do contator.

A prática foi estruturada de modo a promover a tomada de decisão do usuário: ao selecionar a extremidade livre de um cabo, são apresentadas três opções de conexão, sendo apenas uma correta para aquela etapa. O circuito é considerado corretamente montado quando o motor é acionado, evidenciado pela rotação do seu eixo no ambiente virtual.

Fluxograma 1

Fluxo de execução da prática de partida direta com botoeiras.



Partida Direta com CLP

A segunda prática mantém o mesmo circuito de força da prática anterior, diferenciando-se pelo método de comando, que passa a ser executado por CLP. O usuário deve primeiramente programar o CLP em linguagem Ladder, utilizando um número limitado de contatos e bobinas disponíveis no ambiente virtual. Essa restrição foi implementada intencionalmente para estimular diferentes estratégias de programação e a compreensão da lógica de controle. Após a validação automática da programação, são disponibilizadas ao usuário as botoeiras correspondentes às

entradas digitais definidas na lógica Ladder, para que sejam realizadas as conexões físicas por meio dos cabos na bancada virtual.

Fluxograma 2

Fluxo de execução da prática de partida direta com CLP.

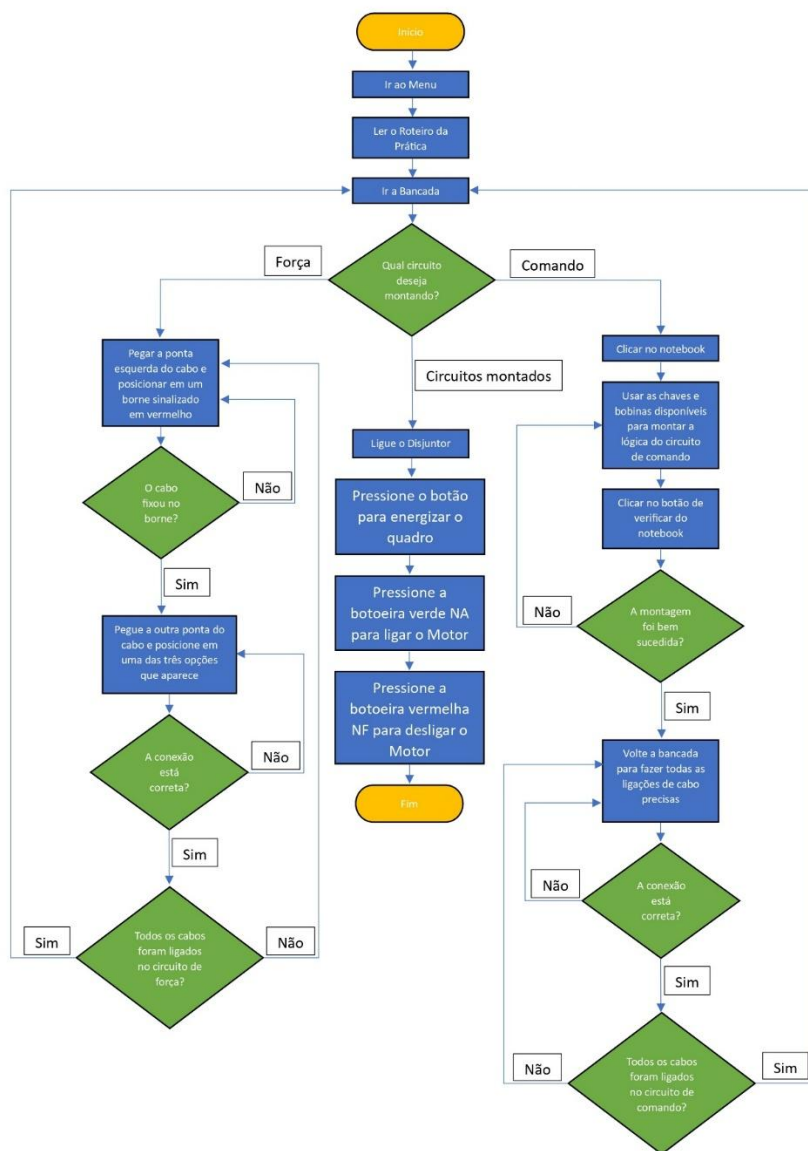
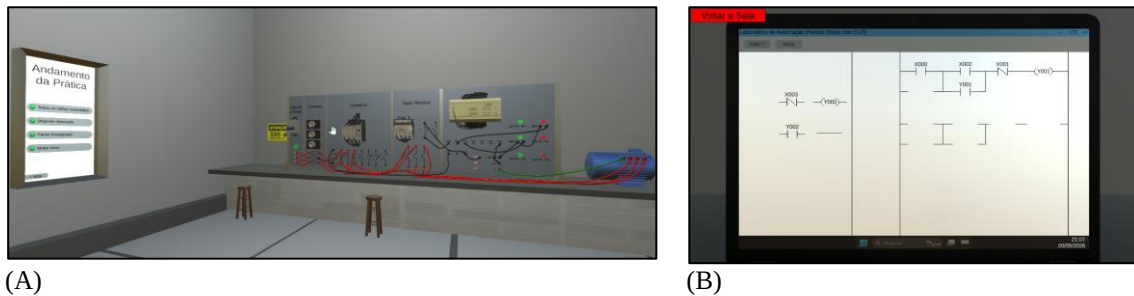


Figura 2

Circuito com CLP montado (A) e exemplo de programação Ladder no simulador (B).



Avaliação por Especialistas

Perfil dos Avaliadores

Participaram da avaliação sete especialistas, todos com consentimento informado para uso anonimizado das respostas. O grupo foi composto por profissionais com experiência nas áreas de acionamentos elétricos, laboratórios de engenharia, docência, desenvolvimento de simuladores e segurança elétrica. A Tabela 2 apresenta o perfil dos avaliadores quanto à formação e ao tempo de experiência profissional.

Cabe registrar que um oitavo avaliador foi inicialmente convidado a participar do processo de validação, porém foi impossibilitado de responder ao questionário em virtude da incompatibilidade do simulador com o sistema operacional macOS de seu computador. O simulador, desenvolvido na versão 2019.4.27f1 do Unity 3D, foi disponibilizado exclusivamente em formato executável para Windows, o que restringiu o acesso de usuários de outros sistemas operacionais. Esse fato constitui uma limitação relevante do presente estudo e deverá ser considerado nas próximas edições do simulador, com vistas ao desenvolvimento de versão compatível com múltiplas plataformas, incluindo macOS e Linux.

Tabela 2

Perfil dos especialistas participantes da avaliação do laboratório virtual.

Esp.	Formação/Titulação	Área de Atuação	Exp. (anos)	Docência
E1	Engenharia Elétrica / Doutorado	Sistemas Embarcados e Telecomunicações	8	Sim
E2	Doutorado em Eng. Elétrica e de Computação	Telecomunicações	8	Sim
E3	Engenharia Elétrica / Doutorado	Sistemas de Energia / Máquinas Elétricas	12	Sim
E4	Engenharia Elétrica / Mestrado	Técnico de Laboratório	8	Não
E5	Doutorado em Engenharia Elétrica	Controle e Automação	15	Sim
E6	Técnico em Eletromecânica	Sistemas de Potência e Automação	13	Não
E7	Técnico de Laboratório	Engenharia Elétrica	8	Sim

Resultados Quantitativos

Os 20 itens do instrumento foram agrupados em cinco dimensões avaliativas. A Tabela 3 apresenta as médias (M), os desvios padrão (DP) e o Índice de Validade de Conteúdo (IVC) por item, e a Tabela 4 sintetiza os resultados por dimensão.

Tabela 3

Resultados por item: média, desvio padrão e Índice de Validade de Conteúdo (IVC).

Cód.	Item	M	DP	IVC
Fidelidade Técnica				
FT1	O ambiente virtual representa adequadamente os componentes utilizados em sistemas de acionamento de motores elétricos	4,86	0,38	1,00
FT2	A lógica de funcionamento implementada no ambiente é coerente com práticas reais de laboratório	4,86	0,38	1,00
FT3	As conexões e interações simuladas apresentam consistência técnica satisfatória	4,57	0,79	0,86
FT4	O ambiente demonstra fidelidade suficiente para apoiar atividades práticas introdutórias em acionamentos elétricos	4,71	0,49	1,00
Usabilidade da Interface				
UI1	A interface do ambiente virtual é intuitiva	4,14	0,69	0,86
UI2	As instruções e elementos visuais permitem compreensão adequada das tarefas	4,57	0,79	0,86
UI3	A navegação no ambiente ocorre de forma clara e organizada	4,00	1,41	0,86

UI4	Os feedbacks fornecidos pelo sistema auxiliam a execução das atividades propostas	4,14	1,46	0,86
Interatividade e Imersão				
II1	O ambiente promove sensação de interação prática com os componentes elétricos	4,71	0,76	0,86
II2	A manipulação virtual de cabos e dispositivos contribui para maior envolvimento do usuário	3,43	1,62	0,43
II3	O nível de interatividade do sistema é adequado aos objetivos didáticos propostos	4,43	1,51	0,86
II4	O ambiente virtual favorece experiências próximas às práticas laboratoriais reais	4,43	1,51	0,86
Potencial Didático				
PD1	O ambiente possui potencial para auxiliar o ensino de acionamentos elétricos	4,71	0,49	1,00
PD2	A ferramenta pode contribuir para a compreensão de procedimentos operacionais	4,57	0,53	1,00
PD3	O sistema apresenta potencial para complementar aulas práticas presenciais	4,71	0,49	1,00
PD4	O ambiente pode favorecer maior engajamento dos estudantes durante atividades práticas	4,71	0,49	1,00
Aplicabilidade e Expansão				
AE1	O ambiente apresenta potencial de utilização em cursos técnicos e superiores	4,43	1,13	0,86
AE2	A ferramenta possui potencial para utilização em treinamentos introdutórios	4,00	1,41	0,86
AE3	A arquitetura desenvolvida permite expansão para outros tipos de acionamentos elétricos	4,00	1,15	0,71
AE4	O ambiente virtual apresenta potencial de aplicação em diferentes contextos educacionais	4,00	1,15	0,71

Fonte: Dados da pesquisa, 2026. M = média; DP = desvio padrão; IVC = Índice de Validade de Conteúdo.

Tabela 4

Síntese dos resultados por dimensão avaliativa.

Dimensão	M	DP	IVC
Fidelidade Técnica	4,75	0,52	0,96
Usabilidade da Interface	4,21	1,10	0,86
Interatividade e Imersão	4,25	1,40	0,75
Potencial Didático	4,68	0,48	1,00
Aplicabilidade e Expansão	4,11	1,17	0,79

Análise e Discussão dos Resultados Quantitativos

Os resultados evidenciam elevada concordância dos especialistas quanto à fidelidade técnica do simulador ($M = 4,75$; $DP = 0,52$; $IVC = 0,96$). Os itens FT1 e FT2, que avaliam a representação adequada dos componentes e a coerência da lógica de funcionamento com práticas reais de laboratório, obtiveram IVC de 1,00, indicando concordância unânime entre os avaliadores. Esses achados corroboram os critérios de referência adotados na modelagem, fundamentados nas proporções dimensionais, nas características visuais externas e no comportamento funcional de cada componente, em consonância com o que Castro *et al.* (2014) identificaram como fator determinante para a efetividade de simuladores no treinamento técnico.

A dimensão Potencial Didático apresentou os resultados mais favoráveis do estudo ($M = 4,68$; $DP = 0,48$; $IVC = 1,00$), com todos os quatro itens alcançando IVC máximo. Esse resultado é particularmente relevante, pois confirma que o simulador é percebido pelos especialistas como ferramenta com capacidade real de apoiar o ensino de acionamentos elétricos, complementar aulas presenciais e favorecer o engajamento dos estudantes. Esses achados são consistentes com os resultados reportados por Martins *et al.* (2020) e Da Silveira Júnior, Raia e Rodrigues (2025), que identificaram maior motivação, compreensão conceitual e participação ativa em atividades mediadas por simuladores virtuais.

A Usabilidade da Interface obteve concordância satisfatória ($M = 4,21$; $DP = 1,10$; $IVC = 0,86$), com todos os itens atingindo IVC superior ao limiar de 0,80. Observa-se, contudo, maior variabilidade nas respostas aos itens UI3 (navegação clara: $DP = 1,41$) e UI4 (feedbacks: $DP = 1,46$), refletindo percepções distintas entre os especialistas. A dimensão Interatividade e Imersão apresentou o único item com IVC abaixo do limiar de validade: II2 — relativo à contribuição da manipulação virtual de cabos para o envolvimento do usuário — obteve $M = 3,43$ e $IVC = 0,43$, indicando que a mecânica de conexão dos cabos constitui o ponto mais crítico a ser aprimorado no simulador.

A dimensão Aplicabilidade e Expansão apresentou IVC de 0,79, ligeiramente abaixo do limiar de 0,80. Os itens AE3 e AE4, referentes à expansibilidade para outros tipos de acionamentos e à aplicação em diferentes contextos educacionais, obtiveram $IVC = 0,71$, sinalizando que parte dos especialistas percebe limitações no escopo atual do simulador. Esse resultado é coerente com as sugestões qualitativas apresentadas, que apontam para a necessidade de expansão das funcionalidades.

Análise Qualitativa: Pontos Fortes e Sugestões

A análise das respostas abertas permitiu identificar categorias recorrentes quanto aos pontos fortes e às limitações do simulador.

Entre os pontos fortes, destacaram-se: (a) a fidelidade visual e técnica dos modelos 3D, que contribui para a familiarização do usuário com os equipamentos reais antes do contato com o laboratório físico; (b) a possibilidade de execução das práticas em ambiente seguro, sem riscos de danos a equipamentos ou ao usuário; (c) o nível de interatividade, especialmente a mudança de cor dos componentes ao posicionamento do cursor e as informações exibidas ao clicar nos equipamentos; (d) a programação em linguagem Ladder com restrição de elementos, que estimula o raciocínio lógico; e (e) a visão tridimensional da bancada, que permite explorar os equipamentos sob diferentes perspectivas.

Quanto às sugestões de melhoria, houve convergência nos seguintes aspectos: (a) revisão da mecânica de manipulação dos cabos de conexão, que foi apontada como a principal dificuldade de interação, com relatos de cabos que ultrapassam os painéis e necessidade de maior precisão no soltar do clique do mouse; (b) expansão do simulador para outros tipos de acionamentos, como partida estrela-triângulo, softstarter e inversores de frequência; (c) incorporação de equipamentos mais modernos, como CLPs da linha LOGO! e disjuntores-motores; e (d) desenvolvimento de versão compatível com macOS, viabilizando o acesso a usuários de diferentes plataformas.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um laboratório virtual tridimensional para treinamento em partida direta de motores elétricos trifásicos, implementado na plataforma Unity 3D e avaliado por sete especialistas de engenharia elétrica, automação e docência. Os resultados da validação indicam que o simulador atende satisfatoriamente aos requisitos de fidelidade técnica e potencial didático, com IVC global superior a 0,80 em quatro das cinco dimensões avaliadas, confirmando sua viabilidade como ferramenta pedagógica complementar ao laboratório físico.

Os principais pontos fortes identificados foram a fidelidade dos modelos 3D, a segurança do ambiente virtual e os recursos de interatividade, em especial o retorno visual dos componentes e o acesso às informações dos equipamentos. Por outro lado, a mecânica de manipulação dos

cabos de conexão representa o principal ponto de melhoria, com impacto direto no IVC da dimensão de interatividade e imersão.

A identificação da incompatibilidade do simulador com o sistema operacional macOS, que inviabilizou a participação de um avaliador inicialmente convidado, evidencia a necessidade de priorizar o suporte multiplataforma nas próximas versões do software. Somada à demanda por expansão do escopo — com inclusão de partidas estrela-triângulo, softstarter e equipamentos de geração mais recente —, essa limitação define uma agenda clara para o desenvolvimento futuro do laboratório virtual.

Como contribuição, o simulador disponibiliza gratuitamente, sem custos de licenciamento, uma alternativa viável e escalável para a superação das barreiras estruturais dos laboratórios físicos convencionais, com potencial de replicação em diferentes instituições de ensino técnico e superior.

REFERÊNCIAS

- Castro, R. H. A., *et al.* (2014). Ambiente computacional baseado em realidade virtual e interação natural para treinamento no setor elétrico. In Conferência Internacional sobre Informática na Educação (TISE) (pp. 836-841).
- Chapman, S. J. (2013). Fundamentos de máquinas elétricas. AMGH Editora.
- Chwif, L., & Medina, A. C. (2014). Modelagem e simulação de eventos discretos (4. ed.). Elsevier.
- Cipriani, R. C., *et al.* (2025). Ambiente digital na educação: evolução, benefícios e riscos. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, 11(4), 184-190.
- Da Silveira Júnior, M. H., Raia, R. Z., & Rodrigues, K. G. (2025). O uso de simuladores virtuais no ensino de física em cursos de engenharia a distância: uma abordagem baseada em lançamento de projéteis. Revista de Ensino de Engenharia, 44, 267-276.
- De Andrade, T. G. A., Lessa, A. R. P., & Dos Santos, M. P. M. (2025). A evolução da tecnologia na educação, olhares na era digital. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, 11(3), 1007-1016.
- Fernandes, M. A. S., Rodrigues, R. C., & Antunes, A. M. S. (2023). Behavioral training of engineering professionals and students for Industry 4.0. RAM. Revista de Administração Mackenzie, 24(5), eRAMR230084.
- Filippo, I. C., & Filippo, L. C. (2010). Acionamentos elétricos. Editora Ciência Moderna.
- Lynn, M. R. (1986). Determination and quantification of content validity. Nursing Research, 35(6), 382-385.

- Macedo, P. (2021). Simulação da partida direta de motores de indução trifásicos para analisar as curvas de parâmetros elétricos. In Engenharia Elétrica: o caminho para o desenvolvimento sustentável.
- Martins, S. O., *et al.* (2020). O uso de simuladores virtuais na educação básica: uma estratégia para facilitar a aprendizagem nas aulas de química. *Revista Ciências & Ideias*, 216-233.
- Negahban, A. (2024). Simulation in engineering education: The transition from physical experimentation to digital immersive simulated environments. *Simulation*, 100(7), 695-708.
- Oliveira, C. A., *et al.* (2014). Estudo do desempenho do motor de indução trifásico acionado a velocidade variável com utilização de técnicas digitais. In *Semana Científica da Engenharia Elétrica* (pp. 306-311). Universidade Federal de Uberlândia.
- Pacheco, J. E. (2005). As 10 partidas de motores que você precisa conhecer. *Porto*, 1, 227-273.
- Silva, F. B., *et al.* (2015). Atenuação do afundamento de tensão em geradores síncronos isolados quando submetidos a partida direta de motores de indução [Trabalho de Conclusão de Curso].
- Umans, S. D. (2014). *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley* (7. ed.). AMGH Editora.