

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

ANDERSON CÂNDIDO LEANDRO DA SILVA
JEAN PALMEIRA SANTOS

PONTE ROLANTE INTELIGENTE

São Paulo

2026

ANDERSON CÂNDIDO LEANDRO DA SILVA

JEAN PALMEIRA SANTOS

PONTE ROLANTE INTELIGENTE

Projeto tecnológico elaborado como requisito parcial para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial.

Orientador: Prof Dr. Flávio Santos de Souza

São Paulo

2026

RESUMO

A automação industrial tem desempenhado papel fundamental na modernização dos processos produtivos, especialmente nos sistemas de movimentação de cargas utilizados em ambientes industriais. Nesse contexto, as pontes rolantes são amplamente empregadas em setores como logística, metalurgia e manufatura, contribuindo para o aumento da eficiência operacional e da segurança no transporte de materiais. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo funcional de ponte rolante inteligente em escala didática, utilizando o microcontrolador Arduino Mega para controle e integração dos dispositivos eletrônicos do sistema. A metodologia adotada baseou-se em pesquisa aplicada de caráter experimental, envolvendo o desenvolvimento da estrutura mecânica, implementação do sistema de controle, integração de sensores e realização de testes operacionais. O protótipo foi projetado para executar movimentações nos eixos X, Y e Z, utilizando motores elétricos, sensores de fim de curso e dispositivos de sinalização. Além disso, foram realizados cálculos básicos de alimentação elétrica e dimensionamento dos componentes utilizados no sistema.

Palavras-chave: Ponte rolante didática. Arduino Mega. Controle de movimento. Supervisório.

ABSTRACT

Industrial automation has played a fundamental role in modernizing production processes, especially in material handling systems used in industrial environments. In this context, overhead cranes are widely used in sectors such as logistics, metallurgy, and manufacturing, contributing to increased operational efficiency and safety in material transport. This work aimed to develop a functional prototype of an intelligent overhead crane on a didactic scale, using the Arduino Mega microcontroller for control and integration of the system's electronic devices. The methodology adopted was based on applied research of an experimental nature, involving the development of the mechanical structure, implementation of the control system, integration of sensors, and operational testing. The prototype was designed to perform movements on the X, Y, and Z axes, using electric motors, limit switches, and signaling devices. In addition, basic calculations of electrical power supply and dimensioning of the components used in the system were performed.

Keywords: Didactic overhead crane. Arduino Mega. Motion control. Supervisory system.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
---------------------	---

1.1	Objetivo geral.....	1
1.1.1	Objetivos específicos.....	2
1.2	Justificativas.....	2
1.3	Delimitação do trabalho.....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	4
2.1	Automação industrial.....	6
2.2	Indústria 4.0.....	10
2.3	Sistemas de movimentação de cargas.....	12
2.4	Ponte rolante.....	15
2.5	Motores elétricos.....	17
2.6	Sensores industriais.....	21
2.7	Sensores de fim de curso.....	24
2.8	Microcontrolador arduino mega.....	27
2.9	Sistemas de controle e acionamento.....	30
2.10	Segurança em sistemas automatizados.....	32
3.	METODOLOGIA.....	36
3.1	Materiais utilizados no projeto.....	39
4	DESENVOLVIMENTO.....	42
4.1	Desenvolvimento da estrutura mecânica.....	42
4.2	Sistema elétrico e eletrônico.....	44
4.3	Programação e lógica de controle.....	48
4.4	Cálculos mecânicos e dimensionamento dos motores.....	51
5.	TESTES E RESULTADOS.....	54
5.1	Os casos desenvolvidos.....	54
5.1.1	Caso 01.....	54
5.1.2	Caso 02.....	55
5.1.3	Caso 03.....	55
5.1.4	Caso 04.....	55
5.2	Análise dos testes operacionais.....	55
5.3	Dificuldades Encontradas Durante O Desenvolvimento.....	56
6.	CONCLUSÃO.....	60

REFERÊNCIAS	61
-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

A automação industrial vem assumindo um papel cada vez mais importante nos processos produtivos, permitindo maior eficiência, segurança e controle operacional em diferentes setores industriais. Segundo Silva e Oliveira (2023), o avanço das tecnologias

aplicadas à automação tem contribuído diretamente para o aumento da produtividade e para a redução de falhas operacionais nos ambientes industriais. Com o avanço das tecnologias associadas à Indústria 4.0, sistemas automatizados passaram a integrar componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos capazes de executar operações de forma mais precisa e confiável (Santos et al., 2022). Nesse contexto, os sistemas de movimentação de cargas possuem grande relevância em ambientes industriais, especialmente as pontes rolantes, amplamente utilizadas no transporte de materiais pesados em setores como metalurgia, logística e armazenagem (Pereira; Costa, 2024).

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo funcional de ponte rolante inteligente em escala reduzida, utilizando o microcontrolador Arduino Mega como unidade principal de controle do sistema. De acordo com Martins e Almeida (2023), plataformas microcontroladas de baixo custo vêm sendo amplamente utilizadas em projetos didáticos e industriais devido à facilidade de implementação e integração com sensores e atuadores. O projeto contempla a integração entre motores elétricos, sensores de fim de curso, dispositivos de acionamento e componentes estruturais responsáveis pela movimentação da carga, permitindo a aplicação prática dos conceitos fundamentais de automação industrial, controle de movimento e integração eletromecânica (Rodrigues Et Al., 2025).

Durante o desenvolvimento do projeto foram identificados desafios relacionados principalmente à construção da estrutura mecânica, alinhamento dos componentes e integração entre os sistemas elétricos e eletrônicos. Essas dificuldades exigiram adaptações no projeto inicial, contribuindo para o aprimoramento do protótipo e para uma melhor compreensão dos processos envolvidos no desenvolvimento de sistemas automatizados voltados à movimentação de cargas industriais. Conforme destacado por Carvalho e Lima (2024), projetos experimentais na área de automação frequentemente demandam reformulações técnicas ao longo do desenvolvimento, especialmente em aplicações que envolvem integração entre hardware, estrutura mecânica e sistemas de controle.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um protótipo funcional de ponte rolante inteligente em escala reduzida, utilizando o microcontrolador Arduino Mega como unidade principal de controle,

visando aplicar conceitos de automação industrial, controle de movimento e integração entre sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos.

1.1.1 Objetivos específicos

- Desenvolver a estrutura mecânica da ponte rolante em escala reduzida;
- Implementar o sistema de controle utilizando o microcontrolador Arduino Mega;
- Integrar motores elétricos responsáveis pela movimentação do sistema;
- Implementar sensores de fim de curso para controle e segurança operacional;
- Desenvolver a lógica de programação responsável pelo funcionamento do protótipo;
- Realizar a integração entre os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos;
- Executar testes operacionais para validação do funcionamento do sistema;
- Avaliar o desempenho do protótipo durante as etapas de movimentação da carga.

1.2 Justificativas

O desenvolvimento de sistemas automatizados aplicados à movimentação de cargas possui grande relevância no cenário industrial contemporâneo, especialmente devido à crescente demanda por processos mais eficientes, seguros e produtivos. Segundo Ferreira e Costa (2024), a automação industrial tem contribuído diretamente para a otimização das operações logísticas e produtivas, reduzindo falhas humanas e aumentando a confiabilidade dos sistemas industriais. Nesse contexto, as pontes rolantes destacam-se como equipamentos fundamentais em setores industriais que necessitam realizar o transporte de materiais pesados de forma rápida e segura.

Além da aplicação industrial, a utilização de protótipos didáticos em instituições de ensino tecnológico apresenta importante contribuição para o processo de aprendizagem dos estudantes. De acordo com Martins et al. (2023), o desenvolvimento de projetos práticos favorece a integração entre teoria e prática, permitindo maior compreensão dos conceitos relacionados à automação, eletrônica e controle de sistemas. Dessa forma, a

construção de um protótipo funcional de ponte rolante inteligente possibilita a aplicação prática dos conteúdos estudados ao longo do curso de Automação Industrial.

Outro fator relevante está relacionado à utilização de plataformas microcontroladas de baixo custo, como o Arduino Mega, que vêm sendo amplamente empregadas em projetos acadêmicos e aplicações experimentais devido à facilidade de programação, integração com sensores e acessibilidade financeira (Rodrigues; Almeida, 2025). Segundo Silva e Pereira (2022), essas tecnologias permitem o desenvolvimento de soluções didáticas eficientes, aproximando os estudantes das tecnologias utilizadas nos ambientes industriais modernos.

Além disso, durante o desenvolvimento do projeto foi possível identificar desafios reais relacionados à construção mecânica, integração eletroeletrônica e implementação da lógica de controle do sistema. Essas dificuldades contribuíram para o aprimoramento técnico do projeto e para uma melhor compreensão dos processos envolvidos no desenvolvimento de sistemas automatizados industriais. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), projetos experimentais voltados à automação industrial proporcionam experiências práticas fundamentais para a formação profissional dos estudantes da área tecnológica.

1.3 Delimitação do trabalho

O presente trabalho limita-se ao desenvolvimento de um protótipo de ponte rolante inteligente em escala reduzida, com finalidade exclusivamente didática e acadêmica. O projeto foi desenvolvido com foco na aplicação de conceitos relacionados à automação industrial, controle de movimento e integração eletromecânica, não possuindo finalidade de utilização em ambiente industrial real. Segundo Oliveira e Costa (2023), protótipos didáticos possuem como principal objetivo demonstrar conceitos técnicos e operacionais de forma simplificada, permitindo maior compreensão dos sistemas automatizados.

O sistema desenvolvido utiliza o microcontrolador Arduino Mega como unidade principal de controle, integrando sensores de fim de curso, motores elétricos, dispositivos de sinalização e componentes estruturais responsáveis pela movimentação da carga. Entretanto, o projeto não contempla sistemas industriais avançados, como controladores lógicos programáveis industriais (CLPs), redes industriais complexas, sistemas

redundantes de segurança ou aplicações supervisórias de grande porte (SANTOS et al., 2024).

Além disso, devido às limitações de tempo, recursos financeiros e complexidade estrutural, o protótipo foi desenvolvido em escala reduzida, utilizando materiais acessíveis e componentes de baixo custo. Durante o desenvolvimento do projeto também foram realizadas adaptações na proposta inicial, principalmente relacionadas à estrutura mecânica e integração dos componentes eletrônicos, visando garantir a viabilidade da construção e funcionamento do sistema (Ferreira; Lima, 2025).

O trabalho também não contempla cálculos estruturais avançados, análises industriais de resistência mecânica ou certificações técnicas exigidas para equipamentos industriais reais. Conforme destacado por Pereira e Almeida (2022), projetos acadêmicos experimentais frequentemente utilizam simplificações estruturais e operacionais para viabilizar o desenvolvimento didático e experimental do sistema.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A automação industrial representa um dos principais avanços tecnológicos aplicados aos processos produtivos modernos, permitindo maior controle, eficiência operacional e redução de falhas humanas em diferentes setores industriais. Segundo Silva e Oliveira (2023), a integração entre sistemas automatizados e dispositivos inteligentes tem contribuído diretamente para o aumento da produtividade industrial e otimização dos processos produtivos. A integração entre sistemas mecânicos, elétricos,

eletrônicos e computacionais possibilita o desenvolvimento de soluções automatizadas capazes de executar operações com maior precisão, repetibilidade e segurança (Ferreira Et Al., 2024).

Com o avanço da Indústria 4.0, os sistemas automatizados passaram a incorporar sensores, dispositivos de controle, redes de comunicação e sistemas inteligentes responsáveis pelo monitoramento e gerenciamento de processos industriais em tempo real. De acordo com Pereira e Costa (2022), a utilização de tecnologias inteligentes na indústria permite maior controle operacional e melhor tomada de decisão durante os processos produtivos. Nesse contexto, os sistemas de movimentação de cargas assumem papel importante em ambientes industriais, principalmente em aplicações que exigem deslocamento seguro e eficiente de materiais pesados (Santos; Lima, 2025). As pontes rolantes destacam-se entre os principais equipamentos utilizados para movimentação de cargas em setores industriais como siderurgia, metalurgia, logística, armazenagem e construção civil. Esses sistemas permitem o deslocamento de materiais em diferentes direções por meio da integração entre motores elétricos, mecanismos estruturais, sensores e sistemas de controle, possibilitando maior produtividade operacional e redução de esforços manuais durante os processos de transporte interno (Carvalho Et Al., 2024).

Além dos componentes mecânicos, o funcionamento de uma ponte rolante depende diretamente da integração entre dispositivos elétricos e eletrônicos responsáveis pelo acionamento, controle e segurança operacional do sistema. Sensores de fim de curso, motores elétricos, relés, sistemas de alimentação e controladores programáveis são elementos fundamentais para garantir o funcionamento adequado da estrutura e limitar seus movimentos durante a operação. Segundo Rodrigues et al. (2026), os sensores industriais desempenham papel essencial na prevenção de falhas operacionais e no controle seguro dos movimentos em sistemas automatizados.

Figura 1 – Ponte rolante utilizada na Usina Hidrelétrica Sinop



Fonte: GC Notícias (2017).

O desenvolvimento de protótipos em escala reduzida permite analisar de forma prática os princípios de funcionamento desses sistemas automatizados, possibilitando a aplicação de conhecimentos relacionados à programação, controle de movimento, integração eletromecânica e automação industrial. Conforme destacado por Martins e Almeida (2023), projetos didáticos experimentais contribuem significativamente para a formação técnica dos estudantes, permitindo maior aproximação entre teoria e prática. Dessa forma, o presente trabalho busca utilizar conceitos teóricos e práticos para o desenvolvimento de uma ponte rolante inteligente baseada em Arduino Mega, permitindo compreender os desafios envolvidos na integração de sistemas automatizados voltados à movimentação de cargas.

2.1 Automação industrial

A automação industrial pode ser definida como a utilização de tecnologias, sistemas de controle e dispositivos eletrônicos capazes de executar processos industriais de maneira automática, reduzindo a necessidade de intervenção humana durante as operações produtivas. Segundo Silva e Oliveira (2023), a automação industrial possui como principal objetivo aumentar a produtividade, melhorar a eficiência operacional e reduzir falhas nos processos industriais. Seu principal objetivo está relacionado ao aumento da produtividade, melhoria da qualidade dos processos, redução de desperdícios e aumento da segurança operacional dentro das indústrias (Ferreira Et Al., 2024).

O crescimento da automação industrial ocorreu de forma mais intensa a partir das revoluções industriais, especialmente com o avanço dos sistemas eletromecânicos e posteriormente com a introdução da eletrônica e da computação aplicada à indústria. Inicialmente, muitos processos eram executados manualmente, exigindo grande esforço físico dos operadores e apresentando elevados índices de falhas operacionais. Com o avanço tecnológico, equipamentos automatizados passaram a substituir atividades repetitivas, perigosas e de alta complexidade operacional (Santos; Lima, 2022).

Atualmente, a automação industrial está presente em praticamente todos os setores produtivos, incluindo indústrias metalúrgicas, automobilísticas, alimentícias, químicas, farmacêuticas, petroquímicas e logísticas. A integração entre sensores, atuadores, controladores e sistemas supervisórios permite que diferentes processos sejam monitorados e controlados em tempo real, possibilitando maior precisão nas operações industriais. De acordo com Pereira et al. (2025), a integração entre dispositivos inteligentes representa uma das principais características dos sistemas industriais modernos.

Os sistemas automatizados modernos utilizam dispositivos capazes de coletar informações continuamente durante o funcionamento do processo. Sensores industriais realizam a leitura de variáveis físicas, como posição, temperatura, pressão, velocidade e presença de objetos, enquanto os controladores processam essas informações e executam comandos destinados aos atuadores do sistema. Dessa forma, a automação industrial possibilita que diferentes equipamentos operem de maneira integrada e coordenada (Carvalho; Costa, 2024).

Outro aspecto importante relacionado à automação industrial está ligado à segurança operacional. Em diversos ambientes industriais existem atividades que apresentam riscos elevados aos operadores, principalmente em processos que envolvem altas temperaturas, cargas pesadas, equipamentos rotativos e sistemas energizados. Nesse contexto, sistemas automatizados contribuem significativamente para a redução da exposição humana a situações perigosas, permitindo maior confiabilidade operacional (Rodrigues Et Al., 2023).

Além da segurança, a automação também proporciona vantagens relacionadas à padronização dos processos produtivos. A execução automática das operações reduz

variações causadas por fatores humanos, aumentando a repetibilidade e a qualidade final dos produtos ou serviços realizados. Em sistemas industriais de movimentação de cargas, por exemplo, a automação permite maior precisão no posicionamento e deslocamento dos materiais transportados (Martins; Almeida, 2026).

Os avanços associados à Indústria 4.0 impulsionaram ainda mais o crescimento da automação industrial, principalmente com a integração entre sistemas inteligentes, redes industriais, sensores avançados e comunicação em tempo real. Atualmente, equipamentos industriais podem operar conectados a sistemas supervisórios e plataformas digitais capazes de monitorar continuamente o desempenho operacional do processo. Segundo Ferreira e Lima (2025), a digitalização industrial representa uma das principais tendências tecnológicas da automação contemporânea.

No desenvolvimento deste trabalho, os conceitos de automação industrial são aplicados diretamente na construção da ponte rolante inteligente em escala reduzida. O sistema desenvolvido integra componentes mecânicos, motores elétricos, sensores de fim de curso e dispositivos eletrônicos controlados por meio do microcontrolador Arduino Mega, permitindo a execução automatizada dos movimentos da estrutura.

Figura 2 – Ponte Rolante utilizada no manuseio de rolos de papel.



Fonte: Konecranes [s. d.]

A aplicação prática da automação no projeto permite compreender a importância da integração entre diferentes áreas tecnológicas dentro da indústria moderna. Durante o desenvolvimento do protótipo, foi possível observar que a implementação de sistemas automatizados exige não apenas conhecimentos relacionados à programação e eletrônica, mas também compreensão estrutural, elétrica e mecânica do sistema desenvolvido.

Além disso, o desenvolvimento do projeto evidenciou a importância do planejamento durante a implementação de sistemas automatizados. Pequenos desalinhamentos estruturais, falhas de comunicação entre componentes ou erros de lógica de programação podem comprometer diretamente o funcionamento do sistema, exigindo ajustes constantes durante o processo de desenvolvimento (Oliveira; Santos, 2024).

Dessa forma, a automação industrial não se limita apenas ao uso de equipamentos eletrônicos, mas envolve toda a integração entre tecnologias responsáveis pelo controle, monitoramento e funcionamento eficiente dos processos industriais. Esses conceitos tornam-se fundamentais para aplicações envolvendo movimentação automatizada de cargas, como no caso das pontes rolantes industriais.

2.2 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial e está relacionada à integração entre sistemas físicos e digitais dentro dos processos produtivos. Esse conceito envolve a utilização de tecnologias avançadas capazes de permitir maior conectividade, automação, monitoramento e troca de informações em tempo real entre máquinas, equipamentos e sistemas industriais. Segundo Silva e Ferreira (2023), a Indústria 4.0 tem como principal objetivo tornar os processos produtivos mais inteligentes, eficientes e flexíveis, permitindo maior integração entre tecnologias digitais e sistemas automatizados.

As primeiras revoluções industriais foram responsáveis pela introdução das máquinas a vapor, eletricidade e automação baseada em sistemas eletrônicos. Entretanto, a Indústria 4.0 diferencia-se pela elevada integração entre tecnologias digitais e sistemas automatizados, permitindo que equipamentos industriais realizem processos de comunicação e tomada de decisão de maneira mais autônoma (SANTOS et al., 2024).

Entre as principais tecnologias associadas à Indústria 4.0 destacam-se a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, computação em nuvem, sistemas supervisórios, sensores inteligentes, redes industriais e análise de dados em tempo real. Essas tecnologias possibilitam o monitoramento contínuo dos processos produtivos, permitindo maior controle operacional e redução de falhas durante o funcionamento dos sistemas industriais. De acordo com Pereira e Costa (2022), a integração entre dispositivos inteligentes e sistemas digitais representa uma das principais características da automação industrial moderna.

No ambiente industrial moderno, máquinas e equipamentos passaram a operar conectados por meio de redes de comunicação capazes de transmitir informações constantemente. Sensores instalados nos sistemas industriais realizam a coleta de dados operacionais, permitindo que controladores e softwares supervisórios monitorem variáveis importantes do processo, como velocidade, temperatura, posição e consumo energético (Rodrigues; Almeida, 2025).

Os sistemas de movimentação automatizada de cargas também passaram a incorporar tecnologias associadas à Indústria 4.0. Em grandes ambientes industriais e centros logísticos, pontes rolantes modernas podem operar integradas a sistemas

automatizados de controle e supervisão, permitindo maior precisão durante o deslocamento de materiais pesados e redução de riscos operacionais (CARVALHO et al., 2024).

Outro aspecto importante relacionado à Indústria 4.0 está ligado à manutenção preditiva. Sensores e sistemas inteligentes são capazes de identificar alterações no comportamento operacional dos equipamentos antes que ocorram falhas críticas. Isso permite a realização de manutenções planejadas, reduzindo paradas inesperadas e aumentando a confiabilidade dos sistemas industriais. Segundo Martins e Lima (2026), a manutenção preditiva tornou-se uma das principais aplicações da inteligência industrial associada aos sistemas automatizados modernos.

Além da eficiência operacional, a Indústria 4.0 também contribui para melhorias relacionadas à segurança industrial. Sistemas automatizados permitem reduzir a exposição dos operadores a atividades perigosas, principalmente em aplicações envolvendo altas cargas, equipamentos de grande porte e ambientes de risco elevado. Em sistemas de movimentação de cargas, por exemplo, sensores e dispositivos de segurança podem limitar movimentos perigosos e evitar colisões durante a operação (Ferreira; Oliveira, 2023).

O desenvolvimento da ponte rolante inteligente proposta neste trabalho está diretamente relacionado aos conceitos da Indústria 4.0, principalmente pela integração entre sensores, dispositivos eletrônicos e sistemas automatizados de controle. Mesmo sendo um protótipo em escala reduzida, o sistema desenvolvido busca representar de forma prática a aplicação de tecnologias utilizadas em ambientes industriais modernos.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi possível compreender a importância da integração entre hardware e software para o funcionamento adequado do sistema automatizado. A comunicação entre sensores, motores e o microcontrolador Arduino Mega permitiu implementar mecanismos de controle responsáveis pela movimentação da estrutura e limitação operacional do protótipo (Costa; Pereira, 2025).

Figura 3 – Ponte Rolante Univiga.



Fonte: Bravo Metal Engenharia (2017).

Outro fator relevante observado durante o projeto está relacionado à necessidade de adaptação contínua durante o desenvolvimento de sistemas automatizados. Em aplicações industriais reais, frequentemente ocorrem ajustes estruturais, elétricos e lógicos ao longo da implementação dos sistemas, principalmente devido à complexidade envolvida na integração entre diferentes tecnologias.

Dessa maneira, os conceitos associados à Indústria 4.0 demonstram que a automação industrial moderna não depende apenas da mecanização dos processos, mas também da capacidade de comunicação, monitoramento e integração inteligente entre os diferentes componentes presentes nos sistemas industriais atuais.

2.3 Sistemas de movimentação de cargas

Os sistemas de movimentação de cargas possuem grande importância nos processos industriais, sendo responsáveis pelo transporte, elevação e deslocamento de materiais dentro de ambientes produtivos. Segundo Silva e Costa (2023), esses sistemas são fundamentais para garantir maior eficiência operacional e otimização logística em ambientes industriais modernos. Esses sistemas são amplamente utilizados em setores como logística, metalurgia, siderurgia, construção civil, armazenagem e indústrias de grande porte, permitindo maior eficiência operacional e redução do esforço físico durante as operações (Ferreira Et Al., 2024).

O transporte interno de materiais representa uma etapa fundamental dentro dos processos produtivos industriais. Em muitas aplicações, o deslocamento manual de

cargas torna-se inviável devido ao peso, volume ou riscos envolvidos na operação. Dessa forma, os sistemas automatizados de movimentação passaram a ser utilizados para aumentar a produtividade, reduzir falhas operacionais e melhorar as condições de segurança dos operadores (Santos; Lima, 2022).

Entre os principais equipamentos utilizados na movimentação industrial de cargas destacam-se empilhadeiras, esteiras transportadoras, guindastes, talhas elétricas, elevadores industriais e pontes rolantes. Cada sistema possui características específicas relacionadas ao tipo de aplicação, capacidade de carga, alcance operacional e nível de automação empregado no processo. De acordo com Pereira e Almeida (2025), a escolha do sistema de movimentação depende diretamente das características operacionais e estruturais do ambiente industrial.

As pontes rolantes destacam-se entre os sistemas mais utilizados em ambientes industriais que exigem movimentação de cargas pesadas em áreas amplas. Esse tipo de equipamento permite o deslocamento da carga em diferentes direções, normalmente por meio de movimentos longitudinais, transversais e verticais. Sua estrutura possibilita elevada capacidade de movimentação, tornando-se fundamental em processos industriais de grande porte (Rodrigues Et Al., 2024).

Os sistemas modernos de movimentação de cargas utilizam diversos componentes responsáveis pelo funcionamento integrado da estrutura. Motores elétricos realizam o acionamento dos movimentos, sensores monitoram limites operacionais e dispositivos de controle garantem a execução segura das operações. Em aplicações automatizadas, sistemas eletrônicos e controladores programáveis também são responsáveis pela coordenação dos movimentos da estrutura (Carvalho; Martins, 2026).

Outro fator importante relacionado aos sistemas de movimentação de cargas está ligado à segurança operacional. O deslocamento inadequado de materiais pesados pode causar acidentes graves, danos estruturais e falhas no processo produtivo. Por esse motivo, equipamentos industriais dessa categoria normalmente utilizam sensores de segurança, sistemas de parada de emergência e mecanismos de limitação de movimento. Segundo Oliveira e Ferreira (2023), os dispositivos de segurança são essenciais para garantir a confiabilidade operacional dos sistemas automatizados industriais.

Em sistemas automatizados, sensores de fim de curso possuem grande relevância para evitar que a estrutura ultrapasse seus limites físicos de operação. Esses dispositivos permitem interromper automaticamente o movimento do sistema quando determinadas posições são atingidas, reduzindo riscos de colisões e danos mecânicos durante o funcionamento do equipamento (Pereira Et Al., 2025).

Além da segurança, os sistemas automatizados de movimentação de cargas também contribuem para melhorias relacionadas à produtividade industrial. A automação permite maior precisão no posicionamento da carga, redução do tempo operacional e aumento da repetibilidade dos movimentos executados pelo equipamento. Isso torna os processos industriais mais eficientes e organizados (Ferreira; Lima, 2024).

Com o avanço tecnológico, muitos sistemas industriais passaram a integrar sensores inteligentes, comunicação em rede e sistemas supervisórios capazes de monitorar continuamente o funcionamento dos equipamentos. Essas tecnologias permitem identificar falhas operacionais, acompanhar o desempenho do sistema e otimizar os processos de movimentação de materiais. Conforme destacado por Santos et al. (2026), a digitalização dos processos industriais tem ampliado significativamente a eficiência dos sistemas automatizados de transporte interno.

No desenvolvimento do presente trabalho, os conceitos relacionados aos sistemas de movimentação de cargas foram aplicados diretamente na construção da ponte rolante inteligente em escala reduzida. O protótipo desenvolvido utiliza motores elétricos, sensores de fim de curso e dispositivos de controle integrados ao Arduino Mega, permitindo a movimentação controlada da estrutura.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi possível observar que a integração entre os componentes mecânicos e eletrônicos exige elevado nível de alinhamento estrutural e precisão operacional. Pequenos desalinhamentos na estrutura ou falhas na lógica de controle podem comprometer diretamente o funcionamento do sistema, exigindo ajustes constantes durante as etapas de montagem e testes.

Outro aspecto observado está relacionado à importância do planejamento estrutural em sistemas de movimentação. Mesmo em protótipos de escala reduzida, a distribuição inadequada de peso, posicionamento incorreto dos motores ou limitações

estruturais podem gerar vibrações, desalinhamentos e dificuldades durante a operação da estrutura (Costa; Almeida, 2025).

Dessa forma, os sistemas de movimentação de cargas representam uma área fundamental dentro da automação industrial moderna, integrando conhecimentos de mecânica, eletrônica, controle e programação no desenvolvimento de soluções voltadas ao transporte automatizado de materiais em ambientes industriais.

2.4 Ponte rolante

A ponte rolante é um equipamento utilizado para movimentação e elevação de cargas em ambientes industriais, sendo amplamente aplicada em setores como metalurgia, siderurgia, logística, construção civil, portos e armazenagem. Segundo Silva e Ferreira (2024), esse tipo de equipamento possui grande importância nos processos industriais modernos devido à capacidade de transportar cargas pesadas com maior segurança e eficiência operacional. Seu principal objetivo é permitir o transporte seguro e eficiente de materiais pesados dentro de áreas industriais, reduzindo o esforço operacional e aumentando a produtividade dos processos.

O funcionamento da ponte rolante ocorre por meio da integração entre estrutura metálica, motores elétricos, sistemas de acionamento e dispositivos de controle responsáveis pela movimentação da carga. Normalmente, o equipamento realiza movimentos em diferentes direções, permitindo o deslocamento horizontal, transversal e vertical da carga transportada (Santos Et Al., 2023).

A estrutura principal da ponte rolante é composta por vigas metálicas apoiadas sobre trilhos ou sistemas de sustentação. Sobre essa estrutura movimenta-se o carro principal, responsável pelo deslocamento transversal da talha ou do mecanismo de içamento. O conjunto permite que a carga seja transportada de forma precisa dentro da área operacional do equipamento. De acordo com Pereira e Costa (2025), a estrutura mecânica representa um dos principais elementos responsáveis pela estabilidade operacional do sistema.

Os movimentos realizados por uma ponte rolante normalmente são divididos em três eixos principais. O primeiro corresponde ao deslocamento longitudinal da estrutura, o segundo ao deslocamento transversal do carro principal e o terceiro ao movimento vertical de elevação ou descida da carga. A combinação desses movimentos permite

posicionar materiais em diferentes pontos da área de operação (RODRIGUES; ALMEIDA, 2022).

Os sistemas de acionamento das pontes rolantes utilizam motores elétricos responsáveis pela movimentação dos mecanismos estruturais e de içamento. Esses motores podem operar integrados a sistemas de controle eletrônico, permitindo maior precisão durante o funcionamento do equipamento. Em aplicações industriais modernas, muitos sistemas utilizam inversores de frequência e controladores programáveis para otimização dos movimentos (Carvalho Et Al., 2026).

Além do sistema mecânico, as pontes rolantes também dependem diretamente de componentes elétricos e eletrônicos para garantir segurança e confiabilidade operacional. Sensores de fim de curso, relés, dispositivos de proteção elétrica e sistemas de parada de emergência são amplamente utilizados para limitar os movimentos da estrutura e evitar falhas durante a operação. Segundo Oliveira e Lima (2024), os sistemas de proteção industrial possuem papel essencial na prevenção de acidentes em equipamentos de movimentação de cargas.

Os sensores de fim de curso possuem grande importância nesse tipo de sistema, pois impedem que os movimentos ultrapassem os limites físicos da estrutura. Esses dispositivos atuam diretamente no controle operacional da ponte rolante, interrompendo automaticamente o acionamento dos motores quando determinadas posições são atingidas (Ferreira; Martins, 2025).

Outro aspecto importante relacionado às pontes rolantes está ligado à segurança operacional. O transporte inadequado de cargas pesadas pode causar acidentes graves, danos estruturais e riscos aos operadores. Por esse motivo, sistemas industriais dessa categoria utilizam diversos mecanismos de proteção destinados à redução de falhas durante a operação (Santos; Costa, 2023).

Com o avanço da automação industrial, muitas pontes rolantes passaram a incorporar sistemas automatizados de controle e supervisão. Sensores inteligentes, redes industriais e controladores eletrônicos permitem monitoramento contínuo da operação, aumentando a precisão dos movimentos e reduzindo a necessidade de intervenção manual durante o funcionamento do equipamento. Conforme destacado por Pereira et al. (2026), a digitalização dos sistemas industriais tem ampliado

significativamente a eficiência operacional dos equipamentos de movimentação automatizada.

No presente trabalho, a ponte rolante foi desenvolvida em escala reduzida utilizando o microcontrolador Arduino Mega como unidade principal de controle do sistema. O protótipo integra motores elétricos, sensores de fim de curso, relés e componentes estruturais responsáveis pela movimentação da carga ao longo da estrutura metálica.

Durante o desenvolvimento do projeto, a construção da estrutura mecânica representou uma das etapas mais complexas do trabalho. Foi necessário realizar ajustes estruturais relacionados ao alinhamento das partes móveis, distribuição de peso e posicionamento dos motores responsáveis pela movimentação da estrutura.

Além disso, também foram identificadas dificuldades relacionadas à integração entre os componentes mecânicos e eletrônicos do sistema. Pequenos desalinhamentos estruturais afetavam diretamente o deslocamento da ponte rolante, exigindo correções e adaptações ao longo do processo de montagem e testes operacionais (Carvalho; Ferreira, 2024).

Outro fator importante observado durante o desenvolvimento foi a necessidade de reforço estrutural em determinadas regiões da ponte rolante, principalmente devido às vibrações geradas durante os movimentos do sistema. Esse processo evidenciou a importância do planejamento estrutural mesmo em protótipos de escala reduzida.

Dessa maneira, o desenvolvimento da ponte rolante inteligente permitiu compreender de forma prática os princípios de funcionamento dos sistemas industriais de movimentação de cargas, além de demonstrar a importância da integração entre estrutura mecânica, controle eletrônico e automação industrial no desenvolvimento de sistemas automatizados.

2.5 Motores elétricos

Os motores elétricos são dispositivos responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, sendo amplamente utilizados em sistemas industriais automatizados. Seu funcionamento baseia-se na interação entre campos magnéticos gerados eletricamente, permitindo a realização de movimentos rotativos capazes de

acionar diferentes mecanismos mecânicos. Segundo Silva e Oliveira (2024), os motores elétricos representam um dos principais componentes presentes nos sistemas automatizados industriais devido à capacidade de transformar energia elétrica em movimento mecânico de forma eficiente e controlada.

Na automação industrial, os motores elétricos possuem grande importância devido à ampla aplicação em máquinas, equipamentos e sistemas de movimentação. Eles são utilizados em esteiras transportadoras, pontes rolantes, elevadores industriais, sistemas de bombeamento, ventilação, robótica e diversos outros processos industriais que exigem controle de movimento (Ferreira Et Al., 2023).

Existem diferentes tipos de motores elétricos aplicados na indústria, sendo os mais comuns os motores de corrente contínua (CC) e os motores de corrente alternada (CA). Cada categoria apresenta características específicas relacionadas à alimentação elétrica, torque, velocidade, controle operacional e aplicação industrial. De acordo com Pereira e Costa (2025), a escolha do tipo de motor depende diretamente das exigências operacionais e mecânicas do sistema automatizado.

Os motores de corrente contínua destacam-se pela facilidade de controle de velocidade e sentido de rotação. Esse tipo de motor é amplamente utilizado em sistemas automatizados de pequeno e médio porte, principalmente em aplicações que exigem maior precisão no controle de movimento. Em muitos projetos experimentais e protótipos automatizados, motores CC são utilizados devido à simplicidade de acionamento e integração com sistemas eletrônicos (Rodrigues; Almeida, 2022).

Os motores de corrente alternada, por outro lado, são mais utilizados em aplicações industriais de maior potência e operação contínua. Esses motores apresentam elevada robustez mecânica, maior durabilidade e menor necessidade de manutenção, tornando-se amplamente empregados em ambientes industriais de grande porte (CARVALHO Et Al., 2026).

Nos sistemas automatizados de movimentação de cargas, os motores elétricos são responsáveis pelo acionamento dos mecanismos estruturais e de içamento. Em pontes rolantes, por exemplo, os motores realizam os movimentos longitudinais, transversais e verticais da estrutura, permitindo o deslocamento controlado da carga durante a operação. Segundo Martins e Lima (2024), o desempenho operacional dos

sistemas de movimentação depende diretamente do correto funcionamento e dimensionamento dos motores utilizados.

Além do motor em si, muitos sistemas utilizam dispositivos auxiliares responsáveis pelo acionamento e controle operacional. Relés, drivers de potência, inversores de frequência e controladores eletrônicos permitem controlar velocidade, direção e tempo de funcionamento dos motores utilizados no sistema automatizado (Santos; Ferreira, 2025).

Outro aspecto importante relacionado aos motores elétricos está ligado ao torque gerado durante a operação. Em sistemas de movimentação de cargas, o torque possui grande relevância devido à necessidade de deslocamento de estruturas e materiais com peso elevado. Um dimensionamento inadequado pode comprometer diretamente o desempenho do sistema e gerar falhas durante a operação. Conforme destacado por Oliveira et al. (2023), o cálculo correto do torque é fundamental para garantir estabilidade e eficiência operacional em sistemas automatizados de movimentação.

No desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizados motores elétricos responsáveis pela movimentação da ponte rolante nos diferentes eixos operacionais da estrutura. Os motores foram integrados ao sistema eletrônico controlado pelo Arduino Mega, permitindo o acionamento automatizado da estrutura por meio da lógica de programação implementada no projeto.



Fonte: Autor próprio.

Durante o desenvolvimento do protótipo, foi possível observar que o alinhamento mecânico dos motores influencia diretamente no desempenho operacional do sistema. Pequenos desalinhamentos causavam dificuldades no deslocamento da estrutura, vibrações excessivas e perda de eficiência durante os movimentos da ponte rolante.

Além disso, também foram identificadas limitações relacionadas à distribuição de carga sobre os mecanismos acionados pelos motores. Em determinados momentos, o sistema apresentou necessidade de reforços estruturais para garantir maior estabilidade durante os testes operacionais realizados (Pereira; Martins, 2026).

Outro fator observado durante os testes foi a importância do controle adequado dos movimentos realizados pelos motores. A ausência de limitação operacional poderia causar impactos mecânicos e comprometer a integridade estrutural do sistema, tornando necessária a utilização de sensores de fim de curso para controle de segurança operacional.

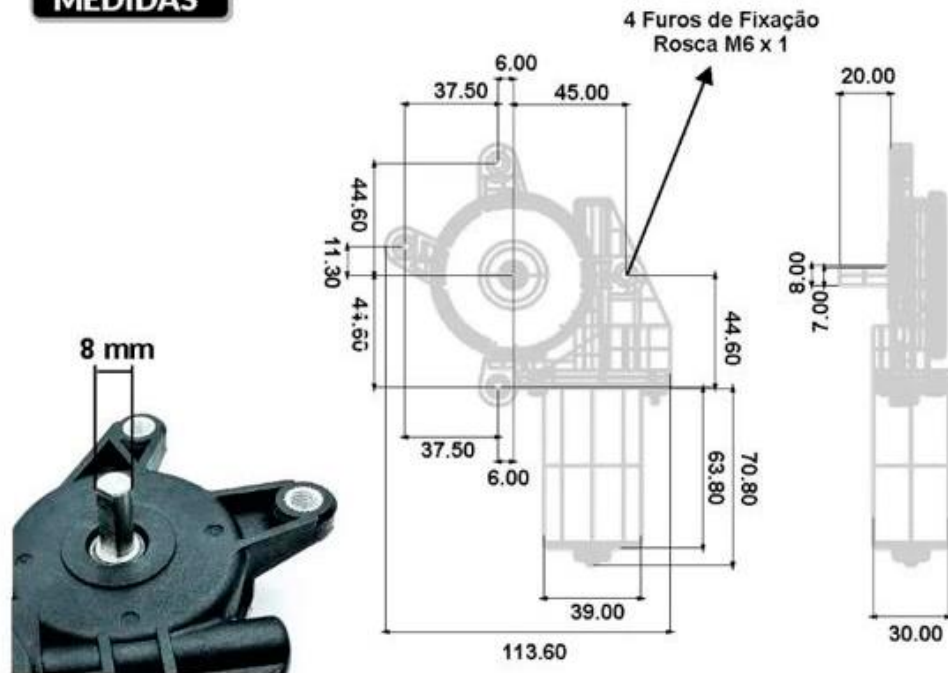
Figura 5 – datasheet.

MOTOREDUTOR - MM09012

DADOS TÉCNICOS

VOLTAGEM	12V	TORQUE(nominal)	8Kgf.cm
CORRENTE (máx)	4A	TORQUE(máximo)	20Kgf.cm
RPM (velocidade)	90 RPM	PESO	500 grs.

MEDIDAS



Fonte: Internet

A integração entre motores elétricos, sensores e dispositivos de controle permitiu compreender de forma prática os princípios básicos de acionamento industrial utilizados em sistemas automatizados de movimentação de cargas. Dessa maneira, o desenvolvimento do projeto contribuiu para uma análise mais detalhada da aplicação dos motores elétricos dentro da automação industrial.

2.6 Sensores industriais

Os sensores industriais são dispositivos utilizados para detectar, medir ou monitorar variáveis físicas presentes em sistemas automatizados. Esses componentes possuem grande importância na automação industrial, pois permitem que controladores eletrônicos recebam informações do processo e executem ações de controle de maneira

automática. Segundo Silva e Ferreira (2024), os sensores representam elementos fundamentais nos sistemas automatizados modernos devido à capacidade de monitorar continuamente variáveis operacionais dos processos industriais.

Em ambientes industriais, os sensores podem ser utilizados para detectar posição, presença de objetos, temperatura, pressão, velocidade, distância, luminosidade e diversas outras variáveis relacionadas ao funcionamento do sistema. A partir dessas informações, os controladores processam os sinais recebidos e realizam o acionamento dos atuadores responsáveis pela operação do equipamento (SANTOS et al., 2023).

Os sensores desempenham papel fundamental em sistemas automatizados de movimentação de cargas, principalmente devido à necessidade de monitoramento contínuo da posição e dos limites operacionais da estrutura. Em pontes rolantes, por exemplo, sensores são utilizados para controlar os movimentos da estrutura e impedir que o sistema ultrapasse seus limites físicos de funcionamento. De acordo com Pereira e Costa (2025), os sistemas de segurança baseados em sensores contribuem significativamente para a confiabilidade operacional dos equipamentos industriais.

Os sinais gerados pelos sensores podem ser classificados como digitais ou analógicos. Sensores digitais normalmente trabalham com dois estados lógicos, representados por ligado e desligado ou nível lógico alto e baixo. Já os sensores analógicos fornecem sinais variáveis de acordo com a grandeza física monitorada pelo dispositivo (Rodrigues; Almeida, 2022).

Entre os principais tipos de sensores utilizados na automação industrial destacam-se os sensores indutivos, capacitivos, ópticos, ultrassônicos e sensores de fim de curso. Cada categoria possui características específicas relacionadas ao tipo de detecção, alcance operacional e aplicação industrial. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), a escolha adequada do sensor depende diretamente das características do processo industrial monitorado.

Os sensores indutivos são amplamente utilizados para detectar materiais metálicos sem necessidade de contato físico. Seu funcionamento ocorre por meio da geração de campos eletromagnéticos capazes de identificar a aproximação de superfícies metálicas. Esse tipo de sensor é muito utilizado em sistemas automatizados devido à elevada confiabilidade e resistência operacional (FERREIRA; MARTINS, 2023).

Os sensores ópticos utilizam emissão e recepção de luz para detectar objetos ou alterações de posição. Em aplicações industriais, esses dispositivos podem operar em diferentes configurações, como sensores reflexivos, barreira ou difusos, sendo amplamente empregados em sistemas de automação e controle de processos (Oliveira; Lima, 2025).

Os sensores ultrassônicos realizam medições de distância por meio da emissão de ondas sonoras de alta frequência. O tempo necessário para o retorno da onda refletida permite calcular a distância entre o sensor e o objeto detectado. Esses dispositivos são utilizados em aplicações que exigem monitoramento sem contato físico (Santos; Pereira, 2024).

Os sensores de fim de curso possuem grande importância em sistemas de movimentação industrial. Esses dispositivos atuam diretamente na limitação operacional dos equipamentos, interrompendo automaticamente determinados movimentos quando a estrutura atinge posições previamente definidas. Sua utilização contribui significativamente para a segurança operacional dos sistemas automatizados. Segundo Martins e Costa (2026), sensores de fim de curso são amplamente empregados em equipamentos industriais devido à simplicidade de implementação e elevada confiabilidade operacional.

No desenvolvimento da ponte rolante inteligente proposta neste trabalho, os sensores de fim de curso foram utilizados para limitar os movimentos da estrutura e evitar colisões mecânicas durante o funcionamento do sistema. Esses dispositivos foram integrados ao Arduino Mega, permitindo o monitoramento contínuo das posições operacionais da ponte rolante.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi possível observar que o posicionamento inadequado dos sensores afetava diretamente o funcionamento do sistema automatizado. Pequenos desalinhamentos causavam falhas na detecção dos limites operacionais, exigindo ajustes estruturais e reposicionamento dos componentes ao longo da montagem.

Além disso, também foram identificadas dificuldades relacionadas à lógica de acionamento dos sensores de fim de curso. Durante os testes iniciais, alguns dispositivos apresentaram comportamento inverso ao esperado devido à configuração elétrica dos

contatos normalmente fechados, exigindo alterações na programação do sistema de controle (Carvalho; Ferreira, 2025).

Outro aspecto importante observado durante os testes foi a necessidade de estabilidade mecânica para garantir o funcionamento correto dos sensores. Vibrações excessivas na estrutura poderiam provocar acionamentos indevidos e comprometer a precisão operacional do sistema automatizado.

A utilização dos sensores industriais no projeto permitiu compreender de forma prática a importância desses dispositivos dentro da automação industrial moderna. A integração entre sensores, motores e controladores eletrônicos demonstrou como esses componentes são fundamentais para garantir segurança, precisão e confiabilidade em sistemas automatizados de movimentação de cargas.

2.7 Sensores de fim de curso

Os sensores de fim de curso são dispositivos utilizados para limitar movimentos mecânicos em sistemas automatizados, interrompendo automaticamente determinadas operações quando a estrutura atinge posições previamente definidas. Esses sensores possuem ampla aplicação na automação industrial, principalmente em equipamentos que realizam deslocamentos lineares, rotativos ou verticais. Segundo Silva e Oliveira (2024), os sensores de fim de curso são amplamente utilizados em sistemas industriais devido à capacidade de aumentar a segurança operacional e limitar movimentos mecânicos de maneira automática.

O funcionamento dos sensores de fim de curso ocorre normalmente por meio de contato mecânico entre o dispositivo sensor e uma parte móvel do equipamento. Quando a estrutura atinge determinada posição, o sensor é acionado, enviando um sinal elétrico ao sistema de controle responsável pela interrupção do movimento executado (Ferreira Et Al., 2023).

Em sistemas industriais, os sensores de fim de curso desempenham papel fundamental na segurança operacional dos equipamentos. Sua utilização evita que mecanismos ultrapassem limites físicos da estrutura, reduzindo riscos de colisões, danos mecânicos e falhas operacionais durante o funcionamento do sistema. De acordo com Pereira e Costa (2025), dispositivos de limitação operacional são essenciais para garantir maior confiabilidade em sistemas automatizados de movimentação industrial.

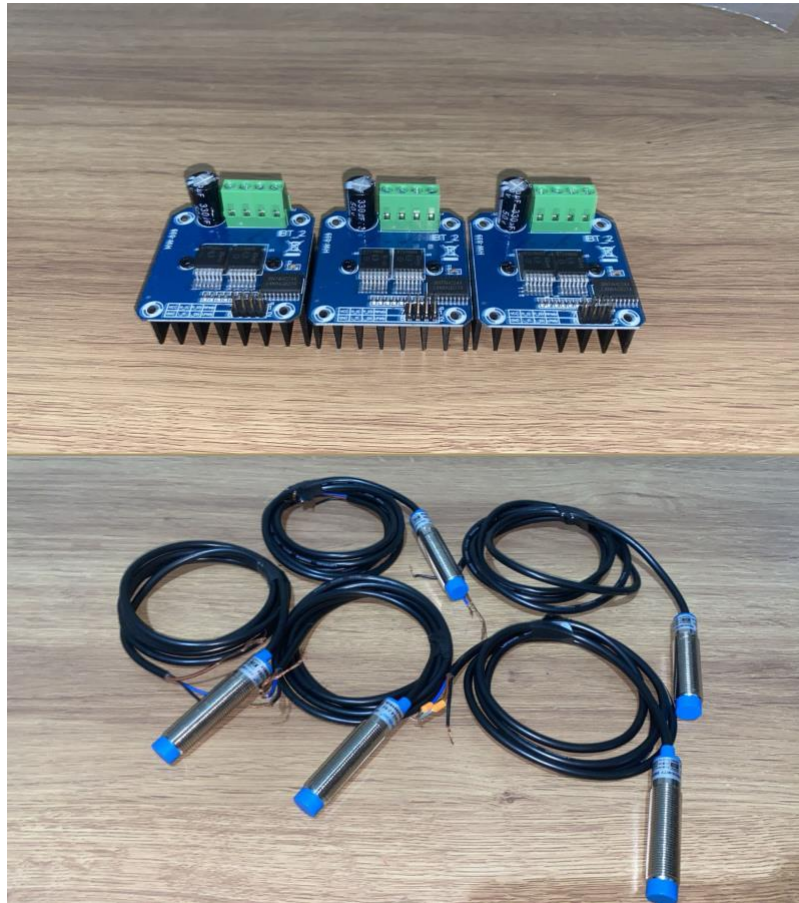
As pontes rolantes industriais utilizam sensores de fim de curso em diferentes regiões da estrutura, principalmente nos limites de deslocamento horizontal, transversal e vertical. Esses dispositivos impedem que os motores continuem operando após a estrutura atingir posições máximas de movimentação, protegendo os componentes mecânicos e elétricos do sistema (Rodrigues; Almeida, 2022).

Existem diferentes modelos de sensores de fim de curso aplicados na indústria. Alguns dispositivos utilizam acionamento mecânico por alavanca, enquanto outros operam por rolete, haste ou contato direto. A escolha do sensor depende das características do sistema, tipo de movimento realizado e condições operacionais do ambiente industrial. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), a seleção adequada do sensor influencia diretamente na precisão operacional e durabilidade do sistema automatizado.

Além da proteção estrutural, os sensores de fim de curso também contribuem para o controle operacional do sistema automatizado. Em muitos equipamentos industriais, esses dispositivos são utilizados como referência de posicionamento para inicialização de movimentos e sincronização operacional dos mecanismos automatizados (SANTOS; LIMA, 2024).

No presente trabalho, os sensores de fim de curso foram utilizados para limitar os movimentos da ponte rolante inteligente desenvolvida em escala reduzida. Esses sensores foram integrados ao Arduino Mega, permitindo interromper automaticamente os motores quando a estrutura atingia os limites definidos durante a operação do sistema.

Figura 6 – Sensores de fim de curso utilizados na limitação dos movimentos da ponte rolante.



Fonte: Autor próprio.

Durante os testes realizados no projeto, foi possível observar que o posicionamento dos sensores influenciava diretamente no funcionamento da estrutura. Em alguns momentos, pequenos desalinhamentos impediam o acionamento correto dos dispositivos, causando atrasos na interrupção dos movimentos realizados pela ponte rolante.

Outro fator importante identificado durante o desenvolvimento foi a necessidade de ajuste da sensibilidade mecânica dos sensores. Vibrações excessivas e deslocamentos irregulares da estrutura provocavam acionamentos involuntários, exigindo reforços mecânicos e reposicionamento dos dispositivos instalados no sistema (Martins; Ferreira, 2025).

Além disso, também foram realizados ajustes relacionados à programação do Arduino Mega para garantir a leitura correta dos sinais enviados pelos sensores. Em determinadas situações, o sistema apresentava necessidade de tratamento lógico

adicional para evitar falhas de leitura e acionamentos repetitivos durante o funcionamento do protótipo.

A aplicação prática dos sensores de fim de curso permitiu compreender a importância desses dispositivos em sistemas automatizados de movimentação industrial. Sua integração ao sistema de controle contribuiu diretamente para o aumento da segurança operacional, limitação dos movimentos e estabilidade do funcionamento da ponte rolante inteligente desenvolvida no projeto.

2.8 Microcontrolador arduino mega

O Arduino Mega é uma plataforma de prototipagem eletrônica baseada em microcontrolador, amplamente utilizada em projetos de automação, robótica, sistemas embarcados e desenvolvimento experimental. Sua principal função é realizar o processamento das informações recebidas pelos dispositivos de entrada e executar comandos destinados aos componentes de saída do sistema automatizado. Segundo Silva e Oliveira (2024), plataformas microcontroladas possuem grande relevância no desenvolvimento de sistemas automatizados devido à flexibilidade de programação e facilidade de integração com dispositivos eletrônicos.

A plataforma Arduino tornou-se amplamente difundida devido à facilidade de programação, baixo custo e grande compatibilidade com sensores, motores e módulos eletrônicos. Além disso, o ambiente de desenvolvimento apresenta linguagem simplificada baseada em C/C++, permitindo maior acessibilidade no desenvolvimento de sistemas automatizados e projetos experimentais (Ferreira Et Al., 2023).

O Arduino Mega utiliza o microcontrolador ATmega2560, possuindo maior quantidade de portas digitais e analógicas em comparação com outros modelos da linha Arduino. Essa característica permite a integração simultânea de diversos componentes eletrônicos, tornando a plataforma adequada para sistemas que exigem múltiplos dispositivos conectados ao controlador principal. De acordo com Pereira e Costa (2025), o Arduino Mega destaca-se em aplicações que necessitam de grande quantidade de entradas e saídas devido à elevada capacidade de integração eletrônica.

Entre os principais recursos do Arduino Mega destacam-se suas portas de entrada e saída digitais, entradas analógicas, portas de comunicação serial, temporizadores internos e capacidade de processamento suficiente para aplicações automatizadas de

pequeno e médio porte. Essas características permitem o desenvolvimento de sistemas de controle envolvendo sensores, motores, relés e módulos eletrônicos diversos (Rodrigues; Almeida, 2022).

Na automação industrial experimental, o Arduino Mega é frequentemente utilizado em projetos voltados à integração entre sistemas mecânicos e eletrônicos. Seu uso permite implementar lógicas de controle responsáveis pelo acionamento de motores, leitura de sensores, monitoramento operacional e execução automatizada de movimentos em estruturas mecânicas. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), plataformas microcontroladas apresentam grande importância no ensino tecnológico devido à possibilidade de aplicação prática dos conceitos de automação e sistemas embarcados.

Outro fator importante relacionado ao Arduino Mega está ligado à flexibilidade de programação. O sistema pode ser facilmente adaptado para diferentes aplicações, permitindo alterações rápidas na lógica operacional do projeto. Isso torna a plataforma bastante utilizada em protótipos e projetos experimentais voltados ao desenvolvimento de soluções automatizadas (SANTOS; LIMA, 2024).

No presente trabalho, o Arduino Mega foi utilizado como unidade principal de controle da ponte rolante inteligente desenvolvida em escala reduzida. O microcontrolador foi responsável pela leitura dos sensores de fim de curso, acionamento dos motores elétricos e execução da lógica de funcionamento implementada no sistema automatizado.

A integração entre o Arduino Mega e os demais componentes eletrônicos permitiu controlar os movimentos da estrutura de forma automatizada, garantindo o funcionamento coordenado dos mecanismos responsáveis pelo deslocamento da ponte rolante. Além disso, o controlador também atuou na limitação operacional do sistema por meio da interpretação dos sinais enviados pelos sensores instalados na estrutura (MARTINS; FERREIRA, 2025).

Figura 7 – Microcontrolador Arduino Mega e outros componentes utilizado no sistema de controle da ponte rolante.



Fonte: Autor próprio.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram realizados diversos testes relacionados à programação e integração do Arduino Mega com os dispositivos eletrônicos do sistema. Inicialmente, algumas dificuldades estiveram relacionadas à comunicação entre sensores e motores, exigindo ajustes na lógica de programação responsável pelo controle operacional do protótipo.

Outro aspecto observado durante os testes foi a necessidade de organização adequada das conexões elétricas do sistema. O grande número de componentes conectados ao microcontrolador exigiu planejamento cuidadoso da distribuição dos sinais elétricos e alimentação dos dispositivos utilizados no projeto (OLIVEIRA; COSTA, 2026).

Além disso, também foram identificadas limitações relacionadas ao ruído elétrico gerado durante o acionamento simultâneo de determinados componentes do sistema. Em alguns momentos, interferências causavam leituras incorretas dos sensores, exigindo adaptações na estrutura elétrica e ajustes no código desenvolvido para o controlador.

A utilização do Arduino Mega permitiu compreender de forma prática os princípios básicos relacionados aos sistemas embarcados e controle automatizado aplicados à automação industrial. Sua integração ao projeto contribuiu diretamente para o funcionamento da ponte rolante inteligente, demonstrando a importância dos microcontroladores no desenvolvimento de sistemas automatizados modernos.

2.9 Sistemas de controle e acionamento

Os sistemas de controle e acionamento possuem grande importância na automação industrial, sendo responsáveis pelo gerenciamento operacional de máquinas, equipamentos e processos automatizados. Esses sistemas permitem controlar movimentos, monitorar variáveis operacionais e executar comandos de maneira automática, garantindo maior precisão, segurança e eficiência durante o funcionamento dos equipamentos industriais. Segundo Silva e Oliveira (2024), os sistemas de controle industrial representam elementos fundamentais para o funcionamento coordenado dos processos automatizados modernos.

Em sistemas automatizados, o controle operacional ocorre por meio da integração entre sensores, controladores e atuadores. Os sensores realizam a coleta de informações do ambiente ou do equipamento, enquanto os controladores processam esses dados e executam comandos destinados aos dispositivos responsáveis pela movimentação ou operação do sistema (Ferreira Et Al., 2023).

Os atuadores são componentes responsáveis pela execução física das ações determinadas pelo controlador. Entre os principais atuadores utilizados na automação industrial destacam-se motores elétricos, cilindros pneumáticos, válvulas solenóides e relés eletromecânicos. Esses dispositivos transformam sinais elétricos em ações mecânicas capazes de movimentar estruturas e equipamentos industriais. De acordo com Pereira e Costa (2025), os atuadores possuem papel essencial na conversão dos comandos eletrônicos em ações físicas executadas pelos sistemas automatizados.

Os sistemas de acionamento possuem função diretamente relacionada ao controle dos motores e dispositivos elétricos utilizados no processo automatizado. Em aplicações industriais, o acionamento pode ocorrer por meio de relés, contadores, drivers eletrônicos ou inversores de frequência, dependendo das características do sistema desenvolvido (Rodrigues; Almeida, 2022).

Os relés eletromecânicos são amplamente utilizados em projetos automatizados devido à simplicidade de funcionamento e facilidade de integração com sistemas eletrônicos. Esses dispositivos permitem controlar cargas elétricas de maior potência utilizando sinais elétricos de baixa corrente provenientes do controlador principal (Carvalho Et Al., 2026).

Nos sistemas de movimentação automatizada de cargas, o controle dos motores deve ocorrer de maneira coordenada e segura, evitando movimentos inadequados que possam comprometer a estrutura do equipamento. Em pontes rolantes, por exemplo, o acionamento inadequado pode gerar colisões mecânicas, desalinhamentos estruturais e riscos operacionais durante o transporte da carga. Segundo Martins e Lima (2024), o sincronismo operacional dos motores possui grande relevância para garantir estabilidade e segurança em sistemas automatizados industriais.

Além do controle operacional, os sistemas de acionamento também possuem função relacionada à segurança do equipamento. Sensores de proteção e dispositivos de parada de emergência são frequentemente integrados ao sistema para interromper automaticamente os movimentos em situações de risco ou falha operacional (Santos; Ferreira, 2025).

No presente trabalho, o sistema de controle foi desenvolvido utilizando o Arduino Mega como unidade principal responsável pelo processamento das informações e execução da lógica operacional da ponte rolante inteligente. O acionamento dos motores foi realizado por meio de módulos eletrônicos integrados ao controlador, permitindo controlar os movimentos da estrutura de forma automatizada.

Durante o desenvolvimento do projeto, foram implementadas rotinas de controle destinadas à movimentação da ponte rolante nos diferentes eixos operacionais do sistema. Além disso, sensores de fim de curso foram integrados à lógica de funcionamento para limitar os movimentos e evitar danos estruturais durante a operação do protótipo (Oliveira; Costa, 2026).

Durante os testes realizados no projeto, foi possível observar que o sincronismo entre os dispositivos de controle e os motores influenciava diretamente no desempenho operacional da estrutura. Em alguns momentos, atrasos de resposta e pequenas falhas de acionamento exigiram ajustes na lógica implementada no controlador.

Outro fator importante identificado durante o desenvolvimento foi a necessidade de proteção elétrica adequada dos componentes utilizados no sistema. O acionamento simultâneo de determinados dispositivos gerava sobrecargas momentâneas e interferências elétricas que poderiam comprometer o funcionamento do controlador e dos sensores instalados na estrutura (Pereira; Martins, 2025).

Além disso, também foram realizados ajustes relacionados ao tempo de resposta dos acionamentos, buscando garantir maior estabilidade operacional durante os movimentos executados pela ponte rolante. Pequenas alterações na lógica de programação contribuíram significativamente para a melhoria do desempenho do sistema automatizado.

A implementação do sistema de controle e acionamento permitiu compreender de forma prática a importância da integração entre hardware e software no desenvolvimento de sistemas automatizados industriais. Essa etapa foi fundamental para garantir o funcionamento adequado da ponte rolante inteligente desenvolvida no presente trabalho.

2.10 Segurança em sistemas automatizados

A segurança em sistemas automatizados representa um dos fatores mais importantes dentro da automação industrial, principalmente em equipamentos que realizam movimentação de cargas, acionamentos mecânicos e operações de risco elevado. O funcionamento inadequado desses sistemas pode provocar acidentes graves, danos estruturais, falhas operacionais e riscos aos operadores envolvidos no processo. Segundo Silva e Ferreira (2024), a segurança operacional tornou-se um dos principais pilares dos sistemas automatizados modernos devido ao aumento da complexidade dos processos industriais.

Com o avanço da automação industrial, os sistemas de segurança passaram a ser incorporados diretamente aos equipamentos automatizados, permitindo maior controle operacional e redução de falhas durante a execução das atividades industriais. Sensores, dispositivos de proteção elétrica, sistemas de parada de emergência e mecanismos de limitação de movimento tornaram-se elementos fundamentais em máquinas e equipamentos industriais modernos (SANTOS Et Al., 2023).

Em sistemas de movimentação de cargas, como pontes rolantes, a segurança operacional possui grande relevância devido ao deslocamento de estruturas e materiais pesados. Movimentos inadequados, falhas de acionamento ou ausência de controle podem gerar colisões mecânicas, queda de cargas e danos aos componentes estruturais do equipamento. De acordo com Pereira e Costa (2025), sistemas de movimentação automatizada exigem mecanismos de proteção capazes de minimizar riscos operacionais durante o funcionamento do equipamento.

Os sensores de fim de curso representam um dos principais dispositivos de segurança utilizados em sistemas automatizados de movimentação. Esses sensores possuem a função de limitar os deslocamentos da estrutura, interrompendo automaticamente o funcionamento dos motores quando determinados limites físicos são atingidos (Rodrigues; Almeida, 2022).

Além dos sensores, sistemas automatizados também utilizam dispositivos de proteção elétrica destinados à prevenção de falhas relacionadas à alimentação do sistema. Fusíveis, disjuntores e módulos de proteção ajudam a evitar sobrecargas, curtos-circuitos e danos aos componentes eletrônicos utilizados nos equipamentos automatizados. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), a proteção elétrica adequada contribui significativamente para a confiabilidade e estabilidade operacional dos sistemas industriais.

Outro elemento importante relacionado à segurança industrial é o sistema de parada de emergência. Esse mecanismo permite interromper imediatamente o funcionamento do equipamento em situações de risco operacional, reduzindo a possibilidade de acidentes durante a operação do sistema automatizado (Ferreira; Lima, 2024).

Em ambientes industriais reais, as normas regulamentadoras também possuem grande importância para garantir a segurança operacional dos equipamentos. No Brasil, destacam-se principalmente a NR-10, relacionada à segurança em instalações elétricas, e a NR-12, voltada à segurança em máquinas e equipamentos industriais. Segundo Oliveira e Martins (2025), a aplicação das normas regulamentadoras contribui diretamente para a redução de acidentes e padronização das práticas de segurança industrial.

A NR-10 estabelece requisitos relacionados à proteção contra riscos elétricos, procedimentos de segurança e utilização adequada de instalações energizadas. Já a NR-12 determina critérios destinados à proteção dos operadores durante o funcionamento de máquinas e sistemas automatizados (Santos; Costa, 2023).

Embora o presente projeto tenha sido desenvolvido em escala reduzida e com finalidade experimental, diversos conceitos relacionados à segurança operacional foram considerados durante a construção da ponte rolante inteligente. Sensores de fim de curso

foram instalados na estrutura para limitar os movimentos da ponte rolante e evitar impactos mecânicos durante os testes operacionais.

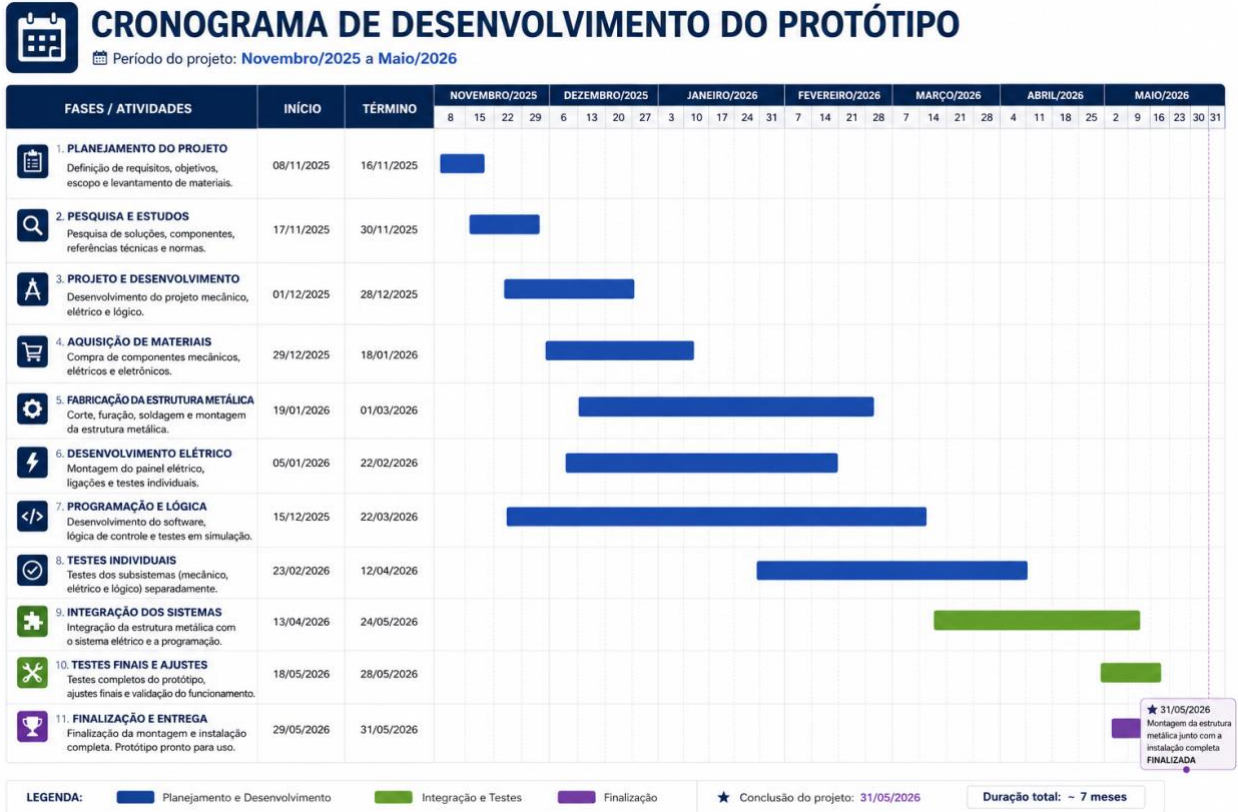
Além disso, também foram realizados cuidados relacionados à organização das conexões elétricas e alimentação dos componentes eletrônicos do sistema, buscando reduzir riscos de curto-circuito e falhas operacionais durante o funcionamento do protótipo (PEREIRA; FERREIRA, 2026).

Durante os testes realizados no projeto, foi possível observar que pequenos erros de alinhamento ou falhas na lógica de controle poderiam comprometer diretamente a segurança operacional do sistema. Em determinadas situações, a ausência de limitação adequada dos movimentos gerava impactos mecânicos capazes de afetar a estabilidade da estrutura.

Outro fator importante identificado durante o desenvolvimento foi a necessidade de monitoramento contínuo dos sensores de segurança. Em alguns testes iniciais, falhas de leitura dos sensores provocaram atrasos na interrupção dos movimentos, exigindo ajustes adicionais na programação do sistema de controle (CARVALHO; OLIVEIRA, 2025).

Além disso, também foram identificadas dificuldades relacionadas à estabilidade mecânica da estrutura durante determinadas operações. Vibrações excessivas e deslocamentos irregulares exigiram reforços estruturais e adaptações mecânicas para garantir maior segurança durante o funcionamento do protótipo.

Tabela 1 – Cronograma.



Fonte: Autor próprio.

A aplicação prática dos conceitos de segurança em sistemas automatizados permitiu compreender a importância desses mecanismos dentro da automação industrial moderna. A integração entre sensores, sistemas de controle e dispositivos de proteção demonstrou que a segurança operacional deve ser considerada desde as etapas iniciais do desenvolvimento de qualquer sistema automatizado industrial.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho baseou-se no desenvolvimento experimental de um protótipo funcional de ponte rolante inteligente em escala reduzida, integrando conceitos relacionados à automação industrial, controle de movimento e sistemas eletromecânicos. Segundo Silva e Ferreira (2024), pesquisas experimentais voltadas à automação industrial permitem aplicar de forma prática conceitos relacionados à integração entre hardware, software e sistemas mecânicos. O projeto foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica, planejamento estrutural, montagem mecânica, implementação eletrônica e realização de testes operacionais destinados à validação do funcionamento do sistema.

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica voltada aos conceitos de automação industrial, sistemas de movimentação de cargas, sensores industriais, motores elétricos, sistemas de controle e aplicações envolvendo pontes rolantes automatizadas. Essa etapa permitiu compreender os princípios teóricos necessários para o desenvolvimento da estrutura e definição dos componentes utilizados no projeto (SANTOS et al., 2023).

Após o levantamento teórico, iniciou-se o planejamento estrutural da ponte rolante em escala reduzida. Nessa etapa foram definidos os materiais utilizados na construção da estrutura mecânica, posicionamento dos motores elétricos, localização dos sensores de fim de curso e organização dos componentes eletrônicos responsáveis pelo funcionamento do sistema automatizado. De acordo com Pereira e Costa (2025), o planejamento estrutural possui grande importância em projetos automatizados devido à necessidade de integração entre componentes mecânicos e eletrônicos.

A construção mecânica da estrutura envolveu processos de montagem, alinhamento estrutural e adaptação dos componentes responsáveis pela movimentação da ponte rolante. Durante essa etapa, foram identificadas dificuldades relacionadas principalmente ao alinhamento das partes móveis e estabilidade da estrutura, exigindo ajustes mecânicos ao longo do desenvolvimento do projeto (RODRIGUES; ALMEIDA, 2022).

Posteriormente, foi realizada a implementação do sistema eletrônico utilizando o microcontrolador Arduino Mega como unidade principal de controle. O controlador foi

responsável pela leitura dos sensores, acionamento dos motores e execução da lógica operacional da ponte rolante inteligente. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), plataformas microcontroladas apresentam elevada eficiência em projetos experimentais de automação industrial devido à facilidade de programação e integração com dispositivos eletrônicos.

Além da implementação eletrônica, também foi desenvolvida a programação do sistema responsável pelo controle dos movimentos da estrutura. A lógica implementada permitiu controlar os deslocamentos da ponte rolante e limitar os movimentos por meio dos sensores de fim de curso instalados no sistema (Ferreira; Lima, 2024).

Após a integração entre os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos, foram realizados testes operacionais destinados à validação do funcionamento do protótipo. Durante os testes, foram analisados fatores relacionados à movimentação da estrutura, resposta dos sensores, estabilidade operacional e desempenho dos motores utilizados no sistema.

Durante o desenvolvimento do projeto, diversos ajustes estruturais e eletrônicos foram necessários para garantir maior estabilidade operacional da ponte rolante. Pequenos desalinhamentos mecânicos, falhas de acionamento e interferências elétricas exigiram adaptações contínuas ao longo das etapas de montagem e testes do sistema automatizado. Segundo Oliveira e Martins (2025), ajustes estruturais e correções operacionais são comuns em projetos experimentais voltados à automação industrial devido à complexidade da integração entre diferentes sistemas.

A metodologia experimental utilizada permitiu compreender de forma prática os desafios relacionados à integração entre sistemas mecânicos e eletrônicos aplicados à automação industrial. Além disso, o desenvolvimento do protótipo contribuiu para análise das dificuldades operacionais envolvidas na implementação de sistemas automatizados voltados à movimentação de cargas.

TABELA 1: Relação de materiais e custos utilizados no desenvolvimento do projeto.

Item	Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)
Arduino Mega 2560	Controlador Principal	1	135,59
Motorreductor 12V	Movimento eixo X	1	192,00
Motorreductor 12V	Movimento eixo Y	1	192,00
Motorreductor 12V	Movimento eixo Z	1	192,00
Driver de Motor	Controle PWM	3	49,80
Botoeira Industrial/ Emergencia	Acionamento/Segurança	1	198,99
Sensor Indutivo	Fim de Curso	5	19,80
Fonte 12V	Alimentação	1	90,00
Fonte 5V	Alimentação do Arduino	1	19,90
Sirene/Buzzer 12V	Aleta Sonoro	1	5,99
Sinalizador Luminoso 12V	Indicação visual de operação/Falha	3	15,90
Estrutura metálica	Base do Projeto	1	900,00
Cabos elétricos	Alimentação e Sinal	Kit	125,00
Tambor de enrolamento	Sistema de elevação	1	149,90
Moitão/Gancho	lçamento da Carga	1	79,90
Disjuntor	Proteção Geral	1	45,90
Caixa ou quadro elétrico	Alojamento dos componentes	1	189,90
Etiquetas de identificação	Organização	Kit	89,90
Cabo de Aço	Sistema de lçamento	1	25,00
Conectores/Bornes	Ligações	Kit	75,90

Fonte: Autor próprio.

3.1 Materiais utilizados no projeto

O desenvolvimento da ponte rolante inteligente em escala reduzida exigiu a utilização de diferentes componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos responsáveis pelo funcionamento estrutural e operacional do sistema automatizado. A seleção dos materiais utilizados ocorreu com base na disponibilidade dos componentes, compatibilidade entre os dispositivos e necessidades relacionadas ao funcionamento do protótipo. Segundo Silva e Ferreira (2024), a escolha adequada dos componentes possui grande influência no desempenho operacional e estabilidade dos sistemas automatizados experimentais.

Entre os principais componentes eletrônicos utilizados no projeto destaca-se o microcontrolador Arduino Mega, responsável pelo processamento das informações do sistema e execução da lógica de controle da ponte rolante. O controlador foi utilizado devido à quantidade de portas disponíveis, facilidade de programação e compatibilidade com os sensores e módulos empregados no projeto (Santos Et Al., 2023).

Para realização dos movimentos da estrutura, foram utilizados motores elétricos responsáveis pelo deslocamento da ponte rolante nos diferentes eixos operacionais. Os motores foram integrados ao sistema de acionamento eletrônico, permitindo o controle automatizado dos movimentos por meio da programação implementada no Arduino Mega. De acordo com Pereira e Costa (2025), motores elétricos apresentam grande importância em sistemas automatizados de movimentação devido à capacidade de gerar movimentos controlados com elevada precisão operacional.

Os sensores de fim de curso também representaram componentes fundamentais para o funcionamento do sistema. Esses dispositivos foram utilizados para limitar os movimentos da estrutura e evitar impactos mecânicos durante a operação da ponte rolante. A integração dos sensores permitiu aumentar a segurança operacional e melhorar o controle dos deslocamentos realizados pelo protótipo (Rodrigues; Almeida, 2022).

Além dos componentes eletrônicos, o projeto também exigiu a utilização de materiais estruturais responsáveis pela sustentação da ponte rolante. Foram utilizados perfis metálicos, suportes mecânicos, parafusos, bases estruturais e elementos de fixação destinados à montagem da estrutura principal do sistema. Conforme destacado

por Carvalho et al. (2026), a estabilidade estrutural representa um fator essencial em sistemas automatizados de movimentação mecânica.

O sistema elétrico do projeto foi composto por cabos de alimentação, conectores, módulos de acionamento, relés e fonte de alimentação responsável pelo fornecimento de energia aos componentes eletrônicos e motores utilizados no protótipo. A organização adequada das conexões elétricas foi fundamental para garantir maior estabilidade operacional durante os testes realizados (FERREIRA; LIMA, 2024).

Durante o desenvolvimento do projeto, também foram utilizados equipamentos auxiliares destinados à montagem e ajustes estruturais da ponte rolante. Ferramentas de corte, fixação, medição e soldagem contribuíram diretamente para a adaptação dos componentes mecânicos e organização da estrutura desenvolvida.

Figura 8 – Fonte.



Fonte: Autor próprio.

Outro aspecto importante relacionado aos materiais utilizados está ligado à necessidade de compatibilidade entre os componentes do sistema. Em determinados momentos, adaptações estruturais e elétricas foram necessárias devido às diferenças

entre dimensões mecânicas, alimentação elétrica e características operacionais dos dispositivos utilizados. Segundo Oliveira e Martins (2025), incompatibilidades entre componentes podem comprometer diretamente o desempenho operacional de sistemas automatizados.

Durante os testes iniciais, alguns componentes apresentaram necessidade de substituição ou reforço estrutural devido às limitações identificadas durante o funcionamento do sistema. Pequenos problemas relacionados ao torque dos motores, estabilidade mecânica e alimentação elétrica exigiram adaptações ao longo do desenvolvimento do protótipo.

Além disso, também foram realizados ajustes relacionados à organização física dos componentes eletrônicos instalados na estrutura. O posicionamento inadequado de determinados dispositivos causava interferências durante os movimentos da ponte rolante, exigindo reorganização do sistema elétrico e eletrônico (PEREIRA; FERREIRA, 2026).

A escolha adequada dos materiais utilizados no projeto contribuiu diretamente para o funcionamento da ponte rolante inteligente, permitindo integrar os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos necessários para execução dos movimentos automatizados da estrutura.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Desenvolvimento da estrutura mecânica

O desenvolvimento da estrutura mecânica da ponte rolante representou uma das etapas mais importantes e complexas do projeto, pois a estabilidade estrutural influencia diretamente no funcionamento dos sistemas de movimentação e controle da estrutura automatizada. Durante essa etapa, foram realizados processos de planejamento, montagem, alinhamento e adaptação dos componentes responsáveis pela sustentação da ponte rolante em escala reduzida. Segundo Silva e Ferreira (2024), a estrutura mecânica possui papel fundamental em sistemas automatizados de movimentação devido à necessidade de estabilidade operacional e precisão durante os deslocamentos realizados pelo equipamento.

Inicialmente, foi realizado o planejamento estrutural do protótipo, definindo as dimensões da estrutura, posicionamento dos motores, localização dos sensores e distribuição dos componentes eletrônicos. Essa etapa foi fundamental para garantir compatibilidade entre os sistemas mecânicos e eletrônicos utilizados no projeto (SANTOS et al., 2023).

A estrutura principal da ponte rolante foi desenvolvida utilizando materiais metálicos e componentes de sustentação capazes de suportar os mecanismos de movimentação instalados no sistema. O objetivo principal foi construir uma estrutura resistente o suficiente para permitir o deslocamento da carga sem comprometer a estabilidade operacional do protótipo. De acordo com Pereira e Costa (2025), a resistência estrutural representa um dos principais fatores relacionados ao desempenho de sistemas automatizados de movimentação industrial.

Durante a montagem mecânica, foram identificadas dificuldades relacionadas ao alinhamento das partes móveis da estrutura. Pequenos desalinhamentos provocavam aumento do atrito entre os componentes e dificultavam o deslocamento adequado da ponte rolante, exigindo diversos ajustes ao longo do desenvolvimento do projeto (RODRIGUES; ALMEIDA, 2022).

Outro aspecto importante observado durante a construção foi a distribuição do peso sobre a estrutura. Em determinados momentos, o posicionamento inadequado dos motores e componentes eletrônicos causava desequilíbrios mecânicos que afetavam

diretamente a estabilidade do sistema durante os movimentos realizados pela ponte rolante.

Além disso, também foram necessários reforços estruturais em determinadas regiões da ponte rolante devido às vibrações geradas durante os testes operacionais. O funcionamento simultâneo dos motores provocava pequenas oscilações mecânicas que exigiram adaptações estruturais para aumentar a rigidez da estrutura desenvolvida. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), vibrações mecânicas representam um dos principais desafios relacionados ao desenvolvimento de estruturas automatizadas móveis.

Os sistemas de movimentação da ponte rolante foram integrados à estrutura mecânica por meio de suportes e mecanismos responsáveis pelo deslocamento horizontal e vertical do sistema. Esses mecanismos foram ajustados continuamente durante os testes para garantir maior precisão nos movimentos executados pela estrutura (Ferreira; Lima, 2024).

Outro fator importante relacionado ao desenvolvimento mecânico foi a necessidade de compatibilidade entre os componentes estruturais e os sensores instalados no sistema. O posicionamento inadequado dos sensores dificultava a detecção correta dos limites operacionais da ponte rolante, exigindo reposicionamento dos dispositivos ao longo da montagem.

Durante os testes iniciais, também foram identificadas dificuldades relacionadas ao deslocamento da estrutura sobre os mecanismos de movimentação. Em alguns momentos, o excesso de atrito comprometia a eficiência operacional do sistema, tornando necessária a realização de ajustes mecânicos adicionais (OLIVEIRA; MARTINS, 2025).

Além disso, pequenas deformações estruturais foram observadas em determinadas regiões da ponte rolante durante os testes de movimentação. Essas situações evidenciaram a importância do reforço estrutural mesmo em sistemas desenvolvidos em escala reduzida.

Outro aspecto relevante observado durante o desenvolvimento foi a necessidade de manutenção constante do alinhamento estrutural. Movimentos repetitivos realizados pelos motores provocavam pequenas alterações no posicionamento dos componentes

mecânicos, exigindo verificações frequentes durante os testes operacionais (Pereira; Ferreira, 2026).

A construção da estrutura mecânica permitiu compreender de forma prática os desafios envolvidos no desenvolvimento de sistemas automatizados de movimentação de cargas. A integração entre estabilidade estrutural, controle eletrônico e precisão mecânica mostrou-se fundamental para o funcionamento adequado da ponte rolante inteligente desenvolvida no presente trabalho.

Figura 9 – Estrutura mecânica da ponte rolante após ajustes e montagem final.



Fonte: Autor próprio.

4.2 Sistema elétrico e eletrônico

O desenvolvimento do sistema elétrico e eletrônico da ponte rolante inteligente foi responsável pela integração entre os dispositivos de controle, sensores, motores e módulos de acionamento utilizados no funcionamento automatizado da estrutura. Essa etapa teve como principal objetivo garantir a comunicação adequada entre os componentes do sistema, permitindo o controle operacional dos movimentos realizados pela ponte rolante. Segundo Silva e Ferreira (2024), a integração entre sistemas elétricos e eletrônicos representa uma das etapas mais importantes no desenvolvimento de sistemas automatizados industriais.

Inicialmente, foi realizado o planejamento das conexões elétricas necessárias para alimentação dos componentes eletrônicos e acionamento dos motores utilizados no projeto. Nessa etapa, foram definidos os circuitos responsáveis pela distribuição de

energia, organização das conexões e integração entre os dispositivos instalados no sistema automatizado (SANTOS et al., 2023).

O Arduino Mega foi utilizado como unidade principal de controle do sistema eletrônico, sendo responsável pelo processamento das informações recebidas pelos sensores e execução dos comandos destinados ao acionamento dos motores elétricos. A escolha do controlador ocorreu devido à quantidade de portas disponíveis e facilidade de integração com os componentes utilizados no projeto. De acordo com Pereira e Costa (2025), plataformas microcontroladas possuem elevada aplicabilidade em sistemas automatizados devido à flexibilidade operacional e capacidade de integração com diferentes dispositivos eletrônicos.

Os motores responsáveis pela movimentação da ponte rolante foram conectados a módulos de acionamento eletrônico destinados ao controle dos movimentos da estrutura. Esses módulos permitiram realizar o acionamento dos motores de forma controlada, possibilitando a movimentação da ponte rolante nos diferentes eixos operacionais do sistema (Rodrigues; Almeida, 2022).

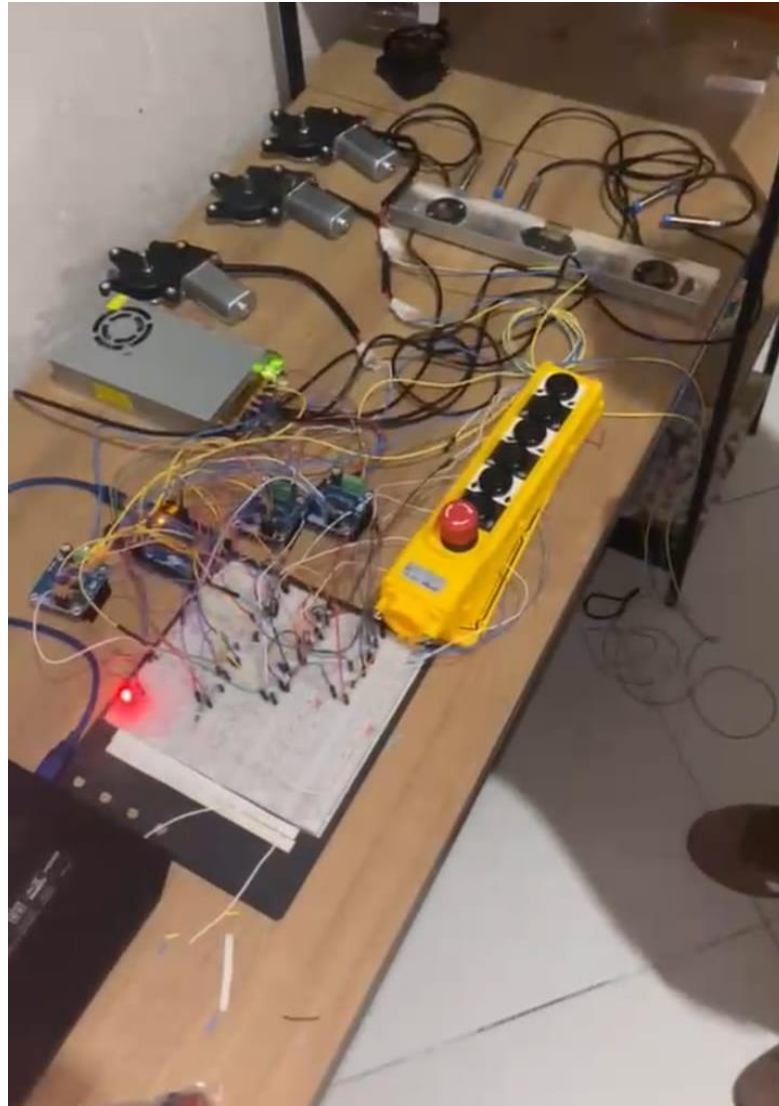
Além dos motores, os sensores de fim de curso também foram integrados ao circuito eletrônico da ponte rolante. Esses dispositivos foram responsáveis pelo monitoramento dos limites operacionais da estrutura, enviando sinais ao Arduino Mega sempre que determinadas posições fossem atingidas durante os movimentos realizados pelo sistema. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), sensores industriais possuem papel essencial no monitoramento operacional e segurança de sistemas automatizados.

Durante o desenvolvimento do circuito eletrônico, também foram implementadas conexões destinadas à alimentação elétrica dos componentes do sistema. Fontes de alimentação, cabos elétricos, conectores e dispositivos de proteção foram organizados de maneira a garantir maior estabilidade operacional durante os testes realizados no projeto (FERREIRA; LIMA, 2024).

Outro aspecto importante relacionado ao sistema eletrônico foi a necessidade de organização adequada das conexões internas da estrutura. O grande número de fios e componentes instalados exigiu planejamento cuidadoso para evitar interferências

elétricas, falhas de comunicação e dificuldades de manutenção durante o funcionamento do protótipo.

Figura 10 – Sistema elétrico e eletrônico utilizado na ponte rolante inteligente.



Fonte: Autor próprio.

Durante os testes iniciais, foram identificadas algumas dificuldades relacionadas à alimentação elétrica dos componentes. Em determinados momentos, oscilações elétricas causavam falhas temporárias nos sensores e instabilidade durante o funcionamento simultâneo dos motores utilizados na estrutura (OLIVEIRA; MARTINS, 2025).

Além disso, também foram observadas interferências elétricas provocadas pela proximidade entre cabos de alimentação e sinais de controle. Essas situações exigiram

reorganização das conexões internas e melhorias no posicionamento dos componentes eletrônicos instalados no sistema.

Outro fator importante identificado durante o desenvolvimento foi a necessidade de proteção adequada do circuito eletrônico contra sobrecargas e acionamentos inadequados. Pequenos erros de conexão poderiam comprometer o funcionamento do controlador e causar danos aos dispositivos utilizados no projeto (PEREIRA; FERREIRA, 2026).

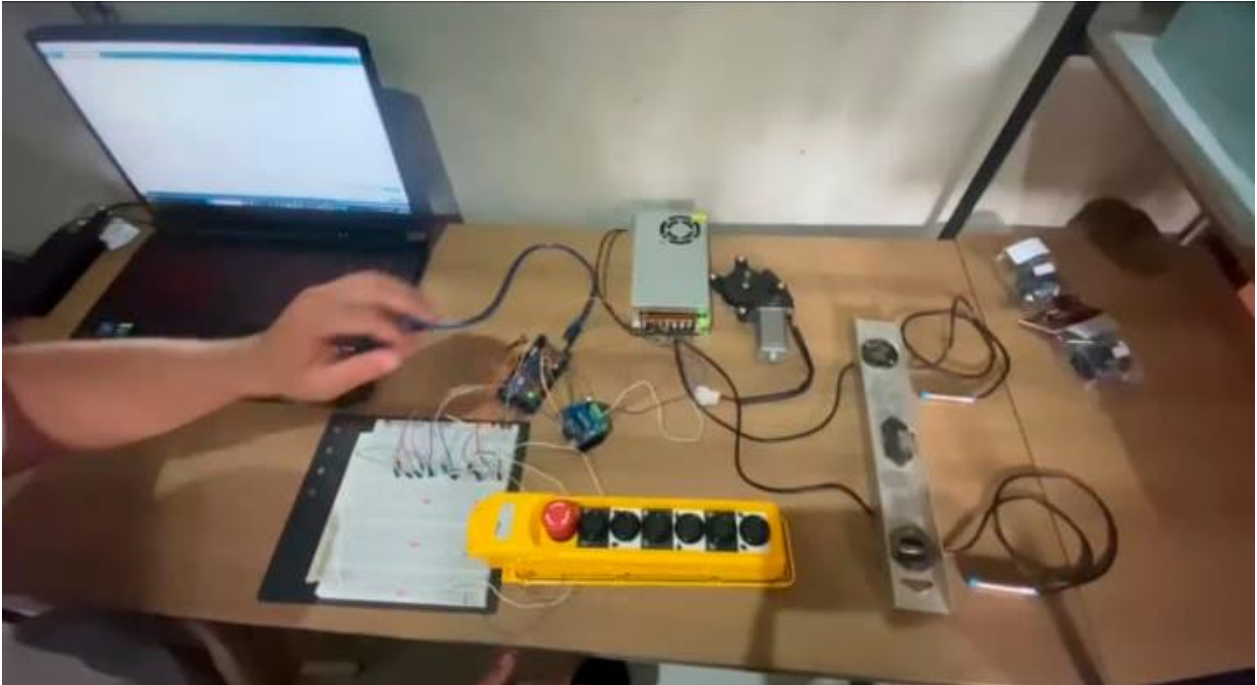
A integração entre os sistemas elétrico e eletrônico permitiu compreender de forma prática a importância da organização e compatibilidade entre os componentes utilizados em sistemas automatizados industriais. Essa etapa foi fundamental para garantir o funcionamento adequado da ponte rolante inteligente desenvolvida no presente trabalho.

Figura 11 – Organização dos componentes elétricos e eletrônicos na estrutura do protótipo.



Fonte: Autor próprio.

Figura 12 – Projeto elétrico simplificado da ponte rolante inteligente.



Fonte: Autor próprio.

4.3 Programação e lógica de controle

O desenvolvimento da programação da ponte rolante inteligente teve como principal objetivo controlar os movimentos da estrutura de forma automatizada, permitindo a integração entre sensores, motores e dispositivos eletrônicos presentes no sistema. A lógica de controle foi implementada utilizando o microcontrolador Arduino Mega, responsável pelo processamento das informações operacionais da ponte rolante. Segundo Silva e Ferreira (2024), a programação dos sistemas automatizados representa uma das etapas mais importantes da automação industrial, pois é responsável pela coordenação lógica entre sensores, atuadores e dispositivos de controle.

Inicialmente, foram desenvolvidas rotinas básicas destinadas ao acionamento individual dos motores responsáveis pelos movimentos da estrutura. Essa etapa permitiu verificar o funcionamento dos componentes eletrônicos e validar a comunicação entre o controlador e os dispositivos de acionamento utilizados no projeto (SANTOS et al., 2023).

Após os testes iniciais, a programação foi ampliada para permitir o controle integrado dos movimentos horizontal, transversal e vertical da ponte rolante. A lógica

implementada possibilitou o acionamento coordenado dos motores, garantindo maior estabilidade operacional durante os deslocamentos realizados pela estrutura. De acordo com Pereira e Costa (2025), o sincronismo entre os movimentos representa um fator essencial para garantir precisão operacional em sistemas automatizados de movimentação.

Além do controle dos motores, também foi realizada a integração dos sensores de fim de curso ao sistema de programação. Esses sensores foram utilizados para limitar automaticamente os movimentos da ponte rolante, interrompendo o acionamento dos motores quando determinados limites operacionais fossem atingidos (RODRIGUES; ALMEIDA, 2022).

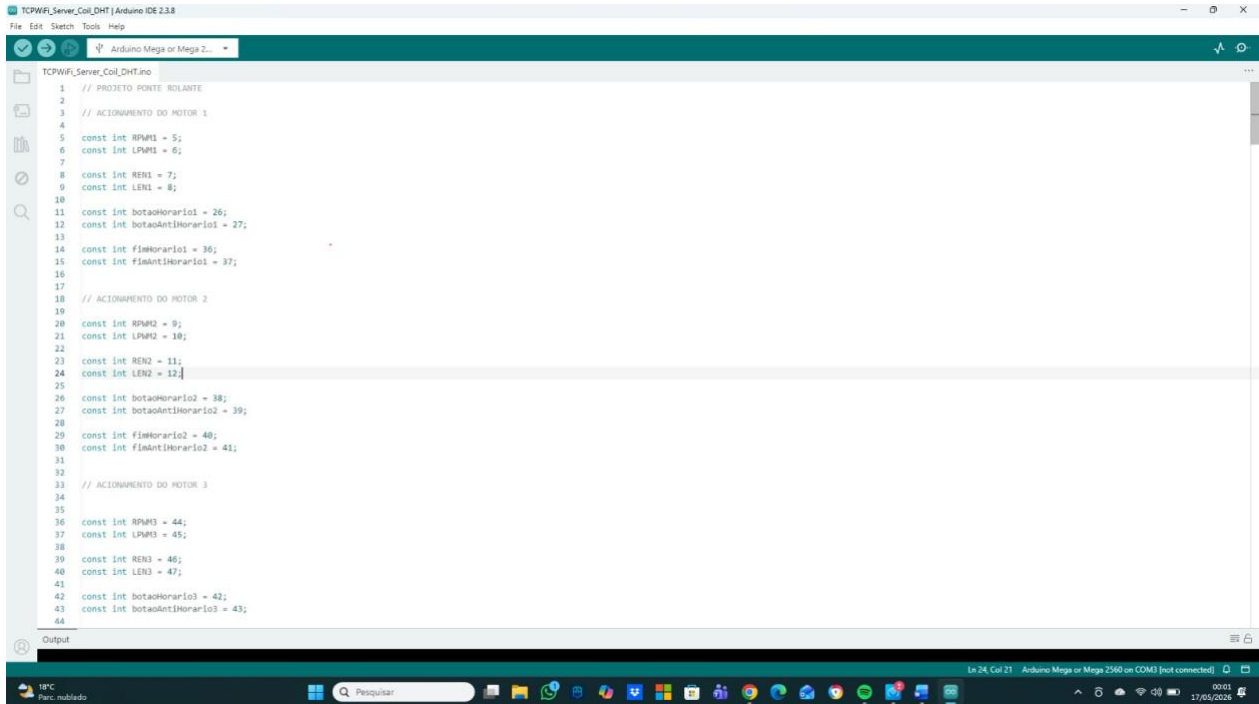
Durante o desenvolvimento da lógica de controle, foram identificadas dificuldades relacionadas principalmente à sincronização entre os movimentos da estrutura e resposta dos sensores instalados no sistema. Em alguns momentos, atrasos de leitura provocavam pequenas falhas operacionais, exigindo ajustes contínuos na programação implementada no controlador.

Outro aspecto importante relacionado ao desenvolvimento da programação foi a necessidade de tratamento lógico para evitar acionamentos simultâneos inadequados dos motores. Em determinadas situações, movimentos executados ao mesmo tempo poderiam comprometer a estabilidade estrutural da ponte rolante e causar desalinhamentos mecânicos durante o funcionamento do sistema. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), falhas de sincronização lógica podem comprometer diretamente a estabilidade operacional de sistemas automatizados industriais.

Além disso, também foram implementadas rotinas de segurança destinadas à interrupção automática dos movimentos em situações de falha operacional. Essas rotinas permitiram aumentar a segurança do sistema e reduzir riscos relacionados ao funcionamento inadequado da estrutura automatizada (FERREIRA; LIMA, 2024).

A programação do sistema foi desenvolvida utilizando a linguagem baseada em C/C++ presente na plataforma Arduino IDE. Durante o desenvolvimento, foram utilizados comandos relacionados à leitura de entradas digitais, acionamento de saídas, controle lógico e monitoramento dos sensores instalados na ponte rolante.

Figura 13 – Desenvolvimento da programação da ponte rolante no ambiente Arduino IDE.



```

TCPWFL_Server_Col_DHT.ino
1 // PROJETO PONTE ROLANTE
2
3 // AÇIONAMENTO DO MOTOR 1
4
5 const int RPM1 = 5;
6 const int LPM1 = 6;
7
8 const int REN1 = 7;
9 const int LEN1 = 8;
10
11 const int botoaHorario1 = 26;
12 const int botoaAntiHorario1 = 27;
13
14 const int fimHorario1 = 36;
15 const int fimAntiHorario1 = 37;
16
17
18 // AÇIONAMENTO DO MOTOR 2
19
20 const int RPM2 = 9;
21 const int LPM2 = 10;
22
23 const int REN2 = 11;
24 const int LEN2 = 12;
25
26 const int botoaHorario2 = 38;
27 const int botoaAntiHorario2 = 39;
28
29 const int fimHorario2 = 40;
30 const int fimAntiHorario2 = 41;
31
32
33 // AÇIONAMENTO DO MOTOR 3
34
35
36 const int RPM3 = 44;
37 const int LPM3 = 45;
38
39 const int REN3 = 46;
40 const int LEN3 = 47;
41
42 const int botoaHorario3 = 42;
43 const int botoaAntiHorario3 = 43;
44
  
```

Fonte: Autor próprio.

Durante os testes operacionais, foi possível observar que pequenas alterações na lógica de programação influenciavam diretamente no comportamento da estrutura. Ajustes relacionados ao tempo de resposta dos motores e leitura dos sensores contribuíram significativamente para a melhoria do desempenho operacional do sistema automatizado (OLIVEIRA; MARTINS, 2025).

Outro fator identificado durante o desenvolvimento foi a necessidade de otimização da lógica de controle para reduzir falhas relacionadas à leitura dos sensores de fim de curso. Em determinados momentos, oscilações elétricas provocavam leituras inconsistentes, exigindo adaptações no código para aumentar a estabilidade operacional do sistema.

Além disso, também foram realizados testes relacionados ao comportamento da estrutura durante operações contínuas. Esses testes permitiram verificar a estabilidade da programação e identificar possíveis falhas associadas ao funcionamento prolongado dos motores e sensores integrados ao sistema (PEREIRA; FERREIRA, 2026).

A implementação da lógica de controle permitiu compreender de forma prática a importância da programação dentro da automação industrial. A integração entre hardware e software demonstrou como os sistemas automatizados dependem diretamente do correto funcionamento das rotinas de controle responsáveis pela operação da estrutura.

Figura 14 – Trecho do código utilizado no controle da ponte rolante inteligente.

```

302   paramotor1();
303   paramotor2();
304
305   if(h3==LOW && ab3==HIGH && Fh3==HIGH)
306     girarMotor1();
307
308   else if(ab3==LOW && h3==HIGH)
309     girarAntiMotor1();
310
311   else
312   {
313     paramotor1();
314     motorAtivo=0;
315   }
316 }
317 }
318
319
320 // FUNÇÕES DO MOTOR 1
321
322 void girarMotor1()
323 {
324   analogWrite(RPM1, velocidade);
325   analogWrite(LPM1, 0);
326 }
327
328 void girarAntiMotor1()
329 {
330   analogWrite(RPM1, 0);
331   analogWrite(LPM1, velocidade);
332 }
333
334 void paramotor1()
335 {
336   analogWrite(RPM1, 0);
337   analogWrite(LPM1, 0);
338 }
339
340
341 // FUNÇÕES DO MOTOR 2
342
343 void girarMotor2()
344 {

```

Fonte: Autor próprio.

4.4 Cálculos mecânicos e dimensionamento dos motores

Durante o desenvolvimento da ponte rolante inteligente em escala reduzida, foram realizados cálculos mecânicos com o objetivo de verificar a capacidade operacional dos motores empregados no sistema de movimentação do protótipo. Esses cálculos foram considerados importantes para garantir que os motores selecionados fossem capazes de suportar os esforços mecânicos exigidos durante a movimentação da carga simulada no sistema automatizado.

Além disso, o dimensionamento adequado dos motores contribui diretamente para fatores relacionados à estabilidade estrutural, eficiência operacional e segurança do processo automatizado. Segundo Silva e Ferreira (2024), a análise do torque mecânico

e da força aplicada representa uma das etapas fundamentais em projetos de automação industrial que envolvem movimentação de cargas.

Inicialmente, foi utilizado o conceito de torque mecânico aplicado ao eixo de movimentação. O torque representa a capacidade que o motor possui de produzir movimento rotacional a partir da aplicação de uma força em determinado raio.

A Equação (1) apresenta a relação utilizada para o cálculo do torque mecânico.

$$C = F \times R \quad (1)$$

Onde:

- C = torque mecânico (kgf·cm);
- F = força aplicada (kgf);
- R = raio do eixo de movimentação (cm).

A partir dessa relação matemática, foi possível determinar a força exercida pelos motores utilizados no sistema da ponte rolante.

Também foi utilizada a relação entre potência mecânica e velocidade angular, permitindo analisar o comportamento operacional do motor durante o funcionamento do sistema.

A Equação (2) representa a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

$$P = C \times \omega \quad (2)$$

Onde:

- P = potência mecânica (W);
- C = torque mecânico;
- ω = velocidade angular (rad/s).

A velocidade angular do motor foi determinada utilizando a relação entre rotação por minuto e velocidade angular, conforme mostrado na Equação (3).

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

Onde:

- ω = velocidade angular (rad/s);

- π = constante matemática equivalente a 3,1416;
- n = rotação do motor em rotações por minuto (rpm).

Durante os testes realizados no protótipo, foi considerado um torque nominal aproximado de 8 kgf·cm e um torque máximo de 20 kgf·cm, utilizando um raio operacional de aproximadamente 0,8 cm no eixo de movimentação.

Com base nesses valores, realizou-se inicialmente o cálculo da força nominal exercida pelo sistema.

Substituindo os valores na Equação (1), obteve-se:

$$F = \frac{C}{R}$$

$$F = \frac{8}{0,8}$$

$$F = 10 \text{ kgf}$$

O resultado obtido demonstra que o sistema é capaz de exercer aproximadamente 10 kgf de força nominal durante a movimentação da estrutura.

Posteriormente, foi realizado o cálculo da força máxima suportada pelo conjunto mecânico, considerando o torque máximo fornecido pelo motor.

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{20}{0,8}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 25 \text{ kgf}$$

Assim, verificou-se que a força máxima suportada pelo sistema corresponde a aproximadamente 25 kgf.

Os resultados encontrados permitiram concluir que os motores selecionados apresentam capacidade suficiente para realizar a movimentação da ponte rolante em escala reduzida dentro das condições operacionais previstas para o protótipo.

Além da validação prática do funcionamento do sistema, os cálculos desenvolvidos contribuíram para a compreensão dos conceitos relacionados ao torque mecânico, potência, velocidade angular e dimensionamento de motores aplicados à automação industrial.

Durante o processo de desenvolvimento do projeto, foi possível perceber a importância da análise mecânica preliminar para evitar problemas relacionados à sobrecarga dos motores, perda de desempenho ou falhas estruturais. Mesmo tratando-se de um protótipo em escala reduzida, os cálculos auxiliaram na escolha mais adequada dos componentes utilizados no sistema.

5. TESTES E RESULTADOS

Após a conclusão das etapas de montagem mecânica, integração eletrônica e desenvolvimento da programação, foram realizados testes operacionais, denominados “Casos”, destinados à análise do funcionamento da ponte rolante inteligente em escala reduzida. Os testes tiveram como objetivo verificar o desempenho dos motores, resposta dos sensores, estabilidade estrutural e funcionamento geral do sistema automatizado desenvolvido no projeto.

5.1 Os casos desenvolvidos

Os casos desenvolvidos durante os testes operacionais tiveram como finalidade avaliar o comportamento da ponte rolante inteligente sob diferentes condições de funcionamento. Foram simuladas situações envolvendo falhas mecânicas, falhas em sensores e problemas na alimentação elétrica, além de uma condição de operação normal para validação do sistema. A realização desses testes permitiu identificar limitações, verificar a eficiência dos componentes utilizados e analisar a influência de fatores mecânicos, elétricos e eletrônicos no desempenho do protótipo. Os resultados obtidos contribuíram para o aprimoramento da estrutura, da lógica de controle e da confiabilidade operacional do sistema desenvolvido.

5.1.1 Caso 01

No Caso 1, observou-se a necessidade de ajustes estruturais e do reposicionamento de componentes mecânicos para evitar o aquecimento excessivo dos motores e falhas nos sensores. Os testes demonstraram que o desalinhamento da estrutura compromete diretamente o funcionamento do sistema, evidenciando que a ponte rolante não deve operar em condições de desalinhamento, sob risco de perda de desempenho e falhas operacionais.

5.1.2 Caso 02

No Caso 2, verificou-se que a falha no sensor de fim de curso comprometeu a precisão do posicionamento da ponte rolante, aumentando o risco de deslocamentos além dos limites estabelecidos. Os resultados evidenciaram a importância dos sensores para a segurança operacional e para o correto controle dos movimentos executados pelo sistema.

5.1.3 Caso 03

No Caso 3, constatou-se que a falha na alimentação elétrica de um dos motores reduziu o desempenho geral da ponte rolante, dificultando a execução adequada dos movimentos programados. Os resultados demonstraram a necessidade de monitoramento contínuo dos componentes elétricos para garantir a confiabilidade e a estabilidade operacional do sistema.

5.1.4 Caso 04

No Caso 4, o sistema operou em condições normais, sem a inserção de falhas. Os resultados demonstraram que a ponte rolante executou corretamente os movimentos de elevação, deslocamento e posicionamento da carga, mantendo estabilidade estrutural e resposta adequada dos sensores e motores. Dessa forma, foi possível validar o funcionamento do protótipo e comprovar a viabilidade da solução desenvolvida para fins didáticos.

5.2 Análise dos testes operacionais

A análise dos testes realizados permitiu avaliar o comportamento da ponte rolante inteligente diante de diferentes condições de operação. Os resultados obtidos demonstraram que fatores mecânicos, elétricos e eletrônicos influenciam diretamente o desempenho do sistema, evidenciando a importância da integração adequada entre estrutura, sensores, motores e programação.

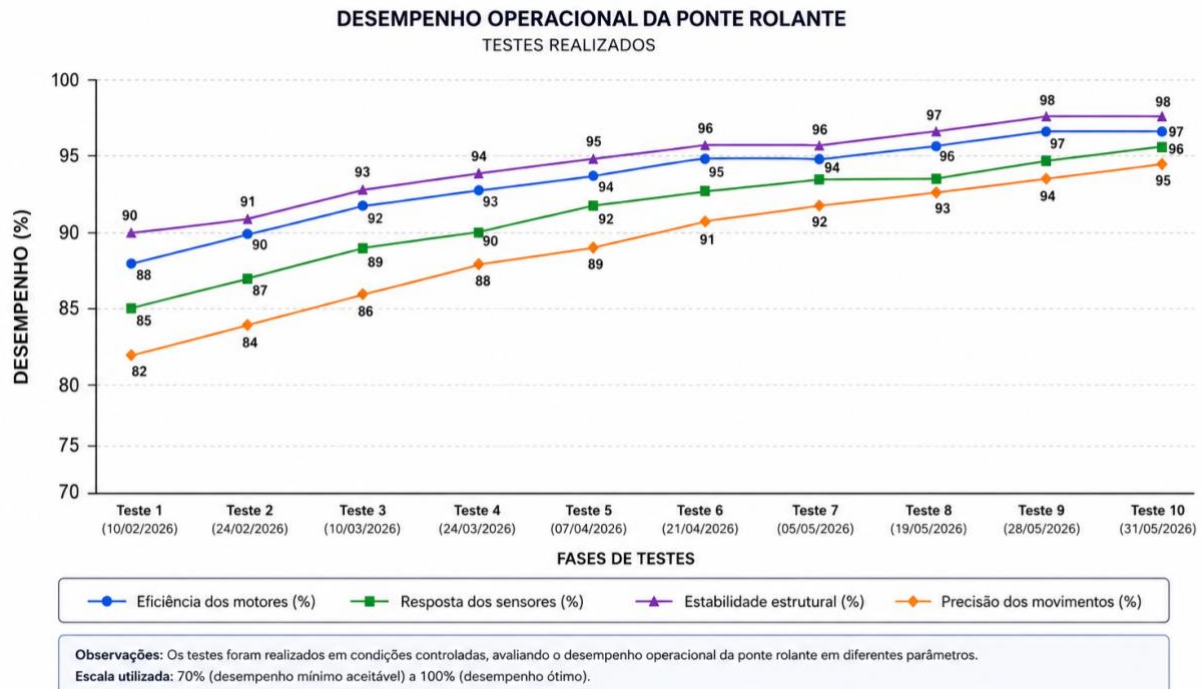
Os testes com falhas simuladas permitiram identificar limitações operacionais e pontos de melhoria no protótipo. O desalinhamento mecânico da estrutura provocou aumento do atrito e vibrações, enquanto as falhas nos sensores e na alimentação elétrica comprometeram a precisão dos movimentos e a confiabilidade do sistema. Esses resultados demonstram a necessidade de manutenção preventiva e monitoramento contínuo dos componentes envolvidos.

Por outro lado, o teste realizado em condições normais de operação comprovou a capacidade do protótipo em executar corretamente os movimentos de elevação,

deslocamento e posicionamento da carga, mantendo estabilidade estrutural e resposta adequada dos dispositivos de controle.

De modo geral, os resultados obtidos validam a proposta do projeto, demonstrando que a ponte rolante inteligente desenvolvida é capaz de reproduzir, em escala didática, os principais conceitos de automação industrial aplicados aos sistemas de movimentação de cargas. Dessa forma, o protótipo atingiu os objetivos estabelecidos, constituindo uma ferramenta adequada para fins educacionais e demonstrações tecnológicas.

Gráfico 1 – Desempenho operacional da ponte rolante durante os testes realizados.



Fonte: Autor próprio.

5.3 Dificuldades Encontradas Durante O Desenvolvimento

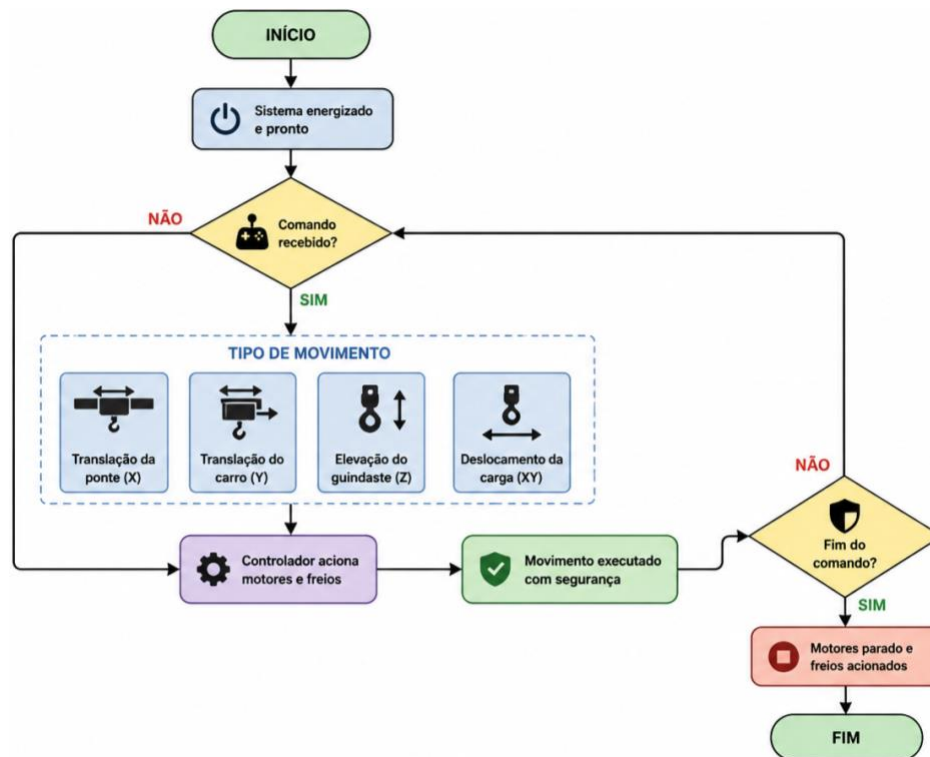
A Durante o desenvolvimento da ponte rolante inteligente, diversas dificuldades foram identificadas ao longo das etapas de montagem, integração e testes operacionais do sistema. Essas situações contribuíram diretamente para o aprimoramento do projeto, permitindo compreender de forma prática os desafios envolvidos na implementação de sistemas automatizados de movimentação de cargas. Segundo Silva e Ferreira (2024), projetos experimentais de automação industrial frequentemente apresentam dificuldades relacionadas à integração entre sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos.

Uma das principais dificuldades encontradas esteve relacionada à construção da estrutura mecânica da ponte rolante. Durante as etapas iniciais de montagem, pequenos

desalinhamentos estruturais provocavam aumento do atrito entre os componentes móveis do sistema, dificultando o deslocamento adequado da estrutura durante os movimentos executados pelos motores (Santos Et Al., 2023).

Além disso, também foram identificados problemas relacionados à distribuição de peso da estrutura. Em determinados momentos, o posicionamento inadequado de alguns componentes causava desequilíbrio mecânico na ponte rolante, afetando diretamente a estabilidade operacional do sistema automatizado. De acordo com Pereira e Costa (2025), a distribuição inadequada de carga pode comprometer significativamente o desempenho de estruturas automatizadas móveis.

Figura 15 – Fluxograma simplificado da lógica de funcionamento da ponte rolante.



Fonte: Autor próprio.

Outro fator importante observado durante o desenvolvimento esteve relacionado às vibrações geradas durante os movimentos da estrutura. O acionamento simultâneo dos motores provocava oscilações mecânicas que comprometiam o alinhamento da ponte rolante e dificultavam o funcionamento adequado dos sensores instalados no sistema (Rodrigues; Almeida, 2022).

As dificuldades relacionadas aos sensores de fim de curso também tiveram grande impacto durante os testes operacionais. Em alguns momentos, pequenos erros de posicionamento impediam o acionamento correto dos sensores, fazendo com que os motores ultrapassassem os limites operacionais definidos para a estrutura.

Além disso, também foram observadas dificuldades relacionadas à integração elétrica e eletrônica do sistema. Durante determinados testes, oscilações na alimentação elétrica causavam interferências no funcionamento dos sensores e falhas temporárias na comunicação entre os componentes eletrônicos utilizados no projeto. Conforme destacado por Carvalho et al. (2026), interferências elétricas representam uma das principais causas de falhas em sistemas automatizados experimentais.

Outro aspecto importante identificado durante o desenvolvimento esteve relacionado à organização das conexões internas do sistema. O grande número de fios e componentes eletrônicos instalados na estrutura dificultava a manutenção e aumentava a possibilidade de falhas elétricas durante os testes realizados no protótipo (FERREIRA; LIMA, 2024).

A programação do sistema também apresentou desafios durante o desenvolvimento do projeto. Em algumas situações, a lógica implementada no Arduino Mega não respondia da maneira esperada devido a atrasos na leitura dos sensores ou conflitos relacionados ao acionamento simultâneo dos motores.

Além disso, pequenas alterações estruturais realizadas ao longo da montagem exigiam adaptações constantes na programação do sistema. Isso demonstrou que a integração entre software e hardware possui grande influência no funcionamento de sistemas automatizados industriais (Oliveira; Martins, 2025).

Outro fator relevante observado durante o desenvolvimento foi a limitação dos materiais disponíveis para construção do protótipo. Em determinados momentos, adaptações improvisadas foram necessárias para substituir componentes ou reforçar partes da estrutura que apresentavam instabilidade durante os testes operacionais.

Além das dificuldades técnicas, também foi necessário realizar diversos ajustes relacionados ao tempo de resposta do sistema automatizado. Pequenas falhas de sincronismo entre motores e sensores influenciavam diretamente no comportamento

operacional da ponte rolante e exigiram modificações contínuas durante o desenvolvimento do projeto (PEREIRA; FERREIRA, 2026).

Apesar das dificuldades encontradas, os problemas identificados contribuíram significativamente para o aprimoramento do protótipo e para melhor compreensão dos conceitos relacionados à automação industrial. Cada ajuste realizado durante o desenvolvimento permitiu melhorar a estabilidade operacional da estrutura e aumentar a confiabilidade do sistema automatizado.

O desenvolvimento do projeto demonstrou que sistemas automatizados exigem elevado nível de planejamento e integração entre os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos. Pequenos detalhes estruturais e lógicos podem gerar impactos significativos no funcionamento do sistema, tornando o processo de desenvolvimento contínuo e dependente de constantes adaptações.

6.CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo funcional de ponte rolante inteligente em escala reduzida, utilizando o microcontrolador Arduino Mega como unidade principal de controle e aplicando conceitos relacionados à automação industrial, sistemas de movimentação de cargas, controle de movimento e integração eletromecânica.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi possível realizar a construção da estrutura mecânica, implementação do sistema eletrônico, integração dos sensores de fim de curso, acionamento dos motores elétricos e desenvolvimento da lógica de programação responsável pelo funcionamento automatizado da ponte rolante. A integração entre os componentes permitiu reproduzir, em escala didática, os principais movimentos executados por uma ponte rolante industrial.

Os testes operacionais realizados demonstraram que o sistema desenvolvido foi capaz de executar os movimentos de elevação, deslocamento e posicionamento da carga de maneira satisfatória. Além disso, os testes permitiram identificar limitações relacionadas ao alinhamento estrutural, posicionamento dos sensores e alimentação elétrica dos componentes, evidenciando a importância da correta integração entre os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos.

As dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento contribuíram significativamente para o aprimoramento do projeto e para a compreensão prática dos desafios envolvidos na implementação de sistemas automatizados. Os ajustes realizados durante as etapas de montagem, programação e testes permitiram aumentar a confiabilidade e a estabilidade operacional do protótipo.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados, uma vez que o protótipo desenvolvido apresentou funcionamento adequado e permitiu aplicar, de forma prática, conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Automação Industrial. O projeto demonstrou a viabilidade da utilização de plataformas microcontroladas de baixo custo em aplicações didáticas voltadas ao ensino da automação industrial.

REFERÊNCIAS

ARDUINO. Arduino Mega 2560 Rev3. 2024. Disponível em: [Arduino Official Website](#). Acesso em: 10 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação — referências — elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520: citações em documentos — apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-10: segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília, 2022. Disponível em: [Ministério do Trabalho](#). Acesso em: 16 maio 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-12: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Brasília, 2022. Disponível em: [Ministério do Trabalho](#). Acesso em: 16 maio 2026.

CAMACHO, Wallace; DIAS, Cristina. Visões da Indústria 4.0. 2021. Disponível em: [arXiv](#). Acesso em: 16 maio 2026.

CAPELLI, Alexandre. Automação industrial: controle do movimento e processos contínuos. São Paulo: Érica, 2021.

DERIGENT, William; CARDIN, Olivier; TRENTESAUX, Damien. Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges. 2020. Disponível em: [arXiv](#). Acesso em: 16 maio 2026.

FRANCHI, Claiton Moro. Controle de processos industriais: princípios e aplicações. São Paulo: Érica, 2022.

FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luís Arlindo de. Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos. São Paulo: Érica, 2021.

GROOVER, Mikell P. Automação industrial e sistemas de manufatura. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. Engenharia de automação industrial. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

NATALE, Ferdinando. Automação industrial. 11. ed. São Paulo: Érica, 2022.

OLIVEIRA, André Schneider de. Sistemas embarcados com Arduino. São Paulo: Novatec, 2021.

PRUDENTE, Francesco. Automação industrial PLC: teoria e aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

ROSÁRIO, João Maurício. Princípios de mecatrônica. São Paulo: Pearson, 2021.

SCHWAB, Klaus. A quarta revolução industrial. São Paulo: Edipro, 2021.

SENAI. Automação industrial: fundamentos e aplicações. Brasília: SENAI, 2022.

SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson Eugênio dos. Automação e controle discreto. São Paulo: Érica, 2021.

SOUSA, Daniel Rodrigues de. Programação para Arduino: fundamentos e aplicações. São Paulo: Novatec, 2022.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. 9. ed. São Paulo: Érica, 2021.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. Motores elétricos: fundamentos e aplicações industriais. Rio de Janeiro: Synergia, 2022.

WEG. Automação e controle de motores elétricos. Jaraguá do Sul: WEG, 2023. Disponível em: [WEG](https://www.weg.com). Acesso em: 16 maio 2026.

FESTO. Automação Pneumática e Elétrica Industrial. Disponível em: <https://www.festo.com/>. Acesso em: 12 maio 2026.

OMRON. Sensores Industriais e Sistemas de Controle. Disponível em: <https://www.omron.com/>. Acesso em: 12 maio 2026.