



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BIANCA EVELYN MENEZES FLORENCIO

**Desenvolvimento de um Protótipo de Comando Elétrico para Ponte Rolante
Integrado a um Sistema de Controle Remoto via ESP8266**

TUCURUÍ

2026

BIANCA EVELYN MENEZES FLORENCIO

**Desenvolvimento de um Protótipo de Comando Elétrico para Ponte Rolante
Integrado a um Sistema de Controle Remoto via ESP8266**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Dr. RAFAEL SUZUKI BAYMA.

TUCURUÍ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F632d Florencio, BIANCA.
 Desenvolvimento de um Protótipo de Comando Elétrico para
 Ponte Rolante Integrado a um Sistema de Controle Remoto via
 ESP8266 / BIANCA Florencio. — 2026.
 73 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
 Coorientador(a): Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
 Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
 Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
 Elétrica, Tucuruí, 2026.

 1. Ponte Rolante. 2. Comandos elétricos. 3.
 Intertravamento elétrico. 4. Controle remoto. 5. Automação
 industrial. I. Título.

CDD 621.381537

BIANCA EVELYN MENEZES FLORENCIO

**Desenvolvimento de um Protótipo de Comando Elétrico para Ponte Rolante
Integrado a um Sistema de Controle Remoto via ESP8266**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 16 de Julho de 2026.

Banca Examinadora:

Dr. RAFAEL SUZUKI BAYMA
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Coorientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Eng. Cleber Pereira Correa
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Título	Desenvolvimento de um Protótipo de Comando Elétrico para Ponte Rolante Integrado a um Sistema de Controle Remoto via ESP8266
Discente	BIANCA EVELYN MENEZES FLORENCIO
Matrícula	202233940015

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	André Felipe Souza da Cruz (CAMTUC/UFGA)	Examinador interno
2	Cléber Pereira Corrêa (CAMTUC/UFGA)	Examinador interno
3	Rafael Suzuki Bayma (CAMTUC/UFGA)	Orientador

Data da Defesa: 16/07/2026	Hora Início: 14:10	Hora Término: 14:41
----------------------------	--------------------	---------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,0	10,0	10
Linguagem (gramática e semântica)	9,5	9,0	9,5
Conteúdo técnico	9,5	9,5	9,5
Média	9,3	9,5	9,7

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	9,5	10,0	9,0
Administração do tempo	10,0	10,0	10,0
Expressão oral	9,0	9,5	9,0
Domínio do tema	9,5	9,5	9,5
Média	9,5	9,8	9,4

Média por examinador	9,4	9,6	9,5
Média Final	9,5		
Conceito Final	EXC		

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ
Data: 17/07/2026 08:36:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Felipe Souza da Cruz
Membro

Documento assinado digitalmente
gov.br CLEBER PEREIRA CORREA
Data: 17/07/2026 10:47:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cléber Pereira Corrêa
Membro

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL SUZUKI BAYMA
Data: 17/07/2026 08:02:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Suzuki Bayma
Orientador

Dedico este trabalho à minha família e amigos
que fiz ao longo da graduação, por todo o
apoio, e ao meu amor Vitor Jorge.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Vitor, pelo apoio, incentivo, compreensão e companheirismo ao longo desta trajetória, contribuindo de forma significativa para que esta etapa fosse concluída.

Agradeço a Deus pela oportunidade, pela força e pela sabedoria que me permitiram enfrentar os desafios encontrados durante a graduação e o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha família, pelo amor, apoio e confiança, que foram fundamentais para a concretização desta etapa. Sou igualmente grata a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos amigos que conquistei durante a graduação, agradeço pelos momentos compartilhados, pelas experiências vividas e pelo apoio mútuo ao longo dessa jornada. Em especial, ao Hartur, à Jessica, ao Igor, ao BH e ao Carlos, pela amizade, companheirismo e incentivo constantes.

Agradeço ao Prof. Telson Galdino pela iniciativa do projeto, pela confiança em meu trabalho, pela oportunidade de desenvolvê-lo, por disponibilizar todos os materiais necessários e pela paciência em compartilhar seus conhecimentos durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Susuki Bayma, pela orientação, dedicação, disponibilidade e valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho, bem como pelos ensinamentos transmitidos ao longo da minha formação acadêmica.

Ao coorientador André, expresso minha gratidão pelo acompanhamento, pelas orientações, sugestões e contribuições técnicas que foram importantes para o desenvolvimento deste projeto.

Ao Cleber, agradeço pela disponibilidade, pelo apoio constante e pelas contribuições oferecidas durante todas as etapas deste trabalho, auxiliando tanto no desenvolvimento do projeto quanto na superação dos desafios encontrados ao longo de sua execução.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o projeto e a implementação de uma bancada experimental de comando elétrico aplicada à lógica operacional de uma ponte rolante, integrada a uma interface complementar de controle remoto via rede Wi-Fi. O objetivo do trabalho foi desenvolver um protótipo funcional capaz de reproduzir, em escala reduzida, operações típicas de uma ponte rolante, contemplando circuitos de comando, intertravamentos elétricos e acionamento de motores trifásicos. Inicialmente, foi realizada a modelagem e simulação do circuito elétrico no software CAdE_SIMU, possibilitando a validação prévia da lógica de comando e dos intertravamentos antes da implementação física. Posteriormente, foi realizada a montagem da bancada experimental utilizando contatores, relés auxiliares, disjuntores e botoeiras normalmente abertas operando em modo momentâneo. Para o acionamento remoto, foi utilizado o microcontrolador ESP8266 integrado a um módulo de relés de oito canais, associado a um aplicativo móvel desenvolvido na plataforma MIT App Inventor. O sistema remoto foi projetado para reproduzir eletricamente os mesmos comandos executados pelas botoeiras físicas, mantendo a lógica de segurança implementada no circuito de comando. Os resultados obtidos demonstraram o funcionamento adequado das funções implementadas, incluindo avanço, recuo, elevação, descida, deslocamento lateral e parada, bem como a atuação correta dos intertravamentos elétricos, impedindo comandos conflitantes durante a operação. Também foi verificada comunicação estável entre o aplicativo móvel e o microcontrolador, permitindo o acionamento remoto do sistema de forma funcional e segura. Conclui-se que o sistema desenvolvido apresentou desempenho satisfatório como bancada experimental aplicada ao estudo de comandos elétricos industriais, possibilitando a integração entre técnicas convencionais de acionamento e recursos complementares de controle remoto.

Palavras-chave: ponte rolante; comandos elétricos; intertravamento elétrico; controle remoto; automação industrial.

ABSTRACT

This work presents the design and implementation of an experimental electrical control bench applied to the operational logic of an overhead crane, integrated with a complementary remote control interface via Wi-Fi network. The objective of the work was to develop a functional prototype capable of reproducing, on a reduced scale, typical overhead crane operations, including electrical control circuits, interlocking systems, and three-phase motor actuation. Initially, the electrical circuit was modeled and simulated using the CAdE_SIMU software, allowing prior validation of the control logic and interlocking systems before physical implementation. Subsequently, the experimental bench was assembled using contactors, auxiliary relays, circuit breakers, and normally open push buttons operating in momentary mode. For remote actuation, the ESP8266 microcontroller integrated with an eight-channel relay module was used, associated with a mobile application developed on the MIT App Inventor platform. The remote system was designed to electrically reproduce the same commands executed by the physical push buttons while maintaining the safety logic implemented in the control circuit. The obtained results demonstrated the proper operation of the implemented functions, including forward, reverse, lifting, lowering, lateral displacement, and stop commands, as well as the correct operation of the electrical interlocking system, preventing conflicting commands during operation. Stable communication between the mobile application and the microcontroller was also verified, enabling functional and safe remote operation of the system. It is concluded that the developed system presented satisfactory performance as an experimental bench applied to the study of industrial electrical control systems, enabling the integration between conventional actuation techniques and complementary remote control resources. .

Keywords: *Keywords:* overhead crane; electrical control systems; electrical interlocking; remote control; industrial automation..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ponte rolante utilizada para movimentação de cargas em ambiente industrial	18
Figura 2 – Ponte rolante na configuração univiga	19
Figura 3 – Ponte rolante na configuração biviga	20
Figura 4 – Principais componentes estruturais e funcionais de uma ponte rolante .	21
Figura 5 – Circuitos de potência e comando desenvolvidos no software CAdESIMU	23
Figura 6 – Contator eletromagnético utilizado em sistemas de comandos elétricos industriais	24
Figura 7 – Relé de sobrecarga térmico	26
Figura 8 – Relé de monitoramento de falta de fase	27
Figura 9 – Disjuntores monopolar, bipolar e tripolar	27
Figura 10 – Disjuntor termomagnético	28
Figura 11 – Disjuntor-motor	29
Figura 12 – Diferentes tipos de botoeiras	29
Figura 13 – Chave Seccionadora	30
Figura 14 – Sistema de sinalização luminosa em comandos elétricos e codificação de cores	31
Figura 15 – Simbologia gráfica de comandos elétricos.	32
Figura 16 – Exemplo de intertravamento elétrico	33
Figura 17 – Motor de indução trifásico	35
Figura 18 – Diagrama de Partida Direta	36
Figura 19 – Partida direta com reversão simulada no CAdESIMU	37
Figura 20 – Circuito de partida estrela-triângulo	37
Figura 21 – Microcontrolador ESP8266 NodeMCU utilizado no sistema de controle remoto.	43
Figura 22 – Módulo de relés de 8 canais utilizado na interface entre o ESP8266 e o circuito de comando	44
Figura 23 – Diagrama eletrônico de um módulo de relés de oito canais.	45
Figura 24 – Interface da plataforma MIT App Inventor	46
Figura 25 – Interface de desenvolvimento do MIT App Inventor utilizada na implementação do aplicativo.	47
Figura 26 – Exemplo de diagrama elétrico padrão utilizado em comandos industriais	48
Figura 27 – Diagrama da lógica de comando do sistema de ponte rolante	49
Figura 28 – Motores utilizados na validação experimental do sistema	51
Figura 29 – Fluxo de comunicação entre aplicativo móvel e ESP8266 em modo Access Point	52

Figura 30 – Interface do aplicativo móvel para envio de comandos ao sistema	53
Figura 31 – Lógica de programação do aplicativo no MIT App Inventor	53
Figura 32 – Diagrama elétrico integrado entre sistema remoto e circuito de comando	54
Figura 33 – Diagrama elétrico final desenvolvido para o sistema de comando da ponte rolante	58
Figura 34 – Protótipo físico desenvolvido para o sistema de comando da ponte rolante	58
Figura 35 – Integração entre o ESP8266 e o módulo de relés de 8 canais	59
Figura 36 – Estrutura experimental utilizada na validação do sistema de comando da ponte rolante	60
Figura 37 – Chave seletora utilizada para seleção do modo de operação do sistema.	61
Figura 38 – Interface do aplicativo móvel utilizada nos testes de envio de comandos	64
Figura 39 – Protótipo físico desenvolvido para o sistema de comando da ponte rolante	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação de componentes em diagramas elétricos	32
Tabela 2 – Variáveis de entrada do sistema	40
Tabela 3 – Critérios funcionais de operação do sistema	41
Tabela 4 – Regras funcionais do sistema	42
Tabela 5 – Critérios de validação funcional do sistema	56
Tabela 6 – Validação funcional dos comandos implementados	62
Tabela 7 – Validação dos intertravamentos elétricos	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Introdução	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	15
1.4	Estrutura da Monografia	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Pontes Rolantes	18
2.1.1	Tipos de Ponte Rolante	19
2.1.2	Componentes da Ponte Rolante	19
2.2	Normas Regulamentadoras	20
2.3	Comandos Elétricos Industriais	22
2.3.1	Circuitos de Potência e Comando	22
2.3.2	Contatores	23
2.3.3	Relés auxiliares	25
2.3.3.1	Relé de sobrecarga térmico	25
2.3.3.2	Relé de Falta de Fase	26
2.3.4	Disjuntores	26
2.3.4.1	Disjuntor-Motor	28
2.3.5	Botões e Sinalizadores	28
2.3.5.1	Chave Seccionadora	29
2.3.5.2	Sinalizadores	30
2.3.6	Diagramas Elétricos e Simbologia de Comando	30
2.3.7	Intertravamentos em Sistemas de Comando	32
2.4	Motores de Indução Trifásicos	34
2.4.1	Acionamento de Motores de Indução Trifásicos	35
2.4.1.1	Partida Direta	35
2.4.1.2	Partida Direta com Reversão	36
2.4.1.3	Partida Estrela-Delta	37
2.4.2	Microcontroladores Aplicados a Sistemas de Comando	38
3	METODOLOGIA	39
3.1	Levantamento dos Requisitos Funcionais do Sistema	39
3.1.1	Componentes Elétricos	41
3.1.2	Componentes Eletrônicos	42
3.1.3	Componentes Eletrônicos	43

3.1.4	Ferramentas de Software	44
3.2	Desenvolvimento do Sistema	46
3.2.1	Modelagem do Circuito Elétrico	46
3.2.2	Definição da Lógica de Comando	47
3.2.3	Construção do Protótipo Experimental	49
3.2.3.1	Sistema de Motores Utilizados	50
3.2.4	Sistema de Controle Remoto	50
3.2.5	Aplicativo Móvel	51
3.2.6	Integração do Sistema Remoto ao Circuito de Comando	54
3.2.7	CrITÉrios de ValidaÇão	55
4	RESULTADOS	57
4.1	Validação do Sistema de Comando Elétrico	57
4.1.1	Resultados da Simulação no CAdE_SIMU	57
4.1.2	Protótipo físico do sistema	57
4.1.3	Integração do microcontrolador ESP8266 com o módulo de relés	59
4.1.4	Testes na Bancada Física	59
4.1.5	Validação do Sistema de Controle Remoto	62
4.1.6	Testes do ESP8266 e do Módulo de Relés	63
4.1.7	Testes do Aplicativo Móvel	64
4.1.8	Integração do sistema	65
4.1.9	Discussão dos Resultados	66
5	CONCLUSÃO	68
5.1	Limitações do Sistema	69
5.2	Trabalhos Futuros	69
	Referências	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A movimentação de cargas é uma atividade essencial em diversos setores industriais, sendo amplamente empregada em processos de produção, armazenagem e logística. Nesse contexto, as pontes rolantes desempenham papel fundamental ao possibilitar o transporte seguro e eficiente de materiais dentro de áreas industriais, permitindo deslocamentos longitudinais, transversais e verticais de cargas de diferentes dimensões e massas ([Ferroindústria, 2026](#); [NETO, 2018](#)).

O funcionamento desses equipamentos depende da atuação integrada de motores elétricos, dispositivos de proteção, sistemas de comando e mecanismos de intertravamento, responsáveis por garantir o controle adequado dos movimentos e a segurança operacional do sistema. Dessa forma, os comandos elétricos constituem um elemento essencial para o acionamento e a coordenação das funções executadas por uma ponte rolante, tornando-se um tema de grande relevância na formação de profissionais da área de Engenharia Elétrica ([FRANCHI, 2008](#)).

Apesar da importância desses conhecimentos, o ensino de comandos elétricos frequentemente é desenvolvido de forma predominantemente teórica, o que pode dificultar a visualização prática da interação entre os componentes utilizados em sistemas industriais. Nesse sentido, atividades experimentais e projetos aplicados tornam-se ferramentas importantes para complementar o processo de aprendizagem, permitindo a associação entre conceitos teóricos e situações encontradas em aplicações reais.

Além da compreensão dos circuitos de comando, é fundamental que o estudante desenvolva familiaridade com os dispositivos responsáveis pelo acionamento, proteção e controle dos motores elétricos, bem como com a lógica de funcionamento que garante a operação segura e adequada desses sistemas. A integração desses conhecimentos contribui para uma formação mais consistente, aproximando o ambiente acadêmico das demandas técnicas presentes no setor industrial.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta o projeto, construção e validação de um protótipo destinado à reprodução da lógica de operação de uma ponte rolante em escala reduzida. O sistema foi desenvolvido utilizando contatores, relés auxiliares, botoeiras, dispositivos de proteção e motores elétricos, permitindo a implementação de funções de avanço, recuo, subida, descida e deslocamento lateral, além da aplicação de técnicas de intertravamento elétrico utilizadas em sistemas industriais.

Como complemento ao sistema de comando convencional, foi implementada uma

interface de controle remoto baseada no microcontrolador ESP8266 e em um aplicativo móvel desenvolvido na plataforma MIT App Inventor. Essa funcionalidade permite o acionamento remoto das funções do sistema por meio de comunicação sem fio, sem alterar a lógica de operação e os mecanismos de segurança implementados no circuito de comando.

Dessa forma, o trabalho busca integrar conhecimentos relacionados a comandos elétricos, acionamentos de motores e sistemas embarcados, demonstrando a viabilidade de implementação de um sistema capaz de reproduzir a lógica operacional de uma ponte rolante em ambiente controlado. Além disso, pretende contribuir para o fortalecimento das atividades práticas associadas às disciplinas de comandos elétricos e automação industrial nos cursos de Engenharia Elétrica, favorecendo a consolidação dos conteúdos abordados ao longo da formação acadêmica.

1.2 Justificativa

Os sistemas de comandos elétricos possuem ampla aplicação em ambientes industriais, sendo fundamentais para o acionamento, proteção e controle de motores elétricos empregados em equipamentos como pontes rolantes, esteiras transportadoras e sistemas de elevação de carga.

No contexto da formação em Engenharia Elétrica, o estudo desses sistemas exige não apenas compreensão teórica, mas também contato prático com dispositivos de comando, circuitos de intertravamento e técnicas de acionamento de motores trifásicos. Entretanto, nem sempre os ambientes acadêmicos dispõem de recursos experimentais capazes de reproduzir, de forma acessível e segura, condições operacionais semelhantes às encontradas em aplicações industriais reais.

Dessa forma, este trabalho justifica-se pelo projeto e desenvolvimento de uma bancada destinada à simulação da lógica operacional de uma ponte rolante, permitindo a validação prática de circuitos de comando elétrico, partidas com reversão e intertravamentos elétricos.

Além disso, a integração complementar de um sistema de acionamento remoto baseado em microcontrolador e comunicação sem fio contribui para ampliar as possibilidades de operação e experimentação da bancada desenvolvida.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é projetar e desenvolver um protótipo de comando elétrico aplicado à lógica de operação de uma ponte rolante, visando a implementação e análise prática de circuitos de acionamento, reversão e intertravamento utilizados em sistemas industriais, com a inclusão de uma interface complementar de controle remoto por comunicação sem fio.

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos de comandos elétricos, partidas de motores e sistemas de automação aplicados à movimentação de cargas;
- b) Desenvolver o circuito de comando elétrico da planta básica de uma ponte rolante utilizando contadores reaproveitados, dispositivos de proteção e botoeiras para acionamento manual;
- c) Montar o protótipo, simulando a operação da ponte rolante através de motores em vazio;
- d) Desenvolver um aplicativo móvel utilizando a plataforma MIT App Inventor para envio dos comandos de movimentação do sistema, controlando relés por meio do microcontrolador ESP8266;
- e) Validar o funcionamento do sistema integrado, avaliando a coerência da lógica de comando e intertravamentos do protótipo;
- f) Documentar e analisar os resultados obtidos, discutindo as vantagens, limitações e possíveis extensões da solução proposta.

1.4 Estrutura da Monografia

O Capítulo 1 – apresenta o tema central da pesquisa, destacando a importância da automação industrial e da modernização de sistemas de comando utilizados em equipamentos de movimentação de cargas. Neste capítulo são apresentados o contexto do trabalho, a justificativa, os objetivos gerais e específicos, além da organização desta monografia.

O Capítulo 2 – aborda os principais conceitos que sustentam o desenvolvimento do trabalho, incluindo automação industrial, comandos elétricos, partidas de motores, funcionamento de pontes rolantes e desenvolvimento de aplicativos móveis para controle de sistemas elétricos.

No Capítulo 3 – são descritas as etapas envolvidas no desenvolvimento do sistema proposto, incluindo o desenvolvimento de um diagrama elétrico da ponte rolante, e o desenvolvimento do circuito de comando elétrico convencional, a montagem do protótipo em bancada com motores em vazio e a criação da interface de controle por meio de um aplicativo móvel desenvolvido na plataforma MIT App Inventor, integrado ao microcontrolador ESP8266.

O Capítulo 4 – apresenta os testes realizados e os resultados obtidos a partir da implementação do sistema proposto. São discutidos o funcionamento do controle da ponte

rolante por meio do aplicativo móvel e a validação da lógica de comando e intertravamentos do protótipo experimental.

O Capítulo 5 – resume os principais resultados e contribuições do trabalho para a área de automação industrial, destacando as vantagens da solução proposta, suas limitações e possíveis aplicações em sistemas reais de movimentação de cargas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Pontes Rolantes

As pontes rolantes são equipamentos industriais amplamente utilizados para a movimentação e elevação de cargas pesadas em áreas de produção, armazenagem e logística (BREVIL, 2025). Esses equipamentos são constituídos por diferentes elementos mecânicos responsáveis pela movimentação da carga nos sentidos longitudinal, transversal e vertical, permitindo o transporte seguro de materiais dentro da área de operação. A Figura 1 apresenta um exemplo de ponte rolante utilizada em ambiente industrial.

Figura 1 – Ponte rolante utilizada para movimentação de cargas em ambiente industrial



Fonte: Benzor Engenharia (2023).

No contexto industrial, a eficiência dos processos produtivos está diretamente relacionada à movimentação de materiais, uma vez que o transporte inadequado pode gerar desperdícios e aumento de custos operacionais. Dessa forma, a adoção de sistemas eficientes de movimentação de cargas contribui para a otimização do fluxo produtivo e redução de perdas, sendo as pontes rolantes uma das soluções mais utilizadas nesse cenário (SORDI, 2016; NETO, 2018).

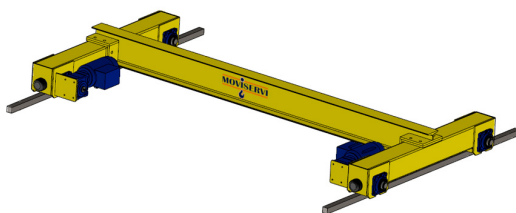
O funcionamento seguro de uma ponte rolante depende da correta implementação de comandos e intertravamentos, que garantem que os motores de tração e elevação sejam acionados de maneira coerente, evitando movimentos simultâneos incompatíveis que possam comprometer a integridade do equipamento e a segurança dos operadores (Ferroindústria, 2026).

2.1.1 Tipos de Ponte Rolante

As pontes rolantes podem ser classificadas em duas categorias principais: apoiadas e suspensas, podendo ainda apresentar configurações de viga única (univiga) ou dupla (biviga). A escolha do tipo mais adequado depende de fatores como as características estruturais do ambiente, limitações físicas do local e natureza da carga a ser transportada (MARTINS et al., 2024).

Na configuração univiga, o carro de elevação desloca-se sobre uma única viga principal, resultando em uma estrutura mais simples e economicamente viável, geralmente aplicada em sistemas de menor capacidade de carga, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Ponte rolante na configuração univiga



Fonte: Adaptado de OMIS (2026).

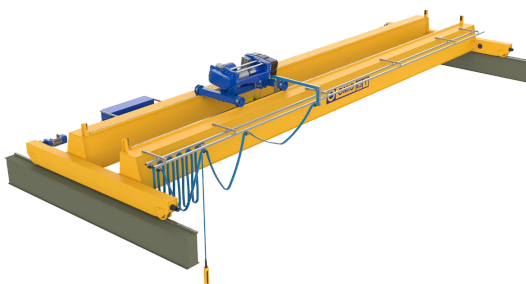
Já na configuração biviga, o sistema é composto por duas vigas principais paralelas, o que proporciona maior rigidez estrutural, maior capacidade de carga e melhor aproveitamento da altura útil de elevação, sendo amplamente utilizado em aplicações industriais de maior porte, conforme apresentado na Figura 3.

Independentemente da configuração estrutural, o princípio de funcionamento dessas máquinas baseia-se na realização dos movimentos de elevação, deslocamento lateral e deslocamento longitudinal, todos controlados por sistemas elétricos de comando. Nesse contexto, destaca-se a importância do correto desenvolvimento dos circuitos de comando, visando garantir segurança, confiabilidade e eficiência operacional do sistema.

2.1.2 Componentes da Ponte Rolante

A ponte rolante é composta por diversos elementos responsáveis por sua operação e segurança. Seus principais componentes incluem:

Figura 3 – Ponte rolante na configuração biviga



Fonte: Adaptado de OMIS (2026).

- **Viga:** elemento estrutural responsável por sustentar a carga e a própria ponte.
- **Carro trole:** responsável pelo deslocamento do sistema de elevação ao longo da viga.
- **Cabeceiras:** localizadas nas extremidades da viga, permitem o deslocamento da ponte ao longo do caminho de rolamento.
- **Talha:** dispositivo de elevação composto por motor, cabo de aço e gancho.
- **Sistema de controle:** composto por dispositivos de comando, como botoeiras ou controles remotos.
- **Sistemas de segurança:** incluem dispositivos como limitadores de carga e botões de parada de emergência.

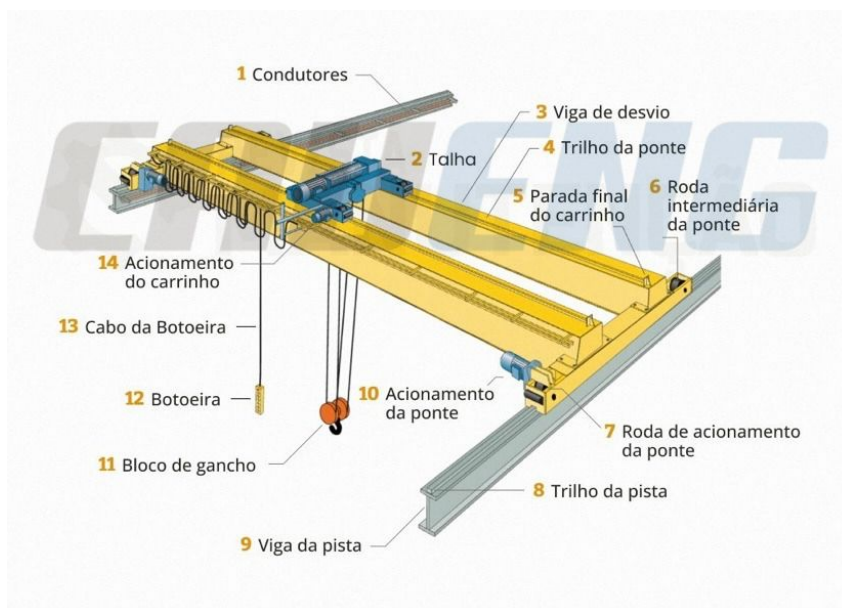
A Figura 4 apresenta os principais componentes de uma ponte rolante industrial, destacando os mecanismos responsáveis pelos movimentos de translação, deslocamento lateral e elevação da carga, os quais dependem diretamente de sistemas de acionamento e comando elétrico para sua operação.

2.2 Normas Regulamentadoras

As normas regulamentadoras e técnicas estabelecem requisitos mínimos de segurança, confiabilidade e procedimentos operacionais aplicáveis a sistemas elétricos industriais, especialmente no que se refere ao projeto, montagem, operação e manutenção de equipamentos.

No presente trabalho, a aplicação das normas é considerada como base conceitual para o desenvolvimento da bancada experimental de comandos elétricos, uma vez que o

Figura 4 – Principais componentes estruturais e funcionais de uma ponte rolante



Fonte: CAUENG (2024).

sistema simula condições encontradas em ambientes industriais, envolvendo circuitos de potência, circuitos de comando e dispositivos de acionamento de máquinas elétricas.

A Norma Regulamentadora NR-10 estabelece requisitos e condições mínimas para garantir a segurança em instalações e serviços em eletricidade, abrangendo medidas de controle e prevenção de riscos elétricos. No contexto deste projeto, seus princípios são observados na separação entre circuitos de potência e comando, na utilização de dispositivos de proteção como disjuntores e relés, e na adoção de intertravamentos elétricos que evitam condições inseguras de operação (Engenhall, 2025).

A NR-11, por sua vez, trata do transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais, sendo diretamente relacionada ao funcionamento de equipamentos como pontes rolantes. Embora o sistema desenvolvido seja em escala de bancada, os movimentos de elevação, deslocamento longitudinal e transversal implementados reproduzem a lógica operacional básica desses equipamentos, permitindo a compreensão dos requisitos de segurança associados à movimentação de cargas (Ministério do Trabalho e Emprego, 2025).

Complementarmente, a NR-12 estabelece referências técnicas e medidas de proteção para máquinas e equipamentos, incluindo a implementação de dispositivos de segurança, sistemas de parada de emergência e intertravamentos. Esses conceitos são aplicados no projeto por meio da lógica de comando implementada, que impede acionamentos simultâneos incompatíveis e garante condições seguras de operação da bancada (Engenharia Adequada, 2024).

Dessa forma, embora o sistema desenvolvido corresponda a um protótipo didático em escala reduzida, sua implementação foi fundamentada em princípios alinhados às normas de

segurança aplicáveis a ambientes industriais. Isso permite não apenas a simulação funcional de uma ponte rolante, mas também a compreensão prática dos requisitos normativos que regem sistemas reais de comando e automação industrial.

2.3 Comandos Elétricos Industriais

O comando elétrico de equipamentos industriais é baseado na utilização de dispositivos eletromecânicos, como contadores, relés, fusíveis e disjuntores, que permitem controlar motores elétricos de forma segura e eficiente. Os contatos dos contadores realizam ligações e desligamentos de motores, enquanto os circuitos auxiliares e intertravamentos garantem que movimentos conflitantes não ocorram simultaneamente ([Sala da Elétrica \(Everton Moraes\), 2026](#)).

A correta implementação de sistemas de comando elétrico é fundamental para o acionamento seguro e eficiente de motores elétricos em aplicações industriais. Por meio desses sistemas, torna-se possível realizar o controle operacional dos equipamentos, reduzir falhas associadas à operação manual e aumentar a segurança tanto dos operadores quanto das instalações industriais ([MOREIRA; SILVA; FONSECA, 2024](#)).

2.3.1 Circuitos de Potência e Comando

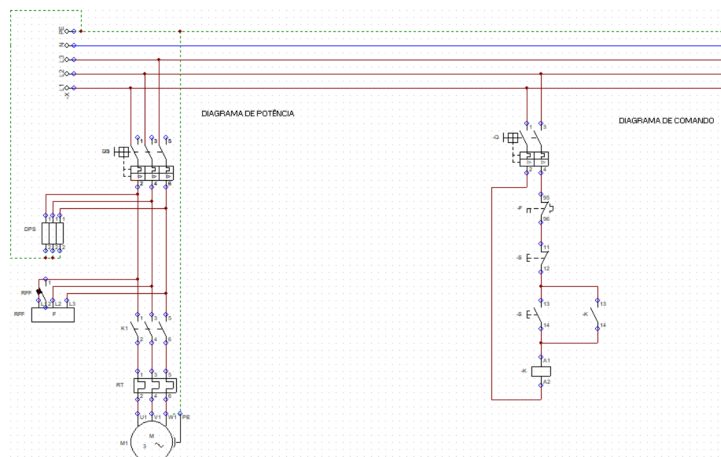
Em instalações industriais, os comandos elétricos são normalmente divididos em circuito de potência e circuito de comando. O circuito de potência é responsável pela alimentação das cargas elétricas, sendo geralmente constituído por motores trifásicos e dispositivos de proteção. Já o circuito de comando opera com menores níveis de corrente e tem como função realizar o acionamento e controle dos dispositivos do sistema.

A Figura 5 apresenta uma simulação genérica de circuitos de potência e comando desenvolvida no software CAdESIMU, utilizada para demonstrar a estrutura básica de acionamento de motores elétricos em aplicações industriais. À esquerda encontra-se o circuito de potência, responsável pela alimentação do motor trifásico por meio dos contatos principais do contator e dos dispositivos de proteção. À direita está representado o circuito de comando, responsável pelo acionamento da bobina do contator através de botoeiras e elementos auxiliares de proteção e controle.

Esse tipo de representação é amplamente utilizado no estudo de comandos elétricos industriais por permitir a organização estruturada do sistema, separando os circuitos de potência e de comando. Em geral, os diagramas seguem a convenção ladder (escada), com disposição lógica dos contatos em ramos e alimentação organizada de forma a facilitar a leitura e interpretação do circuito.

Além disso, são utilizadas padronizações de simbologia, identificação de componentes e numeração de condutores, o que garante maior clareza no projeto e facilita sua

Figura 5 – Circuitos de potência e comando desenvolvidos no software CAdESIMU



fonte: Autoria própria.

materialização em painéis elétricos. Dessa forma, o diagrama serve como base direta para montagem, manutenção e diagnóstico de falhas, sendo parte essencial da documentação técnica do sistema.

2.3.2 Contatores

Os contatores são componentes fundamentais nos sistemas de comandos elétricos industriais, sendo utilizados para o acionamento e controle de circuitos de potência por meio de sinais de baixa corrente. De acordo com Franchi (2008), tratam-se de dispositivos eletromecânicos capazes de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de operação, sendo constituídos basicamente por uma bobina de acionamento, um núcleo ferromagnético móvel, contatos principais de potência e contatos auxiliares. Quando a bobina é energizada, o campo magnético gerado provoca o deslocamento do núcleo móvel, promovendo a comutação dos contatos elétricos. Além disso, os contatores possuem sistemas de supressão de arco elétrico, responsáveis por reduzir os efeitos da interrupção de correntes elevadas durante a abertura dos contatos (FRANCHI, 2008).

O funcionamento do contator ocorre por meio da atuação eletromagnética de sua bobina. Em condição normal de repouso, os contatos permanecem em sua posição inicial. Quando a bobina é energizada, é gerado um campo magnético capaz de atrair a parte móvel do equipamento, promovendo o fechamento dos contatos elétricos. Dessa forma, torna-se possível realizar o acionamento de cargas de maior potência, como motores trifásicos, por meio de um circuito de comando de baixa corrente. Os contatores podem ser classificados de acordo com sua aplicação nos sistemas elétricos industriais, destacando-se principalmente os contatores de potência e os contatores auxiliares. Os contatores de potência são projetados para suportar correntes mais elevadas e altas frequências de operação, sendo utilizados no acionamento direto de cargas elétricas. Além dos contatos principais responsáveis pela alimentação da carga, esses dispositivos também possuem contatos auxiliares utilizados

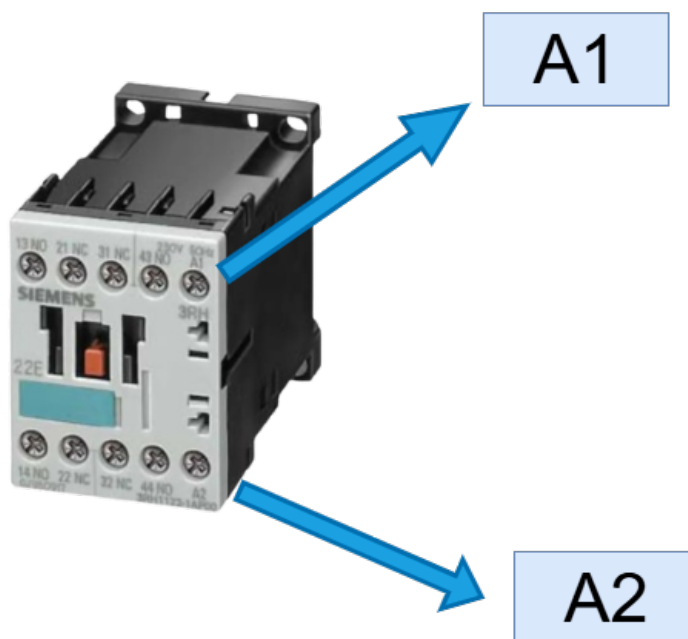
em funções de controle, intertravamento e sinalização (FRANCHI, 2013).

Os contatos auxiliares são amplamente utilizados em circuitos de comando para a implementação de funções como selo, intertravamento, sinalização e lógica de acionamento. Em muitos contadores industriais, além dos contatos principais responsáveis pela alimentação da carga, existem contatos auxiliares normalmente abertos (NA) e normalmente fechados (NF), empregados no controle operacional do sistema. Além disso, há dispositivos denominados contadores auxiliares, compostos exclusivamente por contatos auxiliares e projetados especificamente para atuação em circuitos de comando industrial.

Em relação aos relés convencionais, os contadores auxiliares apresentam maior robustez principalmente devido ao seu projeto construtivo e à capacidade de operação contínua em ambientes industriais. Enquanto relés são tipicamente destinados a aplicações de baixa corrente e comutação de sinais de controle, os contadores auxiliares são projetados com contatos de maior durabilidade elétrica e mecânica, maior resistência ao desgaste por comutação frequente e melhor desempenho na manutenção da continuidade de circuitos lógicos em sistemas industriais. Essa diferença de construção resulta em maior confiabilidade quando empregados em sistemas de comando mais complexos (FREGONEZI, 2021).

Sua utilização torna-se necessária principalmente quando se deseja implementar comandos independentes, intertravamentos adicionais ou funções auxiliares específicas no sistema de comando. A Figura 6 apresenta um exemplo de contador eletromagnético utilizado em sistemas de comandos elétricos industriais.

Figura 6 – Contador eletromagnético utilizado em sistemas de comandos elétricos industriais



Fonte: EletroLico (2026).

No presente trabalho, os contadores foram utilizados como elementos centrais da

lógica de acionamento e intertravamento implementada no protótipo de ponte rolante, permitindo a simulação prática de condições reais de operação em sistemas industriais. Ressalta-se que, conforme indicado na Figura 6, os terminais A1 e A2 correspondem aos terminais da bobina de acionamento do contator, responsáveis pela energização eletromagnética do dispositivo, enquanto os demais contatos apresentados na figura são contatos auxiliares, utilizados em funções de comando, sinalização e intertravamento do circuito.

2.3.3 Relés auxiliares

Um relé é um dispositivo utilizado em circuitos de comando para realizar comutações rápidas e previamente definidas no circuito de corrente, sempre que determinadas condições de operação são atendidas. Sua principal função é permitir o acionamento e a comutação de sinais em circuitos de controle, geralmente de baixa corrente e baixa potência, sem a necessidade de intervenção manual no circuito de comando.

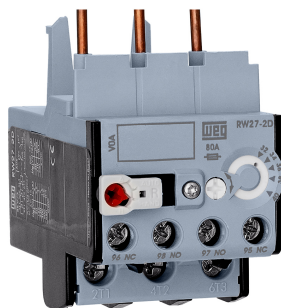
Diferentemente do contator, que é projetado para o acionamento de cargas de potência, como motores elétricos e sistemas de maior corrente, o relé é destinado exclusivamente a circuitos de sinal e lógica de controle. Dessa forma, enquanto o contator realiza a manobra de circuitos de potência, o relé atua na interface e lógica de comando, garantindo o funcionamento adequado de outros dispositivos ou circuitos elétricos associados às condições do sistema (OLIVEIRA, 2024).

Os relés são amplamente utilizados em sistemas de comando elétrico por possibilitarem a implementação de lógicas de controle e o isolamento entre os circuitos de potência e comando. Esses dispositivos também permitem intertravamentos e automação de processos, atuando como interface entre sinais de controle e cargas de potência. De forma complementar, Oliveira (2024) destaca sua aplicação em comandos elétricos devido à sua versatilidade e importância na automação industrial (MOREIRA; SILVA; FONSECA, 2024; OLIVEIRA, 2024).

2.3.3.1 Relé de sobrecarga térmico

O relé térmico é um dispositivo de proteção utilizado em sistemas elétricos para evitar o superaquecimento de motores causado por sobrecargas ou falta de fase. Quando ocorre um aumento excessivo da corrente elétrica, o mecanismo interno do relé atua sobre seus contatos auxiliares, promovendo o desligamento da carga por meio do contator e evitando danos ao equipamento. O tempo de atuação do relé varia de acordo com a intensidade da sobrecarga e com a corrente ajustada no dispositivo. Além disso, os relés térmicos podem possuir rearme manual ou automático após a normalização das condições de operação, sendo amplamente empregados na proteção de motores monofásicos e trifásicos em instalações industriais (WEG, 2024).

Figura 7 – Relé de sobrecarga térmico



Fonte: WEG (2026).

A Figura 7 apresenta um relé de sobrecarga térmico utilizado na proteção de motores elétricos, responsável por interromper o circuito de comando em situações de sobrecorrente, contribuindo para a segurança e integridade do sistema elétrico.

2.3.3.2 Relé de Falta de Fase

O relé de falta de fase é um dispositivo de proteção utilizado em sistemas trifásicos para detectar a ausência de uma das fases da alimentação elétrica. Sua principal função é interromper o funcionamento do circuito quando ocorre desequilíbrio ou perda de fase, evitando danos em motores e demais equipamentos conectados ao sistema. Esse dispositivo é amplamente empregado em ambientes industriais, nos quais motores elétricos, bombas e máquinas operam continuamente em regime trifásico.

O funcionamento do relé baseia-se no monitoramento constante das tensões das três fases. Ao identificar anormalidades, como ausência de fase ou desequilíbrios significativos de tensão, o relé atua rapidamente sobre o circuito de comando, promovendo o desligamento do sistema e protegendo os equipamentos contra superaquecimento, sobrecorrente e possíveis falhas nos enrolamentos dos motores. Dessa forma, sua utilização contribui para maior segurança operacional, redução de custos de manutenção e aumento da confiabilidade dos processos industriais (ABB, 2024).

2.3.4 Disjuntores

Os disjuntores são dispositivos de proteção utilizados em instalações elétricas para interromper automaticamente o circuito em situações de sobrecorrente ou curto-circuito, contribuindo para a segurança dos equipamentos e das instalações industriais. Esses dispositivos são normalmente instalados nos quadros de distribuição e dimensionados de acordo com a corrente demandada pelo sistema elétrico, podendo ser classificados conforme o número de polos e o tipo de atuação. Os modelos monopolares são utilizados

Figura 8 – Relé de monitoramento de falta de fase



Fonte: WEG (2026).

em circuitos monofásicos, geralmente aplicados em sistemas de iluminação e tomadas. Já os disjuntores bipolares são empregados em circuitos com duas fases, enquanto os tripolares são amplamente utilizados na proteção de motores trifásicos e equipamentos industriais de maior potência (MOREIRA; SILVA; FONSECA, 2024).

Os disjuntores magnéticos operam por meio de uma bobina eletromagnética associada ao mecanismo de disparo. Quando ocorre uma corrente elevada de curto-circuito, o intenso campo magnético gerado pela bobina atrai um núcleo móvel, liberando o mecanismo de abertura dos contatos. Essa característica proporciona atuação praticamente instantânea, tornando esse tipo de disjuntor adequado para proteção contra correntes de curto-circuito.

Os disjuntores termomagnéticos reúnem ambos os mecanismos de proteção em um único dispositivo, oferecendo proteção tanto contra sobrecargas quanto contra curtos-circuitos. Dessa forma, são amplamente utilizados em sistemas industriais devido à sua versatilidade e confiabilidade na proteção elétrica. A Figura 9 apresenta exemplos de disjuntores monopolar, bipolar e tripolar, enquanto a Figura 10 ilustra um disjuntor termomagnético utilizado em instalações elétricas.

Figura 9 – Disjuntores monopolar, bipolar e tripolar



Fonte: Brasiltec (2026).

Figura 10 – Disjuntor termomagnético



Fonte: Central Geradores (2026).

2.3.4.1 Disjuntor-Motor

Os disjuntores-motores são dispositivos utilizados na proteção e manobra de motores elétricos, especialmente motores trifásicos empregados em aplicações industriais. Esses equipamentos combinam em uma única unidade funções de proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, além de permitirem o seccionamento manual do circuito.

O princípio de funcionamento do disjuntor-motor baseia-se na atuação de dois mecanismos de proteção. O primeiro é o disparador térmico, responsável pela proteção contra sobrecargas, que atua quando a corrente permanece acima do valor nominal por determinado intervalo de tempo. O segundo é o disparador magnético, que promove a abertura instantânea do circuito em situações de curto-circuito, evitando danos aos condutores e ao motor.

Uma característica importante desse dispositivo é a possibilidade de ajuste da corrente de atuação da proteção térmica de acordo com a corrente nominal do motor. Dessa forma, o equipamento pode ser configurado para atender às características específicas da carga, proporcionando uma proteção mais eficiente e reduzindo a ocorrência de desligamentos indevidos durante a operação.

Em sistemas de comandos elétricos industriais, os disjuntores-motores são frequentemente utilizados em conjunto com contatores, formando conjuntos de acionamento capazes de proporcionar proteção, comando e seccionamento do circuito do motor. Sua aplicação contribui para o aumento da segurança operacional, da confiabilidade do sistema e da vida útil dos equipamentos elétricos (SENAI/FIEMG, 2010). A Figura 11 apresenta um exemplo de disjuntor-motor empregado em aplicações industriais.

2.3.5 Botoeiras e Sinalizadores

As botoeiras, também chamadas de botões de comando, são dispositivos utilizados em sistemas elétricos de comando para fazer interface do circuito com o operador, enviando

Figura 11 – Disjuntor-motor



Fonte: DJL Eletrônica (2026).

sinais elétricos responsáveis pelo controle de equipamentos e máquinas industriais. Esses componentes são normalmente instalados em painéis que protegem seus mecanismos internos contra impactos mecânicos, deixando exposta apenas a parte destinada ao acionamento. As botoeiras podem ser classificadas em modelos de impulso e de retenção. As botoeiras de impulso, também conhecidas como botoeiras por pulso, alteram o estado dos contatos apenas durante o acionamento, retornando automaticamente à posição inicial após a liberação. Já as botoeiras com retenção mantêm seus contatos na posição acionada mesmo após a liberação do botão, sendo necessário um novo acionamento para retornar à condição inicial (RAMALHO, 2024). A Figura ?? apresenta alguns exemplos de botoeiras utilizadas em ambientes industriais, incluindo modelos com diferentes formatos, cores e mecanismos de acionamento.

Figura 12 – Diferentes tipos de botoeiras



Fonte: Sala da eletrica (2026).

2.3.5.1 Chave Seccionadora

A chave seccionadora é um dispositivo de manobra utilizado em sistemas elétricos para realizar o seccionamento de circuitos, permitindo a interrupção da alimentação elétrica durante procedimentos de manutenção, inspeção ou isolamento de partes do sistema. Esse equipamento é projetado para operar em condições de corrente desprezível, possibilitando a abertura e o fechamento do circuito de forma segura. Além disso, a chave seccionadora é capaz de conduzir correntes em condições normais de operação e suportar correntes

anormais, como correntes de curto-circuito, durante um intervalo de tempo especificado, sendo amplamente utilizada em instalações industriais e sistemas de distribuição de energia elétrica (BASSAI, 2016).

Figura 13 – Chave Seccionadora



Fonte: Eletrofelix (2026).

2.3.5.2 Sinalizadores

A sinalização em sistemas industriais consiste na utilização de recursos visuais ou sonoros com a finalidade de informar ou alertar o operador sobre o estado de operação de máquinas, equipamentos ou circuitos elétricos. Esses recursos podem ser implementados por meio de dispositivos luminosos, como lâmpadas indicadoras, ou dispositivos sonoros, como buzinas e campainhas, contribuindo para uma comunicação mais eficiente do funcionamento do sistema. A sinalização luminosa é amplamente utilizada devido à sua rápida identificação, sendo empregada para indicar diferentes condições operacionais, como estado de falha ou alerta (vermelho), atenção (amarelo), operação normal ou sistema pronto para funcionamento (verde), presença de tensão no circuito (branco) e funções específicas não contempladas pelas demais cores (azul). Já a sinalização sonora é utilizada principalmente para alertas imediatos ou indicação de acionamento de equipamentos, sendo comum em aplicações industriais como pontes rolantes, onde é necessária maior atenção do operador durante a operação do sistema (MOREIRA; SILVA; FONSECA, 2024).

2.3.6 Diagramas Elétricos e Simbologia de Comando

Em sistemas de comandos elétricos industriais, a representação gráfica dos circuitos é realizada por meio de diagramas elétricos padronizados, responsáveis por descrever a lógica de funcionamento, as conexões entre dispositivos e a organização entre circuitos de potência e comando. Esses diagramas utilizam simbologias normalizadas para representar componentes como contadores, relés, disjuntores, motores, botoeiras e contatos auxiliares,

Figura 14 – Sistema de sinalização luminosa em comandos elétricos e codificação de cores



Fonte: Mundo da eletrica (2026).

permitindo a interpretação técnica do circuito de forma clara e padronizada. Além da representação gráfica, também são adotadas convenções de identificação numérica e literal para terminais e contatos, facilitando processos de montagem, manutenção e análise operacional (PINHEIRO, s.d.).

Nos contadores e relés, por exemplo, os terminais da bobina são usualmente identificados como A1 e A2, enquanto os contatos auxiliares seguem convenções específicas para contatos normalmente abertos (NA) e normalmente fechados (NF). Essa padronização contribui para a redução de erros de ligação, maior organização documental e melhor comunicação entre projetistas, operadores e equipes de manutenção (PINHEIRO, s.d.).

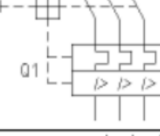
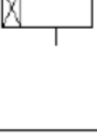
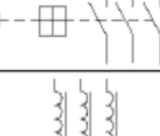
Adicionalmente, conceitos fundamentais como contato de selo, intertravamento e proteção por contatos auxiliares são representados diretamente nesses diagramas, permitindo a implementação de lógicas seguras de acionamento e bloqueio entre comandos incompatíveis.

A Figura 15 apresenta exemplos de simbologias empregadas em diagramas de comandos elétricos industriais.

Em diagramas de comandos elétricos industriais, é comum a utilização de letras padronizadas para identificar os diferentes componentes presentes no circuito. Essa padronização facilita a leitura, interpretação e elaboração dos diagramas, além de contribuir para a comunicação entre projetistas, montadores e profissionais de manutenção. Por meio dessa identificação, torna-se possível reconhecer rapidamente a função de cada elemento representado no esquema elétrico. A Tabela 1 apresenta algumas das principais designações empregadas em diagramas de comandos elétricos industriais.

Observa-se que a utilização dessas designações padronizadas contribui para a organização dos diagramas e reduz a possibilidade de erros durante as etapas de montagem, operação e manutenção dos sistemas elétricos.

Figura 15 – Simbologia gráfica de comandos elétricos.

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	Botoeira NA		Botoeira NF
	Botoeira NA com retorno por mola		Botoeira NF com retorno por mola
	Contatos tripolares NA, ex: contator de potência		Fusível
	Acionamento eletromagnético, ex: bobina do contator		Contato normalmente aberto (NA)
	Relé térmico		Contato normalmente fechado (NF)
	Disjuntor com elementos térmicos e magnéticos, proteção contra correntes de curto e sobrecarga		Acionamento temporizado na ligação
	Disjuntor com elemento magnético, proteção contra corrente de curto-circuito		Lâmpada / Sinalização
	Transformador trifásico		Motor Trifásico

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2026).

Tabela 1 – Identificação de componentes em diagramas elétricos

Símbolo	Componente	Exemplos
F	Dispositivos de proteção	Fusíveis, para-raios, disparadores, relés
H	Dispositivos de sinalização	Indicadores acústicos e ópticos
K	Contatores	Contatores de potência e auxiliares
M	Motores	Motores elétricos trifásicos
Q	Dispositivos de manobra para circuitos de potência	Disjuntores, seccionadores, interruptores
S	Dispositivos de manobra e seletos auxiliares	Botões de comando, dispositivos de posição (fim de curso) e seletos
T	Transformadores	Transformadores de distribuição, potência, potencial, corrente e autotransformadores

Fonte: Autoria própria.

2.3.7 Intertravamentos em Sistemas de Comando

Em sistemas de comandos elétricos industriais, o intertravamento é uma técnica utilizada para impedir condições de operação inadequadas, como o acionamento simultâneo de comandos conflitantes ou sequências operacionais inseguras. Sua principal função é garantir segurança operacional, proteção dos equipamentos e coerência lógica do sistema, evitando situações que possam ocasionar curto-circuitos, sobrecorrentes, inversões indevidas

ou danos mecânicos aos motores e atuadores (Engenharia Adequada, 2024).

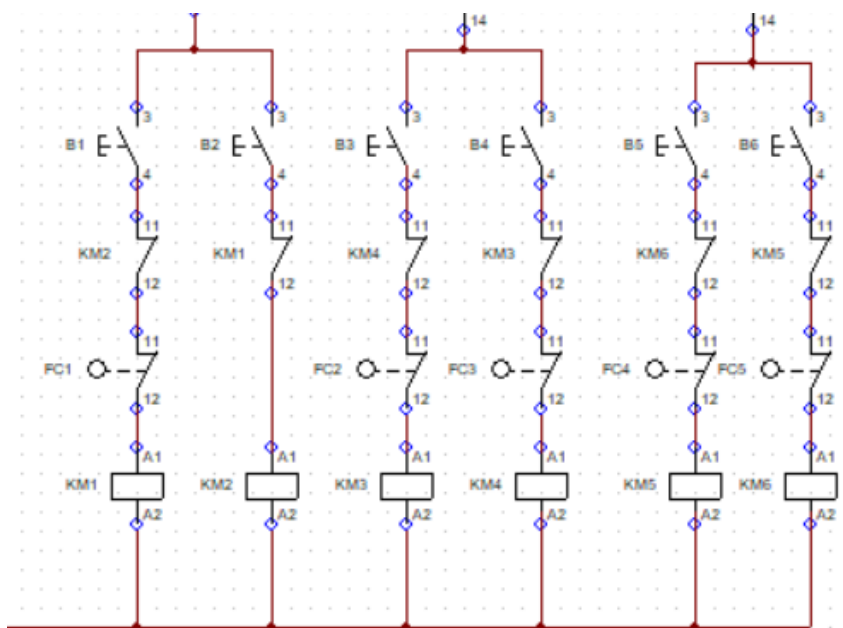
Nos sistemas de acionamento, especialmente em partidas com reversão ou movimentações bidirecionais, o intertravamento torna-se indispensável para impedir que dois contatores responsáveis por comandos opostos sejam energizados simultaneamente. Em aplicações como avanço e recuo, subida e descida ou deslocamento lateral em sentidos contrários, a ausência desse mecanismo pode comprometer tanto o equipamento quanto a segurança do operador.

Os intertravamentos podem ser implementados por diferentes métodos, dependendo do nível de complexidade e da arquitetura do sistema.

O **intertravamento elétrico** é amplamente utilizado em comandos convencionais e consiste na utilização de contatos auxiliares normalmente fechados (NF) conectados em série com as bobinas dos contatores. Nessa configuração, quando um contator é energizado, seu contato auxiliar abre o circuito de comando do contator oposto, impedindo que ambos sejam acionados simultaneamente.

A Figura 16 apresenta um exemplo de diagrama de intertravamento elétrico aplicado a um sistema de reversão de motores.

Figura 16 – Exemplo de intertravamento elétrico



Fonte: Autoria própria.

Conforme ilustrado na Figura 16, o intertravamento elétrico foi implementado por meio de contatos auxiliares normalmente fechados dos próprios contatores. Cada contator possui em série com sua bobina um contato auxiliar pertencente ao contator responsável pelo movimento oposto.

No primeiro conjunto, correspondente aos comandos de avanço e recuo, o contato auxiliar normalmente fechado de KM2 foi conectado em série com a bobina de KM1,

enquanto o contato auxiliar de KM1 foi conectado em série com a bobina de KM2. Dessa forma, quando um dos contatores é energizado, o circuito de acionamento do contator oposto é interrompido.

O mesmo princípio foi aplicado aos pares KM3 e KM4, responsáveis pelos movimentos de subida e descida, e aos pares KM5 e KM6, responsáveis pelo deslocamento lateral à esquerda e à direita.

Essa configuração garante que comandos opostos não possam ser executados simultaneamente, evitando condições inadequadas de operação e aumentando a segurança do sistema. Além disso, o intertravamento contribui para a proteção dos motores e dos dispositivos de acionamento, impedindo inversões conflitantes e reduzindo esforços eletromecânicos indesejados.

Além do intertravamento elétrico, também pode ser empregado o **intertravamento mecânico**, realizado por meio de dispositivos físicos instalados entre contatores. Nessa configuração, um mecanismo impede mecanicamente o fechamento simultâneo dos dispositivos, funcionando como uma camada adicional de proteção.

Em sistemas automatizados baseados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), pode-se ainda utilizar o **intertravamento lógico**, implementado por meio de instruções de programação responsáveis por verificar permissivos e condições operacionais antes da execução dos comandos.

No presente trabalho, optou-se pela utilização do intertravamento elétrico devido à sua ampla aplicação em comandos industriais convencionais, simplicidade de implementação e compatibilidade com a proposta da bancada experimental desenvolvida.

A lógica implementada garante que comandos opostos da ponte rolante, como avanço e recuo, subida e descida, além dos deslocamentos laterais em sentidos contrários, não possam ser executados simultaneamente. Para isso, foram utilizados contatos auxiliares normalmente fechados dos próprios contatores, assegurando o bloqueio elétrico dos movimentos conflitantes e contribuindo para a segurança operacional do sistema.

2.4 Motores de Indução Trifásicos

O motor elétrico é um equipamento responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, geralmente na forma de movimento rotativo. Seu princípio de funcionamento baseia-se na interação entre campos eletromagnéticos gerados pela corrente elétrica aplicada ao dispositivo, resultando na produção de torque no eixo do motor. Esse movimento é amplamente empregado em aplicações industriais, variando conforme o tipo e a configuração do motor (FRANCHI, 2013).

Entre os diversos tipos existentes, o motor de indução destaca-se como o mais

Figura 17 – Motor de indução trifásico



Fonte: Eletroval (2026).

utilizado na indústria, principalmente devido ao predomínio dos sistemas de distribuição de energia em corrente alternada. Em comparação aos motores de corrente contínua, o motor de indução apresenta maior simplicidade construtiva, o que se reflete em menor custo, alta eficiência operacional e baixa necessidade de manutenção. Além disso, apresenta bom rendimento em condições de carga média e elevada, podendo operar com fator de potência adequado quando corretamente dimensionado (FRANCHI, 2013).

2.4.1 Acionamento de Motores de Indução Trifásicos

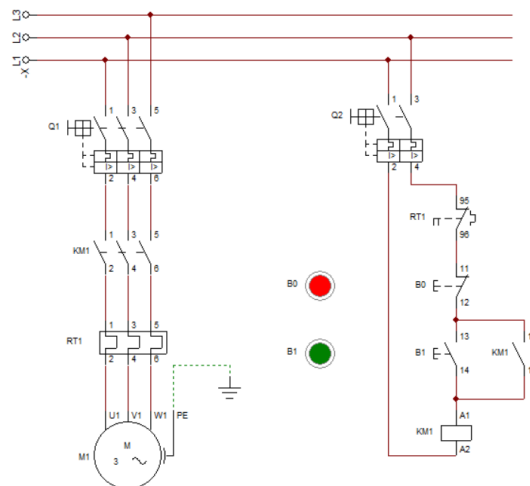
O acionamento de motores elétricos é um tema central em sistemas industriais, devido à ampla utilização desses dispositivos em processos produtivos. Entre os principais tipos de motores, destacam-se os motores de corrente contínua (CC), utilizados em aplicações que exigem maior controle de velocidade. Já os motores de corrente alternada (CA), especialmente os motores de indução do tipo gaiola de esquilo, são os mais empregados na indústria devido à sua robustez, baixo custo e elevada eficiência, representando a maior parte das máquinas elétricas utilizadas industrialmente (FRANCHI, 2013).

2.4.1.1 Partida Direta

A partida direta de motores trifásicos consiste na ligação do motor diretamente à rede elétrica, aplicando-se a tensão nominal em seus terminais por meio de dispositivos de manobra, como contadores, sem utilização de métodos de redução de tensão na partida. Esse tipo de acionamento é caracterizado por simplicidade de implementação e baixo custo, porém apresenta elevados picos de corrente no instante da energização, podendo causar impactos na rede elétrica e esforços mecânicos no sistema acionado. Por esse motivo, sua aplicação é mais comum em motores de menor potência ou em sistemas projetados para suportar a corrente de partida (BUCHINO et al., 2023). A Figura 18 apresenta um exemplo de circuito de partida direta. Nesse tipo de acionamento, ao pressionar a botoeira de partida, a bobina do contator é energizada, provocando o fechamento dos contatos principais e conectando o motor diretamente à rede elétrica. Ao mesmo tempo, a

botoeira de parada, quando acionada, interrompe a alimentação da bobina, desenergizando o contator e desligando o motor.

Figura 18 – Diagrama de Partida Direta



Fonte: Autoria própria.

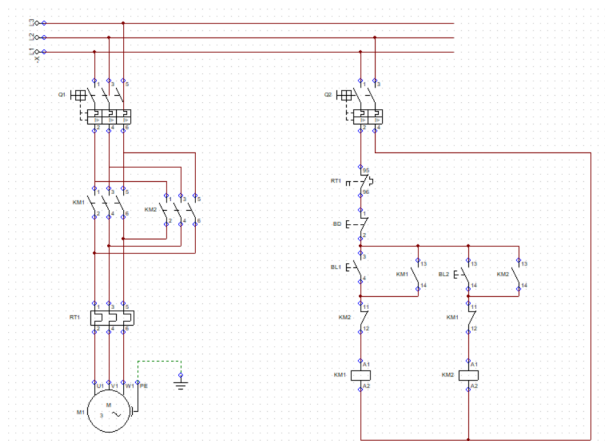
2.4.1.2 Partida Direta com Reversão

A partida direta com reversão é uma técnica de acionamento aplicada a máquinas elétricas que permite a inversão do sentido de rotação do motor por meio da comutação das fases de alimentação. Em geral, sua utilização é recomendada para motores de menor potência, usualmente até 7,5 a 10 CV, devido às características de corrente de partida envolvidas. Esse método apresenta vantagens como a simplicidade de implementação, baixo custo dos componentes de comando e facilidade de operação. Além disso, permite o acionamento sob carga dentro dos limites de torque do motor, manutenção reduzida do sistema e elevada capacidade de torque no eixo, possibilitando a reversão rápida e segura do sentido de rotação quando necessário (MOREIRA; SILVA; FONSECA, 2024).

A Figura 19 apresenta a simulação do circuito de partida direta com reversão desenvolvida no CAdESIMU. No circuito de potência, observam-se dois contadores responsáveis pelo acionamento do motor nos sentidos direto e reverso, sendo a inversão da rotação obtida pela troca de duas fases da alimentação trifásica. Já no circuito de comando, são empregados botões de acionamento para cada sentido de rotação, além de um botão de parada e contatos auxiliares utilizados para a realização do selo elétrico e do intertravamento entre os contadores.

Nota-se ainda que o intertravamento impede o acionamento simultâneo dos contadores de avanço e reversão, evitando curtos-circuitos e garantindo a operação segura do sistema. Dessa forma, a simulação permite visualizar de maneira prática a lógica de controle empregada na reversão do sentido de giro de motores de indução trifásicos.

Figura 19 – Partida direta com reversão simulada no CAdESIMU

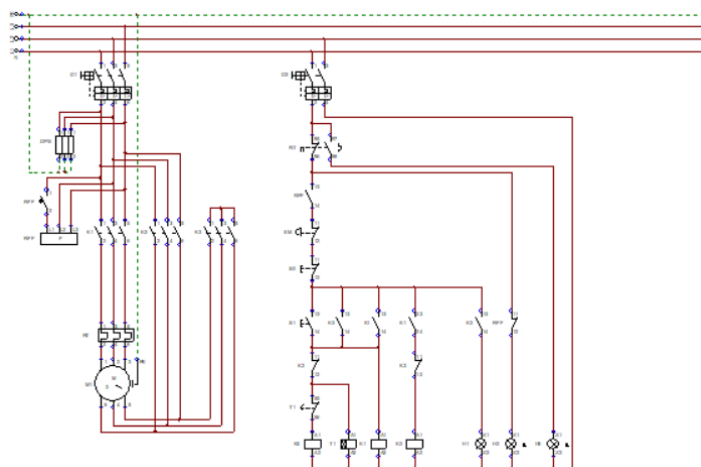


Fonte: Autoria própria.

2.4.1.3 Partida Estrela-Delta

A partida estrela-triângulo é um método de acionamento utilizado em motores de indução trifásicos com o objetivo de reduzir a corrente absorvida durante a partida. Nesse sistema, o motor é inicialmente ligado em configuração estrela, fazendo com que cada enrolamento receba uma tensão reduzida em relação à tensão nominal da rede, o que resulta em menores correntes e esforços mecânicos durante a aceleração. Após o motor atingir uma velocidade adequada, ocorre a comutação automática para a configuração triângulo, permitindo sua operação em regime nominal. Esse método é amplamente empregado em aplicações industriais devido à sua simplicidade, baixo custo de implementação e capacidade de reduzir os impactos da partida sobre a rede elétrica. A Figura 20 apresenta um exemplo de circuito de partida estrela-triângulo.

Figura 20 – Circuito de partida estrela-triângulo



Fonte: Autoria própria.

2.4.2 Microcontroladores Aplicados a Sistemas de Comando

A crescente digitalização dos processos industriais e o avanço dos conceitos associados à Indústria 4.0 impulsionaram a utilização de microcontroladores em sistemas de monitoramento, supervisão e controle. Diferentemente das primeiras gerações de sistemas de comando, baseadas exclusivamente em dispositivos eletromecânicos, os microcontroladores passaram a permitir a implementação de funções lógicas mais complexas, aquisição de dados em tempo real e comunicação com sistemas externos, ampliando significativamente as possibilidades de automação (PEREIRA, 2020).

Entre as plataformas atualmente empregadas em aplicações de automação destacam-se os microcontroladores da família ESP, especialmente os modelos ESP8266 e ESP32. Esses dispositivos incorporam conectividade Wi-Fi nativa, capacidade de processamento elevada para aplicações de controle e ampla disponibilidade de bibliotecas de desenvolvimento. Tais características possibilitam a integração direta entre sistemas de comando elétrico e redes de comunicação, reduzindo a necessidade de módulos adicionais para conexão com dispositivos externos.

A disponibilidade de recursos de comunicação sem fio tornou os microcontroladores ESP amplamente utilizados em aplicações relacionadas à Internet das Coisas (IoT), conceito baseado na interconexão de dispositivos físicos capazes de coletar, transmitir e receber informações por meio de redes digitais. No contexto da automação, essa tecnologia possibilita a implementação de funções de supervisão remota, monitoramento de estados operacionais, aquisição de variáveis do processo e acionamento de equipamentos à distância, ampliando as funcionalidades dos sistemas convencionais de comando.

Em sistemas de comando de motores elétricos, os microcontroladores podem atuar como uma camada complementar de supervisão e controle, enviando sinais para dispositivos de manobra, monitorando condições operacionais e disponibilizando interfaces de interação por meio de dispositivos móveis ou computadores. Dessa forma, preserva-se a lógica tradicional baseada em relés e contadores, ao mesmo tempo em que são incorporadas funcionalidades associadas à conectividade e à operação remota.

Nesse contexto, a utilização de plataformas baseadas em ESP apresenta especial relevância no desenvolvimento de protótipos de sistemas de comando, pois combina baixo custo de implementação, facilidade de programação e recursos avançados de comunicação. Essas características permitem a integração entre circuitos eletromecânicos convencionais e tecnologias de comunicação sem fio, contribuindo para o desenvolvimento de soluções alinhadas aos princípios da automação moderna e da Indústria 4.0 (VENDRAMETTO, 2018).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada deste trabalho consiste no projeto e teste de um protótipo de comando elétrico aplicado à lógica operacional de uma ponte rolante, com o objetivo de reproduzir, em escala reduzida, os princípios de acionamento, reversão e intertravamento utilizados em sistemas industriais, além de incorporar um sistema de controle remoto baseado em comunicação sem fio.

O desenvolvimento foi conduzido de forma sequencial, iniciando-se pela modelagem do sistema elétrico, seguida pela definição da lógica de comando, construção da bancada experimental, implementação do sistema de controle remoto e, por fim, realização dos testes de validação funcional.

3.1 Levantamento dos Requisitos Funcionais do Sistema

O desenvolvimento do protótipo foi iniciado a partir da análise das funções operacionais de uma ponte rolante industrial, equipamento amplamente utilizado para movimentação de cargas em ambientes industriais. Seu funcionamento depende de sistemas de comando capazes de controlar diferentes movimentos mecânicos de forma coordenada e segura.

Neste trabalho, o sistema foi definido a partir de três eixos principais de movimentação: elevação e descida da carga por meio do guincho, deslocamento lateral do trolley (carro) e translação longitudinal da ponte ao longo da estrutura. Cada um desses eixos corresponde a um conjunto específico de motores elétricos, responsáveis por converter os comandos elétricos em movimento mecânico.

O movimento de elevação é realizado pelo motor do guincho, responsável por subir ou descer a carga suspensa por meio de um sistema de tambor e cabo de aço. O deslocamento lateral é realizado pelo motor do trolley, que movimenta o carro ao longo da viga principal da ponte. Já o movimento de translação da ponte é realizado por motores de deslocamento longitudinal, responsáveis por mover toda a estrutura ao longo do trilho da edificação. Em termos operacionais, cada comando elétrico corresponde a um estado específico de funcionamento dos motores. Por exemplo, o comando de subida implica a energização do motor do guincho no sentido de elevação da carga, enquanto o comando de descida inverte esse sentido. Da mesma forma, os comandos de avanço e recuo atuam nos motores responsáveis pela translação da ponte, alterando o sentido de rotação para permitir o deslocamento longitudinal em ambos os sentidos.

Além da definição dos movimentos, foram estabelecidos requisitos de segurança indispensáveis ao funcionamento do sistema, incluindo a prevenção de acionamento simul-

tâneo de movimentos opostos, como subida e descida ou avanço e recuo, condição que será garantida por meio de intertravamentos elétricos no circuito de comando. Também foram considerados dispositivos de segurança adicionais, como botão de emergência para interrupção imediata da operação, fins de curso para limitação física dos deslocamentos mecânicos e relé de falta de fase para supervisão da alimentação elétrica. Esses elementos têm como objetivo evitar falhas operacionais e proteger os motores e a estrutura mecânica do sistema.

A partir desses requisitos, foram definidas as variáveis de entrada e saída utilizadas no desenvolvimento do protótipo. As entradas correspondem aos dispositivos responsáveis pela geração dos comandos e monitoramento das condições de segurança, enquanto as saídas representam os dispositivos acionados pelo sistema de controle.

Tabela 2 – Variáveis de entrada do sistema

Variável	Descrição
BE	Botão de emergência
B1	Comando de subida do guincho
B2	Comando de descida do guincho
B3	Comando de deslocamento para a direita do trolley
B4	Comando de deslocamento para a esquerda do trolley
B5	Comando de avanço da ponte rolante
B6	Comando de recuo da ponte rolante
FC1	Fim de curso do movimento de subida
FC2	Fim de curso do movimento de descida
FC3	Fim de curso do deslocamento lateral
FC4	Fim de curso do movimento de avanço
FC5	Fim de curso do movimento de recuo
RFF	Relé de falta de fase

As saídas do sistema são responsáveis pelo acionamento dos motores e pela execução dos movimentos previstos para a operação da ponte rolante. Cada saída está associada a uma função específica, cujo comportamento esperado foi definido com base nos requisitos operacionais e nos mecanismos de segurança implementados. A Tabela 3 apresenta os critérios funcionais estabelecidos para cada operação do sistema.

Após a identificação das variáveis envolvidas, foram estabelecidas as regras de funcionamento do sistema. Essas regras definem as condições necessárias para o acionamento dos movimentos e os mecanismos de proteção que devem permanecer ativos durante toda a operação. A Tabela 4 apresenta as principais regras funcionais adotadas no desenvolvimento do sistema.

As regras apresentadas constituíram a base para o desenvolvimento dos diagramas elétricos e da lógica de controle do sistema, garantindo que os requisitos operacionais e de segurança fossem incorporados desde a etapa de projeto.

Tabela 3 – Critérios funcionais de operação do sistema

Função	Descrição
Avançar	Os motores responsáveis pelo deslocamento longitudinal devem operar no sentido de avanço, com energização do contator K1 e bloqueio do contator K2.
Recuar	Os motores responsáveis pelo deslocamento longitudinal devem operar no sentido de recuo, com energização do contator K2 e bloqueio do contator K1.
Subir	O motor de elevação deve operar no sentido de subida, com energização do contator K3 e bloqueio do contator K4.
Descer	O motor de elevação deve operar no sentido de descida, com energização do contator K4 e bloqueio do contator K3.
Mover para a esquerda	O motor responsável pelo deslocamento lateral deve operar no sentido correspondente ao movimento para a esquerda, com energização do contator K5 e bloqueio do contator K6.
Mover para a direita	O motor responsável pelo deslocamento lateral deve operar no sentido correspondente ao movimento para a direita, com energização do contator K6 e bloqueio do contator K5.
Parada	Todos os contadores devem permanecer desenergizados e nenhum motor deve apresentar movimento.
Intertravamento	Não deve ser possível energizar simultaneamente os pares K1-K2, K3-K4 ou K5-K6.
Controle remoto	Os comandos executados pelo aplicativo devem produzir os mesmos resultados observados no acionamento manual.
Seleção de modo	A chave seletora deve permitir apenas um modo de operação por vez (manual, remoto ou desligado).

3.1.1 Componentes Elétricos

Os componentes elétricos foram utilizados na construção dos circuitos de potência e comando da bancada, sendo responsáveis pelo acionamento dos motores, proteção do sistema e implementação da lógica de controle.

Foram utilizados seis contadores com bobina CA de 220 V, responsáveis pelo acionamento dos motores e pela implementação dos intertravamentos elétricos entre comandos opostos. A utilização de seis contadores permitiu a implementação das funções de avanço, recuo, subida, descida, deslocamento lateral à esquerda e deslocamento lateral à direita da ponte rolante.

Para proteção da alimentação trifásica foi empregado um relé de falta de fase, cuja função é interromper o funcionamento do sistema em situações de ausência ou desequilíbrio entre as fases, contribuindo para a proteção dos motores utilizados na bancada.

O sistema de proteção elétrica foi composto por cinco disjuntores, sendo um disjuntor termomagnético tripolar utilizado como proteção geral da bancada, um disjuntor bipolar destinado à proteção do circuito de comando, dois disjuntores-motor utilizados

Tabela 4 – Regras funcionais do sistema

Regra	Descrição
R1	O guincho não pode executar simultaneamente os movimentos de subida e descida.
R2	O trolley não pode executar simultaneamente os movimentos para direita e esquerda.
R3	A ponte não pode executar simultaneamente os movimentos de avanço e recuo.
R4	O acionamento do botão de emergência deve interromper imediatamente todos os movimentos do sistema.
R5	A atuação de qualquer fim de curso deve impedir a continuidade do movimento correspondente.
R6	A detecção de falta de fase deve impedir o acionamento dos motores e sinalizar a condição de falha.
R7	O sistema deve fornecer sinalização visual e sonora indicando suas condições de operação e falha.

na proteção individual dos motores e um disjuntor termomagnético tripolar adicional empregado na proteção de um ramal específico do circuito de potência.

A seleção desses componentes foi realizada considerando a compatibilidade com os níveis de tensão e corrente do sistema, bem como a disponibilidade dos dispositivos durante a construção da bancada experimental. A montagem foi realizada com separação física entre os circuitos de potência e comando, visando organização, segurança operacional e facilidade de manutenção.

3.1.2 Componentes Eletrônicos

Os componentes eletrônicos foram utilizados na implementação do sistema de controle remoto da bancada experimental, sendo responsáveis pelo processamento dos comandos enviados pelo usuário e pela interface entre o sistema digital e o circuito de comando elétrico.

O sistema eletrônico foi composto por um microcontrolador ESP8266 NodeMCU e um módulo de relés de oito canais. O ESP8266, apresentado na Figura 21, foi escolhido por integrar recursos de processamento e comunicação Wi-Fi em um único dispositivo, além de apresentar baixo custo, fácil programação e ampla utilização em aplicações de automação e sistemas embarcados. O microcontrolador foi configurado em modo *Access Point* (AP), permitindo que dispositivos móveis se conectassem diretamente à rede Wi-Fi criada pelo próprio ESP8266, sem necessidade de roteador externo ou acesso à Internet.

Para realizar a interface entre o sistema eletrônico e o circuito de comando foi utilizado um módulo de relés de 8 canais, apresentado na Figura 22. A utilização desse dispositivo foi necessária devido à incompatibilidade entre os níveis de tensão e corrente

Figura 21 – Microcontrolador ESP8266 NodeMCU utilizado no sistema de controle remoto.



Fonte: Mercado Livre (2026).

das saídas digitais do ESP8266 e os circuitos elétricos da bancada. Dessa forma, os relés atuam como elementos de interface, permitindo que sinais de baixa potência provenientes do microcontrolador acionem os circuitos de comando dos contatores de forma segura.

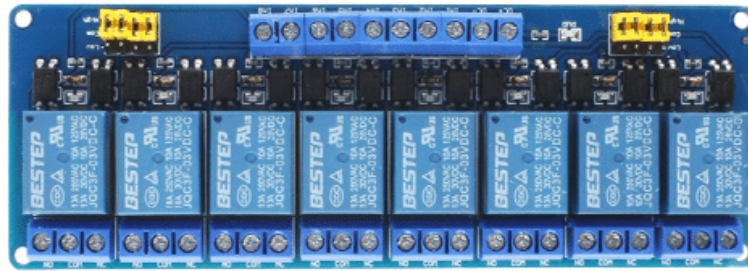
Além de possibilitar o acionamento das funções operacionais da ponte rolante, o módulo de relés fornece isolamento elétrico entre o sistema eletrônico e o circuito de comando, contribuindo para a proteção dos dispositivos eletrônicos e aumentando a segurança operacional da bancada. A disponibilidade de oito canais também permitiu a implementação de todas as funções previstas no projeto, incluindo avanço, recuo, subida, descida, deslocamento lateral à esquerda, deslocamento lateral à direita e parada.

3.1.3 Componentes Eletrônicos

Conforme ilustrado na Figura 23, cada canal do módulo é composto por um optoacoplador, um transistor de acionamento, diodos de proteção e um relé eletromecânico. O optoacoplador proporciona isolamento elétrico entre o circuito lógico e o circuito de acionamento, reduzindo a possibilidade de interferências elétricas atingirem o microcontrolador. O transistor fornece a corrente necessária para energizar a bobina do relé, enquanto o diodo de roda livre protege o circuito contra sobretensões geradas durante o desligamento da bobina.

Além de possibilitar o acionamento das funções operacionais da ponte rolante, o módulo de relés contribuiu para o isolamento elétrico entre o sistema eletrônico e o circuito de comando, aumentando a confiabilidade e a segurança da bancada experimental. A disponibilidade de oito canais permitiu implementar todas as funções previstas no projeto, incluindo avanço, recuo, subida, descida, deslocamento lateral à esquerda, deslocamento

Figura 22 – Módulo de relés de 8 canais utilizado na interface entre o ESP8266 e o circuito de comando



Fonte: MakerHero (2026).

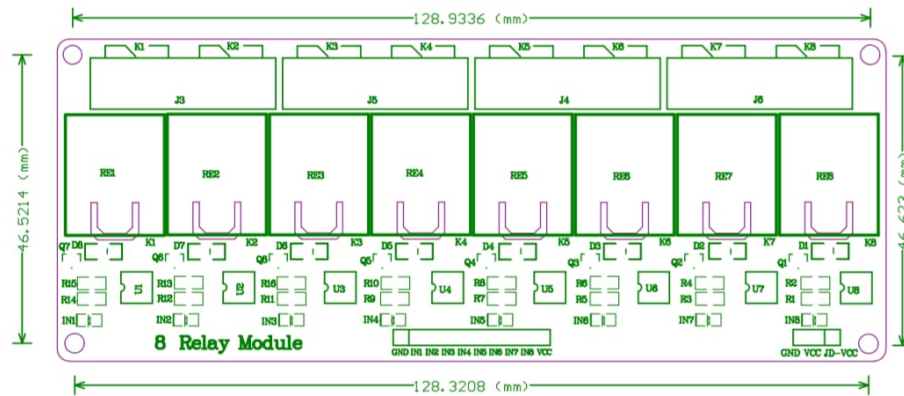
lateral à direita e parada.

3.1.4 Ferramentas de Software

Foram utilizadas ferramentas computacionais para apoio às etapas de projeto, simulação e programação do sistema, permitindo o desenvolvimento e validação das diferentes funcionalidades da bancada experimental antes de sua implementação física.

Para a modelagem e simulação dos circuitos elétricos foi utilizado o software CADe_SIMU. Trata-se de uma ferramenta amplamente empregada no ensino e desenvolvimento de comandos elétricos, permitindo a elaboração de diagramas de comando e potência por meio de uma biblioteca composta por símbolos eletrotécnicos padronizados. Além da construção dos diagramas, o software possibilita a simulação do funcionamento dos circuitos, permitindo verificar a lógica de acionamento, intertravamentos e sequências operacionais antes da montagem física do sistema. Dessa forma, sua utilização contribuiu para a identificação e correção de possíveis falhas ainda durante a etapa de projeto (MOREIRA; SILVA; FONSECA, 2024).

Figura 23 – Diagrama eletrônico de um módulo de relés de oito canais.



Fonte: ELEGOO Wiki (2026).

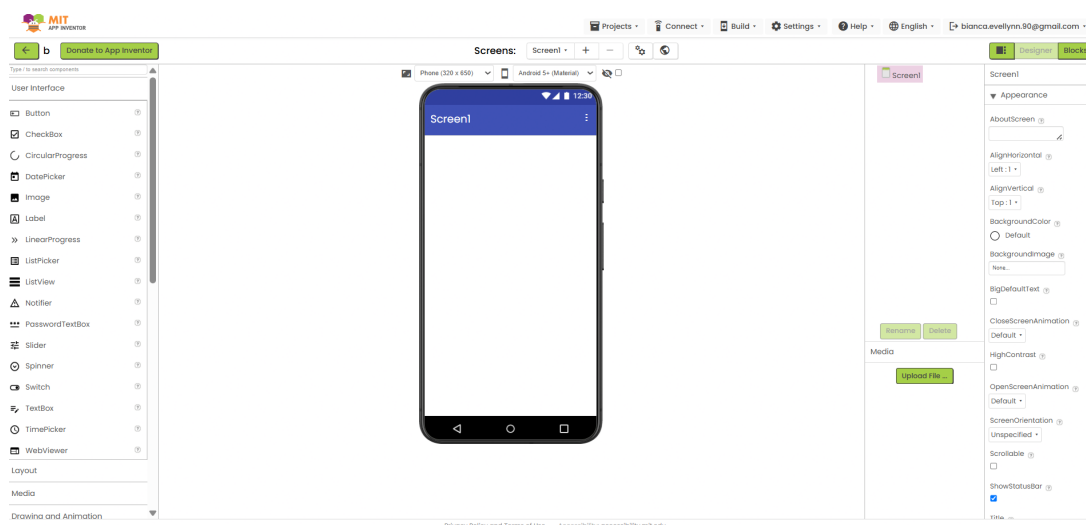
A programação do microcontrolador foi realizada na plataforma Arduino IDE, um ambiente de desenvolvimento integrado utilizado para escrita, compilação e gravação de programas em microcontroladores. A ferramenta oferece suporte ao ESP8266 por meio de bibliotecas específicas, possibilitando a implementação das rotinas de comunicação Wi-Fi e controle dos dispositivos conectados ao sistema.

Para o desenvolvimento do aplicativo móvel foi utilizada a plataforma MIT App Inventor, um ambiente de programação visual criado pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) que permite o desenvolvimento de aplicativos para dispositivos Android por meio da utilização de blocos lógicos. A plataforma disponibiliza recursos para criação de interfaces gráficas, comunicação em rede e integração com dispositivos externos, tornando-se adequada para aplicações de automação e controle remoto. Sua utilização permitiu desenvolver a interface responsável pelo envio dos comandos operacionais da ponte rolante ao microcontrolador ESP8266.

A Figura 24 apresenta a interface da plataforma MIT App Inventor utilizada durante o desenvolvimento do aplicativo.

A Figura 25 apresenta a interface de desenvolvimento do MIT App Inventor utilizada na construção do aplicativo. À esquerda encontram-se os componentes disponíveis para a criação da interface gráfica, como botões, imagens, rótulos e caixas de texto. Na região central é exibida a tela do aplicativo em desenvolvimento, permitindo a organização visual dos componentes. À direita são apresentadas as propriedades do elemento selecionado, possibilitando a configuração de atributos como alinhamento, cores, orientação da tela e demais características da interface.

Figura 24 – Interface da plataforma MIT App Inventor



Fonte: Autoria própria.

3.2 Desenvolvimento do Sistema

3.2.1 Modelagem do Circuito Elétrico

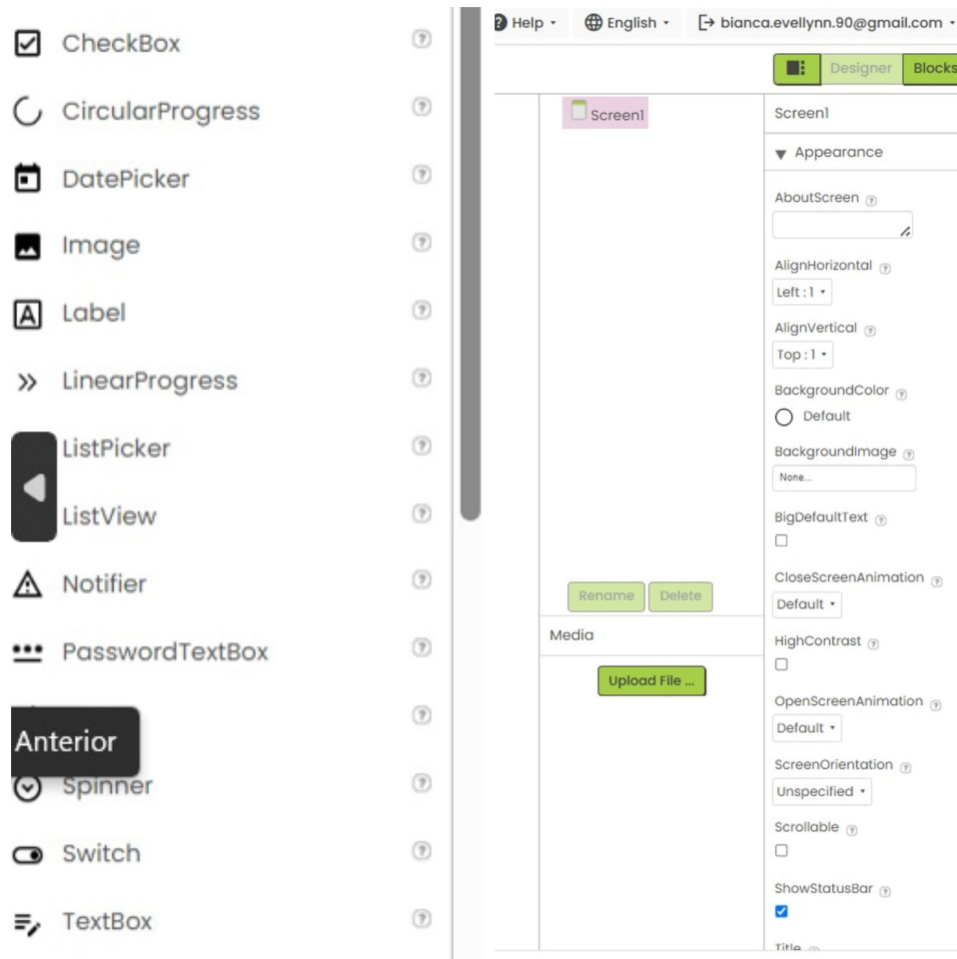
Inicialmente, foi realizada a modelagem do sistema de comando elétrico utilizando o software CADe_SIMU, com base em princípios de comandos elétricos aplicados a sistemas de movimentação de pontes rolantes. Essa etapa teve como objetivo representar, em ambiente de simulação, a lógica de acionamento dos motores e os princípios de segurança utilizados em sistemas industriais reais.

Como referência, foi utilizado um diagrama clássico de comando de ponte rolante, amplamente empregado em sistemas industriais de movimentação de cargas. Esse tipo de circuito tem como principal função permitir o acionamento reversível de motores trifásicos, possibilitando a inversão do sentido de rotação por meio da inversão de fases, além de implementar intertravamentos elétricos entre contatos auxiliares normalmente fechados, impedindo a energização simultânea de comandos opostos, como avanço e recuo ou subida e descida. Dessa forma, o circuito garante segurança operacional e evita falhas por acionamento simultâneo de sentidos contrários de movimento.

Esse modelo de referência foi utilizado como base funcional para o desenvolvimento do sistema proposto, sendo adaptado às condições da bancada experimental e aos componentes disponíveis no projeto, conforme apresentado na Figura 26.

Com base nessa estrutura de referência, foi desenvolvido o diagrama do circuito de comando da ponte rolante no CADe_SIMU, considerando os componentes disponíveis e as limitações da bancada experimental, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 25 – Interface de desenvolvimento do MIT App Inventor utilizada na implementação do aplicativo.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Definição da Lógica de Comando

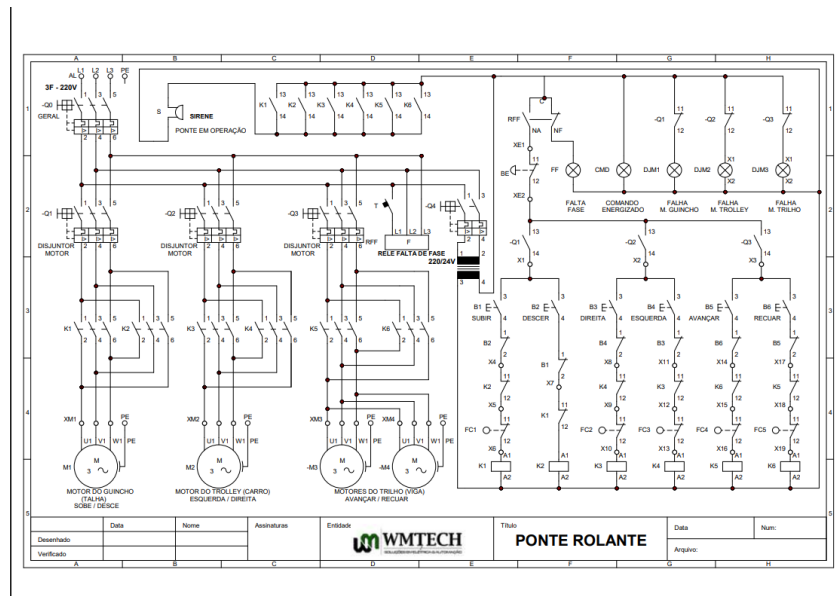
A lógica de comando do sistema foi desenvolvida com base no circuito de comandos elétricos modelado no software CAdE_SIMU, tendo como princípio a energização controlada das bobinas dos contadores responsáveis pelo acionamento dos motores da ponte rolante.

O sistema de comando foi implementado por meio de seis contadores (K1 a K6), sendo cada um responsável por uma função específica de movimentação dos motores. O acionamento de cada contador ocorre a partir dos sinais provenientes das botoeiras ou do sistema de controle remoto, que atuam diretamente na energização das bobinas correspondentes.

Para garantir a segurança operacional, foi implementada uma lógica de intertravamento elétrico utilizando contatos auxiliares normalmente fechados (NF). Esse recurso impede a energização simultânea de contadores pertencentes a movimentos opostos.

Essa condição é necessária devido ao fato de que a energização simultânea de dois contadores associados ao mesmo motor pode gerar estados elétricos conflitantes no circuito

Figura 26 – Exemplo de diagrama elétrico padrão utilizado em comandos industriais



Fonte: Adaptado de documento disponível em Scribd (2026).

de potência. Nesse cenário, o motor pode receber comandos simultâneos de rotação em sentidos opostos, o que provoca aumento significativo de corrente, aquecimento excessivo dos enrolamentos, desgaste prematuro dos contatos e possível falha operacional do sistema.

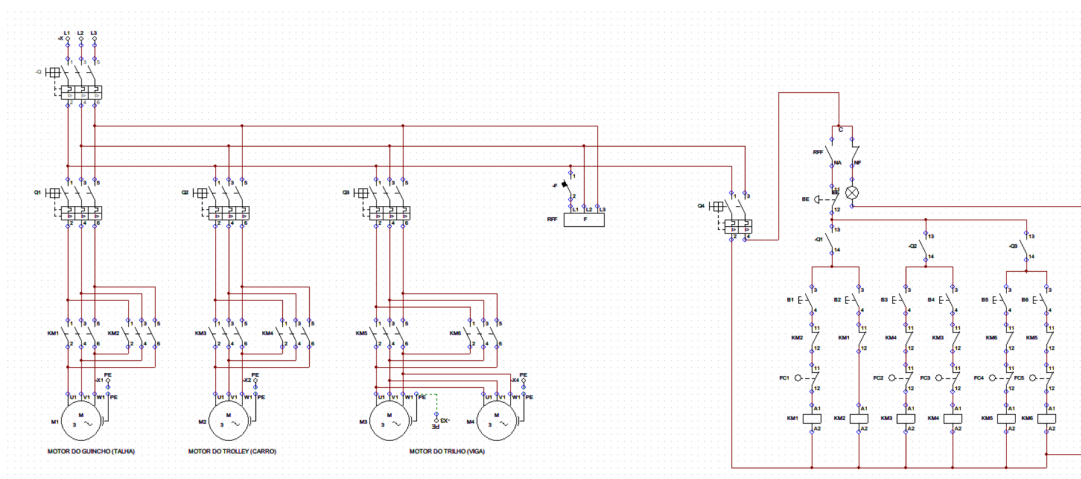
O conflito de acionamento ocorre, por exemplo, quando os contatores K1 e K2 são energizados simultaneamente, representando comandos de avanço e recuo aplicados ao mesmo eixo de movimentação. Situações equivalentes podem ocorrer entre K3 e K4 (subida e descida) e entre K5 e K6 (deslocamento lateral esquerdo e direito), resultando em comandos contraditórios para o mesmo conjunto mecânico.

Para evitar essa condição, foi implementado o intertravamento elétrico por meio de contatos auxiliares normalmente fechados (NF). Quando um contator é energizado, o contato auxiliar NF associado ao contator do sentido oposto é aberto, interrompendo o circuito de comando e impedindo sua ativação. Dessa forma, apenas um sentido de movimento pode ser acionado por vez em cada eixo, garantindo que não haja sobreposição de comandos elétricos incompatíveis.

Essa configuração assegura a integridade elétrica e mecânica do sistema, garantindo que os movimentos da ponte rolante ocorram de forma controlada, sequencial e segura, em conformidade com os princípios de comandos elétricos industriais.

A estrutura lógica implementada no circuito de comando é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Diagrama da lógica de comando do sistema de ponte rolante



Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Construção do Protótipo Experimental

Após a etapa de simulação do sistema, foi realizado o planejamento da construção da bancada experimental, considerando critérios de organização elétrica, segurança operacional e boas práticas aplicadas à montagem de painéis industriais. Esse planejamento teve como objetivo estruturar a disposição dos componentes de forma funcional, garantindo a rastreabilidade dos circuitos e condições adequadas para testes e manutenção.

A organização física do sistema foi planejada com base na separação entre circuito de potência e circuito de comando. Essa separação é uma prática amplamente utilizada em instalações elétricas industriais, tendo como finalidade reduzir interferências elétricas entre circuitos distintos, facilitar a identificação dos condutores e aumentar a segurança operacional durante testes e intervenções no sistema.

Como critério de padronização, foi adotada a identificação dos condutores por cores, sendo utilizados cabos vermelhos para o circuito de potência e cabos azuis para o circuito de comando. Essa padronização facilita a identificação visual dos circuitos e reduz a probabilidade de erros de ligação durante a montagem, além de contribuir para a organização geral do sistema.

A disposição dos dispositivos foi definida com base na organização funcional do sistema, agrupando os componentes conforme suas respectivas funções. Dessa forma, os dispositivos de proteção, como disjuntores e relé de falta de fase, foram posicionados próximos à entrada de alimentação, enquanto os contadores e relés auxiliares foram organizados de acordo com os eixos de movimentação da ponte rolante. Essa estratégia permite maior clareza na leitura do circuito e facilita a identificação de falhas durante testes.

Esse planejamento foi baseado em práticas comuns de montagem de painéis elétricos

industriais, considerando princípios de organização, segurança e facilidade de manutenção, mesmo em ambientes experimentais de pequena escala. Como referência técnica, foram observadas diretrizes gerais estabelecidas por normas como a NR-10, que trata da segurança em instalações elétricas, e a NR-12, que estabelece requisitos de segurança no trabalho em máquinas e equipamentos, especialmente no que se refere à prevenção de riscos elétricos e operacionais.

O resultado prático desse planejamento foi a montagem da bancada experimental, na qual os componentes foram dispostos conforme os critérios descritos, permitindo a validação funcional do sistema de comando elétrico desenvolvido neste trabalho.

3.2.3.1 Sistema de Motores Utilizados

Os motores utilizados no protótipo são motores de indução trifásicos de 0,25 cv, alimentados em 220 V trifásico, provenientes de uma bancada didática disponível no laboratório. Esses motores foram selecionados devido à sua disponibilidade para uso experimental e por apresentarem características compatíveis com a simulação dos movimentos de uma ponte rolante em escala reduzida.

No desenvolvimento deste trabalho, os motores foram operados em condição de vazio, sem acoplamento de carga mecânica, visando garantir maior segurança durante os testes e permitir a análise exclusiva do comportamento elétrico do sistema de comando, incluindo acionamento, reversão de sentido e intertravamento entre contadores.

Foram utilizados quatro motores no total, distribuídos conforme os eixos de movimentação do sistema: dois motores responsáveis pelo deslocamento longitudinal da ponte (avanco e recuo), um motor para o movimento de elevação da carga e um motor para o deslocamento lateral do trolley. Essa configuração permitiu a representação funcional dos principais movimentos de uma ponte rolante industrial em escala experimental.

A Figura 28 apresenta os motores utilizados na validação experimental do sistema.

3.2.4 Sistema de Controle Remoto

O sistema de controle remoto foi implementado utilizando o microcontrolador ESP8266, programado na plataforma Arduino IDE e configurado em modo *Access Point* (AP). Nessa configuração, o próprio microcontrolador cria uma rede Wi-Fi local, permitindo a conexão direta de dispositivos móveis sem a necessidade de roteadores externos ou acesso à internet.

Para realizar a interface entre o sistema digital e o circuito elétrico da bancada foi utilizado um módulo de relés de 8 canais conectado às saídas digitais do ESP8266. Esse módulo atua como interface de acoplamento e isolamento elétrico, permitindo que sinais

Figura 28 – Motores utilizados na validação experimental do sistema



Fonte: Autoria própria.

de baixa tensão provenientes do microcontrolador acionem o circuito de comando da ponte rolante com segurança.

Ao receber um comando enviado pelo aplicativo móvel, o ESP8266 processa a requisição via comunicação Wi-Fi e realiza a ativação da saída digital correspondente. Essa saída energiza o relé associado à função solicitada, o qual, por sua vez, realiza o acionamento do circuito de comando elétrico da bancada, reproduzindo eletricamente a ação equivalente às botoeiras físicas.

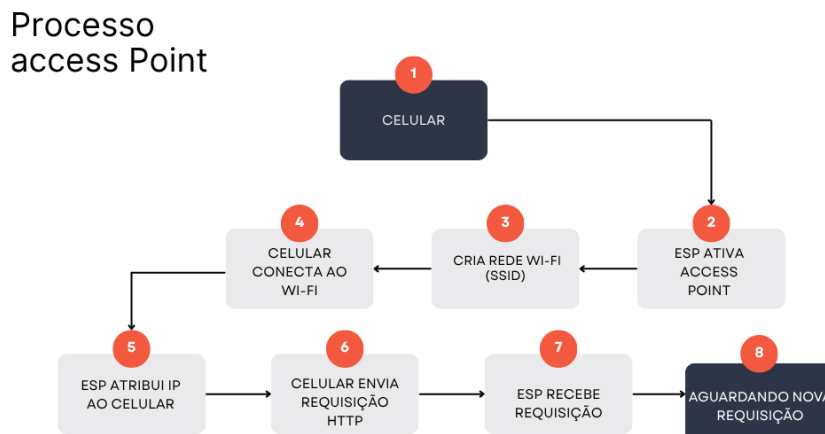
O fluxo de comunicação entre os elementos do sistema é apresentado na Figura 29. A figura representa a sequência lógica de funcionamento do sistema, iniciando no aplicativo móvel, que envia o comando via rede Wi-Fi local para o ESP8266. Em seguida, o microcontrolador interpreta a solicitação e aciona a saída digital correspondente, que ativa o módulo de relés. Por fim, o relé atua sobre o circuito de comando da ponte rolante, acionando o contator responsável pelo movimento desejado.

3.2.5 Aplicativo Móvel

O desenvolvimento do aplicativo móvel foi planejado na plataforma MIT App Inventor, adotando uma abordagem baseada em blocos lógicos para implementação da interface de controle do sistema de ponte rolante. O objetivo do aplicativo foi estruturar um conjunto de funções de comando digital compatíveis com as variáveis definidas no sistema elétrico, garantindo correspondência direta entre interface, comunicação e acionamento.

O planejamento do aplicativo foi baseado nas mesmas funções operacionais definidas na etapa de requisitos do sistema, sendo elas: avanço, recuo, subida, descida, deslocamento lateral à esquerda, deslocamento lateral à direita e parada. Dessa forma, cada função do

Figura 29 – Fluxo de comunicação entre aplicativo móvel e ESP8266 em modo Access Point



Fonte: Autoria própria.

sistema foi mapeada para um evento específico de interação do usuário (botão), garantindo relação direta entre comando e ação.

A interface desenvolvida é apresentada na Figura 30. Nela foram implementados sete botões correspondentes às funções de avanço, recuo, subida, descida, deslocamento lateral à esquerda, deslocamento lateral à direita e parada.

Do ponto de vista de arquitetura, o aplicativo foi estruturado em três camadas funcionais: interface gráfica, lógica de eventos e comunicação com o sistema embarcado. A interface gráfica é composta por botões independentes, cada um associado a uma função do sistema. A camada lógica é responsável por capturar o evento de clique e definir qual comando será executado. Já a camada de comunicação realiza o envio das requisições HTTP para o microcontrolador ESP8266.

A lógica de funcionamento do aplicativo foi definida de forma que cada botão aciona um evento específico de envio de comando, o qual gera uma requisição HTTP com um identificador associado à função desejada. Esse identificador é interpretado pelo ESP8266, que realiza o mapeamento para a saída digital correspondente ao acionamento do circuito de comando.

A comunicação entre aplicativo e sistema embarcado foi planejada para ocorrer por meio de rede Wi-Fi local, garantindo baixa latência e independência de conexão com internet externa. Essa escolha permite maior robustez no ambiente experimental e simplifica a arquitetura de comunicação.

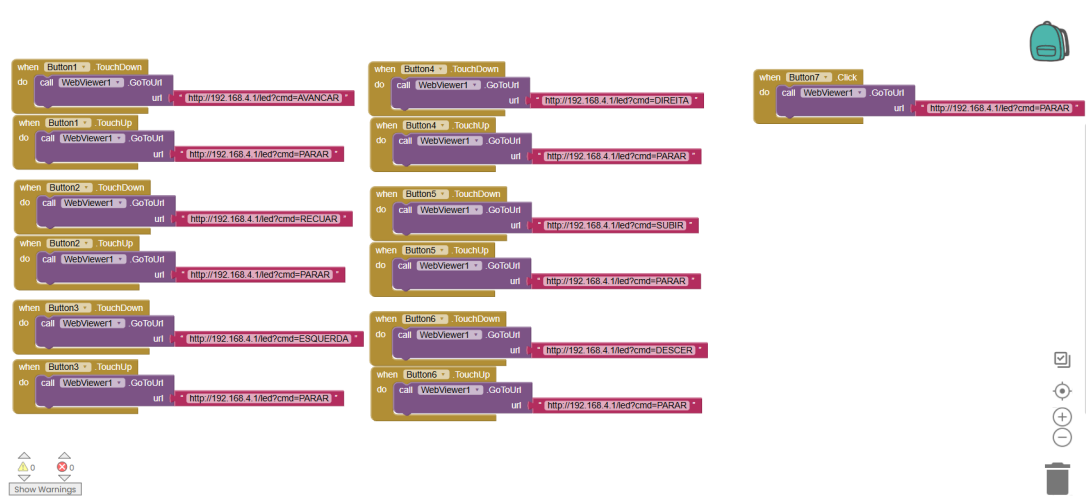
Figura 30 – Interface do aplicativo móvel para envio de comandos ao sistema



Fonte: Autoria própria.

A lógica de programação implementada é apresentada na Figura 31. Ao pressionar um botão, o aplicativo envia a requisição correspondente ao ESP8266, que interpreta o comando recebido e aciona a saída digital responsável pela função solicitada.

Figura 31 – Lógica de programação do aplicativo no MIT App Inventor



Fonte: Autoria própria.

Durante o planejamento do sistema, considerou-se uma comunicação em rede Wi-Fi

local com distância operacional aproximada de 11,5 m entre o dispositivo móvel e o módulo ESP8266, sendo suficiente para operação em ambiente de laboratório.

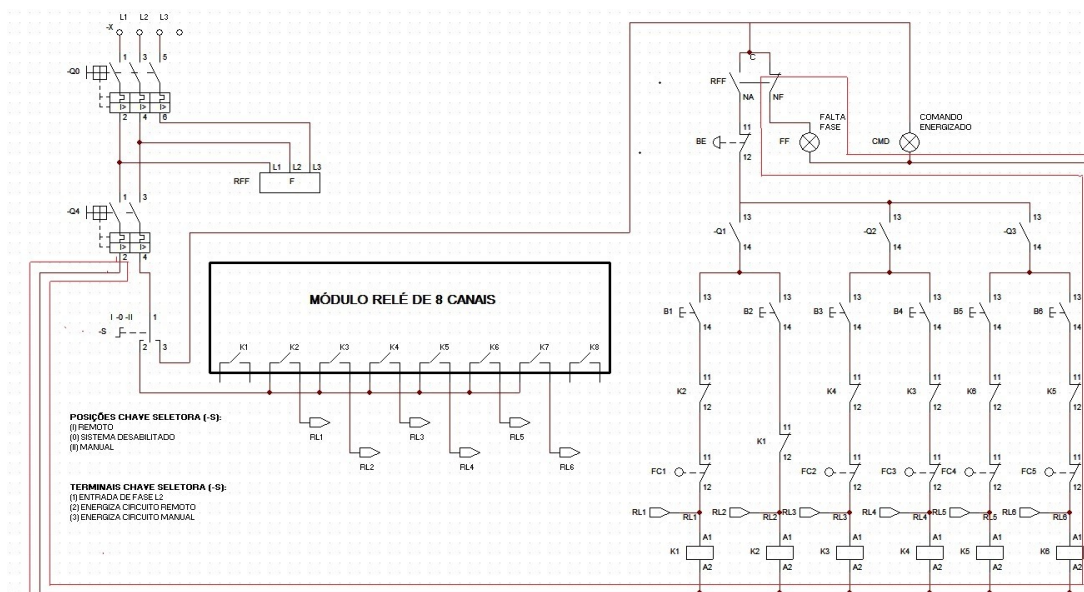
3.2.6 Integração do Sistema Remoto ao Circuito de Comando

Após o desenvolvimento individual dos subsistemas elétrico e eletrônico, foi realizada a etapa de integração entre o sistema de controle remoto e o circuito de comando da bancada experimental. Essa etapa teve como objetivo permitir que os comandos enviados pelo aplicativo móvel tivessem o mesmo efeito elétrico das botoeiras físicas, acionando diretamente os contatores responsáveis pelos movimentos da ponte rolante.

A integração foi realizada por meio da interligação do módulo de relés às bobinas dos contatores K1 a K6. Nesse arranjo, cada saída do módulo de relés atua como um contato auxiliar de acionamento, reproduzindo eletricamente o fechamento de uma botoeira convencional. Dessa forma, quando um relé é energizado pelo ESP8266, ele fecha o circuito de comando correspondente, permitindo a energização da bobina do contator associado à função selecionada.

A Figura 32 apresenta a estrutura elétrica adotada para a integração entre o sistema remoto e o circuito de comando. O diagrama representa três blocos principais: o sistema de controle (ESP8266 e módulo de relés), o circuito de comando elétrico e os contatores responsáveis pelo acionamento dos motores. O fluxo de atuação ocorre da esquerda para a direita, iniciando com o comando digital, passando pela interface de relés e finalizando na energização das bobinas dos contatores.

Figura 32 – Diagrama elétrico integrado entre sistema remoto e circuito de comando



Fonte: Autoria própria.

Para garantir a organização operacional do sistema, foi definida uma chave seletora de três posições responsável pela definição do modo de operação. Neste contexto, o modo

de operação corresponde à forma de acionamento do sistema, podendo ser: controle manual por botoeiras, controle remoto via aplicativo ou sistema desabilitado para manutenção. Essa seleção garante que apenas uma fonte de comando atue sobre o circuito por vez, evitando acionamentos simultâneos entre diferentes formas de controle.

Do ponto de vista elétrico, a chave seletora atua como elemento de comutação do circuito de comando, direcionando a alimentação das bobinas dos contatores para o conjunto de botoeiras ou para o módulo de relés, dependendo da posição selecionada. Devido a restrições técnicas e físicas do protótipo experimental, algumas decisões de projeto foram adotadas para viabilizar a integração do sistema. A primeira delas foi a utilização direta do módulo de relés conectado aos circuitos das bobinas dos contatores, sem a inclusão de interfaces intermediárias adicionais, como circuitos de acoplamento ou módulos isoladores dedicados. Essa decisão foi possível devido à compatibilidade elétrica entre os níveis de tensão do módulo de relés e o circuito de comando existente.

Outra adequação foi a utilização de uma chave seletora de três posições para gerenciamento dos modos de operação, ao invés de um sistema automatizado de comutação. Essa escolha foi motivada pela simplicidade de implementação e pela necessidade de garantir uma comutação manual e visível entre as fontes de comando durante os testes experimentais.

Essas decisões não alteram a lógica funcional do sistema, uma vez que o princípio de acionamento permanece baseado na energização das bobinas dos contatores por meio de sinais de comando independentes. Dessa forma, o sistema mantém sua equivalência funcional entre controle manual e controle remoto, preservando as condições de segurança e intertravamento já implementadas no circuito de comando.

3.2.7 Critérios de Validação

A validação do sistema foi realizada por meio de testes funcionais executados na bancada experimental, com o objetivo de verificar se o comportamento real do sistema corresponde ao comportamento previsto durante a etapa de projeto. Esses testes foram aplicados individualmente a cada função operacional, tanto no modo de comando manual quanto no modo de controle remoto.

O processo de validação consistiu na observação direta do funcionamento dos motores, da atuação dos contatores e do comportamento dos intertravamentos elétricos. Para cada condição testada, foi verificado se o sistema apresentava a resposta esperada em termos de sentido de rotação dos motores, energização dos contatores e bloqueio de comandos conflitantes.

Dessa forma, os critérios de validação foram definidos com base em evidências observáveis durante a operação do sistema, permitindo confirmar o correto funcionamento

das funções implementadas na bancada. A Tabela 5 apresenta os critérios adotados para a validação funcional de cada operação do sistema.

Tabela 5 – Critérios de validação funcional do sistema

Função	Critério de validação
Avançar	Os motores responsáveis pelo deslocamento longitudinal devem operar no sentido de avanço, com energização do contator K1 e bloqueio do contator K2.
Recuar	Os motores responsáveis pelo deslocamento longitudinal devem operar no sentido de recuo, com energização do contator K2 e bloqueio do contator K1.
Subir	O motor de elevação deve operar no sentido de subida, com energização do contator K3 e bloqueio do contator K4.
Descer	O motor de elevação deve operar no sentido de descida, com energização do contator K4 e bloqueio do contator K3.
Mover para a esquerda	O motor responsável pelo deslocamento lateral deve operar no sentido correspondente ao movimento para a esquerda, com energização do contator K5 e bloqueio do contator K6.
Mover para a direita	O motor responsável pelo deslocamento lateral deve operar no sentido correspondente ao movimento para a direita, com energização do contator K6 e bloqueio do contator K5.
Parada	Todos os contadores devem permanecer desenergizados e nenhum motor deve apresentar movimento.
Intertravamento	Não deve ser possível energizar simultaneamente os pares K1–K2, K3–K4 ou K5–K6.
Controle remoto	Os comandos executados pelo aplicativo devem produzir os mesmos resultados observados no acionamento manual.
Seleção de modo	A chave seletora deve permitir apenas um modo de operação por vez (manual, remoto ou desligado).

Durante os ensaios experimentais, cada função foi acionada individualmente nos modos manual e remoto, sendo observado o comportamento dos motores e a atuação dos dispositivos de proteção. Considerou-se validada cada função cujo comportamento observado coincidiu com os critérios estabelecidos na tabela.

4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da implementação do sistema de comando da ponte rolante, contemplando a validação da lógica de intertravamento, o funcionamento da bancada física, a comunicação entre o aplicativo móvel e o microcontrolador ESP8266, bem como a análise da integração entre os subsistemas.

4.1 Validação do Sistema de Comando Elétrico

4.1.1 Resultados da Simulação no CAdE_SIMU

Como etapa preliminar à implementação física da bancada, o circuito desenvolvido foi submetido a simulações no software CAdE_SIMU. Essa etapa permitiu verificar o comportamento da lógica de comando projetada e identificar possíveis inconsistências antes da montagem do sistema.

Durante as simulações foram realizados testes envolvendo os comandos de avanço, recuo, subida, descida, deslocamento lateral à esquerda, deslocamento lateral à direita e parada, bem como diferentes combinações de acionamento. Observou-se que os intertravamentos elétricos atuaram conforme previsto, impedindo a energização simultânea dos contatores associados a movimentos opostos.

Também foi verificado que os comandos executavam as funções planejadas, produzindo os estados esperados de acionamento para cada movimento da ponte rolante. Dessa forma, os resultados obtidos na simulação indicaram que a lógica de comando desenvolvida estava coerente com os requisitos funcionais estabelecidos durante a etapa de projeto.

A Figura 33 apresenta o diagrama elétrico final desenvolvido no software CAdE_SIMU e utilizado como referência para a implementação da bancada experimental.

4.1.2 Protótipo físico do sistema

A implementação física do sistema desenvolvido neste trabalho é apresentada na Figura 34, correspondendo ao resultado final da montagem da bancada experimental.

O protótipo físico representa a materialização do sistema de comando elétrico projetado em etapas anteriores, contemplando os circuitos de potência e comando implementados na bancada experimental.

A organização do protótipo foi definida com base em boas práticas de montagem de painéis elétricos industriais, adotando critérios de segregação entre circuitos de potência e comando, organização do cabeamento conforme a função de cada circuito, minimização

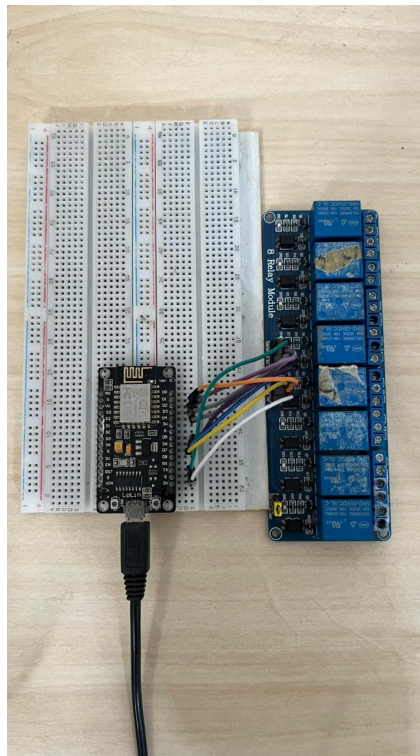
A lógica de intertravamento foi implementada diretamente no circuito de comando por meio de contatos auxiliares normalmente fechados, garantindo que não ocorra energização simultânea de contadores associados a movimentos opostos.

Essa configuração assegura que o sistema opere de forma segura e coerente com os princípios de comandos elétricos industriais, permitindo a validação do comportamento eletromecânico da bancada experimental.

4.1.3 Integração do microcontrolador ESP8266 com o módulo de relés

A interface entre o sistema de controle remoto e o circuito elétrico foi implementada por meio da conexão do microcontrolador ESP8266 ao módulo de relés de 8 canais, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Integração entre o ESP8266 e o módulo de relés de 8 canais



Fonte: Autoria própria.

O módulo de relés atua como interface de potência entre o microcontrolador e o circuito de comando, permitindo o acionamento seguro das bobinas dos contadores.

4.1.4 Testes na Bancada Física

Após a etapa de verificação da lógica de comando em ambiente de simulação, foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de validar o funcionamento do sistema desenvolvido em condições reais de operação.

A estrutura experimental utilizada durante os testes é apresentada na Figura 36.

Figura 36 – Estrutura experimental utilizada na validação do sistema de comando da ponte rolante



Fonte: Autoria própria.

Para a realização dos testes experimentais, foi utilizada uma bancada didática industrial disponível no laboratório, do tipo WEG, a qual foi empregada como infraestrutura de suporte para alimentação e operação do sistema. Essa bancada foi responsável pela disponibilização da alimentação trifásica necessária ao funcionamento dos motores utilizados nos ensaios, garantindo condições compatíveis com aplicações industriais em escala reduzida.

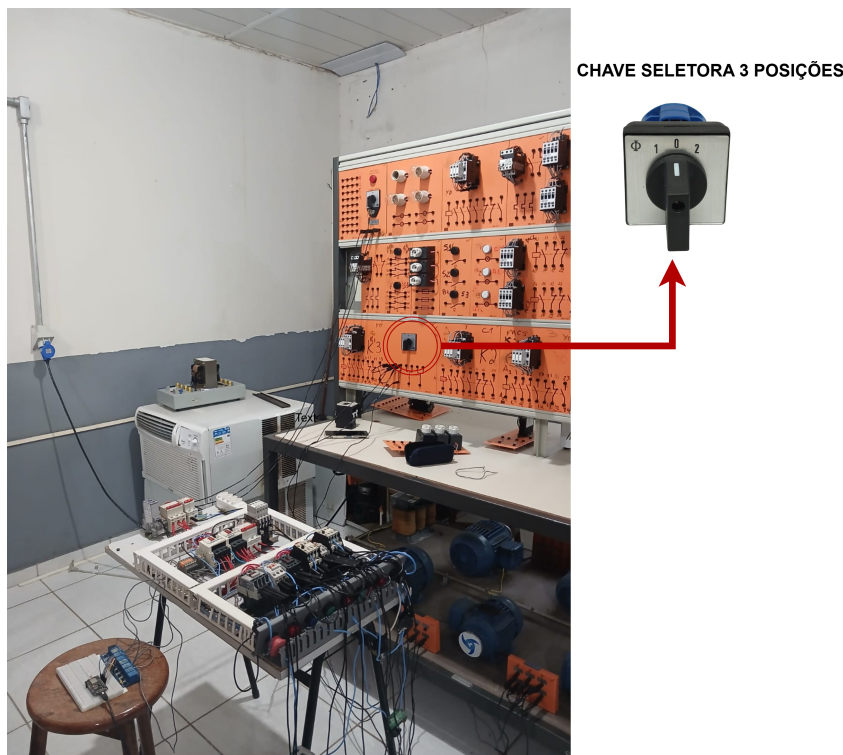
Além da função de alimentação, a bancada WEG também possuía uma chave seletora de três posições, a qual foi utilizada para definir o modo de operação do sistema. As posições da chave correspondiam ao modo manual, ao modo remoto e à condição de desligamento do circuito de comando.

No modo manual, o acionamento da ponte rolante era realizado exclusivamente por meio das botoeiras instaladas na bancada, permitindo a operação convencional do sistema. No modo remoto, os comandos enviados pelo aplicativo móvel eram processados pelo microcontrolador ESP8266, que acionava o módulo de relés e reproduzia eletricamente os comandos das botoeiras sobre o circuito de comando. Na posição de desligamento, tanto o acionamento manual quanto o remoto permaneciam desabilitados, impedindo qualquer operação do sistema.

A utilização da chave seletora permitiu alternar de forma simples e segura entre as diferentes modalidades de operação, garantindo que apenas um método de acionamento permanecesse ativo por vez. Dessa forma, evitou-se a possibilidade de comandos simultâneos provenientes das botoeiras e do aplicativo, preservando a lógica de funcionamento do circuito e aumentando a segurança durante a realização dos testes experimentais.

A Figura 37 apresenta a chave seletora utilizada para a seleção do modo de operação do sistema.

Figura 37 – Chave seletora utilizada para seleção do modo de operação do sistema.



Fonte: Autoria própria.

O conjunto experimental do sistema desenvolvido foi conectado a essa infraestrutura por meio do circuito de comando implementado, permitindo que os acionamentos fossem realizados tanto pela interface manual quanto pelo sistema remoto, conforme a posição selecionada na chave da bancada.

Durante os ensaios, verificou-se o funcionamento adequado dos motores e dos intertravamentos elétricos em ambas as condições de operação. Os resultados obtidos indicaram que o sistema respondeu corretamente aos comandos enviados, mantendo comportamento coerente com o previsto em projeto e sem ocorrência de falhas durante os testes.

Também foram realizados testes específicos para validação dos intertravamentos elétricos, nos quais se tentou executar comandos conflitantes simultaneamente. Os resultados demonstraram que o sistema bloqueou corretamente essas condições indevidas, evidenciando o funcionamento adequado da lógica de proteção implementada e assegurando maior segurança operacional.

A Tabela 6 apresenta o comportamento observado para cada comando implementado durante os testes realizados na bancada.

Os resultados demonstram que todos os comandos implementados apresentaram

Tabela 6 – Validação funcional dos comandos implementados

Comando	Resultado observado	Status
Avançar	Motor acionado corretamente	Aprovado
Recuar	Inversão realizada corretamente	Aprovado
Subir	Elevação acionada corretamente	Aprovado
Descer	Descida acionada corretamente	Aprovado
Esquerda	Movimento lateral executado	Aprovado
Direita	Movimento lateral executado	Aprovado
Parar	Desligamento geral executado	Aprovado

funcionamento adequado, com resposta coerente entre acionamento e comportamento esperado dos motores.

Além da validação funcional dos comandos, foram realizados testes específicos para análise da lógica de intertravamento, com o objetivo de verificar a prevenção de acionamentos simultâneos incompatíveis. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Verificou-se que o sistema bloqueou corretamente os comandos conflitantes, evidenciando a eficácia da lógica de intertravamento implementada.

De forma geral, os resultados indicam que o sistema apresenta comportamento estável e confiável, reproduzindo de forma consistente a lógica de operação de uma ponte rolante em escala de bancada.

4.1.5 Validação do Sistema de Controle Remoto

O sistema de controle remoto foi avaliado por meio da comunicação entre o aplicativo móvel e o microcontrolador ESP8266, configurado em modo *Access Point*. Os testes foram realizados em ambiente de laboratório, com distância aproximada de 11,5 m entre o dispositivo móvel e a bancada experimental.

Durante os ensaios, verificou-se que todos os comandos enviados pelo aplicativo foram corretamente recebidos e processados pelo ESP8266, acionando os respectivos relés e reproduzindo o mesmo comportamento observado no acionamento manual realizado pelas botoeiras.

A resposta do sistema remoto foi comparada diretamente ao acionamento em modo manual, utilizando a chave seletora para alternar entre as duas formas de operação. Observou-se que não houve diferença perceptível no tempo de resposta entre os modos manual e remoto, uma vez que a comunicação ocorreu integralmente em rede local, sem dependência de acesso à Internet. Nessas condições, o tempo de transmissão das requisições HTTP ocorreu na ordem de milissegundos, sendo inferior ao tempo de reação humana e, portanto, imperceptível durante a operação do sistema.

Tabela 7 – Validação dos intertravamentos elétricos

Combinação testada	Resultado esperado	Resultado obtido
Avançar + Recuar	Bloqueio simultâneo	Conforme esperado
Subir + Descer	Bloqueio simultâneo	Conforme esperado
Esquerda + Direita	Bloqueio simultâneo	Conforme esperado
Avançar + Subir	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Avançar + Descer	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Recuar + Subir	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Recuar + Descer	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Avançar + Esquerda	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Avançar + Direita	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Recuar + Esquerda	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Recuar + Direita	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Subir + Esquerda	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Subir + Direita	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Descer + Esquerda	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado
Descer + Direita	Operação simultânea permitida (eixos independentes)	Conforme esperado

Além disso, não foram identificadas falhas de comunicação, perdas de pacotes ou interrupções durante os testes realizados, evidenciando a estabilidade da comunicação entre o aplicativo e o microcontrolador no modo *Access Point*.

4.1.6 Testes do ESP8266 e do Módulo de Relés

Após a validação do sistema de comando elétrico, foram realizados testes isolados no sistema embarcado, com o objetivo de verificar o funcionamento do microcontrolador ESP8266 e sua comunicação com o módulo de relés.

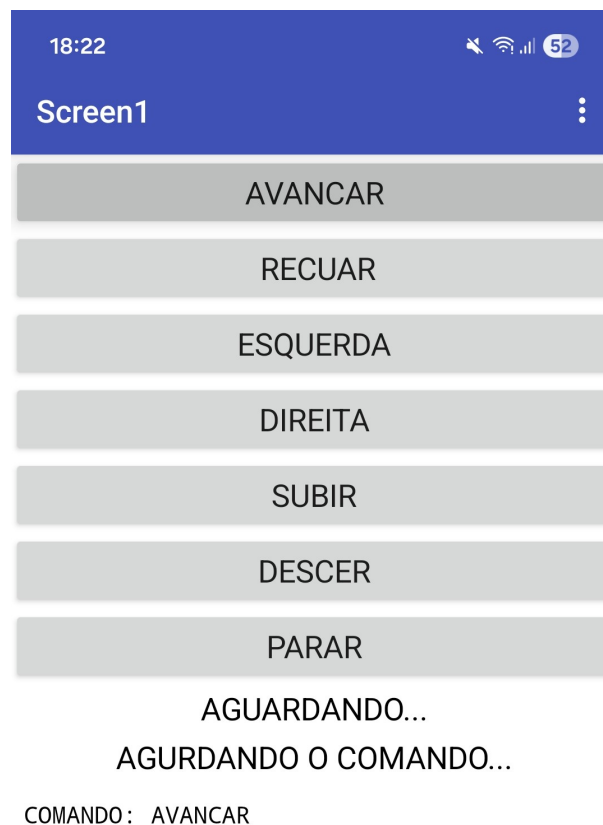
Durante os testes, comandos foram enviados ao microcontrolador, observando-se o acionamento correto das saídas digitais e, conseqüentemente, dos relés correspondentes. Não foram identificadas falhas de acionamento ou inconsistências operacionais, indicando funcionamento adequado da interface entre o sistema digital e o circuito de comando.

4.1.7 Testes do Aplicativo Móvel

O aplicativo desenvolvido foi submetido a testes funcionais, avaliando a comunicação com o ESP8266 por meio de rede Wi-Fi.

Observou-se que todos os comandos enviados pelo aplicativo foram corretamente recebidos e processados pelo microcontrolador, mantendo correspondência direta com as funções previamente implementadas nas botoeiras físicas. A interface utilizada durante os testes é apresentada na Figura 38.

Figura 38 – Interface do aplicativo móvel utilizada nos testes de envio de comandos



Fonte: Autoria própria.

O tempo de resposta entre o envio do comando e o acionamento do relé foi considerado adequado para aplicações em bancada, não sendo observados atrasos significativos durante os testes realizados. Esse comportamento foi verificado considerando a comunicação em rede local Wi-Fi, com o dispositivo móvel operando a uma distância média de aproximadamente 11,5 m do módulo ESP8266, o que não comprometeu o desempenho do sistema.

Adicionalmente, foram realizados testes de alcance da comunicação sem fio. O sistema permaneceu funcional mesmo com o afastamento do operador em diferentes

pontos do ambiente de laboratório, incluindo a região próxima à porta do laboratório, situada a aproximadamente 11,5 m da bancada experimental. Nessas condições, não foram observadas perdas de comunicação ou falhas no envio de comandos, indicando estabilidade satisfatória da rede Wi-Fi no contexto de aplicação.

É importante destacar que a integridade operacional do sistema em relação a comandos conflitantes não depende da aplicação móvel, sendo garantida pelo circuito de comando elétrico por meio de intertravamentos implementados com contatos auxiliares normalmente fechados dos contatores. Dessa forma, o aplicativo atua exclusivamente como interface de envio de comandos, enquanto a segurança lógica de acionamento é assegurada em nível eletromecânico no sistema de potência e comando.

4.1.8 Integração do sistema

Após a validação individual dos subsistemas, foi realizada a integração entre o sistema de comando elétrico e o sistema de controle remoto baseado no microcontrolador ESP8266.

A implementação física final do sistema integrado é apresentada na Figura 39, evidenciando a conexão entre o circuito de comando elétrico, o módulo de relés e o sistema de controle remoto.

Conforme observado na Figura 39, o microcontrolador ESP8266 encontra-se interligado ao módulo de relés, responsável por reproduzir eletricamente os comandos enviados pelo aplicativo móvel. As saídas do módulo de relés foram conectadas ao circuito de comando da bancada, especificamente aos terminais das bobinas dos contatores (entrada A1), de forma a permitir o acionamento indireto das funções de movimentação da ponte rolante.

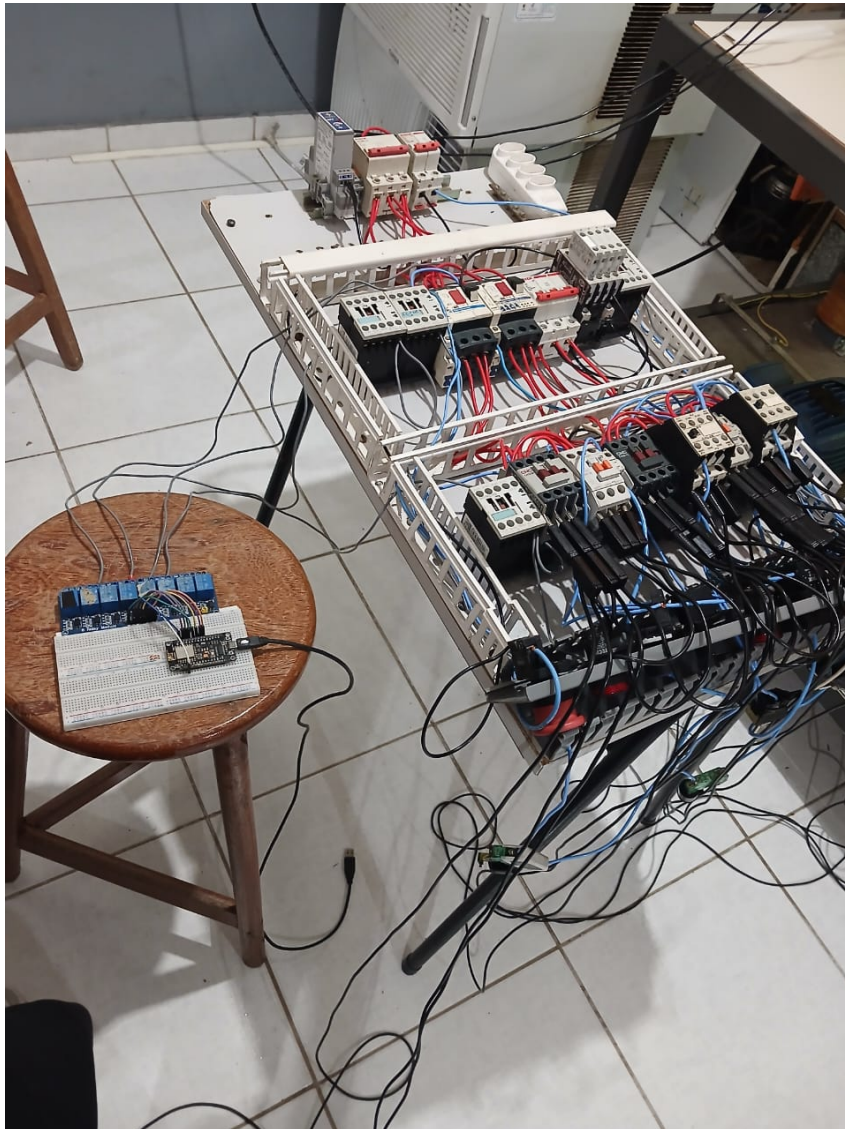
Nesse arranjo, o sinal de comando é gerado pelo aplicativo móvel e enviado ao microcontrolador ESP8266, que realiza o processamento da requisição e ativa a saída digital correspondente. Essa saída energiza o relé associado, o qual realiza o fechamento do circuito de comando, simulando o acionamento de uma botoeira convencional.

Dessa forma, o controle não atua diretamente sobre o circuito de potência, mas sim sobre o circuito de comando, garantindo isolamento elétrico e compatibilidade entre os níveis de tensão do sistema embarcado e os componentes industriais do protótipo.

Essa arquitetura permitiu a implementação do controle remoto sem necessidade de alterações na lógica original do circuito elétrico de comando, uma vez que os relés foram utilizados apenas como elementos de interface entre o sistema embarcado e os contatores.

Durante os testes integrados, verificou-se o funcionamento adequado da comunicação entre aplicativo, ESP8266 e circuito de comando, observando-se o acionamento correto das funções implementadas.

Figura 39 – Protótipo físico desenvolvido para o sistema de comando da ponte rolante



Fonte: Autoria própria.

Além disso, a lógica de intertravamento previamente desenvolvida foi preservada durante o acionamento remoto, impedindo a execução simultânea de comandos conflitantes e mantendo as condições de segurança operacional.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da integração entre sistemas eletromecânicos convencionais e tecnologias digitais embarcadas, permitindo o controle remoto funcional da ponte rolante de forma segura e consistente.

4.1.9 Discussão dos Resultados

A análise dos resultados permite observar que o sistema desenvolvido apresentou comportamento coerente com os requisitos operacionais de uma ponte rolante, especialmente no que se refere à confiabilidade dos comandos e à segurança operacional. A lógica de intertravamento demonstrou-se eficaz na prevenção de comandos conflitantes, tanto

em ambiente de simulação quanto na implementação física. Durante os testes, verificou-se que comandos opostos não puderam ser acionados simultaneamente, evidenciando o funcionamento adequado do circuito de proteção implementado.

A utilização de botoeiras de pulso, sem a aplicação de contatos de selo, mostrou-se adequada à proposta do sistema, uma vez que a manutenção da lógica de operação foi assegurada pelo próprio circuito de comando e intertravamento.

No sistema de controle remoto, verificou-se que a comunicação entre aplicativo e microcontrolador ocorreu de forma estável, com resposta satisfatória aos comandos enviados. Foram realizados testes de operação tanto nas proximidades da bancada quanto a aproximadamente 11,5 m de distância, incluindo a região externa ao laboratório, mantendo-se a comunicação funcional e sem perdas perceptíveis de comando. A equivalência funcional entre os modos de operação local e remoto reforça a consistência da arquitetura desenvolvida, demonstrando que a integração digital não comprometeu a lógica original do sistema elétrico.

A integração entre sistemas eletromecânicos e tecnologias embarcadas evidencia o potencial de aplicação de soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT) em sistemas industriais, possibilitando maior flexibilidade operacional, supervisão remota e futuras expansões.

Adicionalmente, o sistema foi apresentado em ambiente acadêmico por meio de uma aula expositiva seguida de demonstração prática do protótipo desenvolvido. A apresentação foi realizada no dia 14 de abril, no laboratório NUT, durante a disciplina de Automação Industrial, para a turma de Engenharia da Computação. Nesta ocasião, foi demonstrado o funcionamento completo do sistema, com ênfase na lógica de intertravamento elétrico e no comportamento do sistema de comando durante os acionamentos.

Observou-se que a demonstração contribuiu para a visualização prática de conceitos relacionados a comandos elétricos, intertravamentos e automação industrial, facilitando a compreensão do funcionamento do sistema desenvolvido.

De forma geral, os resultados demonstram que o sistema proposto foi capaz de reproduzir, em escala experimental, a lógica de operação de uma ponte rolante, integrando com sucesso comandos elétricos convencionais e tecnologias digitais embarcadas. A solução apresentou desempenho consistente, segurança operacional e potencial para futuras melhorias e expansões.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e construir um protótipo experimental de comando elétrico aplicado à lógica operacional de uma ponte rolante, integrando acionamento convencional e controle remoto por meio de um microcontrolador ESP8266 e de um aplicativo móvel desenvolvido na plataforma MIT App Inventor.

Inicialmente, foi realizada a modelagem do sistema no software CAdSIMU, permitindo a definição da lógica de comando, dos circuitos de potência e dos intertravamentos elétricos. Essa etapa de simulação auxiliou na verificação prévia do funcionamento do sistema e na realização de ajustes antes da implementação física da bancada.

Em seguida, foi realizada a construção do protótipo experimental com componentes utilizados em comandos elétricos industriais, como contatores, relés auxiliares, disjuntores e botoeiras. Os testes realizados comprovaram o funcionamento adequado dos movimentos implementados, bem como a correta atuação dos intertravamentos elétricos, garantindo a não simultaneidade de comandos incompatíveis e contribuindo para a segurança operacional do sistema.

A integração do sistema de controle remoto permitiu a execução dos mesmos comandos disponíveis no modo manual por meio de um dispositivo móvel conectado à rede Wi-Fi criada pelo ESP8266. Os resultados obtidos evidenciaram a comunicação eficiente entre aplicativo, microcontrolador e circuito de comando, mantendo a lógica operacional e os mecanismos de proteção previamente implementados.

Com base nos testes realizados, verificou-se que o sistema desenvolvido foi capaz de reproduzir, em escala experimental, os princípios de acionamento, reversão e intertravamento presentes em pontes rolantes e em sistemas de movimentação industrial. Dessa forma, os objetivos propostos foram alcançados, demonstrando a viabilidade técnica.

Além disso, o desenvolvimento do projeto evidenciou a importância das atividades práticas para a consolidação dos conhecimentos em comandos elétricos, acionamentos de motores e automação industrial. O protótipo construído configura-se como uma ferramenta didática de apoio ao ensino, possibilitando a integração entre teoria e prática e contribuindo para a formação acadêmica na área de engenharia elétrica.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a evolução do protótipo para uma implementação em painel de comando industrial definitivo, com a adoção de sensores para monitoramento do estado dos motores e realimentação do sistema, possibilitando maior capacidade de supervisão e controle. Sugere-se ainda a inclusão de funções de parada de emergência em modo remoto, mecanismos de sinalização de falhas e indicadores visuais do modo de operação, visando aumentar a segurança, confiabilidade e funcionalidade do

sistema.

5.1 Limitações do Sistema

Embora o sistema tenha apresentado funcionamento satisfatório, algumas limitações foram identificadas durante o desenvolvimento e validação experimental.

Atualmente, o sistema opera em malha aberta durante o modo remoto, não possuindo realimentação automática do estado operacional dos motores. Dessa forma, o usuário não recebe confirmação direta do funcionamento efetivo das cargas acionadas, ou seja, não há retorno físico ou elétrico que indique se o movimento foi efetivamente executado pelo motor após o envio do comando. Em aplicações industriais reais, essa confirmação é geralmente realizada por meio de sensores de corrente, sensores de rotação, ou contatos auxiliares nos contatores, permitindo ao sistema ou ao operador validar o estado real da carga. Em uma possível expansão do protótipo, essa funcionalidade poderia ser implementada por meio de sensores acoplados aos motores ou aos eixos mecânicos, com leitura pelo microcontrolador e indicação no aplicativo ou em LEDs de status na bancada.

Além disso, verificou-se que a função de parada de emergência encontra-se disponível apenas em operação manual, por meio das botoeiras físicas, não estando implementada na interface remota do aplicativo. Isso ocorre porque o circuito de segurança foi mantido prioritariamente no nível elétrico, garantindo desligamento direto da alimentação dos contatores sem depender da comunicação via rede. A implementação dessa função no modo remoto exigiria uma rotina de interrupção imediata no ESP8266, com envio de comando prioritário independente do estado do sistema, além de mecanismos de segurança para garantir que o comando de emergência tenha prioridade absoluta mesmo em caso de falhas de comunicação ou atraso de rede. Em uma futura versão, essa função poderia ser implementada por meio de um botão dedicado no aplicativo com lógica de prioridade máxima no microcontrolador, acionando diretamente o desligamento de todas as saídas.

Também não foram implementados mecanismos automáticos de sinalização de falhas ou indicação do modo de operação ativo, fatores que podem ser relevantes em futuras expansões do sistema. Esses recursos poderiam ser adicionados por meio de LEDs indicadores no painel de controle ou pela interface do aplicativo, permitindo ao operador identificar de forma imediata o estado operacional do sistema, aumentando a segurança e a confiabilidade durante o uso.

5.2 Trabalhos Futuros

Como possibilidades de aprimoramento e expansão do sistema desenvolvido, sugerem-se:

- Implementação de sensores de corrente, sensores Hall ou dispositivos equivalentes para monitoramento em tempo real do funcionamento dos motores, permitindo a realimentação do sistema quanto ao estado de operação, como presença de corrente, indicação de motor energizado ou detecção de falhas de acionamento durante a execução dos comandos, sem alteração da lógica de comando em malha aberta.
- Desenvolvimento de um mecanismo de parada de emergência acessível também em modo remoto, ampliando a segurança operacional do sistema;
- Implementação de alertas no aplicativo móvel para sinalização de parada de emergência e identificação de possíveis falhas de funcionamento;
- Inclusão de indicadores visuais na interface do aplicativo informando o modo de operação ativo do sistema, distinguindo entre operação manual e operação remota;
- Expansão da arquitetura de controle para integração com sensores adicionais, monitoramento remoto e estratégias mais avançadas de supervisão e diagnóstico.

Dessa forma, o sistema desenvolvido constitui uma base funcional para futuras implementações envolvendo automação industrial conectada, supervisão remota e aprimoramento de sistemas de comando elétrico aplicados à movimentação de cargas.

Referências

- ABB. *Relé falta de fase: entenda sua importância e funcionamento*. 2024. Acesso em: 25 maio 2026. Disponível em: <<https://loja.br.abb.com/blog/post/rele-falta-de-fase>>. Citado na página 26.
- BASSAI, M. R. *Aplicação de Chave Seccionadora (SF6) em Sistemas Smart Grid*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Citado na página 30.
- BREVIL. *Tudo que você precisa saber sobre ponte rolante*. 2025. Acesso em: 6 abr. 2026. Disponível em: <<https://www.brevil.ind.br/post/38/tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-ponte-rolante>>. Citado na página 18.
- BUCHINO, A. de A. et al. *Bancada Didática: Partida Direta em Motores Trifásicos*. Fernandópolis: [s.n.], 2023. Trabalho acadêmico. Citado na página 35.
- Engenhall. *NR 10 Atualizada 2025: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade*. 2025. Acesso em: 30 abr. 2026. Disponível em: <<https://engenhall.com.br/nr-10-norma-atualizada-2025-servicos-em-eletricidade/>>. Citado na página 21.
- Engenharia Adequada. *Dispositivo de intertravamento: o que é, exemplos, como funciona*. 2024. Disponível em: <<https://adequada.eng.br/dispositivo-intertravamento/>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 33.
- Ferroindústria. *O que é uma ponte rolante e como funciona*. 2026. Disponível em: <<https://ferroindustria.com.br/o-que-e-uma-ponte-rolante-e-como-funciona/>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.
- FRANCHI, C. M. *Acionamentos Elétricos*. 4. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 23.
- FRANCHI, C. M. *Sistemas de acionamento elétrico*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 24, 34 e 35.
- FREGONEZI, M. A. S. *Instalações Elétricas*. 2021. Acesso em: 25 maio 2026. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/fregonezi/instalacoes_eletricas.php>. Citado na página 24.
- MARTINS, G. d. S. et al. Análise estrutural de uma ponte rolante. *Revista Contemporânea*, v. 4, n. 12, p. 1–24, 2024. Citado na página 19.
- Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 11 - Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais*. 2025. Acesso em: 30 abr. 2026. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-paritaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes>>. Citado na página 21.
- MOREIRA, A. M. S.; SILVA, I. N. da; FONSECA, J. E. *Comandos Elétricos e Aplicação do CAdE_SIMU*. Fernandópolis: [s.n.], 2024. Citado 6 vezes nas páginas 22, 25, 27, 30, 36 e 44.

- NETO, A. L. L. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), *Projeto detalhado de uma ponte rolante para uma empresa metal mecânica*. João Pessoa: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13396/1/ALLN28062018.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.
- OLIVEIRA, A. B. d. M. *Comandos Elétricos: Fundamentos para o Ensino Técnico*. [S.l.: s.n.], 2024. Citado na página 25.
- PEREIRA, C. L. d. O. Projeto Final de Graduação, *Programação de Microcontroladores para a Comunicação com Aplicações Móveis Usando Bluetooth*. 2020. Acesso em: 30 abr. 2026. Disponível em: <<https://www-di.inf.puc-rio.br/~endler/students/ProjetosFinais/CarlosLeandro-2020.pdf>>. Citado na página 38.
- PINHEIRO, H. H. *Comandos Elétricos: Simbologia, Associação de Contatos e Conceitos Básicos*. s.d. Acesso em: 30 abr. 2026. Disponível em: <<https://docentes.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos-ii/conceitos-de-comandos-eletricos>>. Citado na página 31.
- RAMALHO, R. *Comandos Elétricos*. 2024. Acesso em: 11 jun. 2024. Disponível em: <<http://www.buzzero.com>>. Citado na página 29.
- Sala da Elétrica (Everton Moraes). *Comandos Elétricos: Principais fundamentos e aplicações*. 2026. Disponível em: <https://www.saladaeletrica.com.br/comandos-eletricos/?utm_source=www.google.com&xcod=1773170871125_17731710353166&sck=www.google.com>. Citado na página 22.
- SENAI/FIEMG. *Comandos Elétricos*. Belo Horizonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, 2010. Citado na página 28.
- SORDI, G. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), *Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante*. Lajeado: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/e7c67a8b-2cc8-484c-aacd-fb02d4e2964a/content>>. Citado na página 18.
- VENDRAMETTO, M. B. Trabalho de Conclusão de Curso, *Automação Residencial Utilizando Microcontrolador Arduino e Aplicativo Móvel*. 2018. Acesso em: 30 abr. 2026. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16818/1/PG_COADS_2018_2_07.pdf>. Citado na página 38.
- WEG. *RW – Relés de Sobrecarga Térmicos: Alta tecnologia e segurança na proteção de motores elétricos*. [s.n.], 2024. Acesso em: 25 maio 2026. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h3f/h86/WEG-reles-de-sobrecarga-termico-linha-rw-50042397-catalogo-portugues-br-dc.pdf>>. Citado na página 25.