

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS (IFMG)
CAMPUS BAMBUÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Felipe Soares Barbosa

**DESENVOLVIMENTO DE CLP DIDÁTICO PARA LABORATÓRIOS DE
ENGENHARIA NO IFMG - CAMPUS BAMBUÍ**

BambuÍ – MG
2025

FELIPE SOARES BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE CLP DIDÁTICO PARA LABORATÓRIOS DE
ENGENHARIA NO IFMG - CAMPUS BAMBUÍ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) – *Campus* Bambuí para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Esp. Carlos Renato Nolli

Coorientador: Prof. Me. Francisco Heider
Willy dos Santos

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

B238d Barbosa, Felipe Soares.
Desenvolvimento de CPL didático para laboratórios de engenharia no IFMG Campus Bambuí. / Felipe Soares Barbosa. – 2025.
48 f.; il.: color.

Orientador: Prof. Esp. Carlos Renato Nolli.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Bacharelado em Engenharia de Produção, 2025.

1. Controle Lógico Programável (CLP). 2. OPENPLC. 3. ESP32. I. Nolli, Carlos Renato. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III. Título.

CDD 005.268



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Bambuí

Diretoria de Ensino

Departamento de Engenharia e Computação

Faz. Varginha - Rodovia Bambuí/Medeiros - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 38900-000 - Bambuí - MG
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

Felipe Soares Barbosa

**DESENVOLVIMENTO DE CLP DIDÁTICO PARA LABORATÓRIOS DE
ENGENHARIA NO IFMG CAMPUS BAMBUÍ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Bambuí para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em 10/12/2025 pela banca examinadora:

Bambuí, 10 de dezembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Renato Nolli, Professor**, em 10/12/2025, às 15:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Clemente de Sousa, Professor EBTT**, em 10/12/2025, às 15:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Heider Willy dos Santos, Professor**, em 10/12/2025, às 15:47, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Williams Lara de Nicomedes, Professor Substituto**, em 11/12/2025, às 12:24, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2555589** e o código CRC **332CD2F8**.

23209.001441/2024-73	2555589v1
----------------------	-----------

Dedico este trabalho à minha família fontes inesgotáveis de apoio, amor e
compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, ao meu orientador, ao meu coorientador e a todos que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

“Um homem não é medido por como age em momentos de conforto, mas por como reage em momentos de dificuldade.”

Martin Luther King Jr.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aborda o desenvolvimento de um Controlador Lógico Programável (CLP) didático, destinado a laboratórios de Engenharia de Computação e Eletromecânica. A necessidade de uma solução acessível surge das limitações de recursos presentes em muitas instituições de ensino, nas quais a aquisição de equipamentos industriais torna-se inviável devido ao elevado custo. O projeto propõe o desenvolvimento de um controlador didático de baixo custo, capaz de reproduzir as principais funcionalidades de CLPs industriais, utilizando hardware acessível e integrando-se à plataforma OpenPLC. A solução desenvolvida busca oferecer uma experiência prática próxima à realidade industrial, possibilitando aos estudantes a aplicação de conceitos teóricos e práticos relacionados à automação industrial em ambiente acadêmico.

Palavras-chave: Controle Lógico Programável (CLP), OPENPLC, ESP32, Controle e Automação

ABSTRACT

The Undergraduate Thesis (TCC) addresses the development of a didactic Programmable Logic Controller (PLC), intended for laboratories of Computer Engineering and Electromechanical Engineering. The need for an affordable solution arises from the resource limitations present in many educational institutions, where the acquisition of industrial PLC equipment becomes unfeasible due to its high cost. The project proposes the development of a low-cost didactic controller capable of reproducing the main functionalities of industrial PLCs, using accessible hardware and integrating with the OpenPLC platform. The developed solution aims to provide a practical learning experience close to industrial reality, enabling students to apply both theoretical and practical concepts related to industrial automation within an academic environment.

Keywords: Programmable Logic Controller (PLC), OpenPLC, ESP32, control and automation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação de um CLP.	13
Figura 2 - Principais partes de um CLP.	17
Figura 3 - Tipos fundamentais de linguagens.	20
Figura 4 - Pinos disponíveis no ESP32	21
Figura 5 - Diagrama do processo espiral aplicado ao desenvolvimento do CLP didático.	25
Figura 6 - Protótipo I (P1) — montagem em <i>proto-board</i> e validação das GPIOs.	29
Figura 7 - Protótipo II (P2) — condicionamento de sinais e conector ATX.	30
Figura 8 - Protótipo III (P3) — consolidação didática.	30
Figura 9 - Carcaça 3D (versão apresentada).	31
Figura 10 -Fixação do conjunto final em trilho DIN.	31
Figura 11 -Entrada digital isolada com 4N25 (24 V / 220 V).	34
Figura 12 -Saída digital isolada com 4N25.	35
Figura 13 -Entrada analógica 4–20 mA com LM358 e ganho definido por R6 e R5.	36
Figura 14 -Teste da entrada digital em 24 V com indicação por LED.	37
Figura 15 -Teste da entrada digital em 220 V com optoacoplador 4N25.	37
Figura 16 -Medição de tensão na saída digital (24 V) durante o acionamento.	38
Figura 17 -Teste da entrada analógica com fonte de corrente 4–20 mA.	38
Figura 18 -Programa Diagrama Ladder desenvolvido no OpenPLC.	39
Figura 19 -Montagem em bancada: CLP didático acionando motor elétrico.	40
Figura 20 -Diagrama de blocos funcional do sistema.	41

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- IFMG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
- CLP – Controlador Lógico Programável
- SFC – Sequenciamento Gráfico de Funções (sigla do inglês *Sequential Function Chart*)
- FBD – Diagrama de Blocos Funcionais (sigla do inglês *Function Block Diagram*)
- ST – Texto Estruturado (sigla do inglês *Structured Text*)
- IL – Lista de Instruções (sigla do inglês *Instruction List*)
- LD – Diagrama Ladder (sigla do inglês *Ladder Diagram*)
- IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (sigla do inglês *International Electrotechnical Commission*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.2	Justificativa	13
2	Fundamentação Teórica	15
2.1	Referencial bibliográfico	15
2.2	Prática no Ensino	16
2.3	Controlador Lógico Programável (CLP)	17
2.3.1	<i>Portas de Entrada e Saída</i>	<i>18</i>
2.3.2	<i>Entradas e Saídas Digitais</i>	<i>19</i>
2.3.3	<i>Entradas e Saídas Analógicas</i>	<i>19</i>
2.4	Programação de CLPs	19
2.4.1	<i>Linguagens de Programação Textual</i>	<i>20</i>
2.4.2	<i>Linguagens de Programação Gráfica</i>	<i>20</i>
2.5	Microcontrolador	20
2.5.1	<i>ESP32</i>	<i>21</i>
2.6	OpenPLC	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Requisitos do Sistema	24
3.2	Materiais e Ferramentas Utilizadas	24
3.3	Definição da Pesquisa	25
3.4	Especificações Nominais	26
3.5	Materiais	26

3.6	Estratégia de Prototipação	26
3.6.1	<i>Bibliotecas Utilizadas</i>	27
3.7	Ferramentas Computacionais	27
4	Resultados e Discussões	28
4.1	Análise de Custo do Protótipo	28
4.2	Evolução dos Protótipos	29
4.3	Interfaces de Entrada/Saída Implementadas	32
4.3.1	<i>Entradas Digitais 24 V e 220 V</i>	32
4.3.2	<i>Saída Digital 24 V</i>	34
4.3.3	<i>Entrada Analógica 4–20 mA</i>	35
4.4	Validações Experimentais	36
4.4.1	<i>Entradas Digitais (0–24 V e 220 V)</i>	36
4.4.2	<i>Saída Digital 24 V</i>	37
4.4.3	<i>Entrada Analógica 4–20 mA</i>	38
4.4.4	<i>Ensaio Final em Ambiente Didático</i>	39
4.5	Comparação entre o CLP didático desenvolvido e CLPs comerciais equivalentes (dados de 2025)	41
4.5.1	<i>Vantagens do CLP didático desenvolvido</i>	42
4.6	Discussão Geral	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
5.1	Trabalhos Futuros	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Na área do ensino de eletricidade é frequentemente observado que os estudantes têm dificuldade em compreender plenamente a conexão direta entre os princípios físicos e o funcionamento dos dispositivos eletrônicos. Por conseguinte, os professores enfrentam desafios ao buscar métodos que evidenciem a aplicabilidade da teoria (Bello, 2010). Com a dificuldade dos alunos em estabelecer conexões entre as aulas teóricas e a aplicação prática dos conceitos, os professores tendem a recorrer a aulas práticas para tornar o conteúdo mais palpável e compreensível (Marinho, 2018), mostrando que a prática laboratorial desempenha um papel fundamental na consolidação da compreensão dos conceitos teóricos apresentados em sala de aula. Por meio dela, os alunos têm a oportunidade de desenvolver habilidades técnicas e aprimorar sua capacidade de resolver problemas.

Nas áreas de Engenharia de Computação e Técnico em Eletromecânica, os alunos têm contato direto com equipamentos específicos, como o Controlador Lógico Programável (CLP), que possui componentes semelhantes aos de um computador, incluindo memória, processador, barramento e portas de comunicação. Na Figura 1, os sensores, o módulo de entrada, o programa, o módulo de saída e os atuadores são identificados como partes integrantes do sistema. Os sensores são responsáveis por captar dados do ambiente ou do processo em questão. O módulo de entrada recebe os sinais dos sensores e os converte em informações digitais compreensíveis pelo CLP. O programa, desenvolvido pelo usuário, define as ações que o CLP deve executar com base nos dados recebidos, e o módulo de saída recebe as instruções do programa e as converte em sinais adequados para os atuadores.

Apesar de o IFMG - Campus Bambuí apresentar laboratórios educacionais de boa infraestrutura e serem adequadamente equipados para diversas atividades práticas, no contexto da automação industrial a instituição dispõe majoritariamente de bancadas de comandos elétricos. Atualmente, o *campus* conta com apenas três Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) disponíveis para atividades didáticas, número insuficiente para atender de forma adequada à demanda de aulas práticas e à quantidade de alunos dos cursos de Engenharia de Computação e Eletromecânica. Essa limitação restringe a vivência prática dos discentes com essa tecnologia essencial ao ambiente profissional da automação industrial.

O aumento da complexidade e da dinamicidade dos ambientes industriais exige elevados níveis de eficiência e produtividade, tornando indispensável a adoção de recursos tecnológicos e da automação de processos. Nesse contexto, os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) desempenham papel fundamental nos sistemas de automação industrial, sendo amplamente utilizados no meio profissional (Romano, 2024). Entretanto, conforme destacado por (Neto, 2012), o elevado custo de aquisição

de CLPs industriais dificulta a equipagem adequada dos laboratórios de ensino, especialmente em instituições públicas. Como consequência, essa limitação configura-se como um obstáculo relevante para o desenvolvimento técnico e prático dos estudantes das áreas de Engenharia de Computação e Eletromecânica.



Fonte: Tecniar, 2024.

1.1 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um Controlador Lógico Programável (CLP) didático destinado a laboratórios de Engenharia de Computação e Eletromecânica, visando oferecer uma solução acessível e eficaz para o ensino prático de automação industrial.

A fim de alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Projetar e desenvolver um CLP didático com funcionalidades compatíveis com as exigências dos cursos de Engenharia de Computação e Eletromecânica.
- b) Integrar o hardware desenvolvido a um sistema de desenvolvimento para CLPs, assegurando sua compatibilidade e correto funcionamento.
- c) Realizar testes e validações do CLP didático em ambiente laboratorial, avaliando seu desempenho e confiabilidade.
- d) Documentar todo o processo de desenvolvimento, bem como os resultados obtidos ao longo do projeto.

1.2 Justificativa

A automação industrial tem se consolidado como um elemento essencial nos processos produtivos modernos, contribuindo significativamente para o aumento da eficiência, da produtividade e da confiabilidade dos sistemas industriais. Nesse contexto, os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) desempenham papel central, uma vez que permitem maior flexibilidade operacional, facilidade de manutenção,

padronização de processos e redução de falhas humanas, justificando amplamente seu uso no ambiente industrial (Fenerick; Volante, 2020).

Entretanto, embora o investimento em CLPs industriais seja plenamente justificável no setor produtivo devido aos benefícios técnicos e econômicos proporcionados, o elevado custo desses equipamentos representa um entrave quando considerados para fins didáticos. Em instituições de ensino, especialmente em laboratórios acadêmicos, a aquisição de um número suficiente de CLPs industriais para atender às demandas de aulas práticas e ao quantitativo de alunos torna-se financeiramente inviável, limitando o acesso dos estudantes a essa tecnologia fundamental.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de um CLP didático apresenta-se como uma alternativa viável e necessária. A proposta envolve a criação de circuitos de apoio associados a um microcontrolador, integrados a uma ferramenta de desenvolvimento de CLPs, possibilitando a reprodução das principais funcionalidades encontradas em controladores industriais. Essa solução busca oferecer aos estudantes dos cursos de Engenharia de Computação e Eletromecânica uma experiência prática mais próxima da realidade industrial, contribuindo para uma formação técnica mais completa, ao mesmo tempo em que reduz os custos de equipagem dos laboratórios e amplia o acesso a recursos educacionais de qualidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento deste trabalho, abordando conceitos relacionados à automação industrial, aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e à utilização de microcontroladores como alternativas didáticas de baixo custo. Também são discutidos trabalhos correlatos que exploram soluções semelhantes no contexto acadêmico, evidenciando abordagens, metodologias e resultados obtidos, os quais serviram como base conceitual e técnica para a proposta desenvolvida neste projeto.

2.1 Referencial bibliográfico

O levantamento bibliográfico revela diversas pesquisas que exploram a utilização de microcontroladores como substitutos para Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Essas pesquisas destacam as dificuldades encontradas no ambiente acadêmico, onde os recursos são limitados e há uma carência de equipamentos adequados para automação.

A disponibilidade de um equipamento de baixo custo e especializado é fundamental para se alcançar um nível de prática profissional adequado. Isso permite que os alunos concentrem seus esforços no desenvolvimento de suas aplicações e na resolução de problemas práticos.

Assim, este capítulo apresenta trabalhos relacionados que utilizaram microcontroladores em seus projetos, enfatizando a necessidade de redução de custos no contexto do ensino de automação.

O trabalho de (Júnior; Lopes; Dâmaso, 2019) descreve a substituição de um controlador industrial por um Arduino Uno em uma maquete de linha de montagem automotiva, utilizada como recurso didático. O projeto demandou diversas adaptações eletrônicas, incluindo a implementação de circuitos divisores de tensão e de acionamento, com o objetivo de proporcionar aos estudantes uma experiência prática compatível com a aplicação industrial.

Outra abordagem é apresentada por (Amorim; Rall, 2021), que descrevem a criação de um sistema fresador CNC utilizando um Arduino Uno R3 e uma CNC Shield. O objetivo principal do projeto foi a redução de custos, proporcionando, ao mesmo tempo, o desenvolvimento de competências técnicas e a geração de um equipamento aplicável às áreas de manutenção, automação, *design* e produção.

O trabalho apresentado por (Tófoli; Higa, 2014) teve como objetivo comparar um sistema de levantamento de carga utilizando um microcontrolador AT89S52 e um CLP S7-300. O estudo revelou que o microcontrolador apresenta menor custo, porém oferece menor flexibilidade em razão da programação mais complexa e da ne-

cessidade de construção dos circuitos. Em contraste, o CLP, apesar do custo elevado, tanto do equipamento quanto da licença do *software*, mostra-se mais flexível na montagem e também na programação.

A pesquisa apresentada por (Neto, 2012) teve como foco a criação de um CLP com oito entradas e oito saídas digitais, utilizando um microcontrolador PIC 16F628A. O projeto incluiu circuitos de conversão de tensão de 12 V para 5 V destinados à alimentação do microcontrolador. Nas entradas, os pinos operam em nível lógico alto (5 V). Quando um sensor é acionado ou ocorre o fechamento do contato entre o aterramento e a entrada do pino, o nível lógico é reduzido para 0 V, permitindo ao *software* definir a execução da tarefa correspondente. O projeto possibilitou o desenvolvimento de aplicações em automação e contribuiu de forma significativa para o processo didático.

No trabalho apresentado por (Picinin; Weizenmann, 2019) foi desenvolvido um CLP de baixo custo utilizando um microcontrolador ATmega328P, em conformidade com a norma IEC 61131. O projeto incluiu o uso de optoacopladores nas entradas e relés nas saídas para interface com sinais de 24 V, além de reguladores de tensão para a alimentação do microcontrolador. A avaliação realizada com os alunos apresentou resultados positivos, evidenciando a eficácia da proposta.

Por fim, o trabalho apresentado por (Silva Filho *et al.*, 2012) aborda a construção de plataformas didáticas de baixo custo. O projeto propõe uma metodologia de ensino voltada à disciplina de Automação, estimulando a investigação e a experimentação, a realização de trabalhos práticos, a pesquisa bibliográfica, a elaboração de artigos científicos, a reutilização de componentes eletrônicos e a produção de plataformas didáticas no ambiente universitário. Essas plataformas de baixo custo são caracterizadas como abertas.

2.2 Prática no Ensino

Conforme destacado por (Andrade; Massabni, 2011), toda atividade realizada pelo aluno no ambiente escolar pode ser compreendida como uma forma de prática educativa, não sendo necessariamente restrita a atividades laboratoriais específicas. A articulação entre teoria e prática desempenha papel fundamental no processo de ensino-aprendizagem, uma vez que possibilita aos estudantes a aplicação dos conceitos teóricos em situações concretas. Dessa forma, as atividades práticas contribuem para o aumento do engajamento dos alunos, fortalecem a aprendizagem e favorecem a formação profissional, ao mesmo tempo em que promovem o desenvolvimento de habilidades técnicas e a consolidação do conhecimento teórico (Rosset; Santos; Leão, 2020).

De acordo com (Donoso-Garcia; Cortizo; Morais, 2008), as disciplinas em

laboratório desempenham um papel fundamental na formação profissional de estudantes de engenharia e cursos técnicos das áreas de eletricidade, oferecendo uma oportunidade valiosa para os alunos aplicarem os conhecimentos teóricos em contextos práticos e experimentais. Essas experiências práticas não apenas complementam a aprendizagem em sala de aula, mas também promovem o desenvolvimento de habilidades técnicas, raciocínio crítico e resolução de problemas.

2.3 Controlador Lógico Programável (CLP)

De acordo com (Petruzella, 2014), os CLPs são uma tecnologia que veio para substituir os circuitos de controle a relé, uma vez que estes equipamentos eram menos flexíveis, projetados para realizar funções bem definidas, e, quando o sistema precisava de modificação, a substituição dos relés era imprescindível em alguns casos, sendo necessária até a troca do painel de controle.

O CLP pode ser definido como um computador industrial dotado de diversas funcionalidades, capaz de receber e executar instruções de controle, tais como temporização, contagem, cálculos, comparações e processamento de sinais analógicos. Construído a partir de dispositivos eletrônicos e unidades de memória, o CLP permite a interação com sistemas externos por meio de entradas e saídas digitais e analógicas, sendo amplamente empregado em aplicações de automação industrial (Prudente, 2000).

As principais partes de um CLP podem ser observadas na Figura 2 e são descritas conforme (Prudente, 2000):

Figura 2 – Principais partes de um CLP.



Fonte: Prudente, 2000.

- a) A Unidade Central de Processamento (CPU, sigla do inglês *Central Processing Unit*) é responsável por realizar operações lógicas ao interpretar as entradas e produzir saídas correspondentes. Essas saídas podem ser armazenadas na memória para serem utilizadas em operações futuras, conforme especifica o programa inserido pelo usuário na memória do CLP.

- b) A fonte de alimentação fornece corrente contínua (CC) aos módulos conectados no CLP para alimentar os circuitos de processamento, memórias e interfaces de entradas e saídas. Em sistemas mais complexos, os dispositivos de campo geralmente são alimentados por uma fonte de corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), em vez de receberem alimentação diretamente. Nos sistemas de micro CLP, a mesma fonte de alimentação pode ser empregada para alimentar os dispositivos de campo.
- c) As unidades de memória são responsáveis pelo armazenamento do programa, contendo as instruções que o microprocessador do CLP executa para controlar as ações necessárias. Essas instruções são desenvolvidas pelo programador do CLP e são essenciais para a execução das operações de controle.
- d) As portas de Entrada e Saída (E/S) são pontos cruciais onde o processador do CLP interage com dispositivos externos, recebendo dados de entrada e enviando comandos para saída. Essas E/S são classificadas em dois tipos: fixas e modulares. E/S fixas são comumente integradas em CLPs de baixo custo, apresentando um número fixo de entradas e saídas e geralmente não são expansíveis. Em contraste, as E/S modulares são divididas em módulos que podem ser adicionados conforme necessário, oferecendo maior flexibilidade ao sistema. Elas permitem a expansão do número de entradas e saídas e até mesmo a escolha de modelos de diferentes fabricantes. As entradas captam sinais de sensores, botões e interruptores, fornecendo informações sobre o estado do processo. Enquanto isso, as saídas estabelecem conexões físicas entre o CLP e o processo controlado, ativando dispositivos como relés, contadores, válvulas, solenoides, motores, lâmpadas e outros componentes.
- e) O dispositivo de programação mais comum é o computador pessoal (PC), que é empregado para inserir o programa na memória do CLP. O programa é elaborado no PC e, posteriormente, transferido para o CLP. Uma das linguagens mais utilizadas é a lógica *ladder*, projetada especificamente para programar CLPs, o que facilita para os usuários que têm familiaridade com o controle lógico de relés.

2.3.1 Portas de Entrada e Saída

As portas (E/S) permitem a comunicação entre a CPU do CLP e os dispositivos externos. As portas de entrada recebem sinais de dispositivos como sensores e botões, enquanto as portas de saída enviam comandos para atuadores e válvulas.

2.3.2 Entradas e Saídas Digitais

As entradas digitais (DI, sigla do inglês *Digital Input*) são utilizadas para receber sinais de dispositivos como sensores de proximidade, botoeiras e chaves. Esses sinais são do tipo binário, representando estados como *ON/OFF* ou *HIGH/LOW*. As saídas digitais (DO, sigla do inglês *Digital Output*), por sua vez, controlam atuadores como relés e lâmpadas. A importância das portas digitais reside na sua capacidade de fornecer sinais binários, que são essenciais para a automação de processos industriais. As saídas digitais podem ser do tipo relé ou transistor. As saídas a relé podem conduzir correntes mais altas (até 8 A), enquanto as saídas a transistor, incluindo saídas com modulação por largura de pulso (PWM, sigla do inglês *Pulse Width Modulation*), são adequadas para correntes menores (0,5 - 1 A) (Medeiros *et al.*, 2014).

2.3.3 Entradas e Saídas Analógicas

As entradas analógicas (AI, sigla do inglês *Analog Input*) captam sinais variáveis de dispositivos como transmissores de pressão e temperatura. Esses sinais são geralmente de 0 a 10 V ou 4 a 20 mA e são convertidos para valores digitais para processamento. As saídas analógicas (AO, sigla do inglês *Analog Output*) controlam dispositivos como válvulas proporcionais e variadores de velocidade, ajustando continuamente a saída para controlar variáveis físicas com precisão. As portas analógicas são cruciais para processos que exigem controle preciso e contínuo de variáveis físicas, permitindo a execução de funções complexas de controle e automação (Medeiros *et al.*, 2014).

2.4 Programação de CLPs

A norma IEC 61131-3 padroniza cinco tipos principais de linguagens de programação para CLPs: Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC), Diagrama de Blocos Funcionais (FBD), Texto Estruturado (ST), Lista de Instruções (IL) e Diagrama Ladder (LD). Essas linguagens permitem que o programador escolha a abordagem mais adequada para diferentes aplicações de automação.

Conforme mostrado na Figura 3, as linguagens de programação de CLPs são classificadas em duas categorias principais: gráficas e textuais, cada uma com características específicas para diferentes tipos de aplicações.

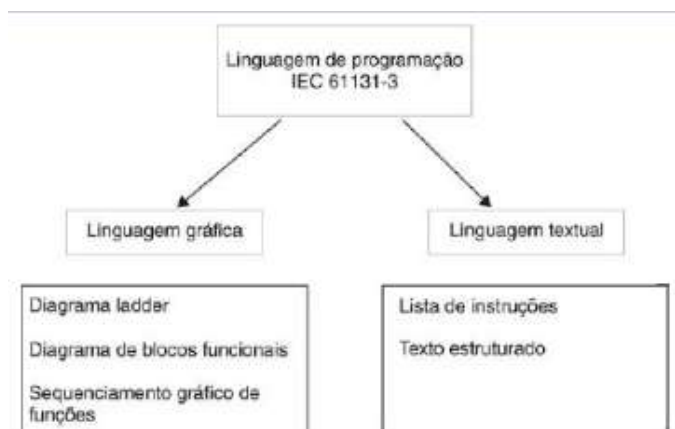


Figura 3 – Tipos fundamentais de linguagens.

Fonte: Prudente, 2000.

2.4.1 Linguagens de Programação Textual

As linguagens textuais, como *Instruction List* e *Structured Text*, envolvem o uso de código escrito para o desenvolvimento de funções de controle. A IL é similar à linguagem de máquina e oferece controle detalhado, porém exige maior conhecimento técnico. Já o ST é uma linguagem de alto nível, comparável a linguagens como Pascal e C++, sendo amplamente usada devido à sua sintaxe robusta.

2.4.2 Linguagens de Programação Gráfica

As linguagens gráficas, como o *Ladder Diagram*, *Function Block Diagram* e *Sequential Function Chart*, utilizam representações visuais para a lógica de controle. O LD é particularmente intuitivo para quem tem familiaridade com circuitos elétricos, enquanto o FBD e o SFC permitem representações visuais claras e organizadas de operações lógicas e sequências de controle.

2.5 Microcontrolador

Microcontroladores são dispositivos programáveis que funcionam como máquinas de estado (Hexsel, 2006). Esses dispositivos incorporam uma Unidade Central de Processamento (CPU, sigla do inglês *Central Processing Unit*), além de memória de acesso aleatório (RAM, sigla do inglês *Random Access Memory*) para armazenamento de dados e memória não volátil do tipo EEPROM, sigla do inglês *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*, para armazenamento do programa.

Os microcontroladores oferecem recursos de entrada e saída, comunicação, geração de interrupções por temporizadores e conversão analógico-digital, entre outras funcionalidades, as quais podem variar de acordo com o fabricante e a arquitetura.

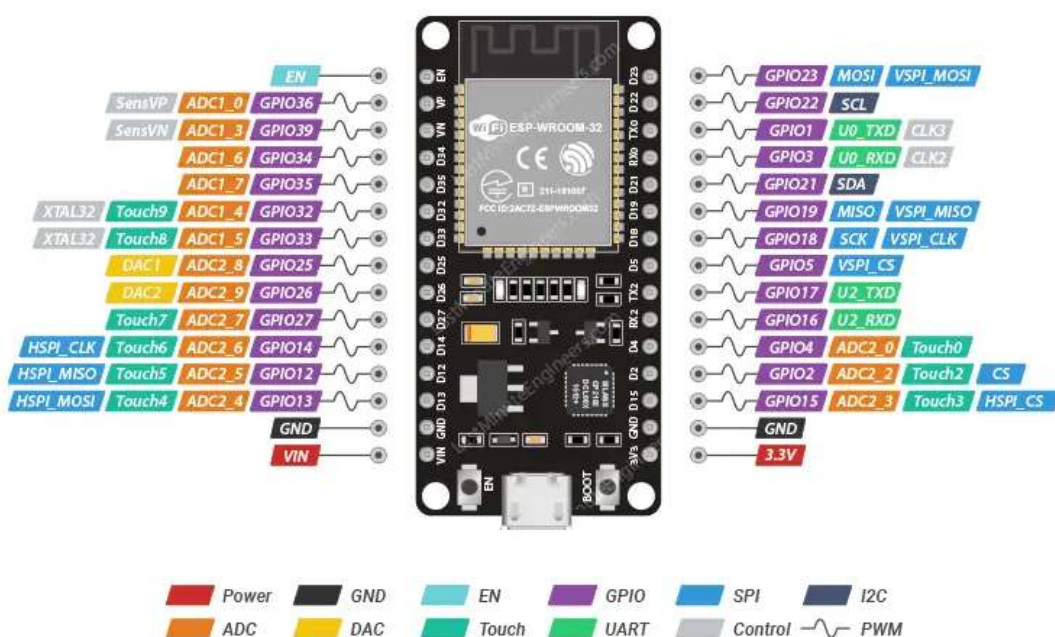
tura do dispositivo (Ordoñez; Penteado; Silva, 2005).

2.5.1 ESP32

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela Espressif Systems, projetado para operar com baixo consumo de energia, mantendo um alto nível de conectividade por meio de *Wi-Fi* e *Bluetooth*. Aliadas a seu bom desempenho e eficiência, estas características o tornam ideal para utilização em projetos que exigem soluções de baixo custo (SANTOS; Junior *et al.*, 2019).

A placa apresenta 30 pinos de entrada e saída de uso geral (GPIO, sigla do inglês *General Purpose Input/Output*), que proporcionam flexibilidade para a conexão e o controle de sensores, atuadores e outros dispositivos periféricos, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Pinos disponíveis no ESP32



Fonte: Last Minute Engineers, 2020.

De acordo com a ficha técnica fornecida pela Espressif Systems, o microcontrolador ESP32 possui uma variedade de pinos que podem ser utilizados para diversas funções:

- Pinos Analógicos: Os pinos GPIO32 a GPIO39 podem ser configurados para entrada analógica, permitindo a leitura de sinais analógicos de sensores.
- Pinos Digitais: A maioria dos pinos de GPIO0 a GPIO39 pode ser usada como entrada ou saída digital, permitindo o controle e a leitura de sinais digitais.
- Pinos de Conversão A/D: Permitem a conversão de sinais analógicos para digitais, fundamentais para a leitura de sensores analógicos.

- Pinos de Comunicação Serial: Incluem UART (RX, TX), usados para comunicação serial, facilitando a interface com outros dispositivos seriais.
- Pinos de Comunicação SPI: SCK, MOSI, MISO e CS são utilizados para comunicação via SPI, essencial em interfaces de alta velocidade com periféricos como displays e memórias.
- Pinos *Touch*: Alguns GPIOs são sensíveis ao toque, permitindo a implementação de interfaces de toque capacitivo.
- Pinos de Alimentação e Aterramento: GND para aterramento e pinos de alimentação que suportam até 12 V (VIN) e fornecem 3,3 V para sensores e outros componentes.

É importante notar que alguns pinos GPIO no ESP32 têm restrições específicas quanto à sua configuração. Os pinos GPIO34, GPIO35, GPIO36 (VP) e GPIO39 (VN) não podem ser usados como saídas digitais, pois são dedicados exclusivamente a funções de entrada digital ou analógica.

2.6 OpenPLC

O OpenPLC é uma plataforma de código aberto destinada à programação de Controladores Lógicos Programáveis, oferecendo uma alternativa acessível e flexível para o desenvolvimento de aplicações em automação industrial. Baseado na norma IEC 61131-3, o OpenPLC suporta as principais linguagens de programação padronizadas para CLPs e pode ser executado em uma ampla variedade de dispositivos, incluindo microcontroladores, sistemas embarcados e computadores pessoais, o que o torna adequado para aplicações acadêmicas, didáticas e experimentais.

As principais características do OpenPLC incluem:

- Compatibilidade multiplataforma: pode ser executado em microcontroladores, sistemas embarcados e computadores pessoais.
- Código aberto: permite personalizações, adaptações e contribuições da comunidade.
- Suporte à IEC 61131-3: possibilita a utilização das linguagens padronizadas para CLPs, como Diagrama Ladder (LD), Diagrama de Blocos Funcionais (FBD) e Texto Estruturado (ST).
- Interface web integrada: oferece uma interface de programação via navegador, facilitando o acesso e o controle remoto.

A seguir são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do OpenPLC, considerando sua aplicação em ambientes acadêmicos e didáticos.

- Acessibilidade: por se tratar de uma plataforma de código aberto, o OpenPLC é gratuito e acessível a qualquer usuário.
- Flexibilidade: suporta uma ampla variedade de hardwares, permitindo sua uti-

lização em diferentes contextos e aplicações.

- Comunidade ativa: conta com suporte da comunidade, além de fácil acesso a materiais de aprendizado e documentação.
- Suporte e documentação limitados: por ser uma solução de código aberto, o suporte oficial é mais restrito quando comparado a plataformas comerciais, dependendo fortemente da comunidade e de recursos disponíveis online.
- Recursos limitados: apesar de oferecer funcionalidades essenciais, o Open-PLC pode não apresentar a mesma variedade de recursos avançados encontrados em sistemas comerciais, como visualizações complexas de interfaces homem-máquina (HMI) ou suporte a uma ampla gama de protocolos industriais.

3 METODOLOGIA

A metodologia descreve os métodos e procedimentos utilizados na pesquisa, incluindo detalhes sobre o *design* do estudo, a coleta e análise de dados, além da justificativa das escolhas metodológicas.

A pesquisa realizada é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e objetivos exploratórios. Utiliza conhecimentos já consolidados para propor a solução: o desenvolvimento de um CLP didático de baixo custo. A escolha do modelo de desenvolvimento espiral se deu pela sua capacidade de permitir melhorias contínuas ao longo do processo, promovendo adaptações conforme os testes com *hardware* e *software*.

3.1 Requisitos do Sistema

Foram definidos os seguintes requisitos funcionais e não funcionais, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos funcionais e não funcionais do CLP didático

Requisitos Funcionais	Requisitos Não Funcionais
Compatibilidade com o microcontrolador ESP32	Apresentar baixo custo de implementação
Suporte à plataforma OpenPLC (IEC 61131-3)	Ser montado sobre trilho DIN com suporte 3D
Programação em linguagem ladder	Possuir isolamento elétrico com optoacopladores
Permitir controle de entradas/saídas digitais	Permitir alimentação via fonte externa 24 V
Executar lógica de controle básica (ex: LED, botão)	Utilizar componentes acessíveis no mercado nacional

Fonte: Autor (2025).

3.2 Materiais e Ferramentas Utilizadas

Para a construção do protótipo, foram considerados os seguintes materiais e ferramentas (listagem orientativa do processo, sem caráter de validação de desempenho):

- **Hardware:** ESP32 DevKit v1, resistores diversos, optoacopladores, amplificadores operacionais, fonte 24V, modelo GDR-2402, trilho DIN e suporte impresso em 3D;
- **Software:** OpenPLC Editor, *drivers* de comunicação CH340/CP2102;

- **Ferramentas:** *protoboard*, cabos *jumper*, estação de solda, multímetro, impressora 3D e fonte de alimentação de corrente contínua.

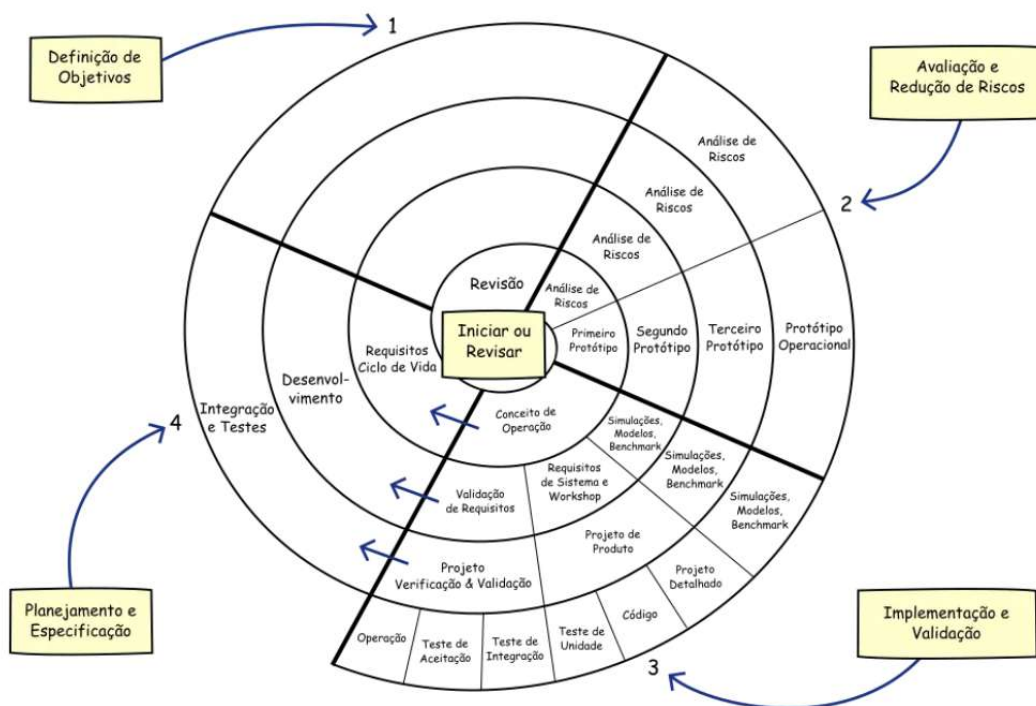
3.3 Definição da Pesquisa

A pesquisa realizada é de natureza aplicada, pois utiliza conhecimentos já validados para desenvolver um CLP didático. Os objetivos da pesquisa caracterizam-se como exploratórios, envolvendo verificações, experimentos e testes para validar a eficiência e eficácia do CLP. A abordagem adotada foi a quantitativa, permitindo a mensuração de variáveis e a análise dos resultados obtidos por meio do CLP (Gerhardt; Silveira, 2009).

De acordo com (Wazlawick, 2009), que propôs uma classificação de pesquisa para a área da computação, a pesquisa apresentada se destaca no estilo apresentação de algo diferente, por focar na elaboração de um CLP didático de baixo custo para o ambiente acadêmico de engenharia.

O procedimento adotado para a pesquisa seguiu a metodologia de desenvolvimento em espiral, que é um processo iterativo e incremental para o desenvolvimento de projetos. Esta abordagem, descrita por (Sommerville, 2011), abrange desde a concepção do problema e definição de requisitos até a avaliação e seleção de soluções, adaptando-se às necessidades do projeto. A Figura 5 ilustra o comportamento da metodologia espiral.

Figura 5 – Diagrama do processo espiral aplicado ao desenvolvimento do CLP didático.



Essa abordagem iterativa permite realizar ajustes e melhorias ao longo do desenvolvimento, garantindo que o CLP atenda aos requisitos funcionais e não funcionais estabelecidos inicialmente.

3.4 Especificações Nominais

Nesta etapa, foram definidos os parâmetros operacionais adotados no desenvolvimento do CLP didático, com o objetivo de orientar a escolha dos componentes e assegurar sua adequação ao ambiente educacional. As especificações nominais implementadas no projeto são apresentadas a seguir:

- Número total de entradas: 4 entradas, sendo 2 digitais e 2 analógicas;
- Número de saídas: 4 saídas digitais;
- Compatibilidade com a linguagem Diagrama Ladder (LD) por meio da plataforma OpenPLC;
- Montagem física compatível com trilho DIN, utilizando suporte impresso em 3D;
- Isolamento elétrico entre os sinais de controle e as cargas por meio de optoacopladores;
- Compatibilidade com alimentação de 24 V.

3.5 Materiais

A seguir, são apresentados os principais materiais empregados na construção do protótipo do CLP didático.

Os materiais utilizados incluem o microcontrolador ESP32-WROOM, uma placa de fenolite com dimensões de 25 cm × 25 cm, optoacopladores do modelo 4N25, um amplificador operacional LM358, reguladores de tensão AMS1117 (3,3 V / 1 A) e L7805 (5 V), bornes do tipo KRE de duas e três vias, além de um conector adaptador plug P4 fêmea com borne KRE de duas vias.

Também foram empregados resistores de diversos valores, tais como 100 Ω , 1 k Ω , 3 k Ω , 7,5 k Ω e 15 k Ω , bem como LEDs e botões para sinalização e acionamento. Para a alimentação do sistema, utilizou-se uma fonte de 24 V com conector P4. Complementarmente, foram utilizados *proto-board*, cabos *jumper*, trilho DIN e uma carcaça impressa em 3D para a montagem e organização do protótipo.

3.6 Estratégia de Prototipação

Adotou-se um processo iterativo de prototipação incremental, dividido em três ciclos de desenvolvimento, denominados P1, P2 e P3. Cada ciclo foi orientado

por uma questão central de projeto, visando reduzir riscos técnicos e validar progressivamente os requisitos definidos.

O primeiro ciclo (P1) teve como objetivo responder à questão Q1: verificar a viabilidade funcional do uso do microcontrolador ESP32 em conjunto com a plataforma OpenPLC, avaliando o mapeamento de entradas e saídas e o funcionamento básico das interfaces digitais. Esse ciclo buscou confirmar a compatibilidade entre *hardware* e *software*.

O segundo ciclo (P2) foi direcionado à questão Q2: garantir a confiabilidade elétrica do sistema, por meio do refinamento das interfaces de entrada e saída, do condicionamento de sinais e do isolamento elétrico entre circuitos de controle e carga. Nessa etapa, o foco esteve na segurança, estabilidade e adequação do protótipo ao uso em ambiente didático.

O terceiro ciclo (P3) teve como objetivo responder à questão Q3: consolidar o protótipo final sob a perspectiva didática e mecânica, integrando os subsistemas desenvolvidos anteriormente em uma estrutura física adequada, compatível com trilho DIN e carcaça impressa em 3D, visando à sua utilização prática em laboratório.

As revisões realizadas ao final de cada ciclo seguiram os princípios da metodologia em espiral, permitindo a avaliação contínua do atendimento aos requisitos e a incorporação de melhorias progressivas ao longo do desenvolvimento.

3.6.1 Bibliotecas Utilizadas

O desenvolvimento do CLP didático teve como base o OpenPLC para o microcontrolador ESP32. A lógica de controle foi implementada por meio da linguagem Diagrama Ladder, conforme a norma IEC 61131-3, utilizando o OpenPLC Editor, responsável pela geração automática do código em C/C++ e pelo mapeamento das entradas e saídas do microcontrolador.

3.7 Ferramentas Computacionais

O OpenPLC Editor foi utilizado para a modelagem, programação e geração de código das rotinas em LD, bem como para o mapeamento das E/S no ESP32. Para a etapa de captura esquemática e estudo preliminar de *layout* da placa de integração recorreu-se ao Proteus. As compilações e carregamentos foram realizados em ambiente de trabalho com desktop equipado com processador Intel Core i5 (6ª geração), adotando-se o mesmo sistema para depuração e verificação do fluxo de implantação no controlador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve a construção do CLP didático, abordando o processo de prototipagem e as interfaces de entradas e saídas, bem como apresenta os resultados dos testes realizados em bancada, organizados em validações por módulo e em um ensaio final em ambiente didático.

4.1 Análise de Custo do Protótipo

Um dos aspectos avaliados neste trabalho foi o custo aproximado dos componentes utilizados na construção do CLP didático. Os valores apresentados referem-se a estimativas obtidas a partir de preços praticados no mercado nacional durante o período de desenvolvimento do projeto, desconsiderando custos adicionais, como frete e taxas.

A análise de custo tem como objetivo demonstrar a viabilidade econômica da solução proposta para fins didáticos, não representando um levantamento comercial ou orçamentário detalhado.

Tabela 2 – Estimativa de custo dos principais componentes do CLP didático

Categoria	Item / Especificação	Valor aproximado (R\$)
Microcontrolador	ESP32-WROOM	32,88
Placa-base	Fenolite (25 cm × 25 cm)	39,95
Semicondutores	Optoacopladores 4N25	24,20
	Amplificador operacional LM358	3,75
Regulação de tensão	AMS1117 (3,3 V / 1 A)	1,50
	L7805 (5 V)	2,90
Conectores	Bornes KRE (2 e 3 vias)	10,00
	Adaptador Plug P4 fêmea para KRE	2,50
Componentes passivos	Resistores diversos	–
	LEDs de sinalização	2,40
Alimentação	Fonte 24 V com conector P4	36,09
Custo total estimado		156,17

Fonte: Autor (2025).

Considerando os valores estimados apresentados na Tabela 2, o custo total

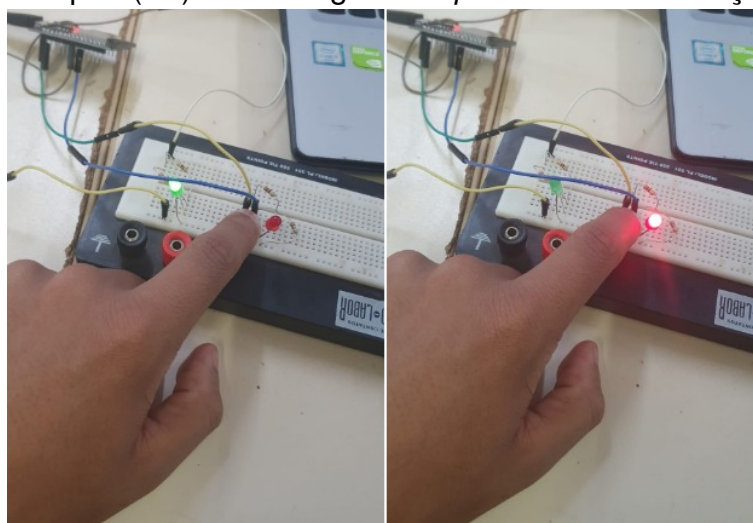
aproximado dos principais componentes do CLP didático foi de R\$ 156,17, desconsiderando custos de envio.

4.2 Evolução dos Protótipos

Com base na estratégia de prototipagem incremental, foram construídos e testados três protótipos ao longo do desenvolvimento do CLP didático. Cada protótipo concentrou-se em aspectos específicos do sistema, permitindo a evolução progressiva do projeto até a consolidação da versão final.

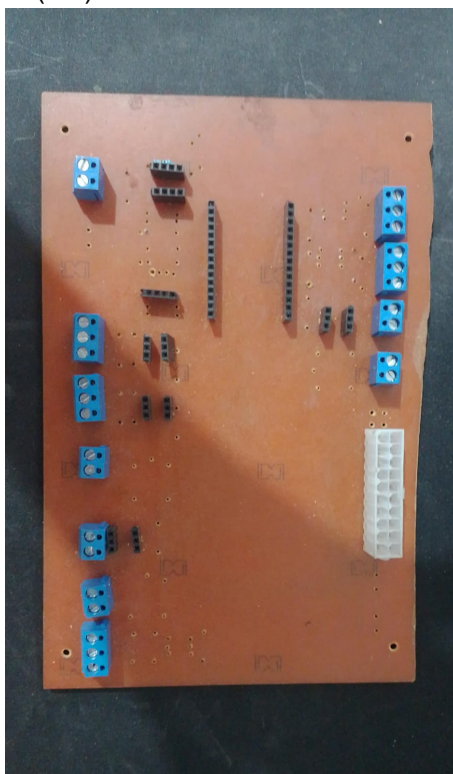
- Protótipo I (P1) — Prova de Conceito: teve como foco a definição da pinagem do ESP32, o mapeamento das entradas e saídas no OpenPLC e o funcionamento básico das interfaces digitais em *proto-board*. Nessa etapa, identificou-se a necessidade de aprimorar o isolamento elétrico e a filtragem dos sinais.
- Protótipo II (P2) — Engenharia de Interface: concentrou-se no refinamento do condicionamento de sinais, abrangendo níveis de 0 a 24 V e 220 V, na inclusão de optoacopladores e na adoção de um conector ATX para alimentação em múltiplas tensões (24 V, 5 V e 3,3 V). Também foi efetuada a reavaliação das correntes conforme especificações dos fabricantes, resultando em avanços na estabilidade e confiabilidade do sistema, além da inclusão de suporte para trilho DIN.
- Protótipo III (P3) — Consolidação Didática: envolveu a integração mecânica do sistema, com o uso de carcaça impressa em 3D revisada, a otimização do layout da placa, a reorganização dos bornes e a substituição do conector ATX por um conector adaptador do tipo Plug P4 fêmea, resultando em um conjunto final adequado para utilização em ambiente laboratorial.

Figura 6 – Protótipo I (P1) — montagem em *proto-board* e validação das GPIOs.



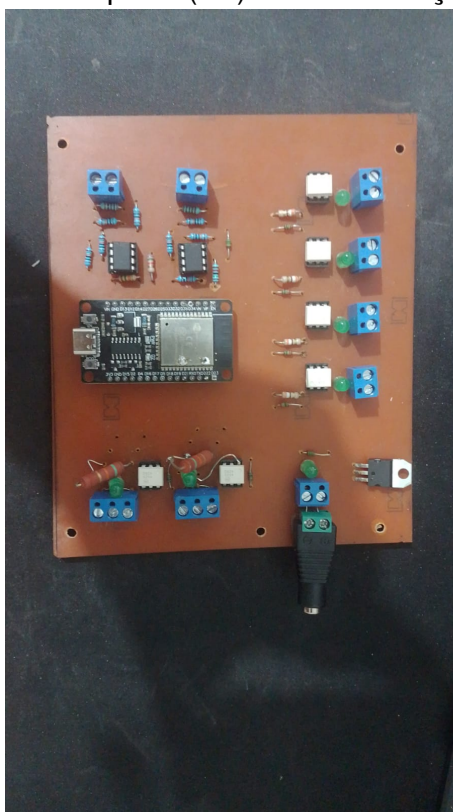
Fonte: Autor (2025).

Figura 7 – Protótipo II (P2) — condicionamento de sinais e conector ATX.



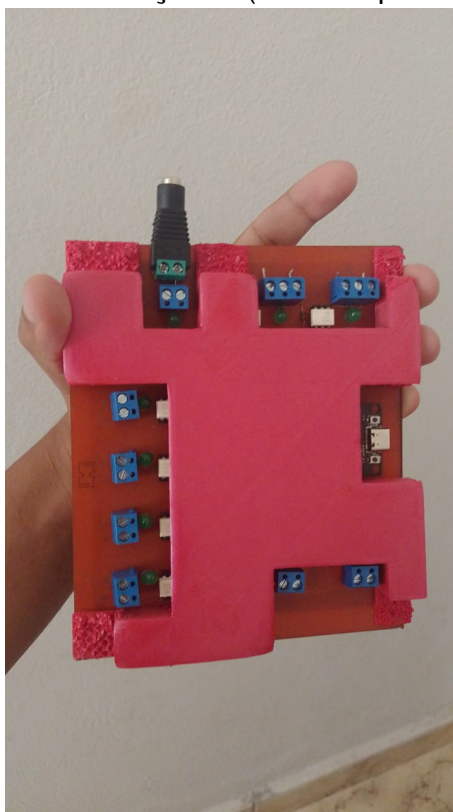
Fonte: Autor (2025).

Figura 8 – Protótipo III (P3) — consolidação didática.



Fonte: Autor (2025).

Figura 9 – Carcaça 3D (versão apresentada).



Fonte: Autor (2025).

Figura 10 – Fixação do conjunto final em trilho DIN.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos ciclos de prototipação desenvolvidos, destacando os principais objetivos e os resultados alcançados em cada etapa do projeto.

Tabela 3 – Ciclos de prototipação: objetivos e resultados

Protótipo	Objetivos principais	Resultados alcançados
P1	Validar pinagem e comunicação OpenPLC–ESP32	Funcionalidade básica comprovada; necessidade de isolamento e filtragem identificada.
P2	Implementar condicionamento 0–24 V e 220 V; adicionar optoacopladores e conector ATX	Isolamento óptico confiável; redução significativa de ruído; inclusão de suporte em trilho DIN e carcaça 3D.
P3	Otimizar layout, substituir conector ATX por Plug P4 fêmea e consolidar estrutura física (trilho DIN e carcaça 3D revisada)	Leituras estáveis; protótipo final consolidado e utilizável em laboratório didático.

Fonte: Autor (2025).

4.3 Interfaces de Entrada/Saída Implementadas

Esta seção descreve as interfaces de entrada e saída implementadas no CLP didático desenvolvido, abordando os tipos de sinais suportados, suas características elétricas e a forma como são integrados ao sistema de controle. O objetivo é apresentar como as interfaces de entradas e saídas foram projetadas para permitir a interação do controlador com sensores e atuadores, assegurando compatibilidade com aplicações didáticas em automação industrial.

4.3.1 Entradas Digitais 24 V e 220 V

Foi implementado um circuito capaz de realizar a leitura de sinais de 24 V (CC) e 220 V (CA) de forma alternada, utilizando um único optoacoplador (4N25). O isolamento galvânico é obtido pelo acoplamento óptico, reduzindo a possibilidade de propagação de ruídos e surtos elétricos para o microcontrolador.

No estágio de 24 V CC, utiliza-se o LED interno do 4N25 em série com o LED indicador (D6) e o resistor de limitação ($R_{23} = 3 \text{ k}\Omega$). O dimensionamento desse resistor visa garantir corrente suficiente para excitar o optoacoplador, sem exceder os limites recomendados pelo *datasheet*.

A corrente no ramo de entrada (aproximando os LEDs como quedas de tensão constantes) é dada por:

$$I_{LED} = \frac{V_{in} - V_{f,opto} - V_{f,ind}}{R} \quad (4.1)$$

onde $V_{f,opto}$ é a queda no LED interno do optoacoplador, e $V_{f,ind}$ é a queda no LED indicador. Adotando valores típicos $V_{f,opto} \approx 1,2 V$ e $V_{f,ind} \approx 2,0 V$, obtém-se:

$$I_{LED} \approx \frac{24 - (1,2 + 2,0)}{3000} \approx 6,9 \text{ mA.}$$

Esse valor de corrente é adequado para o acionamento do fototransistor do 4N25, mantendo operação segura e confiável do estágio de entrada.

Para sinais de 220 V (CA), utiliza-se o mesmo optoacoplador com uma rede resistiva de limitação ($R_{24} = 15 \text{ k}\Omega$), dimensionada para manter a corrente dentro de níveis seguros. Como se trata de um sinal alternado, considera-se o valor de pico da tensão:

$$V_{pico} = V_{rms} \sqrt{2} \approx 220 \sqrt{2} \approx 311 \text{ V.} \quad (4.2)$$

A corrente de pico aproximada no ramo de entrada é:

$$I_{pico} = \frac{V_{pico} - V_{f,opto} - V_{f,ind}}{R_{24}} \quad (4.3)$$

onde $V_{f,opto} \approx 1,2 V$ corresponde à queda de tensão no LED interno do optoacoplador 4N25, $V_{f,ind} \approx 2,0 V$ corresponde à queda de tensão no LED indicador, e $R_{24} = 15 \text{ k}\Omega$ é o resistor de limitação de corrente.

Substituindo os valores:

$$I_{pico} \approx \frac{311 - (1,2 + 2,0)}{15000} \approx 20,5 \text{ mA.}$$

Devido à presença dos LEDs no ramo de entrada, a condução ocorre apenas durante o semiciclo em que os dispositivos se encontram diretamente polarizados. Dessa forma, a corrente no circuito não é contínua, apresentando característica pulsante, com condução em apenas um semiciclo da tensão alternada aplicada.

Como aproximação, a corrente média pode ser estimada a partir da corrente de pico por:

$$I_{médio} = \frac{1}{\pi} I_{pico}. \quad (4.4)$$

Substituindo $I_{pico} \approx 20,5 \text{ mA}$, obtém-se:

$$I_{mdio} \approx \frac{20,5}{\pi} \approx 6,5 \text{ mA.}$$

Esse valor mantém o LED do optoacoplador adequadamente excitado, ao mesmo tempo em que fornece indicação visual do acionamento por meio do LED externo, sem exceder os limites de corrente recomendados pelo fabricante.

O sinal de saída do optoacoplador é aplicado ao ESP32 por meio de um resistor em série ($R_{35} = 10 \text{ k}\Omega$), que atua na limitação de corrente em transitórios e

contribui para a redução de interferências. O nível lógico, quando o optoacoplador se encontra desligado, é definido por um resistor de *pull-down* ($R_{26} = 100\text{ k}\Omega$) conectado ao GND.

A frequência de corte aproximada do filtro passa-baixas, formado pelo resistor R_{35} e pelo capacitor C_1 , é dada por:

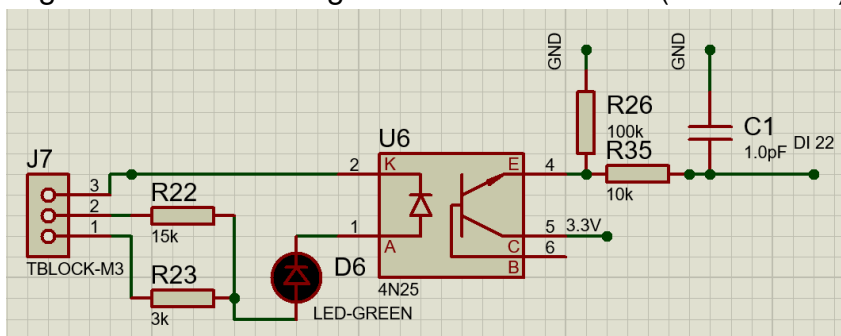
$$f_c \approx \frac{1}{2\pi R_{35} C_1}. \quad (4.5)$$

Considerando $R_{35} = 10\text{ k}\Omega$ e $C_1 = 1,0\text{ pF}$, obtém-se:

$$f_c \approx 15,9\text{ MHz}.$$

Esse filtro atua predominantemente na atenuação de ruídos eletromagnéticos de alta frequência (EMI), preservando o comportamento dos sinais digitais, que operam em frequências significativamente inferiores.

Figura 11 – Entrada digital isolada com 4N25 (24 V / 220 V).



Fonte: Autor (2025).

4.3.2 Saída Digital 24 V

Para o acionamento de cargas externas em 24 V, implementou-se uma saída isolada com o optoacoplador 4N25. O sinal proveniente do pino D12 do ESP32 excita o LED interno do optoacoplador através do resistor R_{43} , responsável pela limitação da corrente. Quando o LED interno é polarizado diretamente, o fototransistor do 4N25 entra em condução, permitindo a comutação do circuito da carga no lado de 24 V.

O valor do resistor R_{43} limita a corrente aplicada ao LED interno do optoacoplador, sendo calculada por:

$$I_{LED,out} = \frac{V_{GPIO} - V_{f,opto}}{R_{43}} \quad (4.6)$$

onde $V_{GPIO} \approx 3,3\text{ V}$ corresponde ao nível lógico de saída do ESP32, $V_{f,opto} \approx 1,2\text{ V}$ é

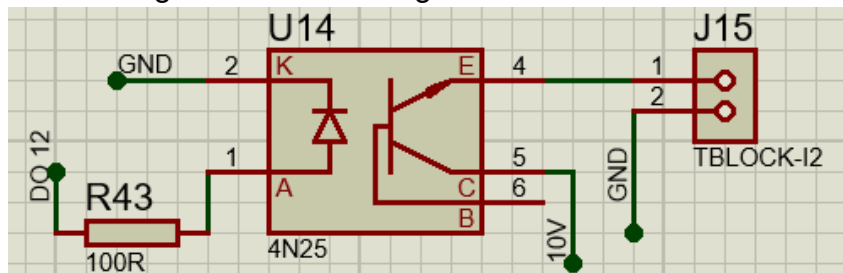
a queda de tensão típica do LED interno do 4N25, e $R_{43} = 400 \Omega$.

Substituindo os valores:

$$I_{LED,out} \approx \frac{3,3 - 1,2}{400} \approx 5,25 \text{ mA.}$$

Esse valor de corrente é suficiente para garantir a excitação adequada do optoacoplador, mantendo o isolamento galvânico do estágio de saída e respeitando os limites de corrente do pino de saída do microcontrolador.

Figura 12 – Saída digital isolada com 4N25.



Fonte: Autor (2025).

4.3.3 Entrada Analógica 4–20 mA

Para leitura de sinais industriais 4–20 mA, utilizou-se um resistor shunt $R_1 = 100 \Omega$ para converter corrente em tensão, seguido de um estágio com amplificador operacional LM358. O objetivo do dimensionamento foi mapear a faixa de entrada (4–20 mA) para uma faixa de tensão compatível com o conversor A/D do ESP32 (0–3,3 V), preservando margem de segurança.

A tensão sobre o *shunt* é dada por:

$$V_{shunt} = I_{in} \cdot R_1 \quad (4.7)$$

Com $R_1 = 100 \Omega$, obtém-se:

$$4 \text{ mA} \Rightarrow V_{shunt} = 0,4 \text{ V}, \quad 20 \text{ mA} \Rightarrow V_{shunt} = 2,0 \text{ V.}$$

O LM358 foi configurado como amplificador não inversor, com a rede de realimentação definida por R_6 e R_5 ($R_6 = 7,5 \text{ k}\Omega$ e $R_5 = 15 \text{ k}\Omega$). O ganho do amplificador não inversor é:

$$G = 1 + \frac{R_6}{R_5}. \quad (4.8)$$

Substituindo os valores:

$$G \approx 1 + \frac{7,5}{15} = 1,5.$$

A tensão de saída do estágio analógico pode ser expressa por:

$$V_{out} = V_{shunt} \cdot G = I_{in} \cdot R_1 \cdot G. \quad (4.9)$$

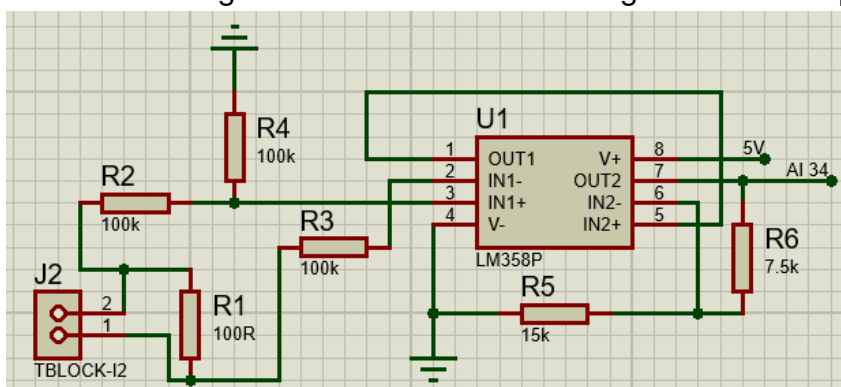
Dessa forma:

$$4 \text{ mA} \Rightarrow V_{out} \approx 0,4 \cdot 1,5 = 0,6 \text{ V}, \quad 20 \text{ mA} \Rightarrow V_{out} \approx 2,0 \cdot 1,5 = 3,0 \text{ V}.$$

A faixa resultante utiliza adequadamente a resolução do conversor A/D do ESP32 e mantém margem em relação ao limite máximo de 3,3 V.

Os resistores R2, R3 e R4 (100 k Ω) compõem uma rede de condicionamento de entrada, auxiliando na polarização, limitação de corrente e estabilização do ponto de operação do amplificador, reduzindo a suscetibilidade a ruídos e flutuações quando o circuito estiver sem sinal ou durante transientes do sistema de medição.

Figura 13 – Entrada analógica 4–20 mA com LM358 e ganho definido por R6 e R5.



Fonte: Autor (2025).

4.4 Validações Experimentais

Esta seção apresenta as validações experimentais realizadas em bancada com o CLP didático desenvolvido, com o objetivo de verificar o funcionamento das interfaces de entrada e saída, bem como a correta integração entre o *hardware*, o microcontrolador ESP32 e a plataforma OpenPLC. Os ensaios foram organizados por tipo de interface e finalizados com um teste em ambiente didático.

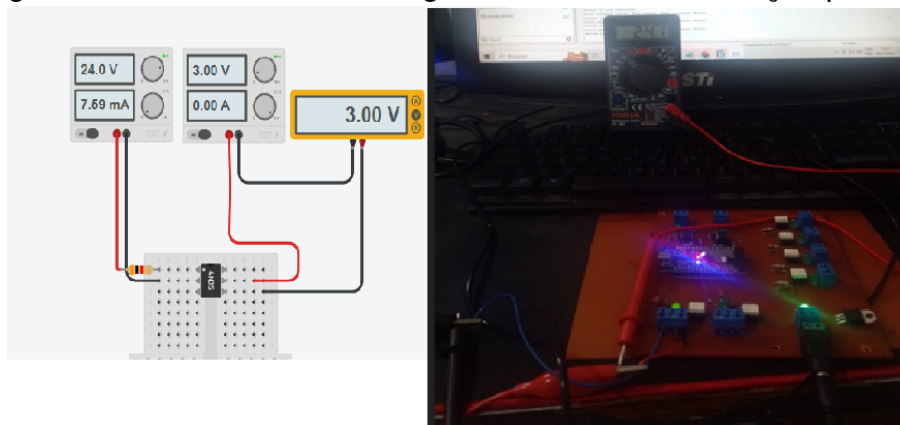
4.4.1 Entradas Digitais (0–24 V e 220 V)

As entradas digitais foram submetidas a testes com tensões de 24 V em corrente contínua e 220 V em corrente alternada, visando avaliar o correto acionamento dos circuitos de entrada e a leitura dos estados lógicos no OpenPLC. Durante os ensaios, observaram-se o acionamento adequado dos indicadores luminosos e a

leitura correspondente no ambiente de supervisão do OpenPLC.

A Figura 14 apresenta o teste da entrada digital alimentada em 24 V, evidenciando a indicação por LED no circuito de entrada.

Figura 14 – Teste da entrada digital em 24 V com indicação por LED.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 15 ilustra o ensaio realizado com tensão de 220 V, utilizando o optoacoplador 4N25, garantindo o isolamento elétrico entre o circuito de potência e o circuito lógico.

Figura 15 – Teste da entrada digital em 220 V com optoacoplador 4N25.

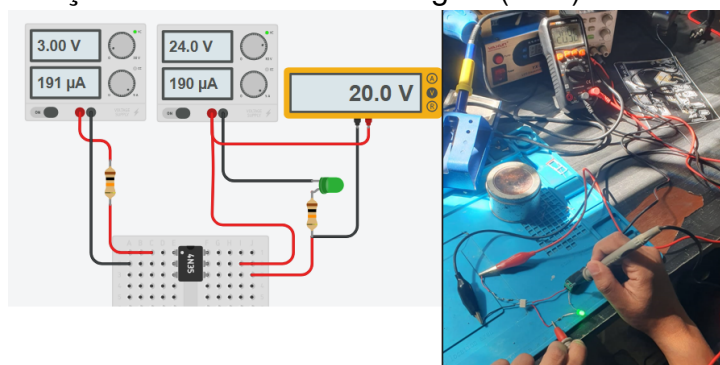


Fonte: Autor (2025).

4.4.2 Saída Digital 24 V

A validação da saída digital foi realizada por meio da medição da tensão durante o acionamento da carga em 24 V. A Figura 16 apresenta a medição realizada com multímetro, confirmando a presença da tensão esperada na saída quando comandada pelo OpenPLC.

Figura 16 – Medição de tensão na saída digital (24 V) durante o acionamento.



Fonte: Autor (2025).

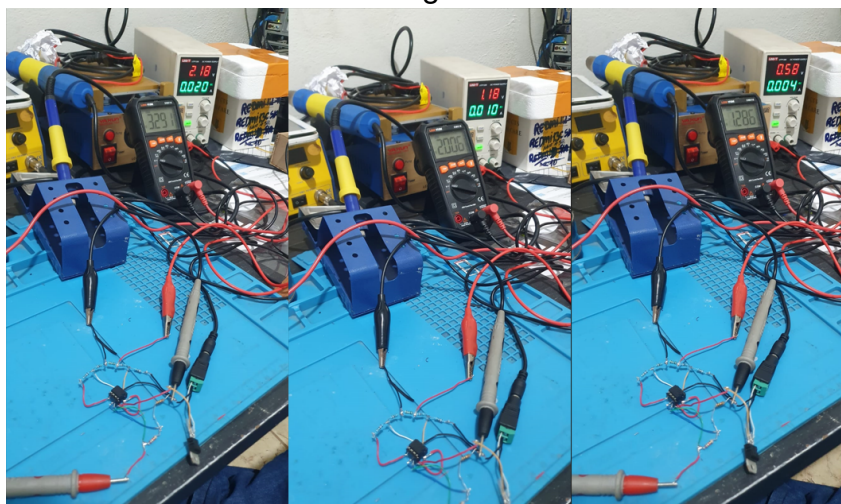
Durante os testes, observou-se comutação precisa da saída, sem acoplamento indevido para o circuito lógico, confirmando a eficiência do isolamento óptico adotado no projeto.

4.4.3 Entrada Analógica 4–20 mA

A entrada analógica foi validada utilizando-se uma fonte de corrente ajustável no padrão industrial de 4–20 mA. As leituras obtidas no ESP32 apresentaram comportamento linear e estável, variando aproximadamente de 0,4 V, ou seja, 4 mA, até 3,0 V, correspondente a 20 mA.

A Figura 17 apresenta o ensaio realizado na entrada analógica do CLP didático.

Figura 17 – Teste da entrada analógica com fonte de corrente 4–20 mA.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 4 apresenta a comparação entre os valores de tensão esperados e os valores medidos durante os testes, evidenciando a coerência entre o comportamento teórico e experimental do circuito.

Tabela 4 – Comparativo entre valores esperados e medidos na entrada analógica

Corrente (mA)	Tensão Esperada (V)	Tensão Medida (V)
4	0,40	1,286
10	1,20	2,006
20	3,00	3,291

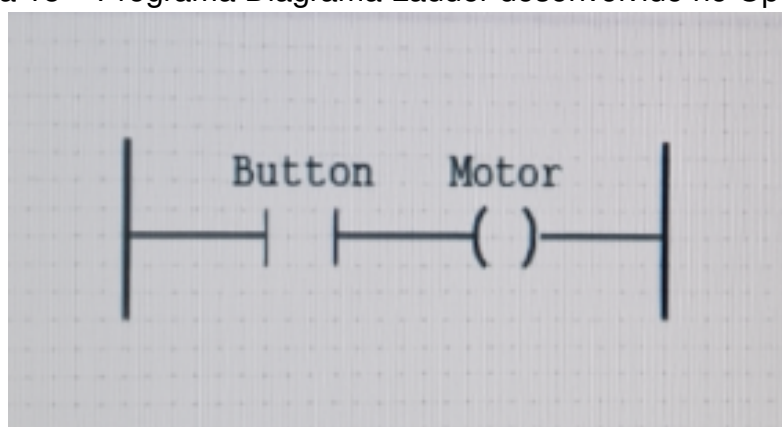
Fonte: Autor (2025).

4.4.4 Ensaio Final em Ambiente Didático

Para o ensaio final, foi desenvolvida uma lógica de controle utilizando a linguagem Diagrama Ladder (LD) no OpenPLC. A entrada digital foi acionada pelo endereço %IX0.3 por meio de um botão alimentado em 220 V, enquanto a saída correspondente, no endereço %QX0.3, foi utilizada para o acionamento de um relé de 24 V.

A Figura 18 apresenta o programa Ladder desenvolvido para o ensaio final.

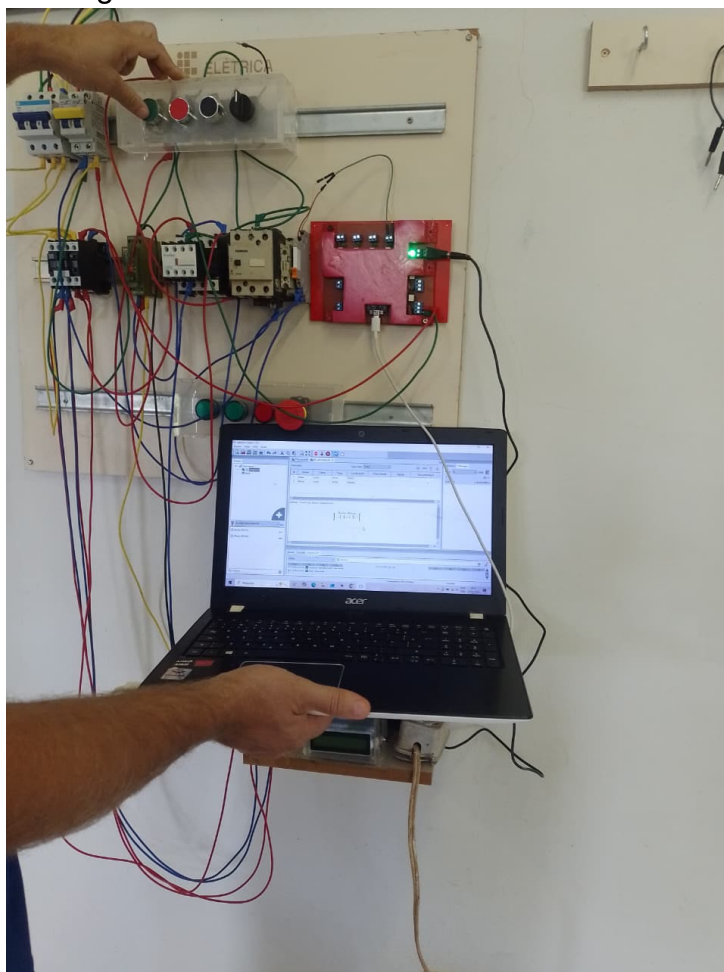
Figura 18 – Programa Diagrama Ladder desenvolvido no OpenPLC.



Fonte: Autor (2025).

Em seguida, o CLP didático foi integrado a uma bancada de automação para o acionamento de um motor elétrico em lógica de partida direta. A montagem experimental é apresentada na Figura 19.

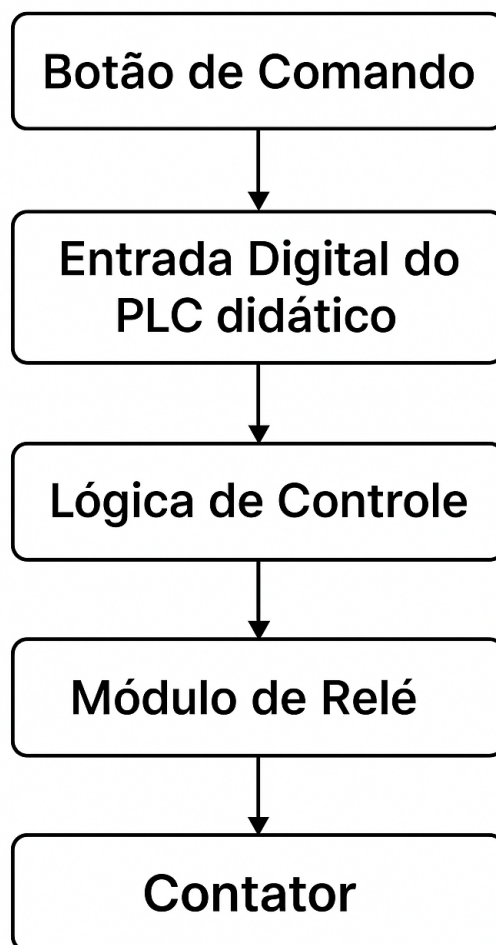
Figura 19 – Montagem em bancada: CLP didático acionando motor elétrico.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 20 apresenta o diagrama de blocos funcional do sistema, ilustrando o fluxo do sinal desde o acionamento do botão de comando até o acionamento do contator, passando pelo ESP32 e pelo módulo de relé.

Figura 20 – Diagrama de blocos funcional do sistema.



Fonte: Autor (2025).

Durante o ensaio final, observou-se o acionamento correto do motor conforme a lógica de comando implementada, sem atrasos perceptíveis entre a entrada e a saída, validando a integração entre o *hardware*, o OpenPLC e o microcontrolador ESP32.

4.5 Comparação entre o CLP didático desenvolvido e CLPs comerciais equivalentes (dados de 2025)

Com o objetivo de contextualizar o desempenho e as funcionalidades do CLP didático desenvolvido, a Tabela 5 apresenta uma comparação com dois controladores *Siemens LOGO! 8 (12/24RCE)* e o *Eaton easyE4-UC-12RC1*. A análise

considera características técnicas, custo e recursos de comunicação.

Tabela 5 – Comparação entre o CLP didático desenvolvido e CLPs comerciais equivalentes (dados de 2025).

Característica	CLP Didático (ESP32 + OpenPLC)	Siemens LOGO! 8 (12/24RCE)	Eaton easyE4-UC-12RC1
Preço Médio (R\$)	≈ 156,17	1.275,90	1.078,97
Fonte / Link	-	https://l1nq.com/8Ux3t	https://l1nq.com/8aekj
Tensão de Operação	24 V CC / 220 V CA (entradas), 24 V CC (saídas)	12/24 V CC (entradas e saídas)	12/24 V CC ou 24 V CA (entradas e saídas)
Wi-Fi Integrado	Sim (nativo)	Não	Não
Ethernet	Não	Sim	Sim
Software de Programação	Gratuito (<i>OpenPLC Editor</i>)	Pago (LOGO! Soft ≈ R\$ 400)	Pago (EasySoft ≈ R\$ 450)
Padrão IEC 61131-3	Sim	Sim	Sim
Certificação Industrial	Não	Sim (IEC 61131-2)	Sim (IEC 61131-2)
Entradas Digitais	4	8	8
Saídas Digitais	4 (transistor)	4 (relé/transistor)	4 (relé)
Entradas Analógicas	2 (4–20 mA)	2 (0–10 V)	4 (0–10 V)
Display Integrado	Não	Sim	Sim
Protocolos de Comunicação	Wi-Fi / Modbus TCP	Ethernet / Modbus TCP	Modbus TCP / Ethernet
Memória do Programa	4 MB (ESP32)	400 blocos lógicos	512 kB aprox. (EEPROM)

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 – Comparação entre o CLP didático desenvolvido e CLPs didáticos descritos na literatura

Característica	CLP Didático (ESP32 + OpenPLC)	(Picinin; Weizenmann, 2019)	(Neto, 2012)
Microcontrolador	ESP32	ATmega328P	PIC 16F628A
Padrão IEC 61131-3	Sim	Sim	Não
Linguagem Ladder	Sim (nativo)	Sim (via tradutor)	Não
Entradas Digitais	(24 V / 220 V)	24 V	5 V
Saídas Digitais	Transistor	Relé	Relé
Entradas Analógicas	(4–20 mA)	Não possui	Não possui
Isolamento Elétrico	Sim	Sim	Não
Comunicação	Wi-Fi / USB / Modbus TCP	Serial	Não possui

Fonte: Autor (2025).

4.5.1 Vantagens do CLP didático desenvolvido

A análise comparativa apresentada nas Tabelas 5 e 6 permite evidenciar pontos do CLP didático desenvolvido, quando considerado o contexto de uso em ambientes educacionais.

Uma das principais vantagens do sistema proposto é a interoperabilidade das entradas digitais, capazes de operar tanto com sinais de 24 V em corrente contínua quanto com sinais de 220 V em corrente alternada. Essa característica permite que o mesmo equipamento seja utilizado em diferentes bancadas didáticas, abrangendo aplicações de automação industrial de baixa tensão e comandos elétricos tra-

dicionais alimentados diretamente pela rede elétrica, sem a necessidade de módulos adicionais ou adaptações externas.

Outro diferencial é a comunicação sem fio nativa, proporcionada pelo microcontrolador ESP32, que incorpora conectividade *Wi-Fi*. Essa funcionalidade viabiliza a comunicação via rede local, incluindo o uso de protocolos como Modbus TCP. Tal recurso amplia as possibilidades de experimentação em laboratório, permitindo atividades de supervisão, monitoramento remoto e introdução a conceitos de Indústria 4.0.

Adicionalmente, o CLP didático permite comunicação e programação por meio de cabo USB genérico, amplamente disponível e de baixo custo. Essa abordagem elimina a dependência de cabos proprietários ou interfaces específicas, comuns em CLPs comerciais, facilitando a manutenção, a replicação do projeto e o acesso dos alunos ao sistema de desenvolvimento.

Em conjunto, essas características reforçam o caráter didático, flexível e econômico do CLP desenvolvido, posicionando-o como uma alternativa viável para instituições de ensino que necessitam de soluções acessíveis, versáteis e alinhadas às práticas atuais da automação industrial.

4.6 Discussão Geral

Os ensaios realizados confirmaram a viabilidade técnica e funcional do CLP didático proposto, demonstrando o atendimento aos requisitos definidos. A combinação entre o microcontrolador ESP32 e o ambiente de programação OpenPLC mostrou-se uma alternativa de baixo custo, flexível e de fácil reprogramação para fins educacionais, conforme evidenciado pela análise de custo apresentada anteriormente. A integração dos circuitos de entrada e saída com isolamento óptico garantiu segurança elétrica e estabilidade operacional. A montagem em trilho DIN e a utilização de carcaça impressa em 3D contribuíram para a robustez e portabilidade do sistema, características essenciais para o uso em ambientes laboratoriais. A comparação com CLPs comerciais evidenciou que, embora o protótipo não possua certificação industrial, ele oferece funcionalidades equivalentes em termos de comunicação, linguagens compatíveis e estrutura de controle, com a vantagem do uso de *software* gratuito e de código aberto. Essa característica, aliada ao baixo custo de implementação, reforça o potencial de disseminação do projeto em instituições de ensino com recursos limitados. Dessa forma, o CLP desenvolvido se apresenta como uma plataforma acessível e eficiente para o ensino de automação, permitindo aos alunos compreenderem, de forma prática, os princípios de controle lógico programável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do CLP didático baseado em ESP32, OpenPLC e circuitos de baixo custo apresentou-se como uma proposta para fins educacionais. A estrutura foi concebida visando a um custo reduzido e fácil replicação, utilizando componentes disponíveis no mercado, como optoacopladores, amplificadores operacionais e conectores-padrão.

Durante o período de testes, foi possível validar o funcionamento das entradas e saídas digitais, responsáveis por receber sinais e acionar cargas — como o motor elétrico — com isolamento elétrico garantido pelo uso de optoacopladores 4N25. A lógica de controle implementada no OpenPLC demonstrou integração eficiente com o microcontrolador ESP32 e com os circuitos periféricos de entrada e saída.

Nos testes da entrada analógica, realizados com fonte de corrente ajustável, as leituras apresentaram comportamento linear, embora com pequenas variações em relação aos valores teóricos esperados. Apesar dessa limitação, o circuito mostrou-se funcional e adequado para aplicações didáticas que não exigem alta precisão. Todos os circuitos foram projetados, documentados e encontram-se operacionais para uso em laboratório.

A montagem em trilho DIN, o uso de suporte impresso em 3D e a escolha de materiais de baixo custo reforçam o caráter didático do protótipo, tornando-o apropriado para utilização em disciplinas práticas de cursos técnicos e superiores nas áreas de eletrônica e automação industrial.

Dessa forma, mesmo com as limitações observadas, o projeto cumpriu seu propósito principal: oferecer uma plataforma acessível, funcional e educativa para simular o comportamento de um CLP, permitindo que o estudante tenha contato direto com os conceitos fundamentais do controle lógico programável.

5.1 Trabalhos Futuros

Para o aprimoramento da solução desenvolvida, são sugeridas as seguintes possibilidades de evolução e expansão do sistema:

- Miniaturização do *hardware* e reorganização dos componentes internos, visando a uma maior compactação do conjunto, melhor aproveitamento do espaço na carenagem e facilitação do processo de montagem;
- Aperfeiçoamento da carenagem do equipamento, com foco em melhor vedação contra poeira e umidade, tornando o sistema mais robusto para utilização em ambientes industriais e laboratoriais;
- Inclusão de proteções internas adicionais, como dispositivos de proteção contra surtos de tensão, sobrecorrente e interferências eletromagnéticas, bem

- como o aprimoramento dos filtros de ruído nas entradas e saídas;
- Melhoria da interface com o usuário por meio da integração de um *display* OLED de aproximadamente 1 polegada, permitindo a visualização de estados do sistema, diagnósticos básicos e informações operacionais em tempo real;
 - Implementação de um módulo de saídas digitais a relé, possibilitando o acionamento direto de cargas de maior potência e ampliando o leque de aplicações didáticas do CLP;
 - Inserção de uma fonte interna de alimentação para conversão de 24 Vdc para 5 Vdc, reduzindo a dependência de módulos externos e aumentando a integração e confiabilidade do sistema;
 - Melhoria do acesso à fiação das entradas e saídas, por meio da reorganização dos bornes e conectores, facilitando a conexão de sensores e atuadores e tornando o uso em bancada mais prático e intuitivo;
 - Integração do CLP didático com sistemas supervisórios (SCADA), permitindo a visualização, monitoramento e controle do processo em tempo real, além de ampliar o uso do equipamento em atividades de ensino relacionadas à automação industrial e Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, W. S. de; RALL, R. Sistema fresador CNC com automação via CLP Arduino. *In: X JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica*. 2021. Acesso em: 20 de jul. 2024. Disponível em: <http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/XJTC/XJTC/paper/view/2478>.
- ANDRADE, M. L. F. d.; MASSABNI, V. G. O desenvolvimento de atividades práticas na escola: um desafio para os professores de ciências. **Ciência & educação**, Graduação em Educação para a Ciência, v. 17, n. 04, p. 835–854, 2011. Acesso em: 03 de mar. 2024. Disponível em: <http://educa.fcc.org.br/pdf/ciedu/v17n04/v17n04a05.pdf>.
- BELLO, E. D. O ensino da eletricidade, desenvolvido através de experiências e elaboração de experimentos construídos com material de baixo custo. **O Professor PDE e os Desafios da Escola Pública Paranaense**, v. 1, 2010. Acesso em: 17 de mar. 2024. Disponível em: <https://acervodigital.educacao.pr.gov.br/pages/download.php?direct=1&noattach=true&ref=34369&ext=pdf&k=>.
- DONOSO-GARCIA, P.; CORTIZO, P.; MORAIS, L. Ensino orientado ao projeto: uma experiência para o ensino de eletrônica nas disciplinas de laboratório de eletrônica e eletrônica de potência. **Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 2, p. 109–116, 2008. Acesso em: 25 de abr. 2024. Disponível em: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/760/688>.
- FENERICK, J. A.; VOLANTE, C. R. A evolução das indústrias, os benefícios da automação e as perspectivas do mercado da robótica no Brasil e no mundo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 734–745, 2020. Acesso em: 19 mar. 2024. DOI: 10.31510/infa.v17i1.805. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/805>.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009. Acesso em: 20 de ago. 2024. Disponível em: <https://meiradarocha.jor.br/news/tcc/files/2017/12/Gerhardt-e-Silveira.-M%C3%A9todos-de-Pesquisa-EAD-UFRGS.pdf>.
- HEXSEL, R. Sistemas Digitais e Microprocessadores. **Editora UFPR**, 2006. Acesso em: 07 de mai. 2024. Disponível em: https://www.academia.edu/12345678/Sistemas_Digitais_e_Microprocessadores.
- JÚNIOR, P. J. R.; LOPES, A. N. D.; DÂMASO, R. d. S. Substituição de controlador industrial por controlador de baixo custo em maquete didática de linha de montagem automotiva. *In: 1. CONGRESSO Brasileiro de Automática-CBA*. 2019. v. 1. Acesso

em: 20 de jul. 2024. Disponível em:
https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/147.

LAST MINUTE ENGINEERS. **ESP32 Pinout Reference**. 2020. Acesso em: 19 de ago. 2024. Disponível em: <https://lastminuteengineers.com/esp32-pinout-reference/>.

MARINHO, E. C. P. **Aprendizagem significativa no ensino de eletricidade, abordando como alicerce a educação por projetos**. 2018. p. 16–37. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Acesso em: 17 de mar. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32829>.

MEDEIROS, E. L. *et al.* Projeto de Domótica utilizando CLP. **Universidade Federal de Campina Grande**, 2014. Acesso em: 18 de jul. 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12345678901234>.

NETO, A. Z. Desenvolvimento de um controlador lógico programável (CLP) experimental utilizando-se micro controlador PIC 16F628A. **Revista do Centro Universitário Católica Salesiano Auxilium – Araçatuba (São Paulo)**, v. 5, n. 5, p. 92–112, 2012. Acesso em: 19 de mar. 2024. Disponível em: https://unisalesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2018/05/universitas_5_edicao.pdf.

ORDOÑEZ, E. D. M.; PENTEADO, C. G.; SILVA, A. C. R. da. **Microcontroladores e FPGAs: aplicações em automação**. Novatec Editora, 2005. Acesso em: 07 de mai. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/23456789_Microcontroladores_e_FPGAs_Aplicacoes_em_automacao.

PETRUZELLA, F. D. **Controladores lógicos programáveis**. AMGH Editora, 2014. Acesso em: 03 de mai. 2024. Disponível em: <https://idoc.pub/download/controladores-logicos-programaveis-4-edicao-frank-d-petruzella-wl12qwd3114j>.

PICININ, A.; WEIZENMANN, G. d. S. Desenvolvimento de um CLP de baixo custo baseado em microcontrolador. **Revista Engeca**, 2019. Acesso em: 20 de jul. 2024. Disponível em:
<http://engeca.chapeco.ifsc.edu.br/wp-content/uploads/2019/02/TCC-Alan-Picinin.pdf>.

PRUDENTE, F. **Automação Industrial PLC: Teoria e Aplicações**. Grupo Gen-LTC, 2000. Acesso em: 03 de mai. 2024. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/automacao-industrial-plc-teoria-e-aplicacoes-2a-ed-francesco-prudente-pdf-free.html>.

ROMANO, M. **O que é Gerenciamento de Alarmes?** 2024. <https://www.logiquesistemas.com.br/blog/gerenciamento-de-alarmes/>. Acesso em: 08 de abr. 2024.

ROSSET, M.; SANTOS, M. dos; LEÃO, G. M. C. Aula prática: um estímulo para o desenvolvimento da interatividade intelectual, física e social dos estudantes. **EJA em Debate**, 2020. Acesso em: 25 de abr. 2024. Disponível em: <https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/EJA/article/view/3012>.

SANTOS, J. W.; JUNIOR, L. *et al.* Sistema de automatização residencial de baixo custo controlado pelo microcontrolador esp32 e monitorado via smartphone. **Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, 2019. Acesso em: 19 de ago. 2024. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>.

SILVA FILHO, A. M. da *et al.* Desenvolvimento de kits didáticos para o aprendizado da automação. *In: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. 2012. Acesso em: 20 de jul. 2024. Disponível em: <https://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/7/artigos/104302.pdf>.

SOMMERVILLE, I. **Engenharia de Software**. Tradução: Ivan Bosnic e Kalinka G. de O. Gonçalves. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. Título original: *Software Engineering*. Tradução autorizada a partir da edição original em inglês. Acesso em: 20 de ago. 2024. ISBN 978-85-7936-108-1. Disponível em: <https://www.facom.ufu.br/~william/Disciplinas%202018-2/BSI-GSI030-EngenhariaSoftware/Livro/engenhariaSoftwareSommerville.pdf>.

TECNIAR. **O que é CLP?** 2024. Acesso em: 03 de ago. 2024. Disponível em: <https://www.tecniar.com.br/noticias/o-que-e-o-clp/>.

TÓFOLI, M. F.; HIGA, R. A. Estudo comparativo entre CLP e microcontrolador em um elevador de baixa complexidade para carga. **Revista Eletrônica e-Fatec**, v. 4, n. 1, p. 10–10, 2014. Acesso em: 20 de jul. 2024. Disponível em: <https://pesquisafatec.com.br/ojs/index.php/efatec/article/view/67>.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação**. Elsevier Rio de Janeiro, 2009. v. 2. Acesso em: 20 de ago. 2024. Disponível em: https://tsxvpsbr.dyndns.org/arquivos/UFFS/Metodologia%20De%20Pesquisa%20CienciaDaComputacao%20_%20TCC1.pdf.