



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Otávio Augusto Teixeira Vieira

**Implementação de um sistema de controle em um guindaste utilizando  
hidráulica digital**

Florianópolis  
2024

Otávio Augusto Teixeira Vieira

**Implementação de um sistema de controle em um guindaste utilizando  
hidráulica digital**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Victor Juliano De Negri

Supervisor: M. Eng. Vinícius Vigolo

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

VIEIRA, Otávio Augusto Teixeira  
Implementação de um sistema de controle em um guindaste  
utilizando hidráulica digital / Otávio Augusto Teixeira  
VIEIRA ; orientador, Victor Juliano De Negri, 2024.  
114 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,  
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Hidráulica  
Digital. 3. Guindastes. I. De Negri, Victor Juliano . II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Otávio Augusto Teixeira Vieira

**Implementação de um sistema de controle em um guindaste utilizando  
hidráulica digital**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 28 de junho de 2024.

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr.  
Orientador  
UFSC/CTC/EMC

M. Eng. Vinícius Vigolo  
Supervisor  
LASHIP/UFSC

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.  
Avaliador  
UFSC/CTC/DAS

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.  
Presidente da Banca  
UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado aos meus amigos, colegas de classe, companheiros de laboratório, minha namorada e aos meus queridos familiares.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, a quem sou imensamente grato, especialmente ao meu pai, Laércio, minha mãe, Elineia, e minha irmã, Isabele, por seu amor incondicional, suporte e incentivo constante, que foram essenciais para minha formação e amadurecimento. Agradeço também à minha namorada, Rafaela, por seu apoio, compreensão e motivação durante todas as etapas deste trabalho. O amor que tenho por vocês é imensurável, e espero não decepcioná-los, conseguindo retribuir os esforços que foram feitos durante esta trajetória.

Aos meus amigos e colegas feitos durante esta jornada, em especial ao grupo PNA, que sempre estiveram ao meu lado, agradeço por todos os conselhos, amizade e companheirismo no decorrer do desenvolvimento da minha vida acadêmica. Seu apoio e motivação foram de extrema importância para minha permanência e continuidade no processo de formação.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, professor Victor Juliano De Negri, por sua orientação e apoio ao longo deste projeto. Agradeço também ao meu supervisor, Vinícius Vigolo, por suas valiosas contribuições, suporte e ensinamentos, sempre estando presente para me auxiliar sempre que necessário.

Agradeço também aos meus companheiros de laboratório, cujas discussões e sugestões tornaram o ambiente de trabalho mais agradável e motivador.

Finalmente, gostaria de expressar minha gratidão a todos os professores que contribuíram para minha formação. Espero poder honrar todo o conhecimento e aprendizado que vocês me transmitiram da melhor maneira possível.

*“Ninguém é tão grande que não possa aprender,  
nem tão pequeno que não possa ensinar.”*  
(ESOPO)

## DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 28 de junho de 2024.

Na condição de representante do LASHIP na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.

---

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr.  
LASHIP



## RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de controle em um guindaste utilizando hidráulica digital. O objetivo principal é desenvolver um sistema eficiente e preciso para o controle do guindaste, substituindo um sistema hidráulico convencional. A metodologia empregada inclui a utilização do Simulink para simulações e do Arduino para o controle real. Foram realizados testes práticos para verificar a eficácia do sistema proposto. Os resultados indicam uma melhoria significativa no desempenho do guindaste, com controle em tempo real mais suave e preciso das operações. A implementação também demonstrou ser robusta e eficiente em termos de consumo de energia.

**Palavras-chave:** Hidráulica digital, Controle de guindaste, Simulink, Arduino.

## **ABSTRACT**

This work presents the implementation of a control system in a crane using digital hydraulics. The main objective is to develop an efficient and precise system for controlling the crane, replacing a conventional hydraulic system. The methodology employed includes the use of Simulink for simulations and Arduino for real control. Practical tests were conducted to verify the effectiveness of the proposed system real time control. The results indicate a significant improvement in the crane's performance, with smoother and more precise control of operations. The implementation also proved to be robust and energy-efficient.

**Keywords:** Digital hydraulics, Crane control, Simulink, Arduino.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Guindaste hidráulico móvel sendo acionado por operador. . . . .	19
Figura 2 – Guindaste hidráulico móvel içando carga. . . . .	19
Figura 3 – Guindaste hidráulico móvel de acionamento manual. . . . .	20
Figura 4 – Demonstração do princípio de Pascal. . . . .	21
Figura 5 – Guindaste hidráulico móvel de acionamento automatizado. . . . .	22
Figura 6 – Guindaste hidráulico móvel utilizado no projeto. . . . .	24
Figura 7 – Atuador convencional e atuador multi-câmaras. . . . .	27
Figura 8 – Controle secundário com atuador multi-câmaras. . . . .	28
Figura 9 – Diagrama de um circuito hidráulico controlado por válvula proporcional em malha aberta. . . . .	29
Figura 10 – Diagrama hidráulico do guindaste. . . . .	32
Figura 11 – Guindaste e painel elétrico antes do início do atual projeto . . . . .	33
Figura 12 – Fluxograma do planejamento de atividades. . . . .	35
Figura 13 – Modelo do Arduino utilizado no projeto. . . . .	36
Figura 14 – Pacote utilizado para comunicação Simulink e Arduino. . . . .	37
Figura 15 – Exemplos de blocos específicos adicionados pelo pacote utilizado. . . . .	38
Figura 16 – Fluxograma da nova lógica da função de giro do sistema. . . . .	39
Figura 17 – Protótipo montado em <i>protoboard</i> para realização de testes. . . . .	41
Figura 18 – Exemplo do modelo de sensor de fim de curso utilizado . . . . .	43
Figura 19 – Vista inferior do guindaste com a posição dos sensores de fim de curso. . . . .	44
Figura 20 – Nova disposição realizada com as mangueiras hidráulicas evitando danos futuros. . . . .	45
Figura 21 – Exemplo do módulo relé utilizado no projeto. . . . .	46
Figura 22 – Função de giro para a esquerda selecionada . . . . .	47
Figura 23 – Função de giro para a direita selecionada . . . . .	48
Figura 24 – Função de giro selecionada. . . . .	48
Figura 25 – Sistema de proteção do projeto. . . . .	50
Figura 26 – Posicionamento antigo e atualizado das fontes do guindaste. . . . .	51
Figura 27 – Exemplo de cabos utilizados no projeto. . . . .	52
Figura 28 – Cabos reposicionados junto às mangueiras hidráulicas. . . . .	53
Figura 29 – Versão final do painel elétrico do guindaste. . . . .	55
Figura 30 – Gráfico das possíveis forças. . . . .	57
Figura 31 – Diagrama de blocos da lógica de controle implementada. . . . .	62
Figura 32 – Régua potenciométrica acoplada ao atuador tandem . . . . .	65
Figura 33 – Caixa de comando manual utilizada pelo operador. . . . .	66
Figura 34 – Carga utilizada para testes. . . . .	66

Figura 35 – Gráfico da posição do atuador filtrado. . . . .	67
Figura 36 – Gráfico da força enviada pelo sistema. . . . .	68
Figura 37 – Gráfico do sinal analógico do <i>joystick</i> filtrado. . . . .	68
Figura 38 – Guindaste realizando o içamento da carga. . . . .	69
Figura 39 – Lógica de giro para a direita. . . . .	78
Figura 40 – Lógica de giro para a esquerda. . . . .	78
Figura 41 – Lógica de despressurização. . . . .	79
Figura 42 – Diagrama das lógicas de giro e despressurização em Simulink. . . .	80
Figura 43 – Diagrama final do projeto no Simulink. . . . .	89
Figura 44 – Diagrama hidráulico da UPCH detalhado . . . . .	93
Figura 45 – Diagrama multifilar painel. . . . .	95
Figura 46 – Inversor de frequência. . . . .	96
Figura 47 – Alimentação Arduino. . . . .	97
Figura 48 – Alimentação Relé. . . . .	98
Figura 49 – Arduino Entradas - Analógicas. . . . .	99
Figura 50 – Arduino Entradas - Digitais. . . . .	100
Figura 51 – Módulo Relé. . . . .	101
Figura 52 – Módulo Relé 2. . . . .	102
Figura 53 – Arduino - Saídas. . . . .	103
Figura 54 – Arduino - Saídas 2. . . . .	104
Figura 55 – Pull-down & Pull-up board. . . . .	105
Figura 56 – Caixa do joystick. . . . .	106
Figura 57 – Caixa do joystick. . . . .	107
Figura 58 – Datasheet RTC . . . . .	114

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>LASHIP</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> . . . . .	<b>18</b>
3.1	GUINDASTES HIDRÁULICOS . . . . .	18
3.2	HIDRÁULICA DIGITAL . . . . .	25
3.3	FILTRAGEM DE DADOS . . . . .	29
<b>4</b>	<b>ESTADO ORIGINAL DO GUINDASTE</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO</b> . . . . .	<b>34</b>
5.1	PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES . . . . .	34
5.2	UTILIZAÇÃO DO PACOTE DE COMUNICAÇÃO SIMULINK E ARDUINO . . . . .	35
5.3	MANUTENÇÃO DOS ATUADORES E SENSORES DO GUINDASTE	42
5.4	IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA DE GIRO NO GUINDASTE . . . . .	47
5.5	ADEQUAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DO GUINDASTE . . . . .	49
5.6	CONEXÃO DAS VÁLVULAS E SENSORES DE IÇAMENTO DO GUINDASTE . . . . .	51
5.7	DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE IÇAMENTO . . . . .	55
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E AVALIAÇÃO</b> . . . . .	<b>65</b>
6.1	CENÁRIO DE TESTE . . . . .	65
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE A – LÓGICAS DETALHADAS DO CONTROLE DE GIRO E DESPRESSURIZAÇÃO DO SISTEMA</b> . . . . .	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE B – VISÃO COMPLETA DAS LÓGICAS DO CONTROLE DE GIRO E DESPRESSURIZAÇÃO DO SISTEMA</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE C – CÓDIGO DO ACIONAMENTO DAS VÁLVULAS DE IÇAMENTO.</b> . . . . .	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE D – CÓDIGO DA FUNÇÃO DE SELEÇÃO DE FORÇAS ATRAVÉS DO JOYSTICK.</b> . . . . .	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE E – NOVA LÓGICA DE SUSTENTAÇÃO DE FORÇAS DO SISTEMA.</b> . . . . .	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE F – CÓDIGOS UTILIZADOS PARA FILTRAGEM DOS DADOS.</b> . . . . .	<b>90</b>
	<b>ANEXO A – DIAGRAMA HIDRÁULICO DA UPCH DETALHADO</b> .	<b>93</b>
	<b>ANEXO B – DIAGRAMAS ELÉTRICOS DO PROJETO</b> . . . . .	<b>95</b>
	<b>ANEXO C – CÓDIGO DE SELEÇÃO DE PRESSÕES</b> . . . . .	<b>108</b>

<b>ANEXO D – <i>DATASHEET</i> RÉGUA POTENCIOMÉTRICA . . . . .</b>	<b>114</b>
---	------------

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda a implementação de um sistema de controle para guindastes hidráulicos utilizando a técnica de hidráulica digital. Este projeto foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), uma instituição reconhecida internacionalmente pela pesquisa em componentes e sistemas hidráulicos e pneumáticos.

O problema tratado neste Projeto Final de Curso (PFC) é a necessidade de modernizar o sistema de controle de guindastes hidráulicos para melhorar sua eficiência energética. Este problema é de grande relevância, pois além de resultar em operações mais econômicas, a melhoria da eficiência energética em sistemas hidráulicos permite que uma menor quantidade de óleo seja empregada, uma vez que não há a necessidade de elevados volumes de óleo para a dissipação de calor. Com isso, sistemas mais econômicos, compactos e menos agressivos ao meio ambiente podem ser desenvolvidos, aumentando a sua competitividade no mercado.

A solução proposta envolve a utilização de técnicas de hidráulica digital, que permitem um controle mais eficiente dos atuadores hidráulicos por meio da redução de perdas energéticas por estrangulamento. A metodologia utilizada inclui a revisão da literatura, desenvolvimento de modelos teóricos, implementação prática no guindaste e testes experimentais para validar a sua capacidade operacional.

Os resultados obtidos evidenciam que a tecnologia de hidráulica digital é aplicável para esta categoria de equipamentos, sendo capaz de atender os requisitos operacionais e de segurança, viabilizando sua aplicação em equipamentos comerciais. Este trabalho diferencia-se de projetos anteriores pela implementação inédita de uma lógica de controle baseada na seleção e sustentação de forças discretas, a qual permite a operação do equipamento em malha aberta e sem a necessidade de sensores de posição e pressão.

### OBJETIVO GERAL DO PROJETO

- Implementar um sistema de controle para o movimento de içamento de um guindaste operando com um circuito de hidráulica digital, utilizando algoritmos desenvolvidos nas plataformas Matlab/Simulink e Arduino, visando aprimorar a precisão, eficiência e robustez do controle operacional.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS DO PROJETO

- Identificar e analisar as limitações do guindaste operando com o sistema hidráulico convencional;

- Desenvolver algoritmos de controle para o movimento de giro do guindaste utilizando as plataformas Matlab/Simulink e Arduino;
- Realizar a adequação elétrica necessária para o sistema de acionamento e controle do atuador hidráulico digital;
- Desenvolver um algoritmo de controle para o sistema de içamento, baseado em hidráulica digital operando em malha aberta;
- Implementar e operacionalizar os movimentos de giro, com hidráulica convencional, e de içamento, com hidráulica digital;
- Validar o desempenho do sistema de controle implementado por meio de testes práticos.

### Organização do Documento

Este Projeto de Fim de Curso (PFC) está organizado em sete capítulos:

No **capítulo 1** é apresentada uma contextualização sobre o tema trabalhado, assim como são elencados o problema de pesquisa e os objetivos desejados no desenvolvimento deste trabalho.

O **capítulo 2** fornece uma visão geral do LASHIP, destacando suas áreas de pesquisa, projetos desenvolvidos e a história de sua formação.

No **capítulo 3** é feita uma revisão da literatura abordando os principais conceitos e temas essenciais para a compreensão deste projeto. São explicados os conceitos de guindastes hidráulicos e seu funcionamento, hidráulica digital e filtragem de dados ao longo do capítulo.

O **capítulo 4** oferece uma descrição detalhada do estado original do guindaste utilizado, incluindo seu funcionamento, projeto e componentes.

No **capítulo 5** são descritos o desenvolvimento e a implementação do projeto. Este capítulo apresenta o planejamento das atividades, a solução proposta para o problema e o processo de implementação. As etapas de cada fase do projeto são detalhadas, mostrando os passos seguidos ao longo do trabalho.

O **capítulo 6** apresenta os resultados alcançados com a solução proposta, demonstrando que o controle desenvolvido para o içamento funcionou conforme esperado.

O **capítulo 7** oferece uma conclusão sobre o projeto, avaliando os objetivos alcançados e fornecendo sugestões para trabalhos futuros complementares.



## 2 LASHIP

Neste capítulo, será feita uma breve apresentação da organização onde ocorreu este projeto, abrangendo desde o momento de sua criação até os dias mais recentes. O objetivo é fornecer uma visão geral do LASHIP, destacando sua importância no campo da engenharia hidráulica e pneumática, bem como sua contribuição para o desenvolvimento tecnológico e a formação de profissionais altamente qualificados.

### SOBRE O LASHIP

O LASHIP, Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos da UFSC, é dedicado às atividades de ensino, pesquisa e extensão universitária desde 1977. Com uma equipe composta por 4 professores e cerca de 20 integrantes, o laboratório atua na pesquisa de componentes e sistemas hidráulicos e pneumáticos, colaborando com empresas nacionais e estrangeiras. Possui uma infraestrutura atualizada, permitindo a montagem de protótipos e testes conceituais, com aplicações em áreas como geração de energia, aviação e equipamentos industriais.

Reconhecido internacionalmente, mantém parcerias com indústrias como Reivax SA, Bosch Rexroth, Camozzi e Saab AB. O LASHIP também se destaca por sua colaboração internacional, proporcionando oportunidades para estudantes e pesquisadores realizarem estudos em renomados grupos de pesquisa ao redor do mundo. Certificado pelo CNPq, é membro de diversas sociedades e participa ativamente de conferências internacionais em hidráulica e pneumática.

Além das atividades tradicionais, o LASHIP é um centro de excelência em inovação tecnológica. Seus projetos incluem o desenvolvimento de sistemas de controle avançado para aplicações críticas e a integração de tecnologias emergentes, como a hidráulica digital. Essas inovações não apenas melhoram a eficiência e a precisão dos sistemas hidráulicos e pneumáticos, mas também contribuem para a sustentabilidade e a redução do consumo de energia.

O laboratório também investe significativamente na formação de recursos humanos, oferecendo programas de estágio, iniciação científica e pós-graduação. Os alunos têm a oportunidade de participar de projetos de pesquisa de ponta e de colaborar com empresas parceiras, preparando-se para enfrentar desafios reais do mercado de trabalho.

A infraestrutura do LASHIP inclui laboratórios equipados com tecnologia de ponta, como bancadas de teste para válvulas, atuadores e sistemas de controle hidráulico e pneumático. Essas instalações permitem a realização de experimentos complexos e a validação de teorias desenvolvidas durante a pesquisa.

Com uma abordagem multidisciplinar, o LASHIP promove a interação entre engenheiros, físicos e matemáticos, incentivando a troca de conhecimentos e a inova-

ção. Esta colaboração interdisciplinar é essencial para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes para os desafios atuais e futuros da engenharia.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são abordadas revisões dos princípios teóricos essenciais para a elaboração e entendimento deste estudo.

#### 3.1 GUINDASTES HIDRÁULICOS

No âmbito industrial e logístico, os guindastes desempenham um papel crucial, sendo denominados popularmente como girafas ou guinchos. São essenciais em oficinas, depósitos e ambientes industriais devido à sua capacidade de movimentar materiais e equipamentos de grande porte e/ou volume. No contexto industrial atual, a circulação de materiais desempenha um papel fundamental e essencial. Este procedimento engloba uma série de atividades, tais como transferência, elevação, posicionamento, transporte, empacotamento e armazenamento de materiais (conforme apontado por RAY (2008)).

De acordo com Gue *et al.* (2014), desde a matéria-prima até o produto final disponível no mercado, todos os itens demandam, em algum momento, o uso de equipamentos de movimentação de materiais, seja durante as etapas de produção ou nos centros de distribuição.

Uma infraestrutura de movimentação de material mal concebida pode acarretar atrasos nas operações de fabricação, aumento nos tempos de produção, danos ou contaminação dos produtos, além de elevação nos custos de logística. Por outro lado, um sistema bem planejado contribui significativamente para a eficiência do processo, impulsionando a produtividade e a qualidade dos produtos (HASSAN, 2010).

Estes equipamentos são utilizados para erguer cargas muito além da capacidade humana, utilizando sistemas mecânicos simples, projetados para multiplicar a força aplicada, possibilitando o deslocamento das cargas, conforme Duragkar, Sakhale e Lande (2016). A escolha do equipamento mais adequado para cada aplicação depende de diversos fatores, como o espaço disponível, a capacidade de carga necessária e os custos operacionais.

Os guindastes hidráulicos móveis surgem como uma opção eficaz e econômica, com modelos capazes de transportar até 3 toneladas. Eles são frequentemente utilizados em ambientes industriais, como fábricas, oficinas e depósitos, especialmente em locais onde não é viável instalar pontes rolantes. Em certas situações, mesmo que pontes rolantes estejam disponíveis, a restrição de espaço pode limitar sua aplicação, tornando os guindastes hidráulicos móveis uma escolha preferencial devido à sua mobilidade (CHUKWULOZIE, 2015). Nas Figuras 1 e 2 têm-se exemplos de alguns guindastes hidráulicos.

Figura 1 – Guindaste hidráulico móvel sendo acionado por operador.



Fonte: (ULINE, 2019).

Figura 2 – Guindaste hidráulico móvel içando carga.

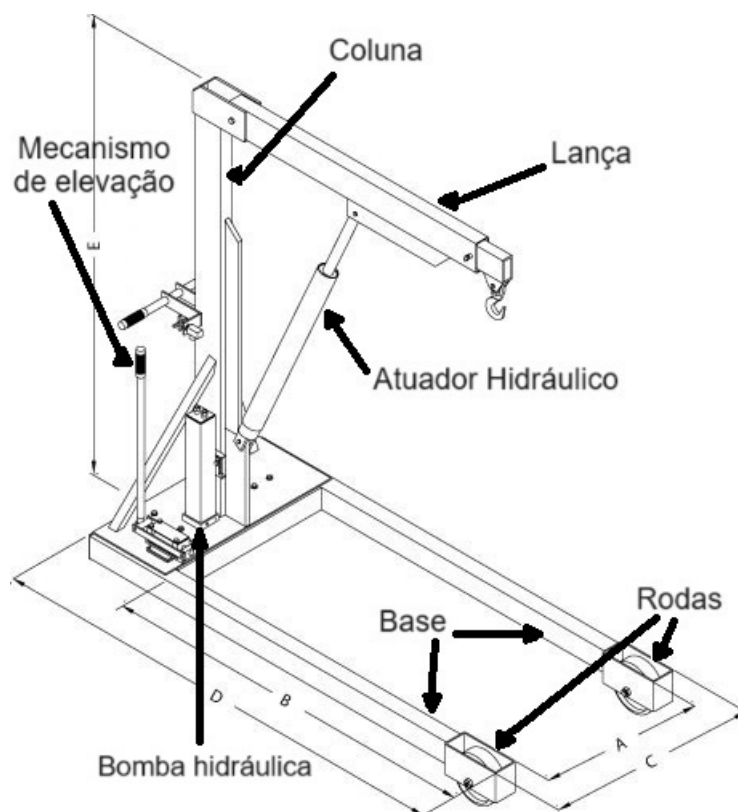


Fonte: (GROUP, 2022).

## Estrutura e funcionamento de um guindaste

Na Figura 3 é apresentado o exemplo de um guindaste com acionamento manual com descrição de suas partes

Figura 3 – Guindaste hidráulico móvel de acionamento manual.

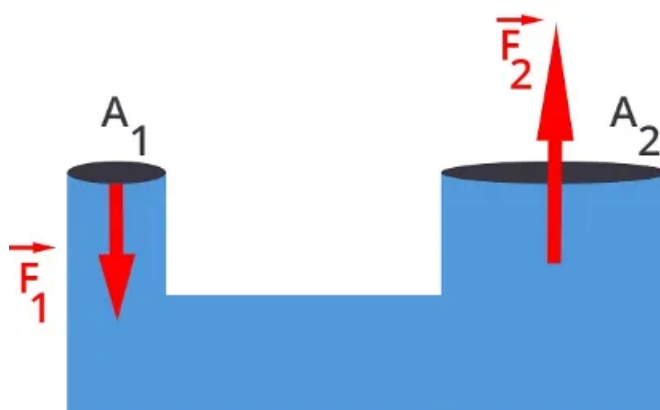


Fonte: Adaptado de (DURAGKAR; SAKHALE; LANDE, 2016).

Os guindastes hidráulicos móveis de acionamento manual são equipamentos que operam utilizando a pressão do fluido em um sistema hidráulico para gerar força mecânica. Isso é possível graças ao princípio de Pascal, que estabelece que a pressão exercida em um ponto de um fluido confinado é transmitida de maneira uniforme para todos os pontos desse fluido e para as paredes do recipiente que o contém.

De acordo com Duragkar, Sakhale e Lande (2016) o funcionamento de um guindaste hidráulico consiste em um pistão de cilindro hidráulico que ao ser acionado levanta ou abaixa a carga. O bombeamento de fluido hidráulico dentro do cilindro a partir do reservatório hidráulico, eleva o pistão e realiza a ação da coluna na vertical, o que levanta o material e vice-versa. O retorno do braço é feito por uma válvula reguladora de vazão que retorna lentamente o fluido hidráulico para o reservatório hidráulico. Esse movimento lento do fluido é necessário para que o braço desça gradualmente, evitando assim a queda repentina da carga no chão. O princípio que permite o funcionamento de um guindaste hidráulico pode ser visto na Figura 4, e é melhor descrito a seguir

Figura 4 – Demonstração do princípio de Pascal.



Fonte: (HELERBROCK, 2024).

Sabendo que a pressão é calculada da seguinte forma, onde  $p$  é a pressão,  $A$  é a área e  $F$  a força, têm-se:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Logo têm-se

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}. \quad (2)$$

Estes equipamentos geralmente apresentam um projeto que inclui uma coluna tubular rígida, fixada sobre uma base, com um sistema de lanças conectado à parte superior da coluna. Um atuador hidráulico, montado na coluna e nas lanças, é responsável pelo levantamento e movimentação das cargas. A base do guindaste é equipada com rodas para possibilitar sua locomoção, sendo projetada com largura adequada para suportar os esforços durante as operações, evitando danos durante manuseio brusco e inexperiente (BHOYAR *et al.*, 2021).

Os guindastes hidráulicos móveis podem ser encontrados em dois modelos principais, com acionamento manual através de uma alavanca ou através de uma unidade de potência e condicionamento hidráulico que pode ser usada para automatizar o processo sem a necessidade de esforços manuais.

Na Figura 5, é apresentado o modelo de um guindaste que possui acionamento automatizado através de uma unidade de potência e condicionamento hidráulico. Este modelo se assemelha ao que será utilizado como objeto de estudo neste projeto, com a exceção de que o guindaste estudado utiliza a tecnologia de hidráulica digital, enquanto o apresentado na figura emprega uma solução convencional, ou seja, controle por bomba de deslocamento variável ou por válvulas direcionais e reguladoras de vazão.

Figura 5 – Guindaste hidráulico móvel de acionamento automatizado.



Fonte: Adaptado de (CATHAY, 2023).

As funções das principais partes que compõem a estrutura dos guindastes hidráulicos móveis serão melhor descritas abaixo (DURAGKAR; SAKHALE; LANDE, 2016):

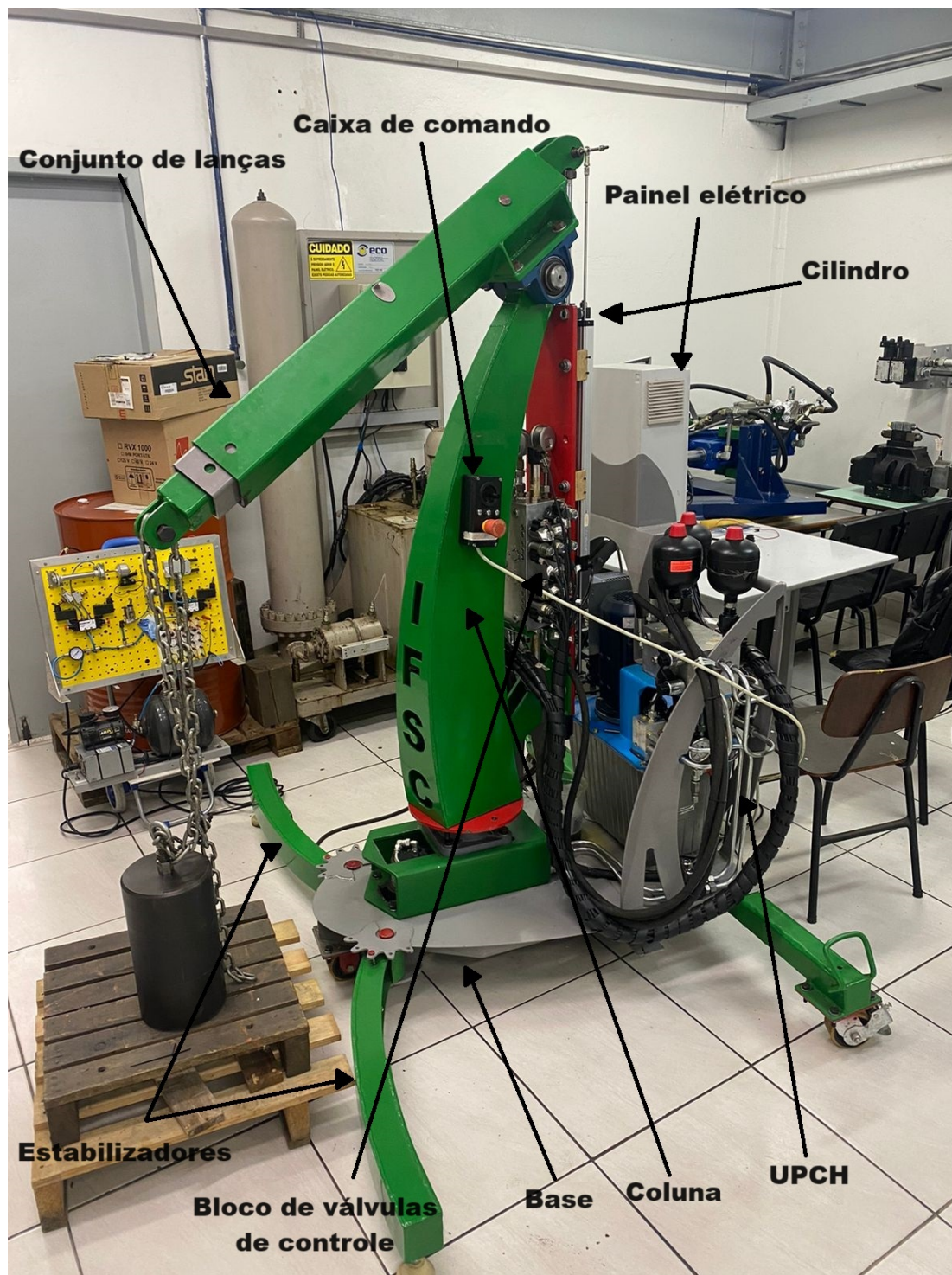
- **Conjunto de lanças e ganchos:** A parte visível do guindaste, composta por lanças extensíveis que podem ser ajustadas conforme a necessidade para alcançar diferentes alturas e distâncias, estas podem ou não serem acionadas por um atuador hidráulico. Os ganchos ou dispositivos de fixação são usados para agarrar e levantar as cargas.
- **Coluna:** É responsável por garantir a estabilidade do equipamento durante as operações de levantamento e movimentação de cargas. Ela é conectada aos cilindros hidráulicos e às lanças, proporcionando suporte e distribuindo de forma equilibrada a pressão gerada durante as operações. Sua construção e manutenção adequadas são essenciais para garantir a segurança e eficiência do guindaste.
- **Base:** A base do guindaste fornece estabilidade, suporte e facilita o deslocamento do equipamento durante as operações de levantamento e movimentação de cargas. É essencial para garantir a segurança e eficiência do guindaste.

- **Rodas:** Em guindastes móveis, a base pode ser equipada com rodas ou esteiras para facilitar o deslocamento do equipamento no local de trabalho. Isso permite que o guindaste seja movido para diferentes áreas conforme necessário.
- **Atuador hidráulico:** O componente mais importante do guindaste, que converte a pressão do fluido em força mecânica. Consiste em um cilindro fechado com um pistão móvel interno. Quando o fluido é bombeado para o cilindro, a interação deste com o pistão e a carga resulta na elevação da pressão, movendo o pistão e gerando a força responsável por abaixar e levantar a carga.
- **Bomba Hidráulica:** Responsável por criar a vazão necessária do fluido hidráulico. De acordo com o tipo do guindaste podem ser
  - **Bomba no guindaste manual:** Nesse caso, o operador utiliza uma alavanca ou outro dispositivo manual para controlar a vazão do fluido hidráulico para os cilindros responsáveis pela elevação da carga. O operador precisa aplicar força física para acionar a alavanca e mover a carga para cima ou para baixo. Esse sistema é mais comum em guindastes de menor porte ou em situações em que não é necessária automação total do processo de elevação.
  - **Bomba no guindaste automatizado:** Neste caso, um motor elétrico ou a combustão é utilizado para acionar uma bomba hidráulica. A vazão produzida pela bomba é controlada por válvulas hidráulicas as quais direcionam o fluido para os cilindros de elevação. As válvulas são acionadas eletronicamente ou por outros meios automatizados, eliminando a necessidade de esforço físico direto do operador. Esse sistema é mais avançado e permite uma elevação mais precisa e controlada, além de possibilitar a automação de outras funções do guindaste.

O modelo que será utilizado neste projeto é um guindaste hidráulico móvel acionado por válvulas hidráulicas *on/off* que controlam as pressões aplicadas em um cilindro de quatro câmaras. Este guindaste móvel é fruto de uma colaboração entre o Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Campus Chapecó. Sua estrutura foi fabricada por uma turma concluinte do curso técnico em mecânica do IFSC. A utilização da hidráulica digital neste projeto baseia-se na tese de doutorado de Belan *et al.* (2018). O modelo utilizado pode ser visto na Figura 6.



Figura 6 – Guindaste hidráulico móvel utilizado no projeto.



Fonte: Do autor (2024).

### Estabilidade de guindastes hidráulicos

Apesar das precauções, acidentes envolvendo guindastes móveis ainda são comuns. Beavers *et al.* (2006) revela que mais de 88% dos acidentes fatais com

equipamentos de transporte similares ocorrem com guindastes móveis, e 11% desses eventos são atribuídos a tombamentos. Esses dados ressaltam a necessidade contínua de melhorias em segurança e estabilidade nesse tipo de equipamento.

Esses incidentes têm impactos significativos na produtividade e na segurança dos operadores e trabalhadores. Portanto, é fundamental adotar sistemas de controle intuitivos e seguros, como sugerido por Fujioka (2010) e Takemoto, Miyoshi, Terashima *et al.* (2004), que alertem os usuários sobre situações críticas de instabilidade e forneçam informações em tempo real para correções adequadas. A norma ABNT (2015) também estabelece critérios para diferentes tipos de cargas e situações, contribuindo para a segurança e estabilidade dos guindastes hidráulicos móveis em suas operações.

A estabilidade de guindastes hidráulicos móveis é um aspecto crucial para garantir operações seguras e eficientes. De acordo com os padrões internacionais estabelecidos pela ISO (2014), a estabilidade é determinada pelo equilíbrio entre o torque de estabilização e o torque de tombamento gerado pela carga em diferentes posições e configurações da lança do guindaste.

Para alcançar esse equilíbrio, são adotadas medidas preventivas, conforme discutido por Fujioka (2010). Contrapesos são usados para compensar o momento gerado pela carga, enquanto braços estabilizadores são implementados para ampliar a área de estabilidade do guindaste. Essas estratégias visam evitar tombamentos, que podem ser causados por fatores como sobrepeso, perda de controle do centro de gravidade, colapso dos braços estabilizadores e manutenção inadequada, como apontado por Beavers *et al.* (2006).

Além disso, o trabalho realizado por Gonçalves (2019) forneceu uma análise detalhada da estabilidade deste modelo específico de guindaste. Gonçalves (2019) conduziu uma série de testes e simulações para avaliar o comportamento do guindaste sob diferentes condições de carga e configuração, contribuindo significativamente para a compreensão dos fatores críticos de estabilidade. Este trabalho é uma referência essencial para as práticas de segurança atuais e futuras implementações de projeto.

### 3.2 HIDRÁULICA DIGITAL

Com o objetivo de aprimorar a eficiência dos sistemas hidráulicos convencionais, nos últimos anos têm surgido novas linhas de pesquisa com estratégias diversificadas. A hidráulica digital tem se destacado como uma promissora tecnologia para enfrentar os desafios de eficiência. Apesar de ter suas ideias apresentadas há décadas, o desenvolvimento significativo dessas pesquisas ocorreu apenas recentemente (LINJAMA *et al.*, 2011).

De acordo com estudos recentes, a hidráulica digital tem se mostrado uma alternativa promissora para reduzir a dissipação de energia em sistemas hidráulicos convencionais (BELAN *et al.*, 2018). Uma abordagem para atingir essa eficiência ener-

gética é o uso de atuadores hidráulicos digitais (DHA), que permitem um controle mais preciso e eficiente dos sistemas hidráulicos.

Linjama *et al.* (2011) definem a hidráulica digital como sistemas hidráulicos que empregam componentes de configurações discretas, como válvulas digitais ou *ON/OFF*, capazes de controlar ativamente a saída. Esses sistemas reduzem os efeitos resistivos e dissipativos normalmente presentes no controle de potência, o que pode elevar consideravelmente a eficiência energética do sistema.

Segundo Schepers, Weiler e Weber (2012), os sistemas hidráulicos digitais oferecem uma série de vantagens significativas em comparação com os sistemas tradicionais que utilizam válvulas proporcionais, como:

- Robustez;
- Elevada capacidade de padronização dos componentes, gerando menos custos;
- Maior eficiência;
- Redução da influência de contaminantes;
- Redundância proporcionada pelo uso da técnica de conexões em paralelo;

### **Classificações da hidráulica digital**

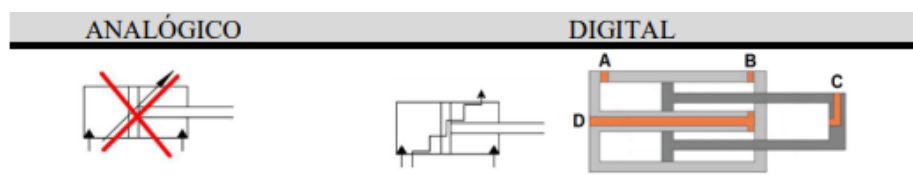
Segundo Belan *et al.* (2018), há uma ausência de consenso quanto à classificação dos sistemas hidráulicos digitais, sendo assim os autores propõem uma classificação dos sistemas digitais com base na função que o sistema desempenha. De acordo com esta classificação, é possível correlacionar as concepções digitais com a função desempenhada dentre: Conversão Primária, Limitação/Controle, Conversão Secundária e Armazenamento/Condicionamento. Neste projeto será utilizado o método de controle secundário, que será apresentado na sequência.

### **Método do controle secundário**

No contexto da hidráulica digital e seus avanços recentes, uma abordagem de destaque tem sido o uso de atuadores multi-câmaras. Estes atuadores são utilizados para oferecer maior eficiência e controle nos sistemas hidráulicos, apresentando vantagens significativas em relação aos sistemas convencionais.

Idealmente, para alcançar uma eficiência ideal, os cilindros hidráulicos deveriam ter suas áreas de câmaras ajustadas de forma contínua para atender às demandas específicas do equipamento. No entanto, essa prática é complexa e, em muitos casos, inviável. Nesse contexto, os atuadores multi-câmaras surgem como uma alternativa viável. Esses atuadores são equipados com múltiplas câmaras, o que permite um controle mais refinado e eficiente das operações hidráulicas (Figura 7).

Figura 7 – Atuador convencional e atuador multi-câmaras.



Fonte: (BELAN *et al.*, 2018).

O estudo conduzido por Linjama *et al.* (2011) explora a utilização de atuadores multi-câmaras como uma solução para otimizar a eficiência energética em sistemas hidráulicos. O autor destaca que atuadores com quatro câmaras representam o limite máximo dentro de uma mesma estrutura. Entretanto, a combinação de múltiplos atuadores, seja em série (tandem) ou em paralelo, amplia consideravelmente o potencial desses sistemas, possibilitando um controle mais exato e eficaz.

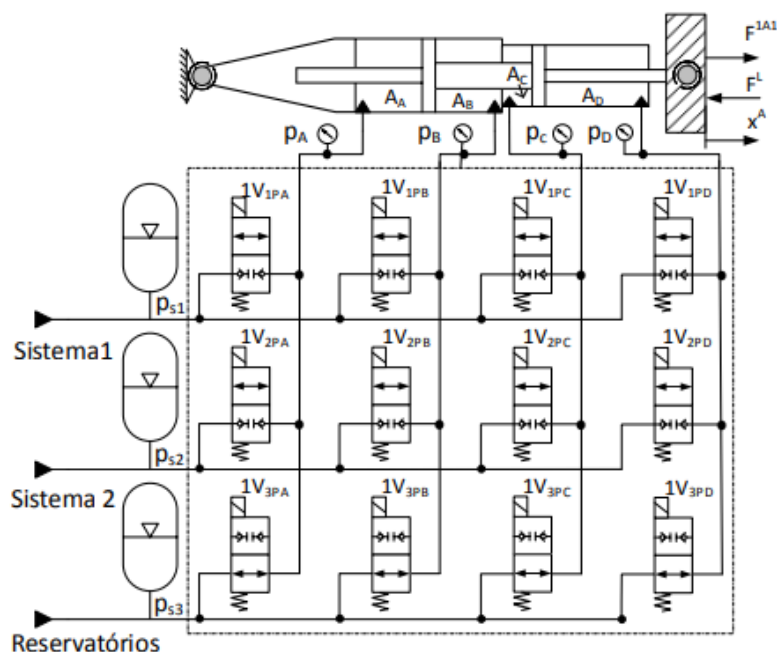
Em um cenário prático, atuadores lineares multi-câmaras não estão exclusivamente associados ao uso de tecnologias digitais. Eles podem ser controlados tanto por soluções analógicas quanto digitais, com ou sem unidades intermediárias de limitação e controle. No entanto, é importante destacar que a aplicação desses atuadores é mais comum em sistemas digitais, devido à sua capacidade de oferecer uma maior resolução de controle.

Além disso, pesquisas recentes evidenciam que o controle digital dos atuadores multi-câmaras pode resultar em significativas melhorias de eficiência energética. Estudos realizados por Nostrani (2021) demonstram que o uso de atuadores multi-câmaras controlados digitalmente pode reduzir consideravelmente as perdas de energia em comparação com sistemas convencionais. Resultados de simulações preliminares indicam uma eficiência energética até 80% superior quando comparada ao uso de válvulas proporcionais.

Na Figura 8 é apresentado um exemplo de atuador hidráulico digital com quatro áreas e três pressões distintas, controlado por 12 válvulas *on/off*, que resulta em 81 combinações de força disponíveis. O número de forças disponíveis resulta da combinação das diferentes áreas do atuador e pressões do sistema, proporcionando uma ampla gama de possibilidades de controle.

Em relação ao número de pressões e áreas distintas do atuador, este critério é fundamental para determinar o número de forças discretas disponíveis. Conforme representado na Figura 8, a variação desses parâmetros influencia diretamente a capacidade de controle e a eficiência do sistema hidráulico, contribuindo para uma melhoria na operação.

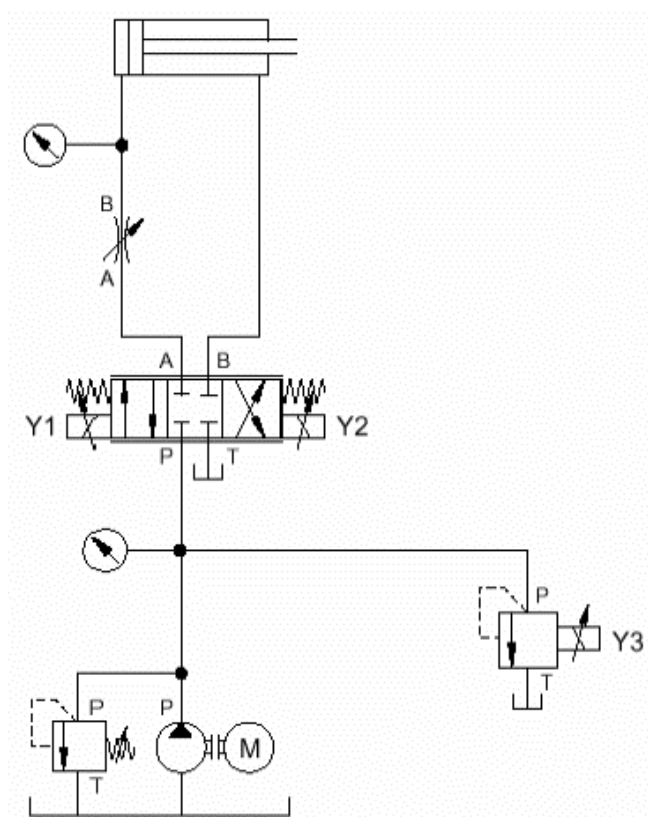
Figura 8 – Controle secundário com atuador multi-câmaras.



Fonte: (BELAN *et al.*, 2015).

A técnica de controle secundário em circuitos hidráulicos analógicos (convencionais) difere da abordagem proposta pela hidráulica digital. Enquanto na hidráulica digital a vazão é controlada por meio de múltiplas válvulas de acionamento discreto conectadas à linha de suprimento e à câmara do atuador, o controle secundário analógico utiliza uma única válvula, a qual usualmente apresenta um comportamento proporcional para ajustar a velocidade de deslocamento de acordo com a necessidade da aplicação. No entanto, este comportamento acarreta perdas por estrangulamento do fluido, reduzindo a eficiência energética e aquecendo demasiadamente o fluido. Na Figura 9 é apresentado o exemplo de um circuito de controle de velocidade utilizando uma válvula proporcional. Para a redução das perdas por aquecimento, não seria viável atuar na velocidade do motor que gera a pressão no sistema hidráulico, ou seja, controlar a pressão não pelo estrangulamento, mas pelo dispositivo que gera a pressão. No entanto, ajustar a velocidade do motor que gera a pressão no sistema pode apresentar desafios significativos, como a inércia do sistema, que dificulta respostas rápidas e precisas às mudanças de carga e necessidade de vazão. Além disso, a implementação desse controle pode ser complexa e custosa. Portanto, a técnica de válvulas *on/off* na hidráulica digital é preferida, pois elimina as perdas por estrangulamento, melhorando a eficiência energética e permitindo uma resposta rápida e precisa às mudanças na demanda.

Figura 9 – Diagrama de um circuito hidráulico controlado por válvula proporcional em malha aberta.



Fonte: (BRAVO, 2010).

Estes aspectos destacam a relevância e o potencial das tecnologias digitais e dos atuadores multi-câmaras para aprimorar a eficiência e o desempenho dos sistemas hidráulicos. A combinação de controle digital, atuadores multi-câmaras e outras técnicas inovadoras abre caminho para um novo paradigma na hidráulica, impulsionando a busca por soluções mais eficientes, precisas e sustentáveis para diversas aplicações industriais.

### 3.3 FILTRAGEM DE DADOS

A filtragem é uma técnica essencial em sistemas de controle e processamento de sinais, usada para remover ruídos indesejados ou extrair informações úteis de um sinal. Em sistemas de controle, a filtragem ajuda a melhorar a qualidade do sinal de medição, reduzindo a influência de ruídos e outras perturbações que podem afetar negativamente o desempenho do controlador.

Um tipo específico de filtro que merece destaque é o filtro de Variação Total (*Total Variation Denoising - TVD*). Este filtro é particularmente eficaz na remoção de ruídos de alta frequência, preservando ao mesmo tempo as características importantes

do sinal, como descontinuidades e bordas. Portanto, o TVD é um problema de otimização que busca minimizar a variância do sinal lido pelos sensores (FIGUEIREDO *et al.*, 2006).

### Filtro TVD

O filtro de Variação Total (TVD) é uma técnica de regularização amplamente utilizada em processamento de sinais e imagens para reduzir o ruído enquanto preserva as bordas e outras características importantes do sinal. O princípio básico do TVD é minimizar a variação total do sinal, o que resulta em um sinal mais suave sem perder detalhes significativos.

Matematicamente, o problema de filtragem TVD pode ser formulado como a minimização de uma função objetivo que balanceia a fidelidade ao dado original e a suavidade do sinal filtrado. Isso pode ser expresso como:

$$\min_u \left\{ \frac{1}{2} \|u - f\|_2^2 + \lambda \|u\|_{TV} \right\}. \quad (3)$$

Onde  $f$  é o sinal observado,  $u$  é o sinal filtrado,  $\|u\|_{TV}$  representa a variação total de  $u$ , e  $\lambda$  é um parâmetro que controla o *trade-off* entre a fidelidade ao dado e a suavidade do sinal.

A vantagem do filtro TVD é que ele é capaz de preservar descontinuidades importantes no sinal, ao contrário de métodos tradicionais de filtragem que tendem a suavizar todas as características do sinal. Isso torna o TVD uma ferramenta poderosa em aplicações onde a preservação de bordas e detalhes é crucial, como no processamento de imagens, caso que será utilizado neste projeto.

#### 4 ESTADO ORIGINAL DO GUINDASTE

O presente projeto foi realizado a partir de um guindaste móvel fornecido ao LASHIP em parceria com o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Campus Chapecó. A estrutura do equipamento foi projetada e fabricada por uma turma concluinte do curso técnico em mecânica do IFSC, conforme uma proposta de projeto.

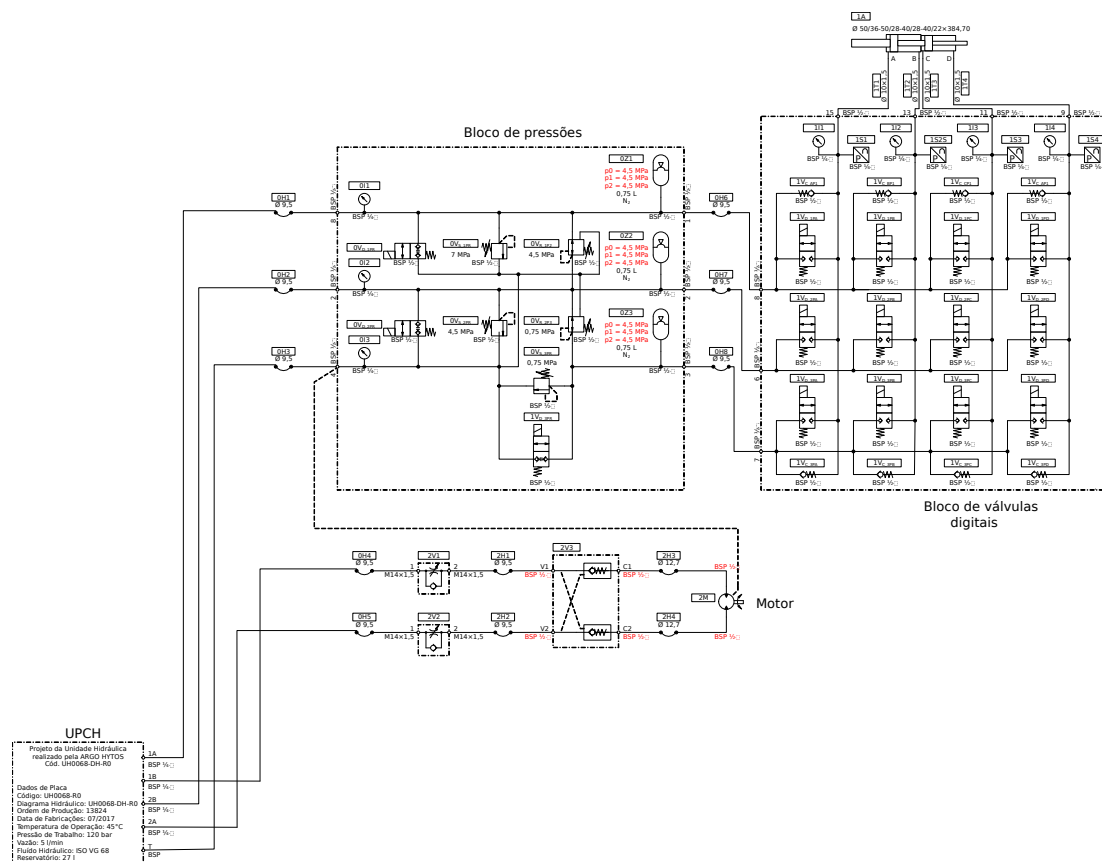
Essa estrutura foi desenvolvida para abrigar todos os componentes necessários e, ao mesmo tempo, ser compatível com elevadores de tamanho padrão, aumentando sua mobilidade e versatilidade de uso. Considerando a utilização em eventos, foram escolhidas geometrias não convencionais.

Além disso, anteriormente, uma bancada foi criada no LASHIP para estudar a aplicação da hidráulica digital no controle de superfícies ativas de aeronaves. Essa abordagem tem o potencial de aumentar significativamente a eficiência desses sistemas, diminuindo a dissipação de energia nos circuitos hidráulicos (BELAN *et al.*, 2018). O protótipo atual do guindaste conta com a realocação de diversos componentes daquela bancada para funcionamento.

A unidade de potência e condicionamento hidráulico (UPCH) e o motor hidráulico, responsáveis pelo movimento de rotação da coluna do guindaste, também foram selecionados e instalados previamente. Um diagrama do sistema que será utilizado no protótipo pode ser visto na Figura 10.



Figura 10 – Diagrama hidráulico do guindaste.



Fonte: (GONÇALVES, 2019).

A UPCH converte energia elétrica em energia hidráulica utilizando um motor trifásico e duas bombas de engrenagens (Anexo A). No bloco de pressões, essa energia é distribuída em três linhas de diferentes pressões. O bloco de válvulas digitais controla o uso destas linhas de pressões e as direciona para qualquer uma das quatro câmaras do cilindro, permitindo o movimento vertical do equipamento ao mover o fluido.

Na parte inferior do diagrama hidráulico está o componente responsável pela rotação da coluna. A energia proveniente da UPCH passa por válvulas de controle de vazão para ajustar a velocidade de rotação e aciona o motor hidráulico que, por meio de um sistema de engrenagens, gira a coluna do guindaste. Além disso, válvulas de retenção conjugadas estão presentes na linha para impedir a rotação quando não há acionamento.

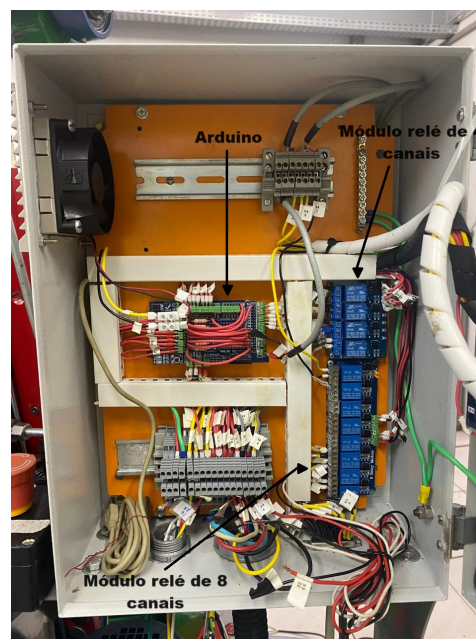
Este protótipo já foi objeto de outros dois trabalhos de conclusão de curso no LASHIP (GONÇALVES, 2019) e (VOSS, 2019). O primeiro realizou uma análise estrutural e uma análise de possíveis casos de tombamento do protótipo, identificando possíveis falhas e buscando corrigi-las, além da disposição dos componentes hidráulicos no equipamento. O segundo realizou a construção da interface entre o operador e o controle do guindaste, adaptação de componentes elétricos do sistema e o desenvol-

vimento do giro da estrutura através da linguagem de programação C++. No entanto, apesar dos esforços realizados anteriormente, o protótipo não teve continuidade até o presente momento, sendo necessária sua conclusão com a implementação da função de içamento, para utilização conforme planejado. Na Figura 11, pode-se ver como estavam dispostas as mangueiras, cabos e o painel elétrico do guindaste antes do início do atual projeto.

Figura 11 – Guindaste e painel elétrico antes do início do atual projeto



(a) Guindaste antes do projeto.



(b) Painel antes do projeto.

Fonte: (GONÇALVES, 2019).

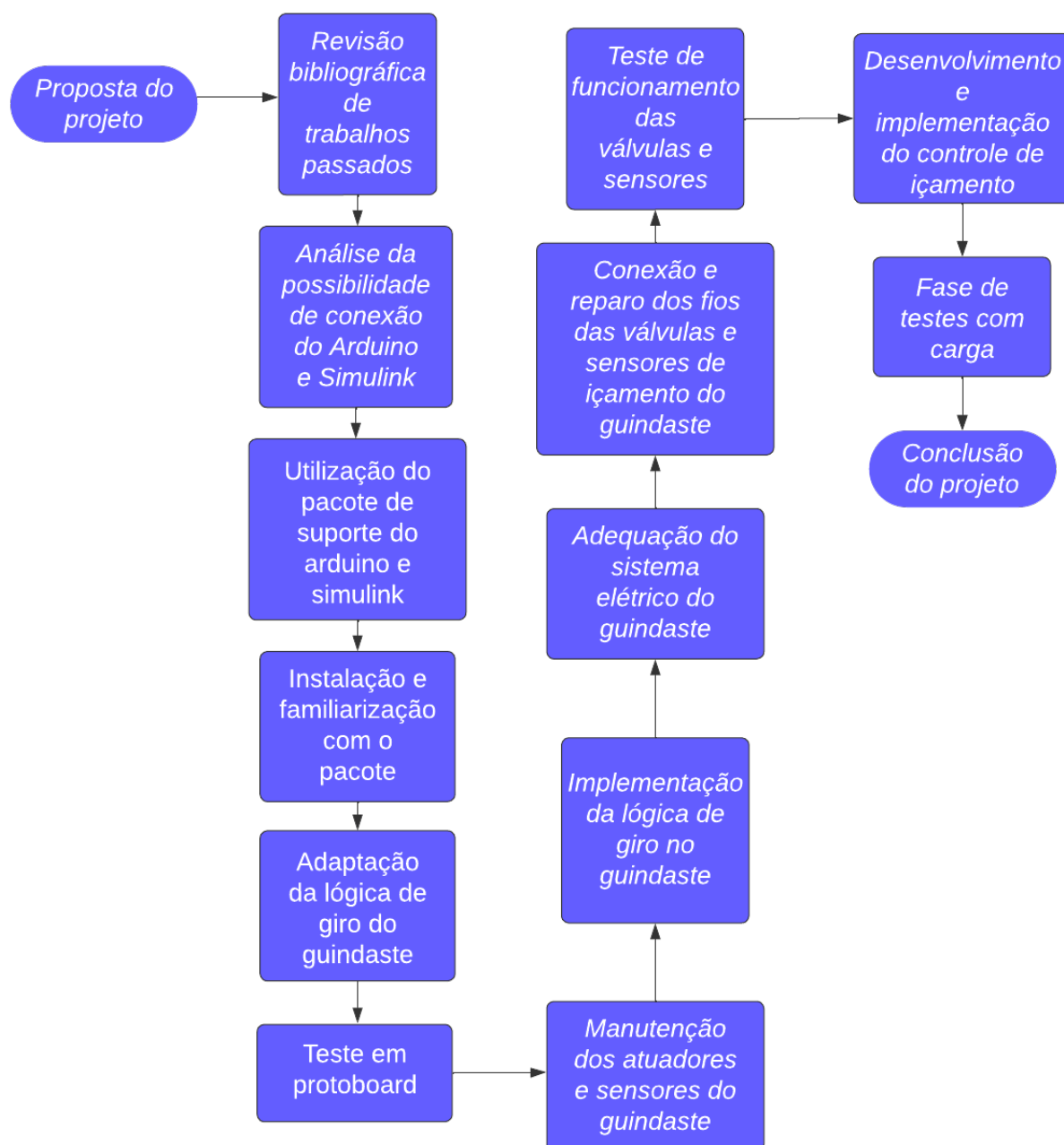
## 5 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo visa demonstrar como foi realizado o desenvolvimento e implementação do projeto proposto, abordando como foi planejado e executado. Inicialmente, descreve-se o planejamento das atividades e a utilização do pacote de comunicação Simulink com Arduino. Em seguida, detalha-se a manutenção dos atuadores e sensores do guindaste, incluindo a substituição de sensores de fim de curso danificados, manutenção de mangueiras hidráulicas e o módulo relé. O capítulo também aborda a implementação da lógica de giro e a adequação do sistema elétrico do guindaste. Além disso, explica-se a conexão das válvulas e sensores de içamento e o desenvolvimento do controle de içamento, que inclui a lógica da hidráulica digital, o mapeamento das forças do guindaste e a criação do primeiro código de içamento e seu aprimoramento.

### 5.1 PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES

Para que o projeto fosse realizado dentro do prazo e atendesse aos requisitos necessários, um planejamento inicial de atividades foi essencial. Esse planejamento buscou abordar todos os passos necessários para o desenvolvimento e implementação do projeto. Além disso, foi considerado um tempo hábil extra para eventuais problemas que pudessem surgir. Assim, um fluxograma detalhando o passo a passo do projeto foi elaborado para garantir que ele fosse desenvolvido de maneira ordenada. Esse fluxograma pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma do planejamento de atividades.

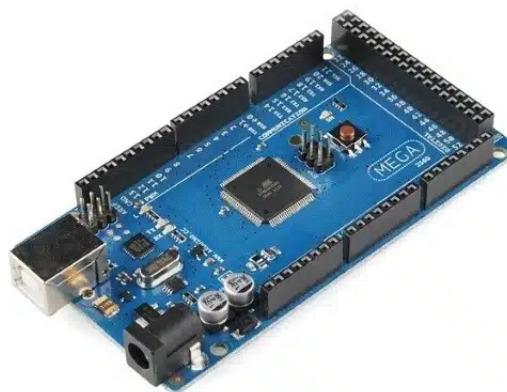


Fonte: Do autor (2024).

## 5.2 UTILIZAÇÃO DO PACOTE DE COMUNICAÇÃO SIMULINK E ARDUINO

Conforme visto na Figura 11b, o controle do guindaste foi realizado através de um Arduino Mega 2560, Figura 13, um microcontrolador de código aberto baseado no ATmega2560. O Arduino Mega 2560 é uma das placas mais poderosas da linha Arduino, oferecendo um grande número de pinos de entrada/saída (I/O) e memória, o que o torna ideal para projetos mais complexos.

Figura 13 – Modelo do Arduino utilizado no projeto.



Fonte: (MAKERHERO, 2024).

A placa é composta por 70 portas, sendo 54 para entradas e saídas digitais e 16 para entradas analógicas. Possui uma tensão de operação de 5 volts, mas a tensão de entrada recomendada varia entre 7 e 12 volts.

Embora o Arduino Mega 2560 seja uma ferramenta poderosa e versátil para prototipagem e desenvolvimento de projetos eletrônicos, ele apresenta algumas desvantagens em comparação a um Controlador Lógico Programável (CLP). CLPs são frequentemente preferidos em aplicações industriais devido à sua maior robustez, durabilidade, e capacidade de tratamento e armazenamento de dados.

No entanto, para este projeto específico, que é uma continuação de um trabalho anteriormente iniciado, optou-se por manter o uso do Arduino Mega 2560. Esta decisão foi motivada pela falta de espaço no painel de controle original para acomodar um CLP e pelo alto custo de aquisição de um CLP. Dessa forma, decidiu-se pela utilização do Arduino Mega 2560.

Assim, apesar de uma lógica de controle para o giro do guindaste em código C++ desenvolvida por Voss (2019) já existir, por questões de facilidade para implementação da lógica de controle do içamento do guindaste foi optado por fazer uma adaptação da lógica existente utilizando MATLAB/Simulink, para isso foi necessário a utilização de um pacote extra chamado *Simulink Support Package for Arduino Hardware* (Figura 14), uma ferramenta desenvolvida pela *MathWorks* que permite a integração do MATLAB/Simulink com plataformas de microcontroladores Arduino. Essa integração facilita o desenvolvimento e a implementação de algoritmos de controle e outros sis-

temas embarcados diretamente no hardware Arduino, utilizando a interface gráfica do Simulink.

Figura 14 – Pacote utilizado para comunicação Simulink e Arduino.



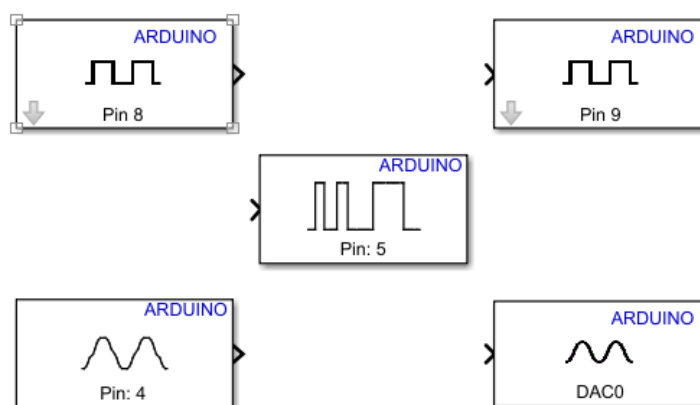
Fonte: (MATHWORKS, 2024).

Dentre os benefícios deste pacote vale ressaltar alguns (MATHWORKS, 2024):

- **Modelagem e Simulação:** Permite criar modelos de sistemas diretamente no Simulink, incluindo blocos de entrada/saída específicos para Arduino, além da possibilidade de simulação do comportamento do sistema em tempo real antes de implementar no hardware, reduzindo erros e otimizando o design.
- **Gerenciamento de Hardware:** Suporta diversas placas Arduino, incluindo o Arduino Mega 2560, Uno, Due, e outras. Automatiza a configuração e o gerenciamento do hardware, simplificando a interação entre o Simulink e o Arduino.
- **Blocos Personalizados:** Inclui bibliotecas de blocos específicos para Arduino, como entradas analógicas e digitais, PWM, comunicação serial, entre outros, como pode ser visto na Figura 15 e permite a utilização de blocos únicos para funções específicas, aumentando a flexibilidade do desenvolvimento de projetos.
- **Deploy e Execução:** Facilita o *deployment* de modelos Simulink diretamente no Arduino sendo o código gerado otimizado para o microcontrolador Arduino, garantindo eficiência e desempenho.

- **Monitoramento e Ajustes em Tempo Real:** Oferece ferramentas para monitorar e ajustar parâmetros em tempo real enquanto o modelo está sendo executado no hardware, permitindo a visualização de dados e a realização de testes e ajustes dinâmicos, melhorando a precisão e a resposta do sistema.

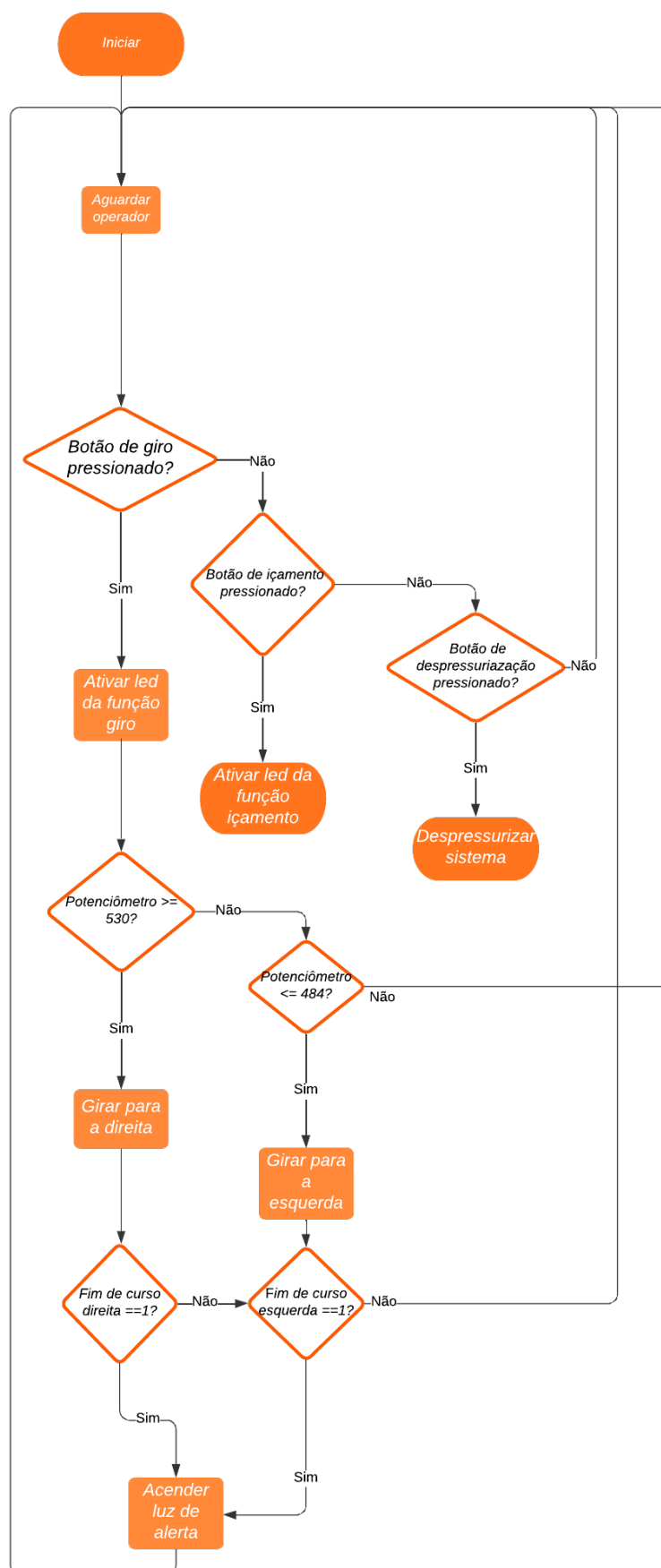
Figura 15 – Exemplos de blocos específicos adicionados pelo pacote utilizado.



Fonte: Do autor (2024).

Após a instalação do pacote e a devida familiarização com a ferramenta, foram realizados alguns testes para a implementação da lógica de giro do guindaste. Primeiramente, foi adaptado o código proposto por Voss (2019). A lógica fundamental foi mantida, porém, algumas modificações foram feitas para melhorar o funcionamento do projeto. A Figura 16 mostra a lógica adaptada para o projeto em um fluxograma, que será explicado em detalhes a seguir.

Figura 16 – Fluxograma da nova lógica da função de giro do sistema.





### 1. Aguardando Operador:

- Aguarda a ação do operador.

### 2. Função Giro:

- Se o operador pressiona o botão de giro e o botão de içamento não está pressionado, o sistema entra na função de giro.
- Nesta função, o LED correspondente à função giro é ativado para indicar que o sistema está no modo de giro.
- A seguir, o sistema verifica a posição do potenciômetro do *joystick* de controle de giro:
  - **Girar para a Direita:**
    - \* Se o valor analógico de saída do potenciômetro é maior ou igual a 530, o guindaste começa a girar para a direita. Para tal, as saídas digitais 23 e 27 são acionadas, o que aciona as bobinas 1V1/14 e 2V1/12 (Apêndice A).
    - \* O guindaste continua girando até que o sensor de fim de curso da direita seja acionado. Esse sensor impede que o guindaste continue girando além do limite permitido e acende uma luz de alerta para indicar que o fim de curso foi atingido.
  - **Girar para a Esquerda:**
    - \* Se o valor analógico de saída do potenciômetro é menor ou igual a 484, o guindaste começa a girar para a esquerda. Para tal, as saídas digitais 25 e 29 são acionadas, o que aciona as bobinas 1V1/12 e 2V1/14 (Apêndice A).
    - \* O guindaste continua girando até que o sensor de fim de curso da esquerda seja acionado, impedindo que o guindaste continue girando além do limite permitido e acendendo uma luz de alerta para indicar que o fim de curso foi atingido.

### 3. Função Içamento:

- Se o botão de giro não está pressionado e o botão de içamento está pressionado, o sistema entra na função de içamento.
- Nesta função, o LED correspondente à função içamento é ativado para indicar que o sistema está no modo de içamento.
- Nas seções seguintes, será apresentada em detalhes a implementação do restante da lógica de içamento.

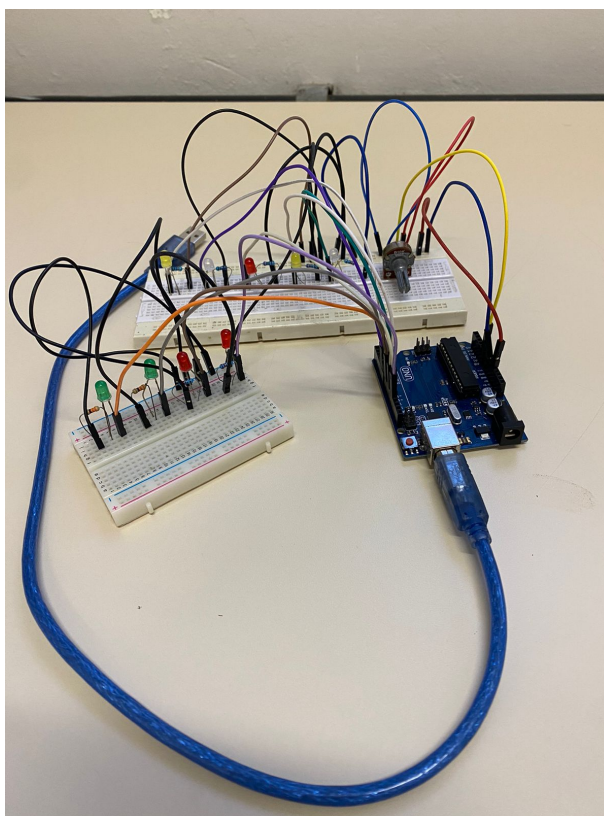
### 4. Despressurização do Sistema:

- Há um botão de despressurização que realiza a despressurização do sistema hidráulico.
- A despressurização é realizada somente se o botão de despressurização é pressionado e nenhum outro botão (giro ou içamento) está pressionado.
- Quando estas condições são atendidas e o botão de despressurização é pressionado, o sistema é despressurizado. Para tal, a saída digital 31 é acionada, o que aciona as bobinas 0VD\_1PR, 0VD\_2PR e 0VD\_3PR (Apêndice A).

Essa lógica assegura que o guindaste funcione corretamente, prevenindo movimentos excessivos além dos limites estabelecidos e permitindo que o sistema hidráulico seja despressurizado de forma segura.

Após a adaptação da lógica, a implementação foi realizada no Simulink para verificar a eficácia da ferramenta escolhida. O código desenvolvido foi então implementado em um protótipo utilizando um Arduino UNO (Figura 17). Os botões de entrada foram simulados virtualmente no *software* para a realização dos testes do código. As saídas, por sua vez, foram emuladas por *LEDs* conectados diretamente na *protoboard*. Os resultados foram satisfatórios, permitindo o avanço para a próxima etapa do projeto.

Figura 17 – Protótipo montado em *protoboard* para realização de testes.



### 5.3 MANUTENÇÃO DOS ATUADORES E SENSORES DO GUINDASTE

Antes de prosseguir com a implementação do código feito para o guindaste, algumas medidas preventivas precisaram ser tomadas para garantia de que o código implementado não tivesse seu desempenho atrapalhado por problemas físicos de *hardware*. Começando a verificação do guindaste alguns problemas foram encontrados, estes serão melhor explicados a seguir.

#### **Sensores de fim de curso quebrados**

Um dos problemas encontrados foram os sensores de fim de curso. Na Figura 18 é mostrado o modelo dos sensores utilizados, os quais se localizam na parte inferior da estrutura, delimitando o espaço de atuação do giro do guindaste. Isso impede que o mesmo complete uma volta de 360 graus, o que poderia resultar em danos às mangueiras, cabos e outros componentes. Esses sensores evitam que o guindaste entre em zonas que podem oferecer risco ao operador ou até mesmo danificar a estrutura.

Durante um teste de sinal das saídas do Arduino, foi observado que os sensores não emitiam sinal de acionamento. Foi necessário verificar o que havia ocorrido com esses sensores. No entanto, eles estavam localizados em um ponto de difícil acesso para manutenção, exigindo a utilização de um guindaste manual para levantar a base do guindaste e realizar a devida manutenção.

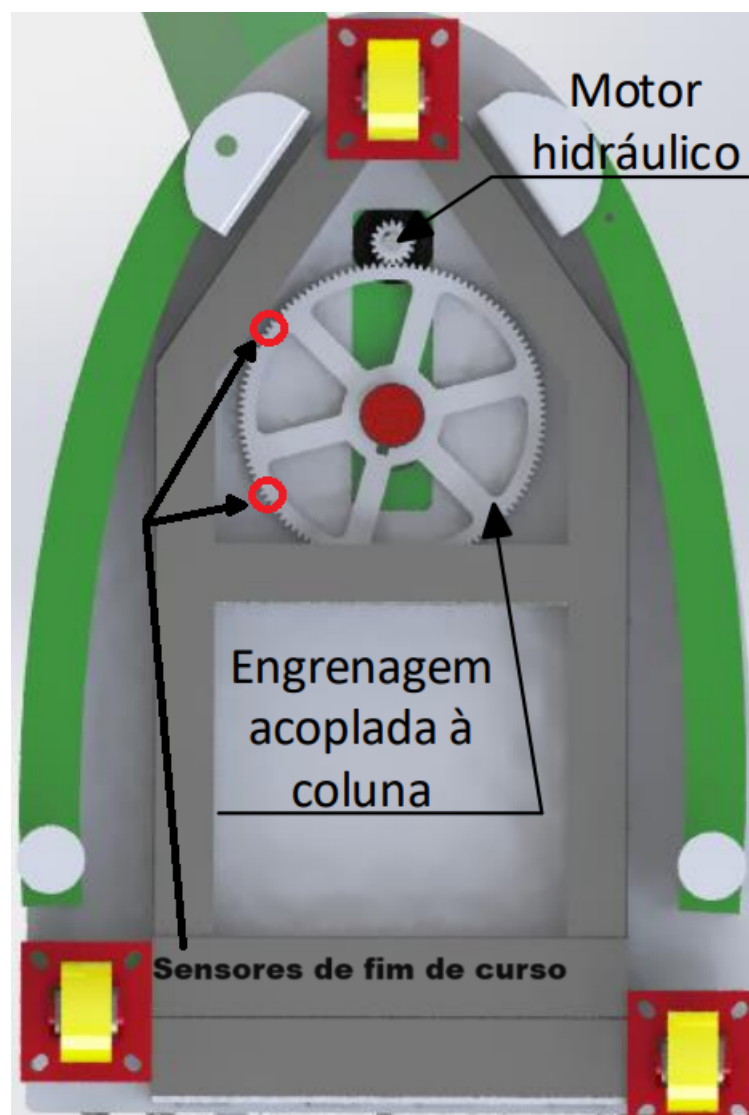
Com a utilização do guindaste auxiliar, percebeu-se que a estrutura que segurava os fios dos sensores havia rompido e estava enroscando no motor. Isso também causou danos na estrutura de suporte dos próprios sensores. A estrutura foi refeita e os fios foram recolocados de forma mais segura para evitar novos danos. Infelizmente, a área de operação para manutenção era muito limitada, dificultando o registro de imagens que ilustrassem o trabalho realizado. No entanto, a Figura 19, adaptada de Voss (2019), demonstra o local onde os sensores foram posicionados.

Figura 18 – Exemplo do modelo de sensor de fim de curso utilizado



Fonte: (OLIVEIRA, 2018).

Figura 19 – Vista inferior do guindaste com a posição dos sensores de fim de curso.



Fonte: Adaptada de (VOSS, 2019).

### Mangueiras hidráulicas

Outro problema encontrado foi o posicionamento das mangueiras hidráulicas responsáveis pelo suprimento de fluido hidráulico para as válvulas que controlam a movimentação do guindaste. As mangueiras hidráulicas são componentes essenciais no sistema de guindastes hidráulicos, pois permitem a transferência de fluido sob pressão, que é crucial para o funcionamento dos atuadores e cilindros hidráulicos que movem o guindaste.

No entanto, da forma como as mangueiras estavam dispostas, elas interferiam no movimento de giro do guindaste, limitando seu alcance e impedindo o acionamento dos sensores de fim de curso. Este posicionamento inadequado não só restringia a

operação do guindaste, mas também representava um risco de danos tanto para as mangueiras quanto para as demais partes do guindaste.

Para resolver este problema, foi necessário reposicionar as mangueiras. A solução envolveu reconfigurar a disposição das mangueiras para garantir que elas não interferissem no movimento de giro e permitissem o acionamento adequado dos sensores de fim de curso. Na Figura 20 é mostrada a solução proposta para resolver este problema, que incluiu a fixação das mangueiras de forma segura e organizada, evitando dobras excessivas e contato com partes móveis do guindaste.

Figura 20 – Nova disposição realizada com as mangueiras hidráulicas evitando danos futuros.

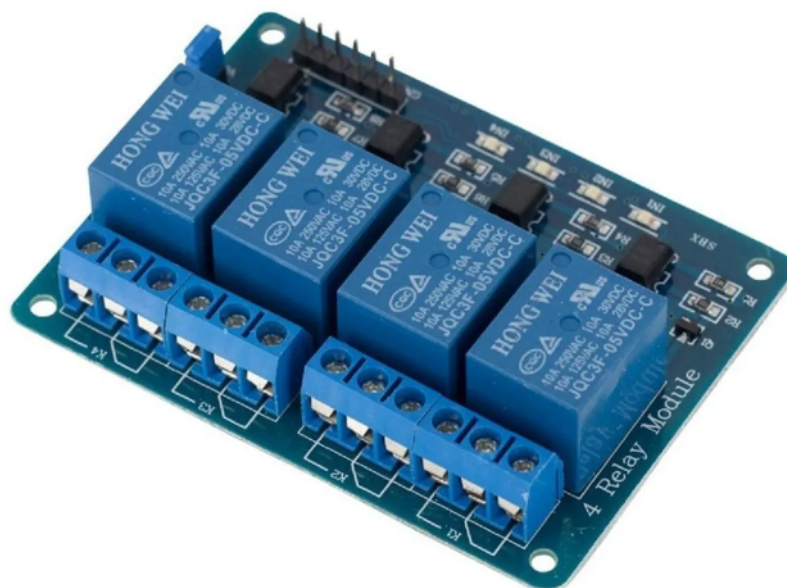


Fonte: Do autor (2024).

### **Módulo relé**

Um módulo relé é um componente eletrônico que permite controlar dispositivos de alta corrente com sinais de baixa corrente provenientes de um microcontrolador, como o Arduino. Na Figura 21, é apresentado o modelo do módulo utilizado. Neste projeto, foram utilizados três módulos de relés: dois módulos com 8 canais e mais um módulo com 4 canais.

Figura 21 – Exemplo do módulo relé utilizado no projeto.



Fonte: (ELETROLÂNDIA, 2024)

- **Funcionamento:** O módulo relé funciona como um interruptor controlado eletricamente. Cada canal do módulo relé pode ser ativado por um sinal de controle, geralmente proveniente de uma saída digital do Arduino. Quando o sinal de controle é enviado, o relé se ativa, permitindo a passagem de corrente elétrica através de seus contatos e acionando o dispositivo conectado.
- **Estrutura:** Os módulos de relés utilizados no projeto possuem 4 e 8 relés independentes, cada um capaz de controlar um dispositivo diferente. Ele é acionado um sinal digital entre 0 e 5 volts, que é a mesma tensão de operação das saídas digitais do Arduino, tornando a integração entre os componentes simples e eficiente.
- **Aplicação no Projeto:** No contexto deste projeto, o módulo relé foi utilizado para controlar as válvulas hidráulicas do sistema, leds e lâmpadas do painel elétrico.

Durante os testes de preparação para a implementação da função de giro do guindaste, observou-se uma falha no acionamento das válvulas solenoides responsáveis pelo controle dessa função. Após análise, foi constatado que o módulo relé, responsável pelo acionamento das 4 válvulas que controlavam o giro do guindaste, estava defeituoso. Alguns dos relés não estavam realizando o acionamento das válvulas, exigindo sua substituição.

Realizou-se a troca do módulo defeituoso, e após a substituição, novos testes foram realizados. Verificou-se que o novo módulo relé funcionou como esperado, permi-

tindo o acionamento correto das válvulas solenoides e o controle adequado da função de giro do guindaste.

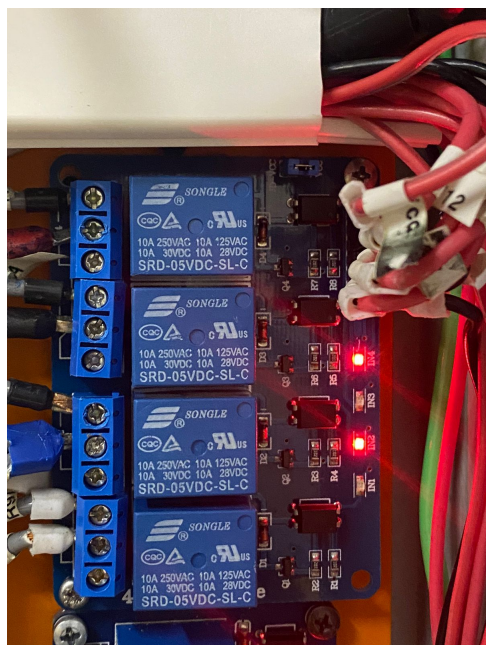
#### 5.4 IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA DE GIRO NO GUINDASTE

Após o reparo dos principais problemas que poderiam interferir na lógica de funcionamento do giro do guindaste, o código de teste foi atualizado para utilizar as entradas e saídas digitais do Arduino Mega 2560, substituindo os botões virtuais utilizados anteriormente no protótipo montado na *protoboard*.

Assim, foi realizado o *deploy* do código, que pode ser visto no Apêndice B, para o microcontrolador. Verificou-se que a lógica funcionou conforme esperado. Nas Figuras 22b e 23, são mostrados os relés e LEDs acionados para cada posição de giro. Já na Figura 24, pode-se ver o LED sinalizando que a função de giro foi selecionada. Quando o motor é ligado pelo painel elétrico principal, o guindaste gira de acordo com a posição selecionada no *joystick* pelo operador.

Após a conclusão da implementação, foram conduzidos diversos testes de funcionamento com o guindaste para garantir que o giro fosse adequado, e os resultados foram satisfatórios.

Figura 22 – Função de giro para a esquerda selecionada



(a) Relés acionados.

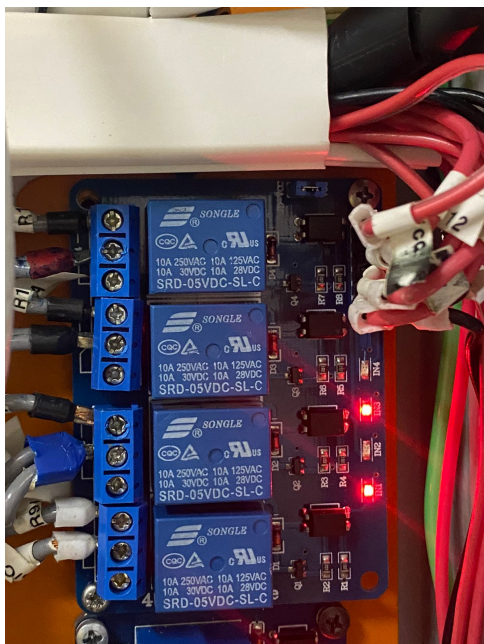


(b) Leds acionados.

Fonte: Do autor (2024).



Figura 23 – Função de giro para a direita selecionada



(a) Relés acionados.



(b) Leds acionados.

Fonte: Do autor (2024).

Figura 24 – Função de giro selecionada.



Fonte: Do autor (2024).

## 5.5 ADEQUAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DO GUINDASTE

Nesta etapa, foram realizadas várias melhorias no sistema elétrico do projeto, com o objetivo de aprimorar a funcionalidade e a segurança. Essas melhorias visaram evitar possíveis acidentes com operadores e danos à estrutura do guindaste.

Primeiramente, foram realizadas adaptações estruturais no painel para facilitar seu uso e futuras manutenções. Toda a fiação elétrica foi revisada, substituindo cabos desgastados e organizando-os de maneira mais eficiente. Isso não apenas reduziu o risco de curto-circuitos, mas também facilitou a manutenção e a identificação de cada componente do sistema.

Além disso, foi feita a unificação dos cabos de alimentação do sistema. Anteriormente, o sistema era alimentado por dois cabos: um responsável por ligar o inversor de frequência que aciona o motor trifásico, e outro utilizado para ligar as três fontes de tensão contínua do projeto (5 Vcc, 12 Vcc e 24 Vcc), que alimentam componentes como o Arduino, válvulas solenoides, módulos relés, sensores, entre outros.

Durante este processo, os cabos das fontes foram incluídos no sistema de proteção do guindaste. Foi realizada a passagem dos cabos de alimentação das fontes pelo disjuntor para evitar sobrecargas elétricas que poderiam danificar os componentes eletrônicos ou causar incêndios. Este dispositivo garante que, em caso de falha, o sistema será automaticamente desligado, protegendo tanto o equipamento quanto os operadores. Agora, todo o sistema passa pelo disjuntor e é necessário apenas uma tomada para inicializá-lo. Na Figura 25, é apresentado o sistema de proteção do projeto.

Figura 25 – Sistema de proteção do projeto.



Fonte: Do autor (2024).

Também foi implementado um sistema de aterramento adequado na estrutura para dissipar correntes indesejadas, proporcionando uma camada adicional de segurança contra choques elétricos.

Adicionalmente, as fontes foram instaladas entre a viga principal da estrutura e os cabos foram reorganizados para permitir o movimento sem obstruções. Na Figura 26 vemos o novo reposicionamento das fontes na estrutura.

Figura 26 – Posicionamento antigo e atualizado das fontes do guindaste.



(a) Disposição antiga das fontes.



(b) Nova disposição das fontes.

Fonte: Do autor (2024).

Por fim, os diagramas elétricos existentes foram atualizados para incluir as novas válvulas instaladas e outros ajustes necessários. Esses diagramas foram adaptados utilizando o *software* Visio, e podem ser vistos no Anexo B.

Essas melhorias combinadas aumentaram significativamente a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico do guindaste, tornando a operação mais segura e eficiente.

## 5.6 CONEXÃO DAS VÁLVULAS E SENSORES DE IÇAMENTO DO GUINDASTE

Com a etapa de implementação do giro completa e a adequação do sistema elétrico finalizada, foi iniciada a conexão das válvulas solenoides necessárias para o içamento do guindaste e a instalação dos sensores de pressão e posição para a aquisição de dados sobre o funcionamento do sistema.

Durante esta etapa, foram identificadas algumas necessidades para a conexão desses elementos:

Primeiramente, notou-se que os cabos das válvulas e dos sensores não possuíam comprimento suficiente para alcançar o painel elétrico do guindaste. Foi necessária a adaptação desses cabos através de emendas realizadas na bancada de trabalho do LASHIP. Ao todo, foram emendados 20 cabos: 12 para as válvulas solenoides utilizadas no içamento e 8 para os sensores do guindaste. Os cabos das válvulas são constituídos por dois fios (um positivo e um negativo), enquanto os cabos dos

sensores possuem três fios (um positivo, um negativo e um de sinal). As válvulas e os sensores possuem interface de conexão para conectores DIN 43650. Na Figura 27, pode-se ver um exemplo dos cabos utilizados.

Figura 27 – Exemplo de cabos utilizados no projeto.



Fonte: (HYSIK, 2021).

Após a adaptação, os cabos foram inseridos no painel elétrico. Destaca-se que os cabos foram dispostos seguindo o posicionamento das mangueiras hidráulicas, evitando qualquer tipo de obstrução ao movimento do guindaste. Na Figura 28, pode-se ver a disposição dos cabos ao lado das mangueiras hidráulicas.

Figura 28 – Cabos reposicionados junto às mangueiras hidráulicas.



Fonte: Do autor (2024).

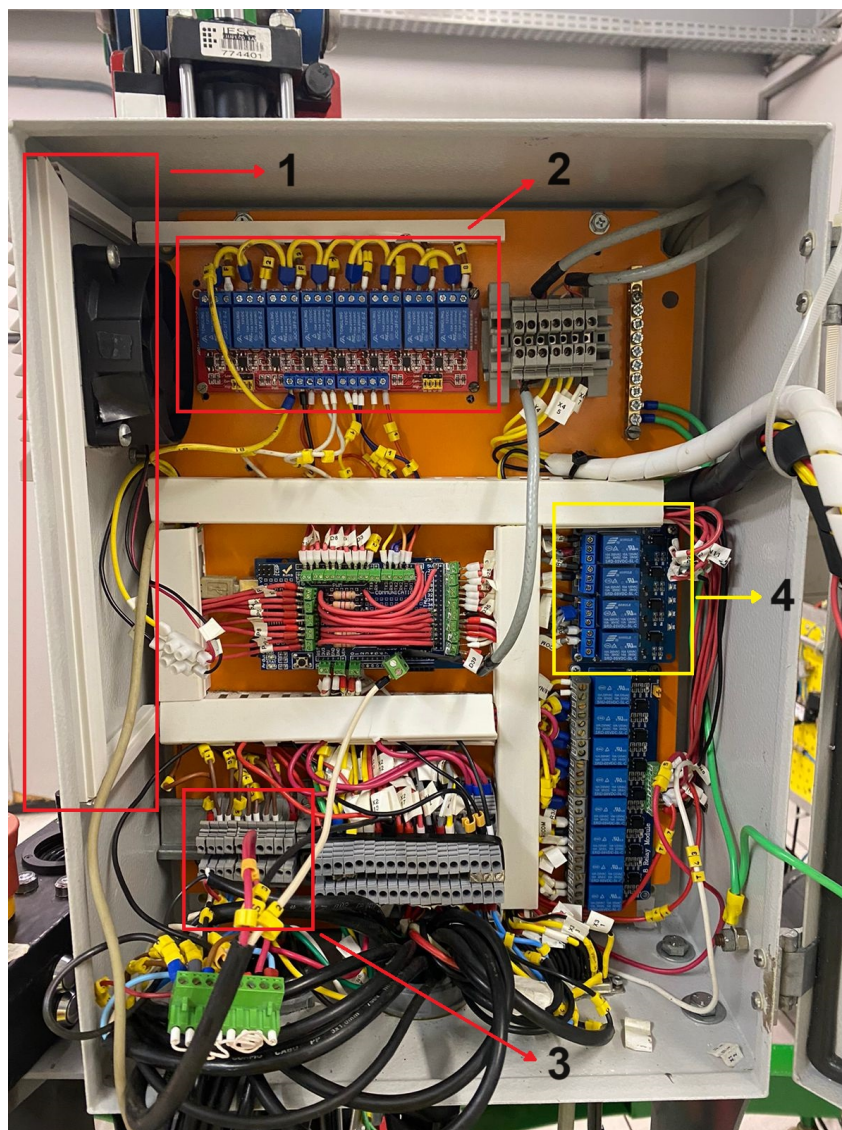
Para a conexão e acionamento das doze válvulas responsáveis pelo içamento do guindaste foi necessária a aquisição de alguns componentes essenciais para o funcionamento esperado do sistema. Entre esses componentes estava 1 módulo de relé com 8 canais para o acionamento das válvulas de içamento, além de bornes duplos e terminais tubulares isolados, que otimizam a disposição dos componentes dentro do painel elétrico.

Estes itens foram solicitados à Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina (FEESC). Contudo, até o período de conclusão do trabalho, apenas o módulo relé de 8 canais e os terminais tubulares pré-isolados foram entregues. A ausência dos bornes duplos de conexão obrigou a realização de adaptações provisórias, comprometendo de forma parcial a organização final do painel. Na Figura 11b, pode-se ver o painel antigo, enquanto a Figura 29 mostra a versão final do painel. Os componentes destacados são:

1. Canaletas adicionais para uma melhor disposição dos fios.
2. O novo módulo relé adicionado.
3. *Bornes* de apenas uma entrada instalados provisoriamente para a conexão das válvulas de içamento do guindaste.
4. O módulo relé substituído devido a um defeito, conforme mencionado na seção 5.3.

Nesta versão do painel, todas as 12 válvulas solenoides responsáveis pelo içamento do guindaste foram conectadas, juntamente com um sensor para a medição do curso do cilindro de içamento. Os sensores de pressão serão conectados assim que os bornes duplos chegarem. Embora a inclusão desses sensores teria representado um bônus para o resultado final do projeto, a lógica de controle desenvolvida não requer a medição em tempo real dos sinais de pressão.

Figura 29 – Versão final do painel elétrico do guindaste.



Fonte: Do autor (2024).

Após a instalação e conexão de todas as válvulas e sensores, foram realizados testes de funcionamento para garantir que cada componente operasse corretamente. Esses testes confirmaram que as válvulas solenoides e o sensor utilizado estavam funcionando como esperado, permitindo o avanço seguro e eficaz para as próximas etapas do projeto.

## 5.7 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE IÇAMENTO

Para desenvolvimento e implementação da lógica de controle de içamento foram necessários alguns passos. A lógica desenvolvida teve como base o sistema de mapeamento de forças utilizando hidráulica digital desenvolvido por Belan *et al.* (2018).



Toda a construção e elaboração do sistema de controle do içamento do guindaste será explicado detalhadamente a seguir.

### **Lógica de funcionamento da hidráulica digital**

Para aprimorar a eficiência e a precisão do sistema de içamento do guindaste, foi adotada uma lógica de funcionamento baseada na hidráulica digital, conforme descrito por Belan *et al.* (2018). Esta abordagem foi selecionada devido à sua capacidade de fornecer controle preciso e adaptável em sistemas hidráulicos complexos. Na verdade, a principal motivação para a escolha dessa abordagem foi a economia de energia, visando a sustentabilidade. A hidráulica digital minimiza as perdas de energia típicas dos sistemas convencionais, reduzindo o consumo energético e promovendo uma operação mais sustentável e eficiente.

A técnica de controle secundário apresentada na Figura 8 foi escolhida como a opção de hidráulica digital a ser utilizada.

Esta técnica utiliza acumuladores de pressão como interface entre os trabalhos, permitindo a disponibilidade de três linhas de suprimento constantes com diferentes pressões: uma linha de baixa pressão (pS3) fixa em 7,5 bar e duas linhas ajustáveis (pS1 e pS2) variando entre 20 e 300 bar.

Para o sistema de atuação, foi proposto o uso de um atuador linear multicâmaras controlado por um sistema de controle secundário. Este atuador possui quatro câmaras e é acionado por um conjunto de 12 válvulas discretas (*on/off*), como visto na Figura 8. Esta configuração permite uma maior flexibilidade e redundância, essenciais para operações seguras e eficientes.

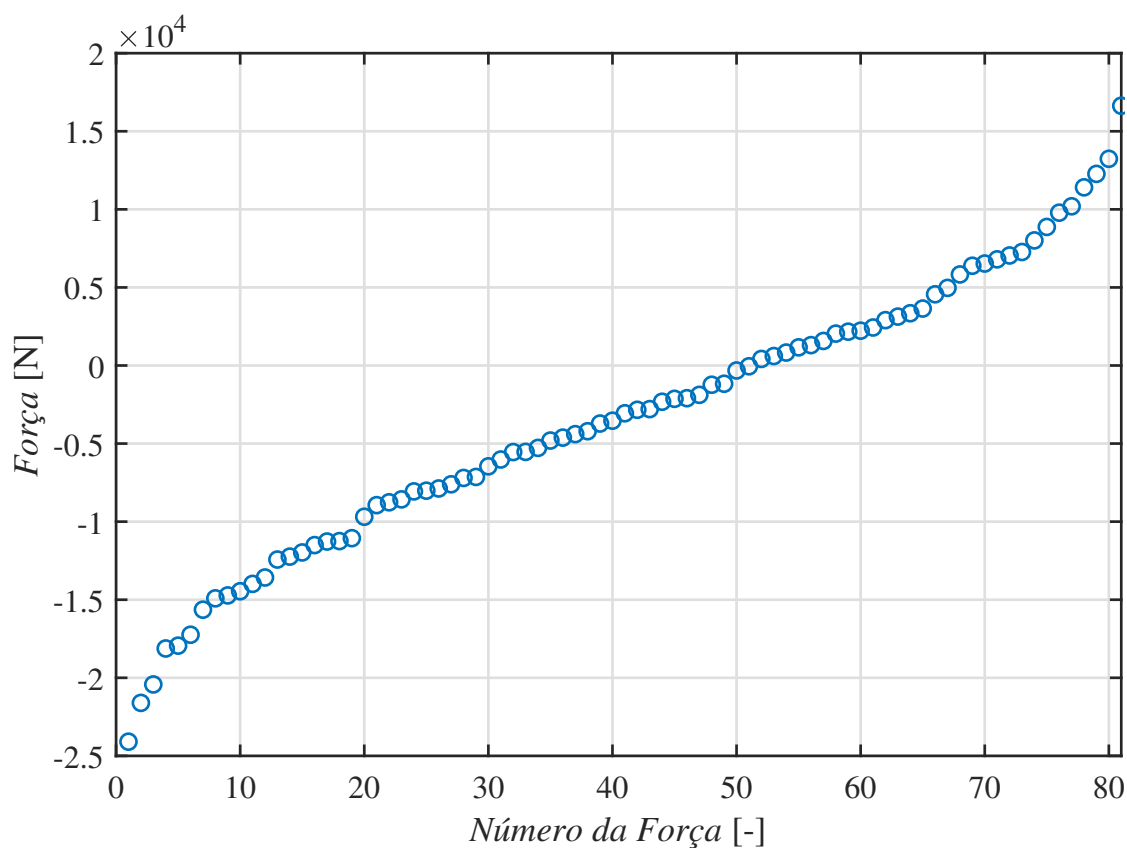
Este circuito pode ser dividido em três partes principais: o bloco de controle digital fornece duas linhas de suprimento. O bloco de controle de pressões ajusta as pressões das linhas de suprimento por meio de válvulas redutoras de pressão. A terceira linha de suprimento (baixa pressão) é produzida por uma válvula redutora de pressão a partir da linha de média pressão. As válvulas direcionais descarregam os acumuladores quando o sistema é desligado, garantindo segurança.

O bloco de controle digital diferencia-se por permitir um número discreto de forças disponibilizadas pelo atuador, dependendo da quantidade de áreas das câmaras e das pressões de suprimento. Utilizando um cilindro com quatro câmaras e três pressões de suprimento, o sistema pode disponibilizar até 81 valores discretos de força. A definição das áreas do cilindro e níveis de pressões possui papel fundamental para garantir uma distribuição uniforme das forças disponíveis. Belan *et al.* (2018) desenvolveu um algoritmo de otimização para a seleção das áreas do cilindro e dos níveis de pressão. Neste trabalho, as áreas de atuação encontravam-se definidas, visto que o atuador tandem presente no guindaste já havia sido utilizado nos testes iniciais de hidráulica digital desenvolvidos por Belan *et al.* (2018). As áreas das câmaras deste

cilindro são:  $A_a = 0.00094562 \text{ m}^2$ ,  $A_b = 0.001348 \text{ m}^2$ ,  $A_c = 0.00064088 \text{ m}^2$  e  $A_d = 0.00087650 \text{ m}^2$ . Essas áreas foram obtidas a partir das informações de trabalhos anteriores realizados por Belan *et al.* (2018) sobre este cilindro.

Para a definição dos níveis de pressão, um novo algoritmo de otimização (Anexo C) desenvolvido pelo engenheiro Túlio de Abreu Burgos Gonçalves (GONÇALVES, 2019) foi utilizado. Neste algoritmo, foi dado como entrada as áreas do cilindro e os limites de pressão para cada linha. Com isso, o algoritmo busca a combinação de pressões que resultará na distribuição mais linear possível. Para este caso, os valores obtidos foram 5, 43 e 111 bar. Na Figura 30 é apresentada a curva de distribuição de forças obtida com as possíveis combinações e áreas de atuação e pressões.

Figura 30 – Gráfico das possíveis forças.



Fonte: Do autor (2024).

Considerando que a perda de carga nas válvulas direcionais *on/off* é pequena, especialmente no caso de válvulas totalmente abertas, a pressão em uma câmara  $i$  do cilindro será dada aproximadamente por:

$$p_i \approx \begin{cases} p_{s1} & \text{se } y(1VD_{1Px}) = 1 \text{ e } y(1VD_{2Px}) = 0 \text{ e } y(1VD_{3Px}) = 0; \\ p_{s2} & \text{se } y(1VD_{1Px}) = 0 \text{ e } y(1VD_{2Px}) = 1 \text{ e } y(1VD_{3Px}) = 0; \\ p_{s3} & \text{se } y(1VD_{1Px}) = 0 \text{ e } y(1VD_{2Px}) = 0 \text{ e } y(1VD_{3Px}) = 1; \end{cases} \quad (4)$$

sendo  $x$  igual a A, B, C ou D. A notação “ $y(1VD_{1Px}) = 1$ ” indica que o solenoide da válvula  $1VD_{1Px}$  está em nível lógico alto, o que neste caso faz com que a válvula permita a passagem de fluido entre a linha de pressão  $pS1$  e a câmara  $x$ .

Com relação às opções de chaveamento das válvulas, é permitido que a mesma linha de pressão de suprimento seja ligada a duas ou mais câmaras do atuador ao mesmo tempo, mas duas linhas de pressão não podem estar ligadas à mesma câmara. Sendo  $P = \{1, 2, 3\}$  e  $Ch = \{A, B, C, D\}$ ,

$$\text{Se } x \in Ch \text{ e } j, k \in P, \text{ então } y(1VD_{jPx}) \Rightarrow \neg y(1VD_{kPx}) \forall k \neq j. \quad (5)$$

As válvulas de retenção do bloco de controle digital desempenham funções de segurança. As válvulas próximas ao cilindro permitem que o fluido das câmaras do atuador seja direcionado para a linha de suprimento de maior pressão, absorvendo possíveis picos de pressão no atuador ( $0VC_iP1$ ). As outras válvulas de retenção evitam cavitação ( $0VC_3Pi$ ). Cavitação é um fenômeno que ocorre quando a pressão do fluido cai abaixo de sua pressão de vapor, fazendo com que o fluido vaporize e forme bolhas de vapor. Essas bolhas podem colapsar violentamente quando passam para regiões de maior pressão, causando danos ao sistema. A cavitação geralmente ocorre devido a uma queda rápida de pressão em pontos específicos do sistema, alta velocidade do fluido, obstruções e descontinuidades, ou altas temperaturas. As válvulas de retenção ajudam a evitar esse fenômeno ao manter a pressão do sistema acima da pressão de vapor do fluido, garantindo um fluxo contínuo e estável. Por questões de segurança, as válvulas *on/off* que conectam as câmaras do cilindro ao reservatório ( $1VD_3Pi$ ) são normalmente fechadas.

### Seleção das forças do guindaste

Para desenvolver a lógica de içamento do guindaste foi necessário, primeiramente, mapear quais das 81 possíveis combinações de forças acionam as válvulas corretas para obter a força desejada. Após a seleção das pressões e das forças disponíveis, conforme demonstrado na seção 5.7, as válvulas necessárias são acionadas para gerar a força requisitada. Para isso, o código de seleção de forças de Belan *et al.* (2015) foi adaptado, conforme mostrado no Apêndice C.

A lógica da função desenvolvida consiste em determinar a combinação de válvulas que gera a força mais próxima da força de referência  $F_{ref}$  solicitada pelo controlador.

A função utiliza uma tabela de forças predefinida, calculada a partir das diferentes combinações de válvulas que podem ser acionadas.

Primeiramente, são inicializadas as variáveis necessárias, incluindo as pressões e áreas das câmaras do atuador do guindaste. A força inicial é calculada assumindo uma pressão uniforme em todas as câmaras.

A função utiliza uma matriz para armazenar as diferentes combinações de forças possíveis. Cada linha da matriz representa uma combinação específica das pressões aplicadas nas câmaras. A função então calcula a força resultante para cada combinação e armazena essa informação na matriz. A seguir é apresentado o algoritmo em formato de pseudocódigo para melhor entendimento:

```
// Definição das áreas das câmaras
Aa = 0.00094562
Ab = 0.001348
Ac = 0.00064088
Ad = 0.00087650

// Inicializa a matriz de combinações de forças
matriz_combinacoes = []

// Lista de combinações de pressões (exemplo)
combinacoes_pressao = [
    [Pa1, Pb1, Pc1, Pd1],
    [Pa2, Pb2, Pc2, Pd2],
    // Adicione todas as combinações necessárias
]

// Função para calcular a força resultante
function calcular_forca(Pa, Pb, Pc, Pd):
    return (Pa * Aa) - (Pb * Ab) + (Pc * Ac) - (Pd * Ad)

// Popula a matriz com as forças resultantes
for cada combinacao in combinacoes_pressao:
    Pa, Pb, Pc, Pd = combinacao
    forca_resultante = calcular_forca(Pa, Pb, Pc, Pd)
    matriz_combinacoes.append([Pa, Pb, Pc, Pd, forca_resultante])

// Matriz final contém todas as combinações e suas forças resultantes
```

- **Definição das Áreas:** As áreas das câmaras (Aa, Ab, Ac, Ad) são definidas no

início do pseudocódigo.

- **Inicialização da Matriz:** A matriz `matriz_combinacoes` é inicializada como uma lista vazia para armazenar as combinações de pressões e suas forças resultantes.
- **Lista de Combinações de Pressões:** `combinacoes_pressao` contém todas as possíveis combinações de pressões aplicadas nas câmaras.
- **Função de Cálculo de Força:** A função `calcular_forca` recebe as pressões nas câmaras como parâmetros e calcula a força resultante utilizando a fórmula fornecida.
- **População da Matriz:** Um *loop* percorre cada combinação de pressões, calcula a força resultante e armazena a combinação e a força na matriz `matriz_combinacoes`.

A combinação de válvulas selecionadas é escolhida através de uma função custo. A função custo é calculada como a diferença entre a força de referência desejada e a força resultante das combinações de válvulas disponíveis. Matematicamente, a função custo pode ser expressa como

$$\text{Custo} = |F_{\text{referência}} - F_{\text{resultante}}|$$

onde  $F_{\text{referência}}$  é a força desejada e  $F_{\text{resultante}}$  é a força gerada pela combinação atual de válvulas. Esse processo é repetido a cada intervalo de tempo  $dT_{\text{min}}$ , garantindo que a força aplicada pelo guindaste esteja sempre o mais próximo possível da força de referência desejada. A função custo avalia quão próxima a força gerada pelo sistema está da força desejada. Quanto menor a diferença entre essas forças, menor será o valor da função custo. O objetivo é minimizar essa diferença, selecionando a combinação de válvulas que gera uma força resultante mais próxima da força de referência. O sistema ajusta continuamente as válvulas para manter a força aplicada dentro do intervalo desejado, assegurando precisão e eficiência na operação do guindaste.

Adicionalmente, a função considera o tempo necessário para o acionamento das válvulas, garantindo que a combinação selecionada seja viável dentro das restrições de tempo do sistema. Se a força de referência  $F_{\text{ref}}$  for inválida (por exemplo, NaN), a combinação de válvulas é redefinida para um estado seguro.

A principal alteração realizada em relação ao algoritmo desenvolvido por Belan *et al.* (2018) é a redução da matriz de armazenamento de forças. Originalmente, esta matriz possuía um tamanho de 81x19, incluindo informações da força hidráulica, estado lógico das válvulas digitais, pressões nas linhas de suprimento entre outras. Entretanto, esta matriz acarretava no consumo de mais de 50% da memória interna do Arduino, inviabilizando o seu uso para esta aplicação. Portanto, o código de seleção de forças

foi alterado e todas as componentes não essenciais da matriz de armazenamento de forças foram removidos. A principal alteração consiste em não armazenar os estados lógicos das válvulas digitais para as 81 combinações de forças e sim, determinar este estado lógico apenas para a força selecionada. Com isso, foi possível reduzir em cerca de 40% o uso de memória do Arduino, viabilizando a sua aplicação neste projeto.

### **Desenvolvimento do primeiro código de içamento**

Com a função de seleção concluída, ela foi integrada ao restante do código, que inclui as funções de giro e despressurização. A seleção da força é inicialmente feita com base na posição em que o operador posiciona o *joystick*. Embora existam 81 possíveis combinações de forças, dividir a área de operação do *joystick* em 81 partes para subida e descida tornaria o controle inviável para o operador, pois resultaria em um constante chaveamento das válvulas, prejudicando a operação do sistema.

Para simplificar a operação e manter a precisão, a faixa de forças foi dividida em 5 níveis para subida e 5 níveis para descida, dentro de uma zona de atuação de 12,5 kN positivos a 12,5 kN negativos. Dependendo da posição do *joystick*, uma força de referência é emitida e passada para a função de seleção de válvulas, que então determina quais válvulas devem ser acionadas para gerar a força desejada entre as 81 possibilidades existentes.

Este sistema de controle, ao simplificar a divisão de forças e integrar funções de mapeamento de válvulas, oferece vários benefícios:

- **Precisão e Segurança:** A lógica de controle garante que as válvulas corretas sejam acionadas, ajustando a velocidade e direção do içamento de forma precisa e segura.
- **Facilidade de Operação:** Com apenas 5 níveis de força para subida e 5 para descida, o operador pode controlar o guindaste de maneira intuitiva e eficiente, sem a necessidade de ajustes constantes.
- **Confiabilidade:** A integração das funções do sistema assegura que o mesmo opere de maneira coordenada, reduzindo o risco de erros operacionais.

Entretanto, alguns problemas foram observados ao implementar este controle no guindaste. Primeiramente, quando o guindaste estava com carga e o operador colocava o *joystick* na posição 0, o sistema enviava força zero para o atuador. Isso fazia com que o próprio peso da carga fizesse o guindaste abaixar, inviabilizando a operação. Uma solução alternativa foi implementada e será explicada na seção a seguir.

## Lógica de controle por sustentação de forças

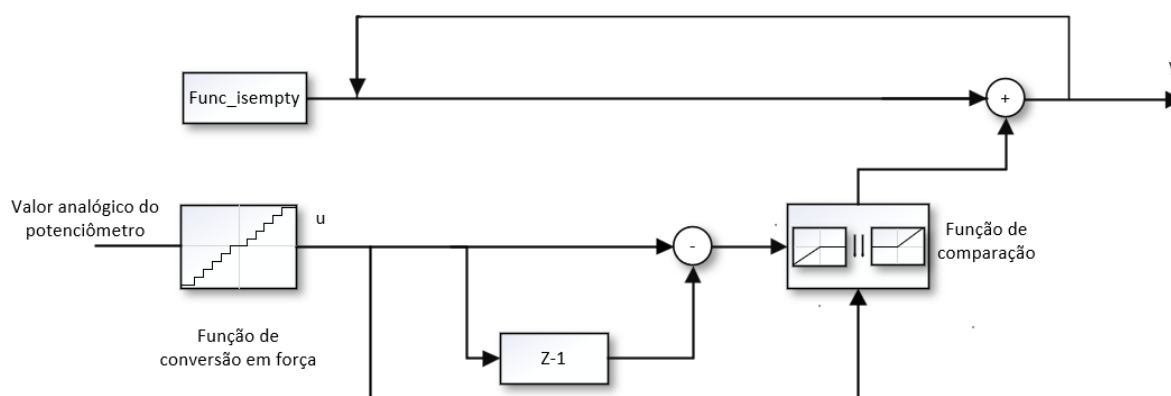
A implementação do controle do guindaste com base na posição do *joystick* foi aprimorada por meio de uma nova lógica de controle por içamento. Esta abordagem visa resolver os problemas observados na versão anterior do sistema, especialmente aqueles relacionados à manutenção da força com carga e ao controle contínuo da força.

A nova lógica de controle foi desenvolvida para garantir que a força aplicada ao guindaste seja ajustada de maneira contínua e suave, com incrementos e decrementos apropriados conforme a entrada do *joystick*. O código é projetado para acumular incrementos de força quando a força atual aumenta e decrementar quando a força diminui, mantendo um histórico das forças aplicadas.

Esta lógica se baseia em um controle PI de velocidade em malha fechada, onde a entrada do usuário é uma referência de velocidade e o controlador integrador faz o papel de sustentar as forças. Ressalta-se que esta técnica possui difícil implementação prática devido aos ruídos obtidos na leitura dos sinais do potenciômetro e, especialmente, aos ruídos obtidos pelo sensor de posição, o qual precisa ser derivado para a obtenção da velocidade. Esses ruídos ocorrem em função do inversor de frequência.

A lógica de controle pode ser melhor compreendida pelo diagrama de blocos da Figura 31.

Figura 31 – Diagrama de blocos da lógica de controle implementada.



Fonte: Do autor (2024).

Este diagrama representa um sistema de controle que recebe a entrada  $u$ , a qual é a saída de uma função que recebe a posição do *joystick* como entrada e a converte em uma força aplicada ao sistema. O código dessa função pode ser visto no Apêndice D.

Inicialmente, o bloco de função "Func\_isempty" tem seu valor atribuído a 0 caso não possua valor definido.

No bloco  $z-1$ , a força atual é comparada com a força anterior para determinar se a mesma está aumentando ou diminuindo. Esta força atual advém da função mencionada anteriormente que envia uma força para a entrada  $u$  através do sinal analógico do potenciômetro. No bloco de comparação, caso a força atual seja positiva e a diferença entre as forças seja negativa, a diferença é ajustada para zero, garantindo que incrementos negativos sejam ignorados nesse caso. Se a força atual é zero, a diferença também é ajustada para zero. Da mesma forma, se a força atual é negativa e a diferença é positiva, a diferença é ajustada para zero.

Após o ajuste da diferença, ela é adicionada ao sinal de saída  $y$ , o qual representa a integração cumulativa das diferenças de forças ao longo do tempo. Em seguida, a força anterior é atualizada para a força atual e salva no bloco "Func\_isempty", preparando o sistema para a próxima iteração.

Por fim, o valor de saída  $y$  é a soma acumulada das diferenças de forças ao longo do tempo e representa a resposta do sistema às forças aplicadas pelo *joystick* ao longo do tempo.

O código implementado para a função de içamento de forças desta nova lógica, bem como o diagrama final do projeto no Simulink, podem ser vistos no Apêndice E.

### Benefícios da Nova Lógica

- **Controle de Sustentação de Forças:** O uso de variáveis que guardam os valores anteriores permite que o sistema mantenha um histórico das forças aplicadas. Isso facilita a implementação de uma lógica de controle que ajusta as forças de maneira incremental, evitando saltos abruptos entre os valores e garantindo um controle suave e contínuo.
- **Incrementação e Decrementação de Forças:** O cálculo da diferença de força e seu ajuste garantem que a força aplicada só seja incrementada ou decrementada conforme apropriado. Por exemplo, a força só aumenta se a diferença for positiva e diminui se a diferença for negativa. Isso previne mudanças bruscas na força aplicada, que poderiam resultar em movimentos instáveis ou inseguros do guindaste. Esse método pode ser comparado a um controle integrativo, ainda que empírico, pois ajusta a força com base na soma acumulada das diferenças de força ao longo do tempo.
- **Robustez contra Erros:** A lógica que define a diferença como zero quando a força atual é zero, ou quando a diferença de força é contrária ao sinal esperado, adiciona uma camada de segurança. Isso assegura que a força aplicada seja mantida estável e controlada, mesmo se houver pequenas flutuações na entrada do *joystick*.



- **Estabilidade e Precisão:** A nova lógica oferece um controle mais estável e preciso do guindaste, evitando movimentos indesejados causados pela força da carga quando o *joystick* está na posição neutra.
- **Facilidade de Operação:** O operador não precisa manter o *joystick* na posição exata para aplicar a força desejada, reduzindo a probabilidade de erros humanos e fadiga.
- **Segurança:** A acumulação do sinal de controle garante que a força aplicada seja ajustada suavemente, proporcionando uma operação segura e eficiente.

Em resumo, esta nova lógica de controle do içamento do guindaste, com incremento e decrementação de forças, aprimora significativamente o desempenho e a segurança do sistema de içamento do guindaste, atendendo melhor às necessidades operacionais e reduzindo os problemas anteriormente observados.

No Apêndice E está o diagrama final do projeto em Simulink, junto com o código utilizado para realizar a nova lógica por sustentação de forças.

## 6 RESULTADOS E AVALIAÇÃO

Após a conclusão das etapas de modificação e implementação, foram iniciados os primeiros testes da solução adotada neste PFC.

### 6.1 CENÁRIO DE TESTE

Para a realização dos testes, um cenário foi configurado no qual uma carga de 55,5 kg foi presa ao final da lança do guindaste. Utilizou-se a primeira configuração da lança devido ao espaço limitado no local onde o guindaste está instalado. A medição da posição do cilindro responsável pelo içamento foi feita com uma régua potenciométrica RTC 500 (Anexo D). Os dados fornecidos pela régua foram extraídos em tempo real utilizando a função do pacote Arduino para Simulink, juntamente com a força selecionada pelo sistema e a posição do *joystick* de içamento enviada pelo operador. Na Figura 32, é mostrada a régua potenciométrica, acoplada ao cilindro responsável por fornecer os dados de posição do cilindro. A Figura 33 apresenta a caixa de comando manual, onde o operador utiliza um potenciômetro, funcionando como um *joystick*, para realizar os movimentos do guindaste. Na Figura 34 é exibida a carga utilizada para a realização dos testes de içamento.

Figura 32 – Régua potenciométrica acoplada ao atuador tandem .



Fonte: Do autor (2024).

Figura 33 – Caixa de comando manual utilizada pelo operador.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 34 – Carga utilizada para testes.

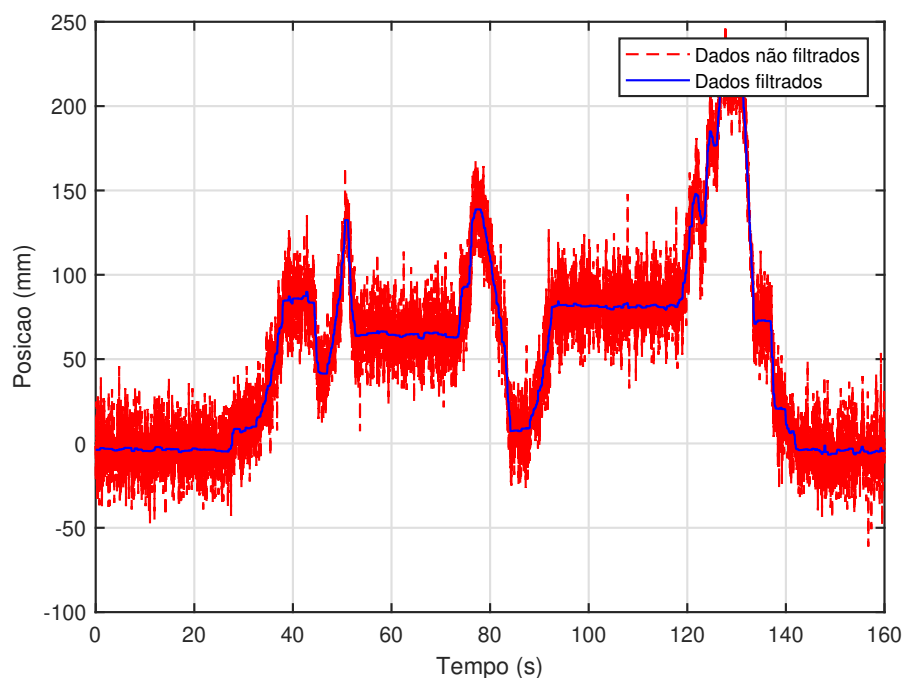


Fonte: Do autor (2024).

## Resultados dos testes

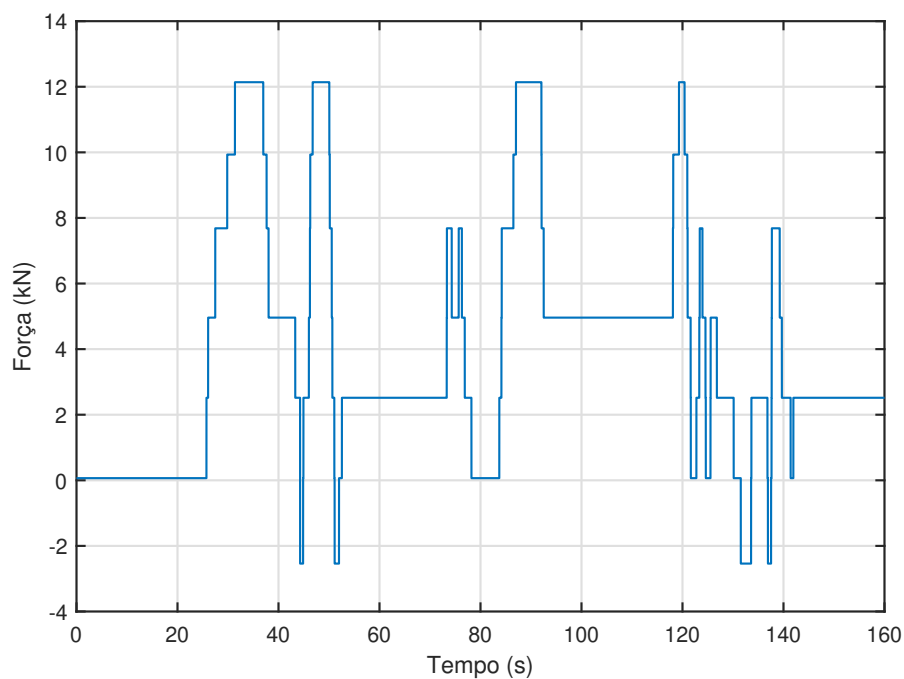
Durante os testes, observou-se que os dados lidos pelo sensor de içamento e pelo potenciômetro do *joystick* estavam bastante ruidosos. Esse ruído foi causado pelo uso do inversor de frequência em conjunto com o Arduino Mega 2560. Mesmo com o inversor estando relativamente afastado do Arduino e este último isolado em uma gaiola de Faraday, foi necessário filtrar os dados de posição utilizando um filtro TVD (Seção 3.3). Os códigos implementados para este filtro podem ser encontrados no Apêndice F. Os gráficos dos resultados estão apresentados nas Figuras 35, 36 e 37.

Figura 35 – Gráfico da posição do atuador filtrado.



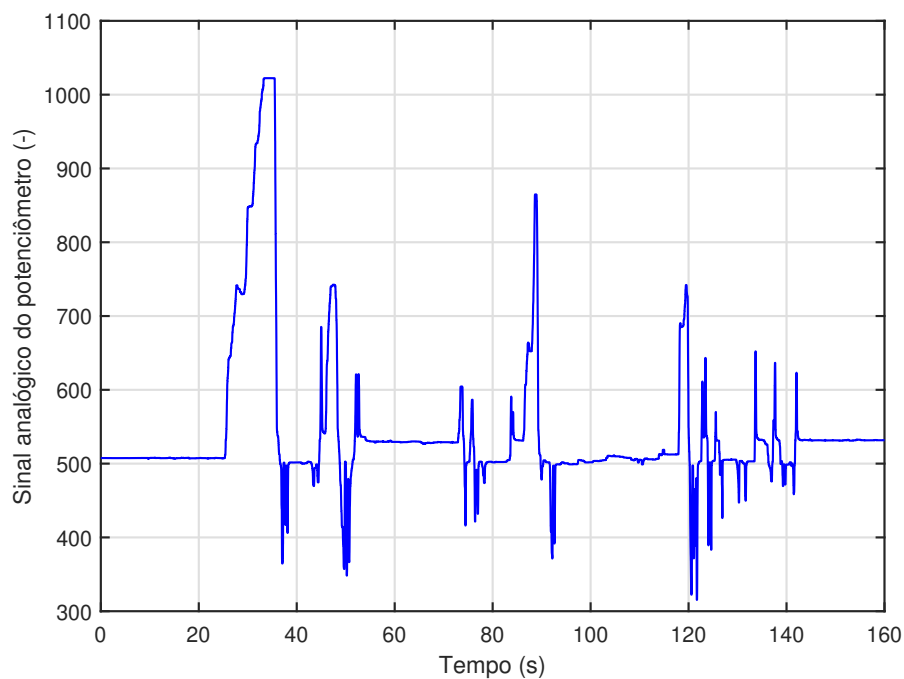
Fonte: Do autor (2024).

Figura 36 – Gráfico da força enviada pelo sistema.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 37 – Gráfico do sinal analógico do joystick filtrado.

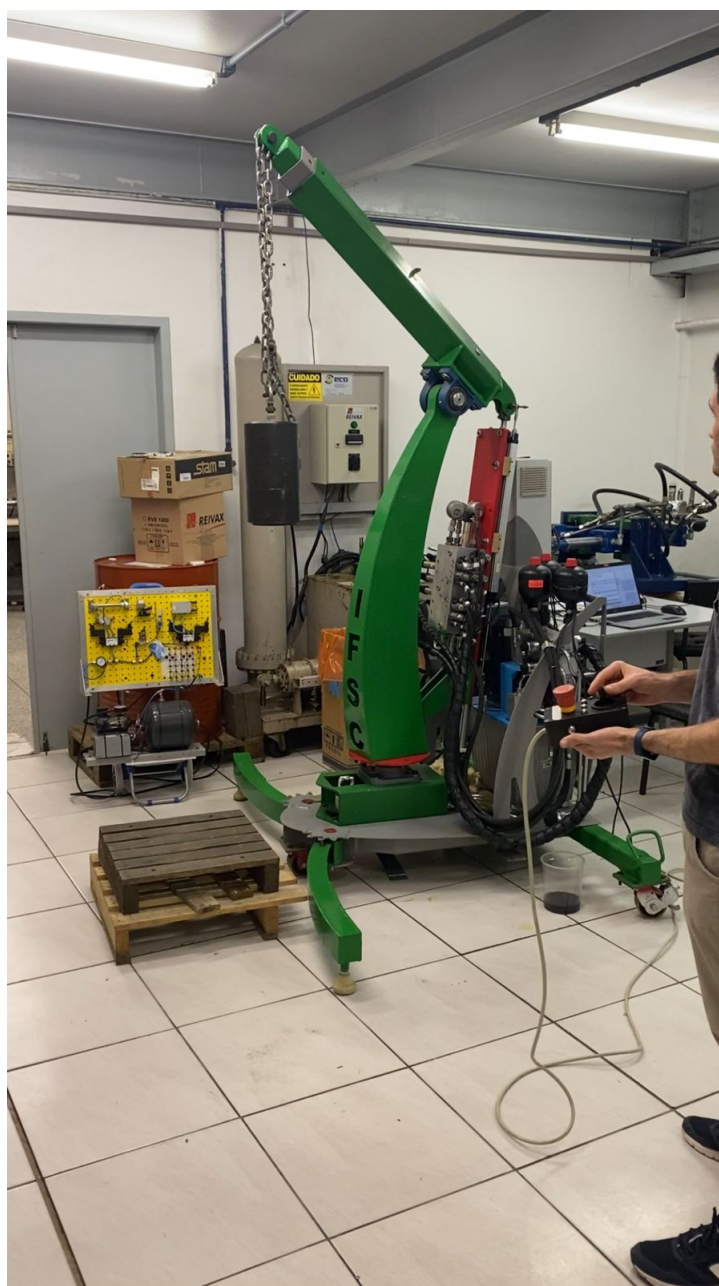


Fonte: Do autor (2024).

Durante o teste, o guindaste começou na posição inicial com a carga no solo,

com o atuador no fim do curso e a lança abaixada. A carga foi içada com a força máxima do guindaste, 12,5 kN, até metade do curso, onde verificou-se se o sistema mantinha a carga estável na posição mesmo com o operador deixando o *joystick* em posição neutra (sinal analógico próximo a 500). Aos 120 segundos, iniciou-se o deslocamento do guindaste para a posição mais alta (início do curso do atuador), e, finalmente, retornou-se à posição inicial, deixando a carga no solo. Na Figura 38 é apresentado o guindaste realizando o içamento da carga.

Figura 38 – Guindaste realizando o içamento da carga.



Fonte: Do autor (2024).

### **Avaliação dos resultados**

Os resultados gráficos mostram que o teste funcionou conforme o esperado. O guindaste conseguiu içar cargas significativas, que não seriam facilmente manipuláveis manualmente, e mantê-las na posição desejada mesmo com o *joystick* na posição de repouso. Esse desempenho confirma a eficácia da nova lógica descrita na Seção 5.7.

## 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este PFC apresentou a modernização do sistema de controle de um guindaste hidráulico através da implementação de técnicas de hidráulica digital. Inicialmente, foi destacada a importância do problema e a necessidade de uma solução inovadora para o laboratório. A solução proposta e implementada envolveu o desenvolvimento de um sistema de controle, que resultou em melhorias substanciais na precisão e eficiência operacionais. As etapas de modificação e implementação foram concluídas com sucesso, e os testes realizados mostraram que o sistema pode içar e manter cargas de forma eficaz

A lógica de controle desenvolvida se mostrou satisfatória dentro do cenário proposto, garantindo que o guindaste consiga realizar o içamento e a manutenção da posição das cargas de maneira estável, mesmo quando o *joystick* é deixado em posição de repouso. Os dados dos testes indicam que o sistema responde adequadamente às variações de força e posição, confirmando a eficácia das estratégias de controle implementadas.

Além disso, a utilização de uma régua potenciométrica para a medição da posição do cilindro de içamento permitiu a obtenção de dados precisos, embora com a necessidade de filtragem devido ao ruído introduzido pelo inversor de frequência.

O projeto também destacou a importância de uma integração cuidadosa dos componentes eletrônicos e mecânicos, mostrando que mesmo detalhes como o posicionamento e o isolamento dos equipamentos podem impactar significativamente a performance do sistema.

### Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados positivos, alguns aspectos podem ser aprimorados em trabalhos futuros:

- **Isolamento Eletromagnético:** O ruído nos dados dos sensores devido ao uso do inversor de frequência em conjunto com o Arduino Mega 2560 indica a necessidade de um melhor isolamento eletromagnético. Investigar materiais e técnicas avançadas para melhorar a blindagem pode reduzir significativamente o ruído.
- **Interface de Usuário:** Desenvolver uma interface de usuário mais intuitiva e informativa pode ajudar os operadores a interagir com o sistema de forma mais eficiente. Isso pode incluir painéis de controle com *feedback* em tempo real sobre a posição e a força aplicadas pelo guindaste.
- **Automatização:** Explorar a possibilidade de automatizar certas operações do guindaste pode aumentar a segurança e a eficiência. Algoritmos de controle



automático podem ser implementados para realizar movimentos complexos de içamento sem a necessidade de intervenção constante do operador.

- **Teste em Diferentes Condições:** Realizar testes adicionais em diferentes condições de espaço e de carga pode fornecer uma compreensão mais abrangente do desempenho do sistema.
- **Substituição do Arduino por CLP:** A substituição do Arduino Mega 2560 por um Controlador Lógico Programável (CLP) deve ser considerada. Durante o desenvolvimento, a falta de memória do Arduino foi um problema significativo. Um CLP oferece mais espaço de memória, maior capacidade de processamento e é mais adequado para aplicações industriais, garantindo maior confiabilidade e desempenho do sistema.
- **Remoção de forças regenerativas:** Algumas combinações de forças resultam em uma configuração hidráulica regenerativa, onde o fluido que sai de uma câmara que esta retraindo e entra diretamente em uma câmara que está expandindo. Durante os testes, observou-se que este cenário causa um aumento de velocidade de deslocamento em situações onde esperava-se uma redução de velocidade, prejudicando a operação do equipamento. Desta forma, em trabalhos futuros, sugere-se o mapeamento das forças que resultam em operação regenerativa e remoção destas condições na matriz de seleção de forças.
- **Implementação de controlador PI:** A implementação de um controlador PI (Proporcional-Integral) para o controle da velocidade do cilindro. Atualmente, o sistema utiliza uma abordagem empírica para o ajuste da força, que poderia ser aprimorada com a medição da variável de processo (saída) e o fechamento da malha de controle. A implementação de um controlador PI adequadamente ajustado pode melhorar significativamente o desempenho do sistema, proporcionando um controle mais preciso e robusto da velocidade do cilindro. A perturbação a ser rejeitada é o peso da carga projetado sobre a haste do cilindro, que provavelmente varia no tempo com o deslocamento do cilindro. Implementar um controlador PI poderia ajudar a mitigar os efeitos dessas perturbações, garantindo um controle mais estável e eficiente. Essa abordagem permitiria um melhor desempenho do sistema em situações onde a carga é variável, aumentando a segurança e a precisão do movimento do guindaste. Ressalta-se que a implementação deste controlador depende de uma atenuação dos ruídos e oscilações do potenciômetro do joystick e do sensor de posição.

## **Considerações Finais**

O desenvolvimento e os testes deste sistema de controle para guindaste foram avaliados como promissores, demonstrando a viabilidade e eficácia da solução proposta. O sistema não só atende às necessidades de içamento de cargas significativas, mas também garante estabilidade e precisão durante a operação. A adaptação do guindaste a condições de carga variáveis e a capacidade de manter a posição das cargas destacam a robustez do projeto.

Com as melhorias sugeridas, espera-se que futuros desenvolvimentos possam levar a um sistema ainda mais robusto, eficiente e seguro para aplicações industriais e de construção. A implementação dessas melhorias pode resultar em um aumento significativo da confiabilidade e da versatilidade do guindaste, expandindo seu uso para uma maior variedade de situações e ambientes operacionais.

Em suma, este projeto não apenas alcançou seus objetivos iniciais, mas também estabeleceu uma base sólida para futuros avanços tecnológicos no campo dos sistemas de controle para guindastes. As recomendações fornecidas oferecem um caminho claro para melhorias contínuas, garantindo que o sistema permaneça à frente das necessidades e desafios da indústria.

## REFERÊNCIAS

ARGO-HYTOS. **ARGO HYTOS - A Voith Company**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.argo-hytos.com/>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14768**: Guindastes — Guindaste articulado hidráulico — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

BEAVERS, James E; MOORE, JR; RINEHART, Richard; SCHRIVER, WR. Crane-related fatalities in the construction industry. **Journal of construction engineering and management**, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 9, p. 901–910, 2006.

BELAN, Henri Carlo *et al.* **Sistemas de atuação hidráulicos digitais para aviões com foco em eficiência energética**. 2018. Tese (Doutorado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BELAN, Henri Carlo; LOCATELI, Cristiano C; LANTTO, Birgitta; KRUS, Petter; DE NEGRI, Victor J. Digital secondary control architecture for aircraft application. *In*: THE seventh workshop on digital fluid power. [S.l.: s.n.], 2015. P. 26–27.

BHOYAR, Ajit; SONULE, Akshay; NAIK, Abhishek; SHANKAR, Jai; WANKHEDE, Suhas; SAWARKAR, Nitin. Assessment of Hydraulic Floor Crane. **International Journal of Innovations in Engineering and Science**, v. 6, n. 7, p. 33–37, jun. 2021.

BRAVO, Rafael Rivelino da Silva. Sistemas Hidráulicos Proporcionais para Automação e Controle. Parte I – Sistemas Hidráulicos para Controle. *In*: IFF - CAMPOS DOS GOYTACAZES. CAMPOS dos Goytacazes: Apostila do curso de graduação da IFF-Campos, 2010. [S.l.: s.n.], 2010.

CATHAY. [S.l.: s.n.], 2023.  
<https://pt.cathaylift.com/floor-crane/hydraulic-floor-crane.html>.

CHUKWULOZIE, Okolie Paul. Steel Work Design and Analysis of a Mobile Floor Crane. **British Journal of Applied Science & Technology**, v. 13, n. 5, p. 1–9, dez. 2015.

DURAGKAR, Abhinav R; SAKHALE, SN; LANDE, MS. A REVIEW: FLOOR CRANES FOR INDUSTRIAL USE, 2016.

ELETROLÂNDIA. **Eletrolândia Produtos Eletrônicos**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.eletrolandiaes.com.br/arduino-modulo-rele-4-canaais-5v>.

FIGUEIREDO, Mario AT; DIAS, J Bioucas; OLIVEIRA, João Pedro; NOWAK, Robert D. On total variation denoising: A new majorization-minimization algorithm and an experimental comparison with wavelet denoising. *In*: IEEE. 2006 International Conference on Image Processing. [S.l.: s.n.], 2006. P. 2633–2636.

FUJIOKA, Daichi. **Tip-over stability analysis for mobile boom cranes with single-and double-pendulum payloads**. 2010. Tese (Doutorado) – CiteSeer.

GONÇALVES, Túlio de Abreu Burgos. **Análise Estrutural e da Capacidade de Carga de um Guindaste Hidráulico**. 2019. TCC. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica. – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GROUP, GGR. **Glassboy Floor Crane**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.ggrgroup.com/products/lifting-solutions/glassboy-floor-crane/>.

GUE, Kevin; AKCALI, Elif; ERERA, Alan; FERRELL, Bill; FORGER, Gary. **Material Handling & Logistics U.S. Roadmap**. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.mheda.org/files/public/mhlroadmapfinal.pdf>.

HASSAN, Mohsen M. D. A framework for selection of material handling equipment in manufacturing and logistics facilities. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2010. DOI: 10.1108/17410381011014396.

HELERBROCK, Rafael. **Princípio de Pascal**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/principio-de-pascal.htm>.

HYSIK. **Hysik Quality Connectivity**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.hysik.com/SolenoidValve/FormB/254.html>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4305: Mobile cranes – Determination of stability**. Switzerland, 2014.

LINJAMA, Matti *et al.* Digital fluid power: State of the art. *In:* 4. THE Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power. [S.l.: s.n.], 2011. P. 18–20.

MAKERHERO. **Makerhero**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/placa-mega-2560-r3-cabo-usb-para-arduino/>.

MATHWORKS. **Simulink Support Package for Arduino Hardware**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40312-simulink-support-package-for-arduino-hardware>.

METALTEX. **SENSORES DE POSIÇÃO LINEAR**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.metaltex.com.br/produtos/automacao/sensores-de-posicao-linear/rtc-sensor-de-posicao-linear-potenciometrico>.

NOSTRANI, MP. Development of a digital electro hydrostatic actuator for application in aircraft flight control surfaces. **Federal University of Santa Catarina**, 2021.

OLIVEIRA, Euler. **Master Walker Eletronic Shop**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-chave-fim-de-curso-micro-switch>.

RAY, SIDDHARTHA. **Introduction to Materials Handling**. 13th. New Delhi, India.: [s.n.], 2008. Disponível em: <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/137-Introduction-to-Materials-Handling-Sidphartha-Ray-Edisi-1-2008.pdf>.

SCHEPERS, Ingo; WEILER, Daniel; WEBER, Jürgen. Comparison and evaluation of digital control methods for on/off valves. *In:* PROCEEDINGS of the Fifth Workshop on Digital Fluid Power. [S.l.: s.n.], 2012. P. 103–122.

TAKEMOTO, Atsushi; MIYOSHI, T; TERASHIMA, K *et al.* Operation assist control system of rotary crane using proposed haptic joystick as man-machine interface. *In:* IEEE. RO-MAN 2004. 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (IEEE Catalog No. 04TH8759). [S.l.: s.n.], 2004. P. 533–538.

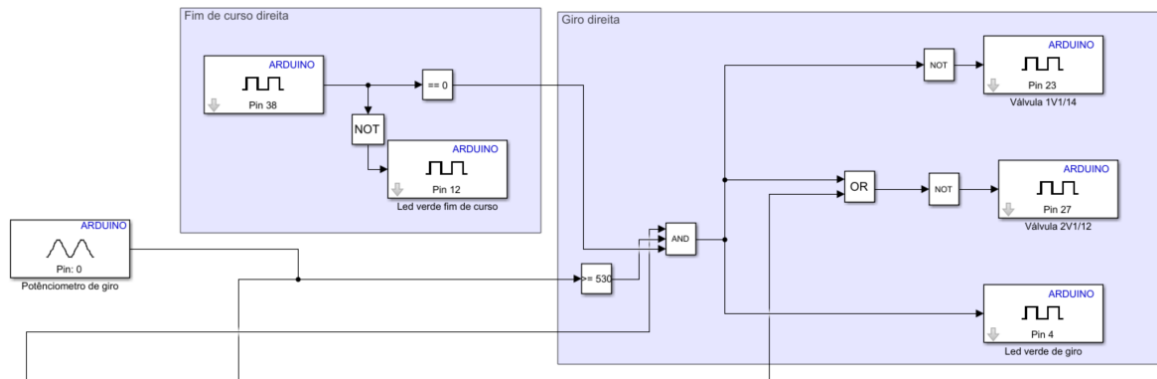
ULINE. **HYDRAULIC FLOOR CRANE**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: [https://www.uline.com/BL\\_2853/Hydraulic-Floor-Crane](https://www.uline.com/BL_2853/Hydraulic-Floor-Crane).

---

VOSS, André Leonardo. **Sistema de Controle Visando o Suporte à Implementação Hidráulica Digital em um Guindaste**. 2019. TCC. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica. – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

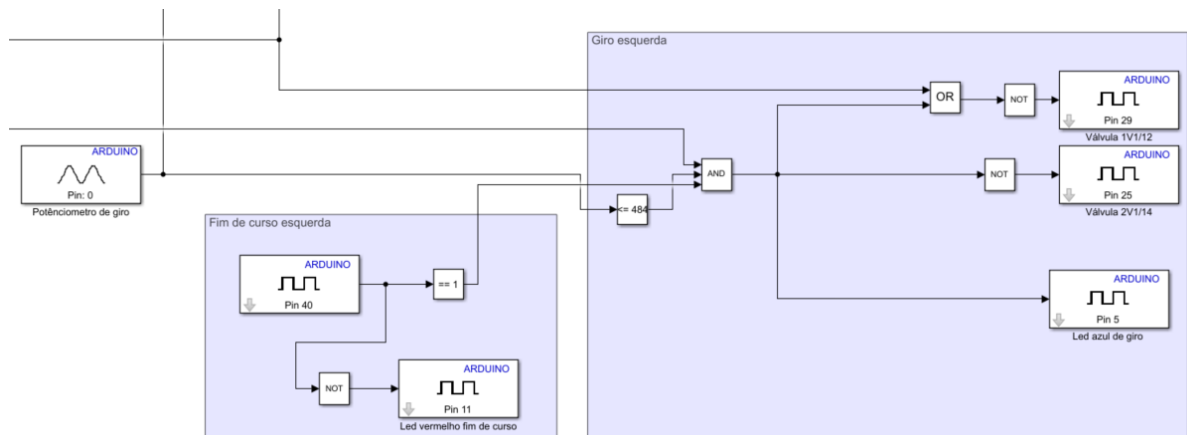
## APÊNDICE A – LÓGICAS DETALHADAS DO CONTROLE DE GIRO E DESPRESSURIZAÇÃO DO SISTEMA

Figura 39 – Lógica de giro para a direita.



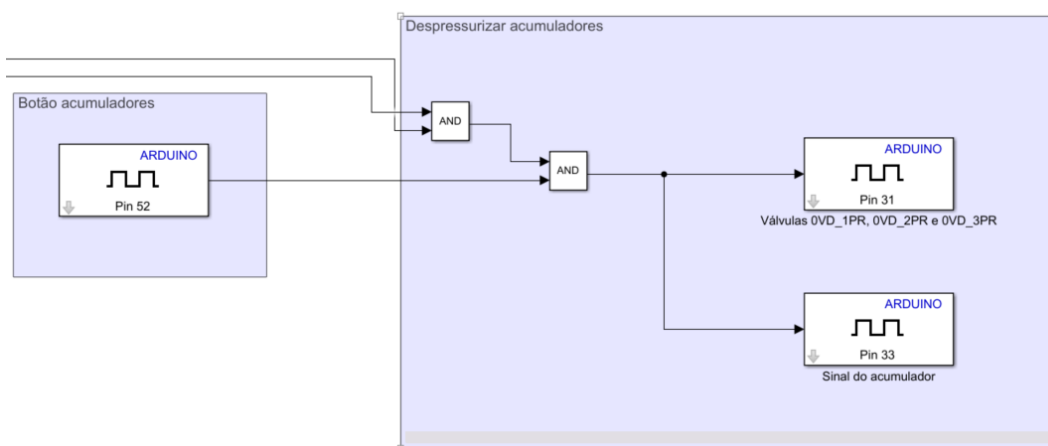
Fonte: Do autor (2024).

Figura 40 – Lógica de giro para a esquerda.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 41 – Lógica de depressurização.

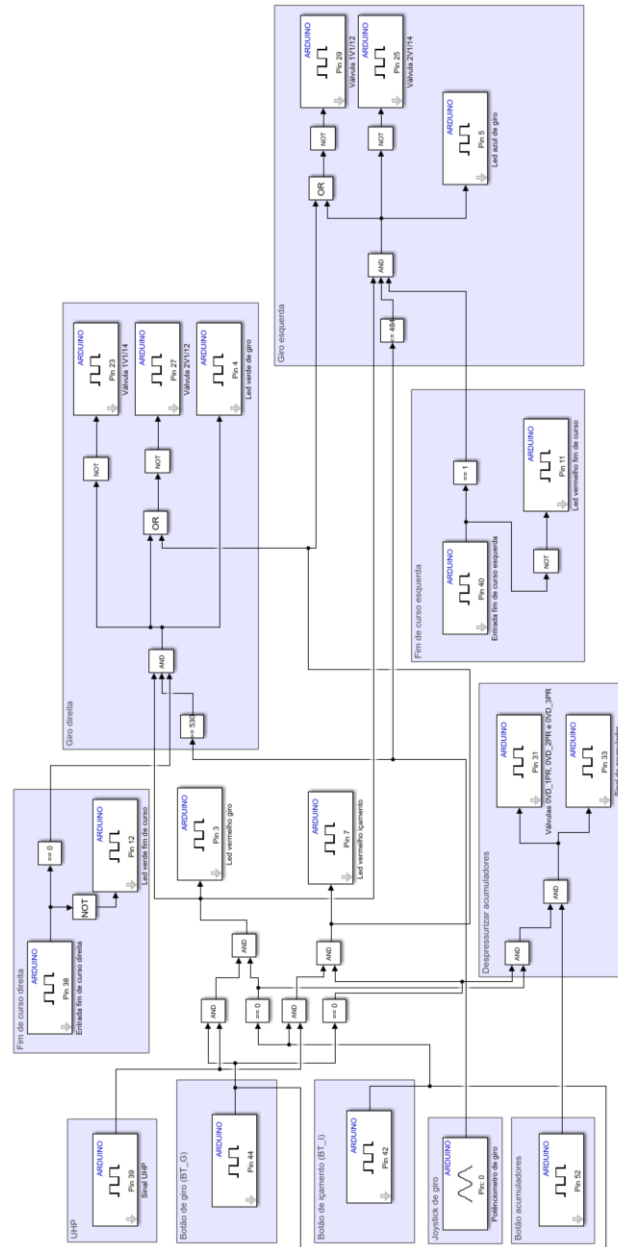


Fonte: Do autor (2024).



## APÊNDICE B – VISÃO COMPLETA DAS LÓGICAS DO CONTROLE DE GIRO E DESPRESSURIZAÇÃO DO SISTEMA

Figura 42 – Diagrama das lógicas de giro e despressurização em Simulink.



Fonte: Do autor (2024).

## APÊNDICE C – CÓDIGO DO ACIONAMENTO DAS VÁLVULAS DE IÇAMENTO.

```

1 % Funcao para determinacao da combinacao de valvulas
2
3 % Entradas
4 % Fref = Forca de referencia solicitada pelo controlador [kN]
5 % dT_min = numero de amostras correspondente ao delay das valvulas
6 % dT_p = numero de amostras para atualizacao da tabela
7
8 function CombSelecionada = matrizDeForcas(Fref, dT_min, dT_p, Clock)
9
10 %coder.extrinsic('roundn') ; % incluir funcoes
11 persistent Fprev ;           % Forca previa (atual)
12 persistent Nprev ;         % Indice da forca previa (atual)
13 persistent combPrev ;      % Vetor de combinacoes da forca previa (
    atual)
14 persistent tabForcas ;     % contador interno para dT_p;
15 persistent icdT_min ;      % Intervalo de tempo para executar laco
    envia vetor combinacao
16 persistent icdT_p ;        % Intervalo de tempo para executar laco de
    construcao da matriz
17 persistent icClockdT_min ; % Variavel para guardar o tempo de execucao
    do laco que envia vetor combinacao
18 persistent icClockdT_p ;   % Variavel para guardar o tempo de execucao
    do laco de construcao da matriz
19
20
21 % inicia contadores
22 if isempty(icClockdT_min)
23     icClockdT_min = single(Clock); % Contador de tempo inteiro
24 end
25 if isempty(icClockdT_p)
26     icClockdT_p = single(Clock); % Contador de tempo inteiro
27 end
28 if isempty(icdT_min)
29     icdT_min = single(dT_min); % Contador de tempo inteiro
30 end
31 if isempty(icdT_p)
32     icdT_p = single(dT_p); % Contador de tempo inteiro
33 end
34
35
36 % Ajuste de variavel para obter resultado em [kN]
37 A = single([9.4562e-04 0.001348 6.4088e-04 8.7650e-04]*(1e-4)*1e6);
38
39 p = single([5 43 111]);
40 % inicia valores vetor de forcas

```

```

41 if isempty(Fprev)
42     % Valor inicial para Fref = ps3 em todas as camaras
43     Fprev = single(-(p(3)*A(1)- p(3)*A(2)+ p(3)*A(3)- p(3)*A(4)));
44     %Fprev = roundn(Fprev,-3);
45 end
46 if isempty(Nprev)
47     Nprev = single(81); % corresponde a ordem de calculo da condicao
48     Fprev
49 end
49 if isempty(combPrev)
50     % cada linha da matriz refere-se a uma combinacao.
51     % [Forca, Fcusto, Ps1/2/3-PA, ...PB, ...PC,...PD, PA, PB, PC, PD].
52     combPrev = single([Fprev 0.001 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1]);
53 end
54
55 if isempty (tabForcas)
56     tabForcas=single(zeros(81,2));
57 end
58
59 if icdT_p >= dT_p % Recalcula matriz de combinacoes
60     icClockdT_p = single(Clock);
61     icdT_p = single(0);
62     n=single(0);
63     for i = 1:3
64         if i == 1, vi = [1, 0, 0];
65         elseif i == 2, vi = [0, 1, 0];
66         else vi = [0, 0, 1];
67         end
68         for j = 1:3
69             if j == 1, vj = [1, 0, 0];
70             elseif j == 2, vj = [0, 1, 0];
71             else vj = [0, 0, 1];
72             end
73             for l = 1:3
74                 if l == 1, vl = [1, 0, 0];
75                 elseif l == 2, vl = [0, 1, 0];
76                 else vl = [0, 0, 1];
77                 end
78                 for k = 1:3
79                     if k == 1, vk = [1, 0, 0];
80                     elseif k == 2, vk = [0, 1, 0];
81                     else vk = [0, 0, 1];
82                     end
83                 n=n+1;
84                 %tabForcas(n,1)= single(n);
85                 % -AA*pA +AB*pB - AC*pC + AD*pD
86                 Faux = single(-(p(i)*A(1) - p(j)*A(2)+ p(l)*A(3)- p(

```

```

k)*A(4));
87         tabForcas(n,1) = single(Faux);
88         tabForcas(n,2) = single(abs(Faux - Fref)); %primeira
           parte da funcao custo
89             end
90         end
91     end
92 end
93 else
94     for i=1:81
95         tabForcas(i,2) = single(abs(tabForcas(i,1) - Fref)); % Primeira
           parte da funcao custo
96     end
97 end
98 icdT_p = single(Clock - icClockdT_p); % Controle de execucao do laco
           abaixo
99
100 if icdT_min >= dT_min % Envia vetor combinacao
101     icClockdT_min = single(Clock);
102     icdT_min = single(0);
103
104     %Busca possivel Forca a ser aplicada (Funcao custo ainda sem peso e
           forca relativa)
105     %obs: O primeiro retorno da funcao "min" seria o valor do campo;
106     [~, minidx] = min(tabForcas(:,2));
107
108     n=single(0);
109     for i = 1:3
110         if i == 1, vi = [1, 0, 0];
111         elseif i == 2, vi = [0, 1, 0];
112         else vi = [0, 0, 1];
113         end
114     for j = 1:3
115         if j == 1, vj = [1, 0, 0];
116         elseif j == 2, vj = [0, 1, 0];
117         else vj = [0, 0, 1];
118         end
119     for l = 1:3
120         if l == 1, vl = [1, 0, 0];
121         elseif l == 2, vl = [0, 1, 0];
122         else vl = [0, 0, 1];
123         end
124     for k = 1:3
125         if k == 1, vk = [1, 0, 0];
126         elseif k == 2, vk = [0, 1, 0];
127         else vk = [0, 0, 1];
128         end

```

```
129         n=n+1;
130
131         if n == minidx
132             Faux = single(-(p(i)*A(1) - p(j)*A(2)+ p(1)*A(3)
- p(k)*A(4)));
133             combPrev = [Faux n vi vj vl vk];
134         end
135     end
136 end
137 end
138 end
139
140 end
141
142 if isnan(Fref)
143     combPrev(:) = 0;
144 end
145
146
147
148 icdT_min = Clock - icClockdT_min;    % Controle de execucao do laco
    abaixo
149 CombSelecionada = combPrev';
```

Listing C.1 – Código do acionamento das válvulas de içamento.

## APÊNDICE D – CÓDIGO DA FUNÇÃO DE SELEÇÃO DE FORÇAS ATRAVÉS DO JOYSTICK.

```
1 function [y, pin8, pin9] = fcn(u, pin42, pin44)
2
3 y = NaN;
4 pin8 = false;
5 pin9 = false;
6
7 if pin42 == 1 && pin44 == 0
8     if u > 900
9         y = 12.5;
10        pin8 = true;
11        pin9 = false;
12    elseif u <= 900 && u >= 800
13        y = 10;
14        pin8 = true;
15        pin9 = false;
16    elseif u < 800 && u >= 720
17        y = 7.5;
18        pin8 = true;
19        pin9 = false;
20    elseif u < 720 && u >= 640
21        y = 5;
22        pin8 = true;
23        pin9 = false;
24    elseif u < 640 && u >= 570
25        y = 2.5;
26        pin8 = true;
27        pin9 = false;
28    elseif u < 570 && u >= 480
29        y = 0;
30        pin8 = false;
31        pin9 = false;
32    elseif u < 480 && u >= 380
33        y = -2.5;
34        pin8 = false;
35        pin9 = true;
36    elseif u < 380 && u >= 280
37        y = -5;
38        pin8 = false;
39        pin9 = true;
40    elseif u < 280 && u >= 200
41        y = -7.5;
42        pin8 = false;
43        pin9 = true;
44    elseif u < 200 && u >= 100
```

```
45     y = -10;
46     pin8 = false;
47     pin9 = true;
48     elseif u < 100
49         y = -12.5;
50         pin8 = false;
51         pin9 = true;
52     end
53 end
54
55 end
```

Listing D.1 – Código da função de seleção de forças através do *joystick*

## APÊNDICE E – NOVA LÓGICA DE SUSTENTAÇÃO DE FORÇAS DO SISTEMA.

```

1 function y = control_system(u)
2     persistent forca_anterior; %Armazena o valor da forca aplicada na
   iteracao anterior.
3     persistent sinal_acumulado;%Mantem um acumulado do sinal de controle
   , que e usado para ajustar a forca aplicada.
4
5     if isempty(forca_anterior)%Substitui valores NaN por zero para
   evitar erros nos calculos subsequentes.
6         forca_anterior = 0;%Substitui valores NaN por zero para evitar
   erros nos calculos subsequentes.
7     end
8
9     if isempty(sinal_acumulado)
10        sinal_acumulado = 0;
11    end
12
13    forca_atual = u; %Recebe a forca selecionada de acordo com a posicao
   do joystick.
14    forca_atual(isnan(forca_atual))=0;
15
16    diff = forca_atual - forca_anterior; %Calcula a diferenca entre a
   forca atual e a forca anterior. Isso ajuda a determinar se a forca
   esta aumentando ou diminuindo.
17
18    if forca_atual > 0 %Se a forca atual e positiva e a diferenca e
   negativa, a diferenca e ajustada para zero.
19        if diff <0
20            diff = 0;
21        end
22    end
23
24    if forca_atual == 0 %Se a forca atual e zero, a diferenca e ajustada
   para zero.
25        diff = 0;
26    end
27
28    if forca_atual < 0 %Se a forca atual e negativa e a diferenca e
   positiva, a diferenca e ajustada para zero.
29        if diff >0
30            diff = 0;
31        end
32    end
33
34    sinal_acumulado = sinal_acumulado + diff; %E atualizado pela adicao
   da diferenca de forca ajustada, mantendo um historico do sinal de

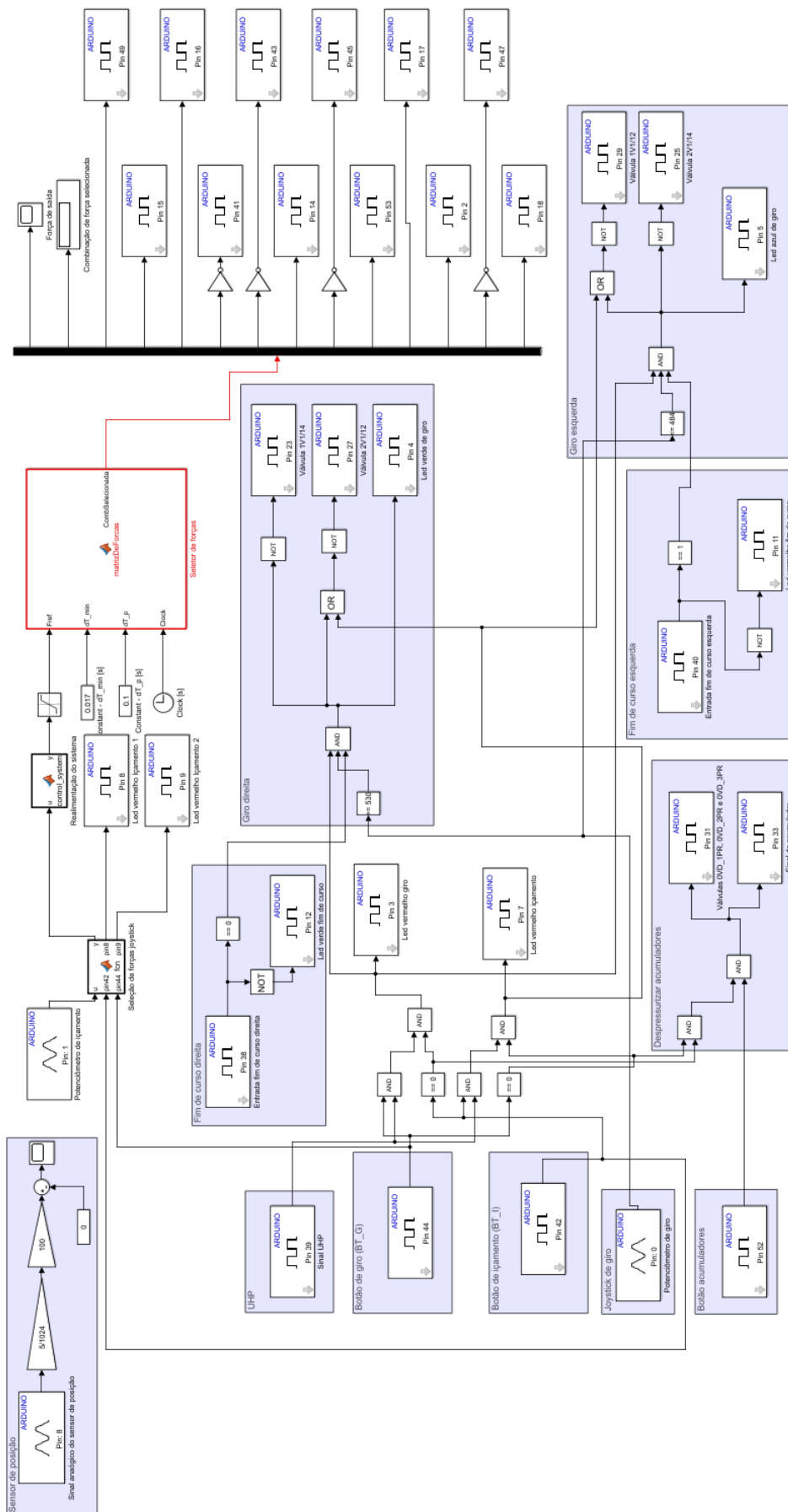
```



```
35     controle_necessario para aplicar a força desejada.  
36     forca_anterior = forca_atual; %A forca anterior e atualizada para a  
37     forca_atual.  
38     y = sinal_acumulado;  
39 end
```

Listing E.1 – Código da função de sustentação de forças do sistema

Figura 43 – Diagrama final do projeto no Simulink.



## APÊNDICE F – CÓDIGOS UTILIZADOS PARA FILTRAGEM DOS DADOS.

```

1 function [x, cost] = tvd_mm(y, lam, Nit)
2 y = y(:); % Make column
   vector
3 cost = zeros(1, Nit); % Cost function
   history
4 N = length(y);
5
6 I = speye(N);
7 D = I(2:N, :) - I(1:N-1, :);
8 DDT = D * D';
9
10 x = y; % Initialization
11 Dx = D*x;
12 Dy = D*y;
13
14 for k = 1:Nit
15     F = sparse(1:N-1, 1:N-1, abs(Dx)/lam) + DDT; % F : Sparse
   banded matrix
16     x = y - D'*(F\Dy); % Solve banded
   linear system
17     Dx = D*x;
18     cost(k) = 0.5*sum(abs(x-y).^2) + lam*sum(abs(Dx)); % cost function
   value
19 end

```

Listing F.1 – Função TVD

```

1 fig = openfig('teste3posicaovideo');
2 ax = fig.CurrentAxes;
3 g_array = ax.Children;
4 x1 = g_array(1).XData;
5 y1 = g_array(1).YData;
6
7 % Parametros do filtro TVD
8 lam = 70; % Parametro de regularizacao
9 Nit = 10; % Numero de iteracoes
10
11 % Aplicacao do filtro TVD
12 Pos_Filt = tvd_mm(y1, lam, Nit)';
13
14 % Plotagem dos dados
15 figure;
16 plot(x1, Pos_Filt, 'b-', 'LineWidth', 1.5); % Dados filtrados
17 xlabel('Tempo (s)');
18 ylabel('Posicao (mm)');
19 xlim([0 160]);

```

```
20 grid on;
```

Listing F.2 – Aplicação do filtro TVD aos dados da régua potenciométrica.

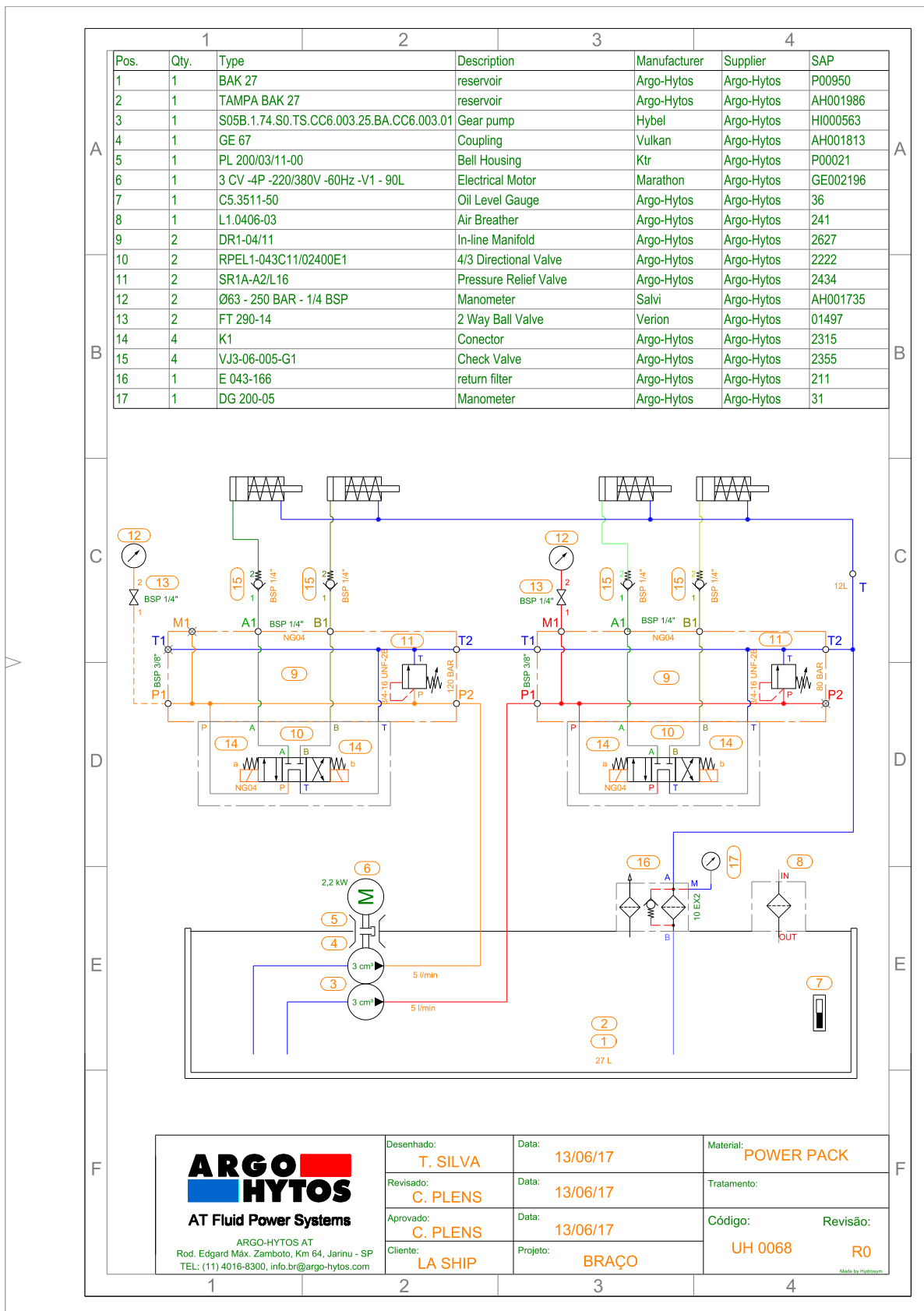
```
1 fig = openfig('teste3potenvideo');
2 ax = fig.CurrentAxes;
3 g_array = ax.Children;
4 x1 = g_array(1).XData;
5 y1 = g_array(1).YData;
6
7 figure
8 plot(x1,y1);
9
10 % Parametros do filtro TVD
11 lam = 10; % Parametro de regularizacao
12 Nit = 10; % Numero de iteracoes
13
14 % Aplicacao do filtro TVD
15 Pos_Filt = tvd_mm(y1, lam, Nit)';
16
17 % Plotagem dos dados
18 figure;
19 plot(x1, Pos_Filt, 'b-', 'LineWidth', 1.5); % Dados filtrados
20 xlabel('Tempo (s)');
21 ylabel('Sinal analogico do potenciometro (-)');
22 xlim([0 160]);
23 grid on;
```

Listing F.3 – Aplicação do filtro TVD ao potenciômetro de içamento.



### ANEXO A – DIAGRAMA HIDRÁULICO DA UPCH DETALHADO

Figura 44 – Diagrama hidráulico da UPCH detalhado





## ANEXO B – DIAGRAMAS ELÉTRICOS DO PROJETO

Figura 45 – Diagrama multifilar painel.

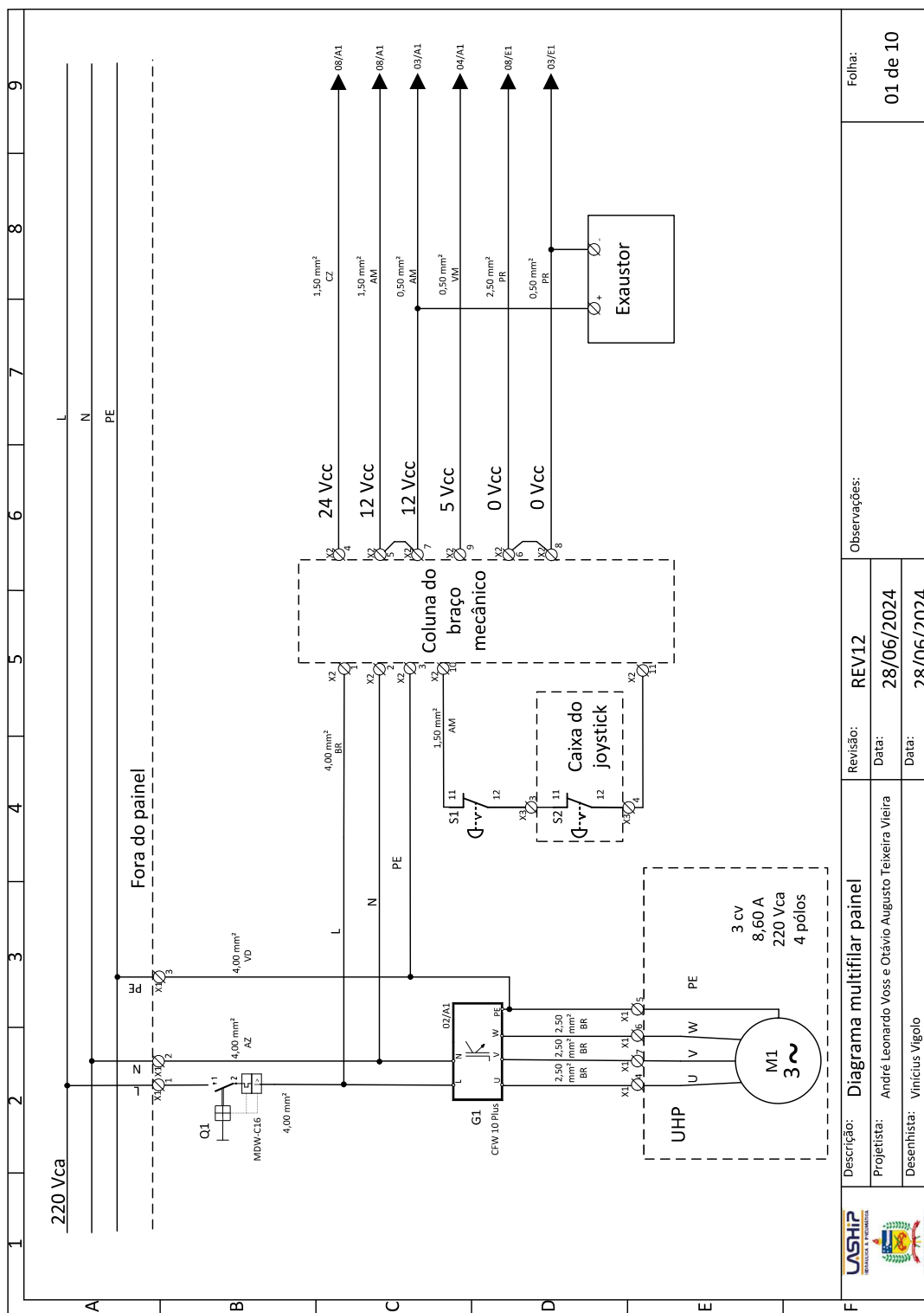
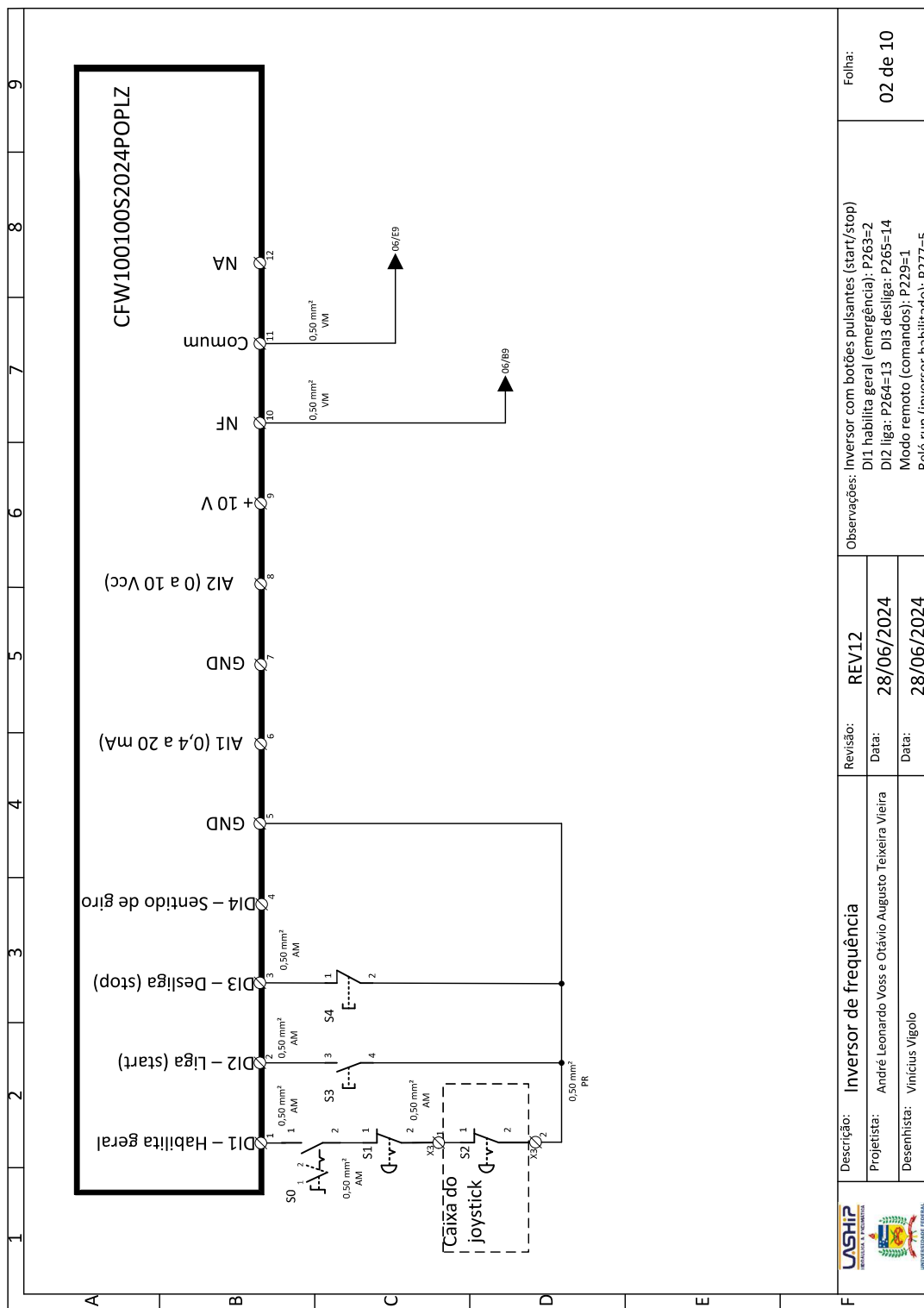


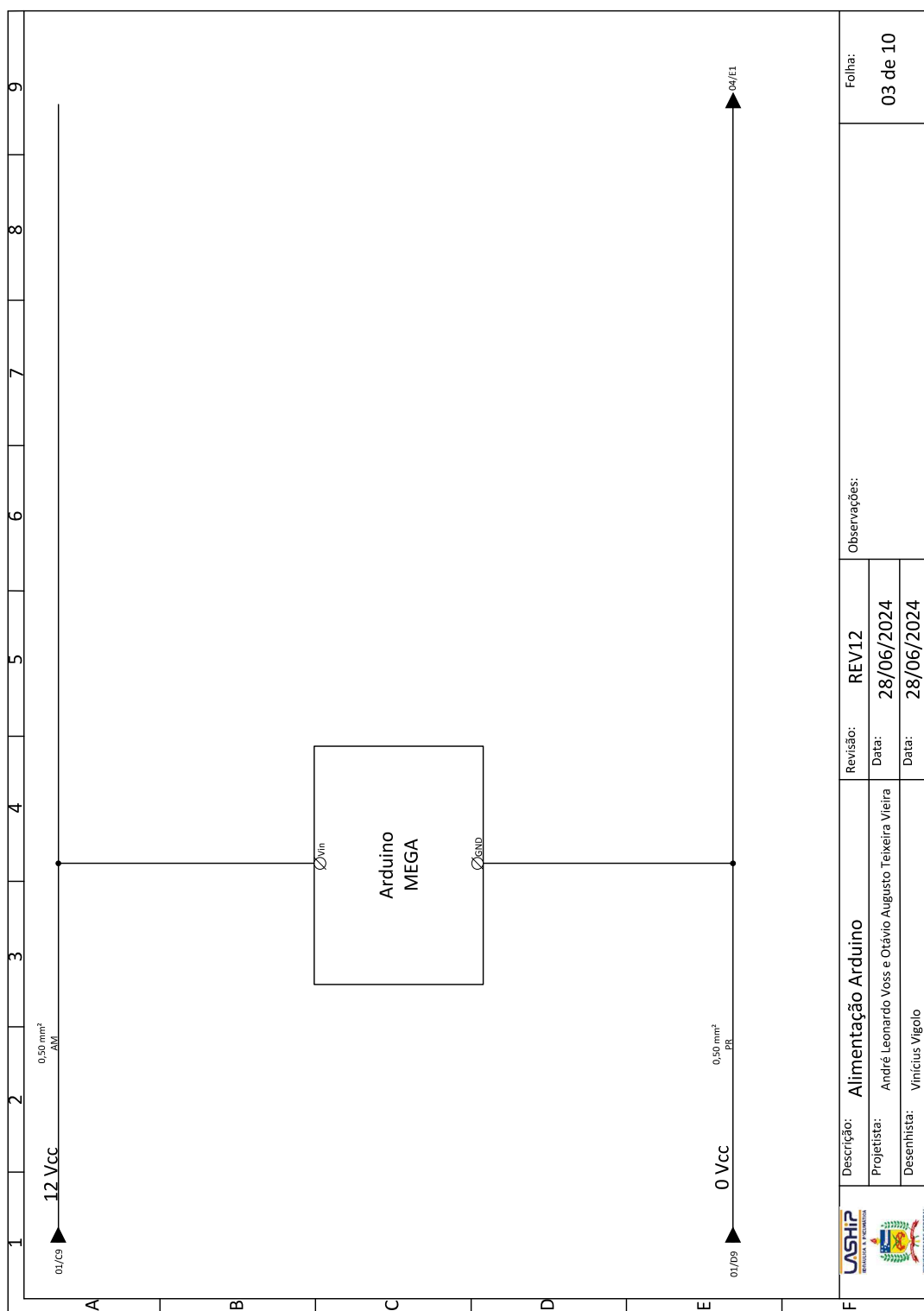


Figura 46 – Inversor de frequência.



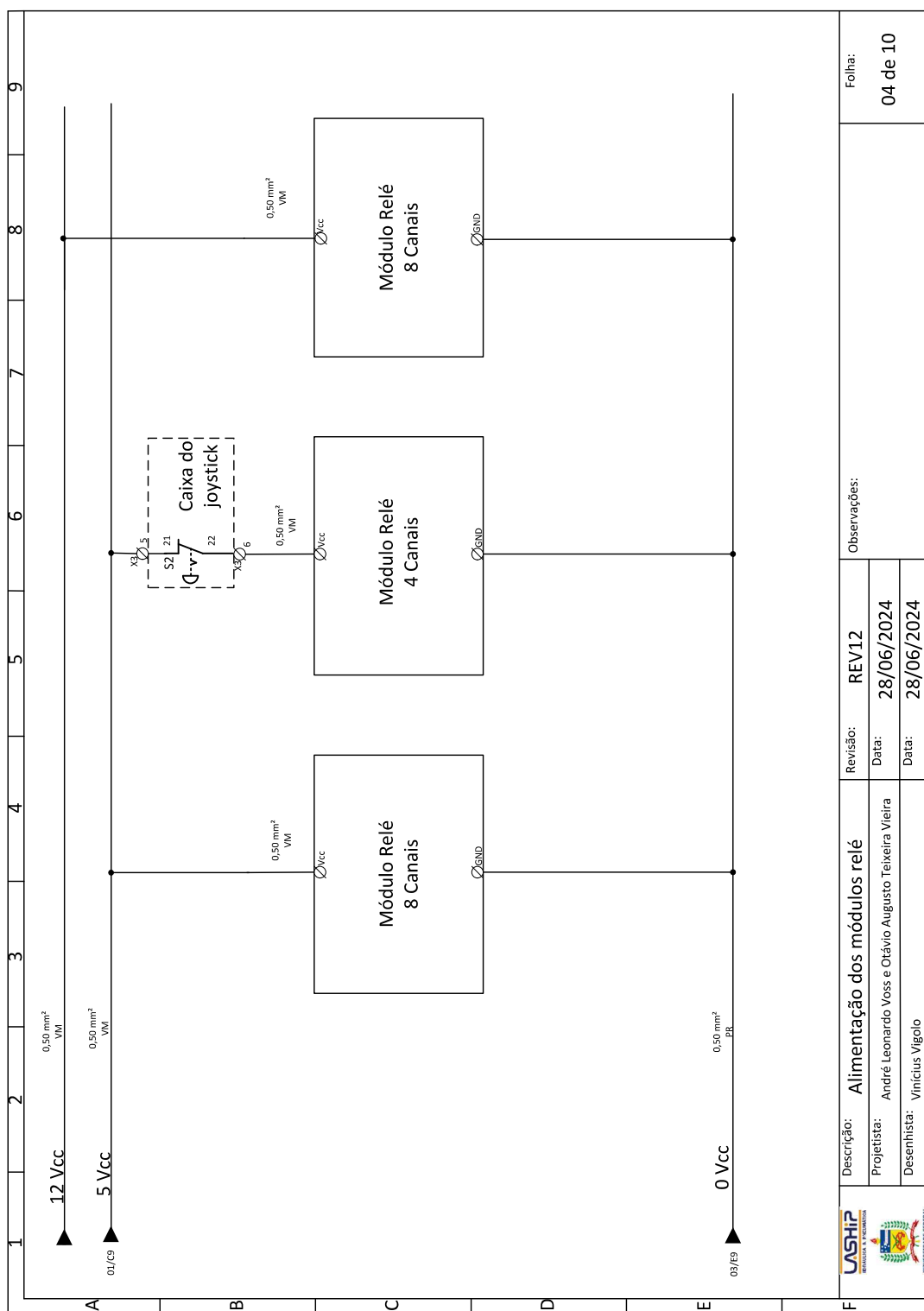
<p><b>Descrição:</b> Inversor de frequência</p> <p><b>Projetista:</b> André Leonardo Voss e Otávio Augusto Teixeira Vieira</p> <p><b>Desenhista:</b> Vinícius Vigolo</p>	<p><b>Revisão:</b> REV12</p>	<p><b>Folha:</b> 02 de 10</p>
	<p><b>Data:</b> 28/06/2024</p> <p><b>Data:</b> 28/06/2024</p>	

Figura 47 – Alimentação Arduino.



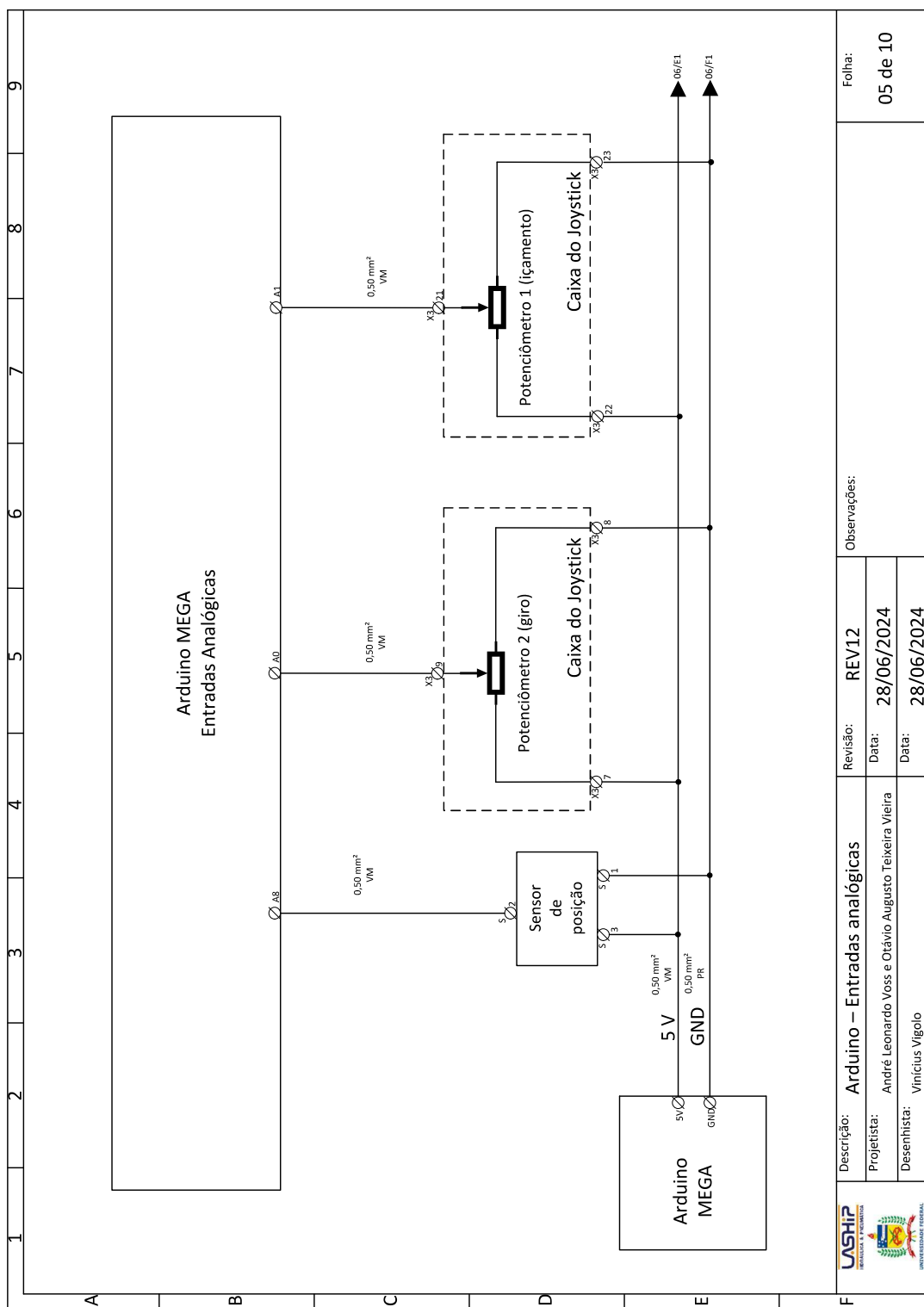
Fonte: (VOSS, 2019).

Figura 48 – Alimentação Relé.



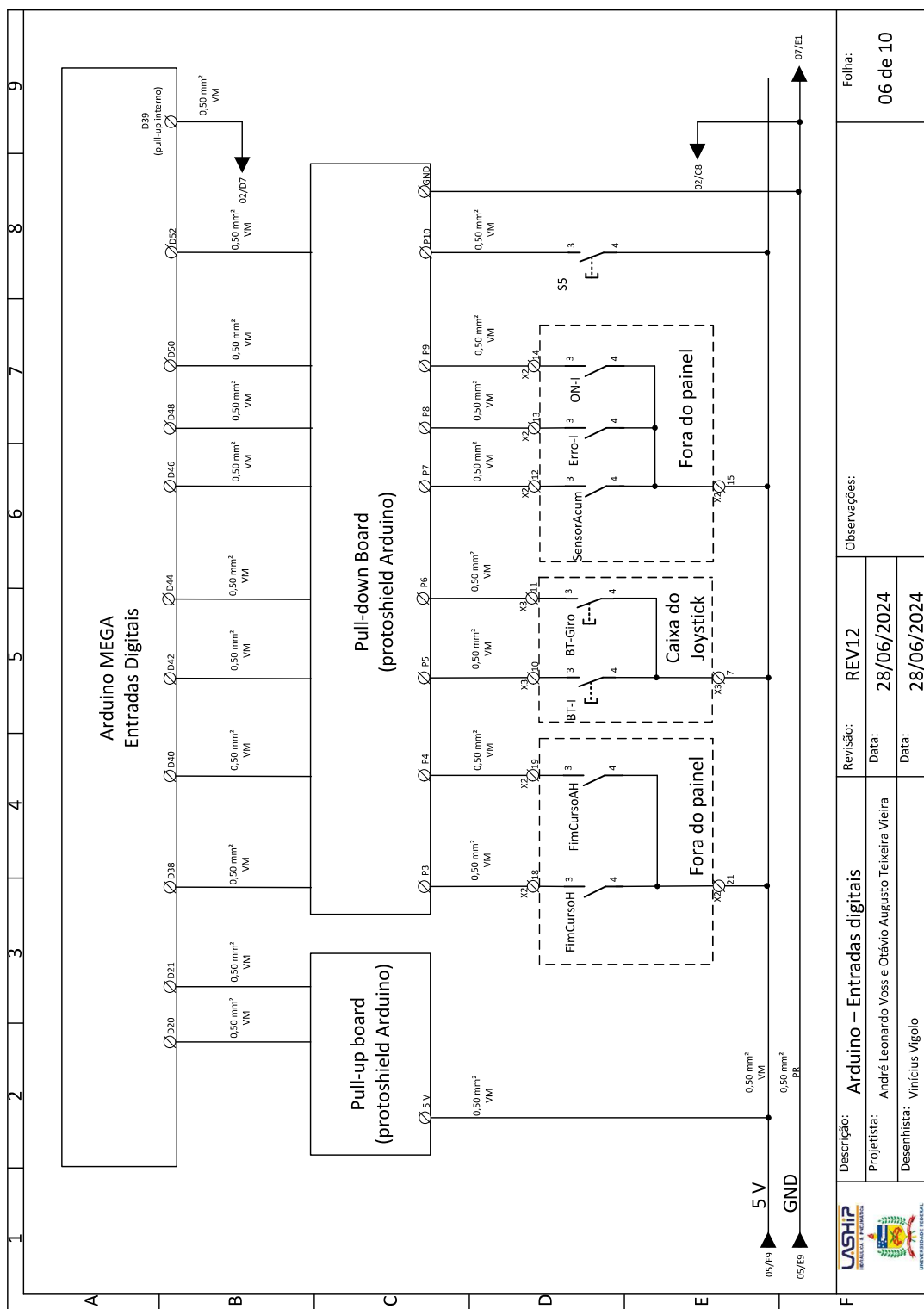
Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).

Figura 49 – Arduino Entradas - Analógicas.



Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).

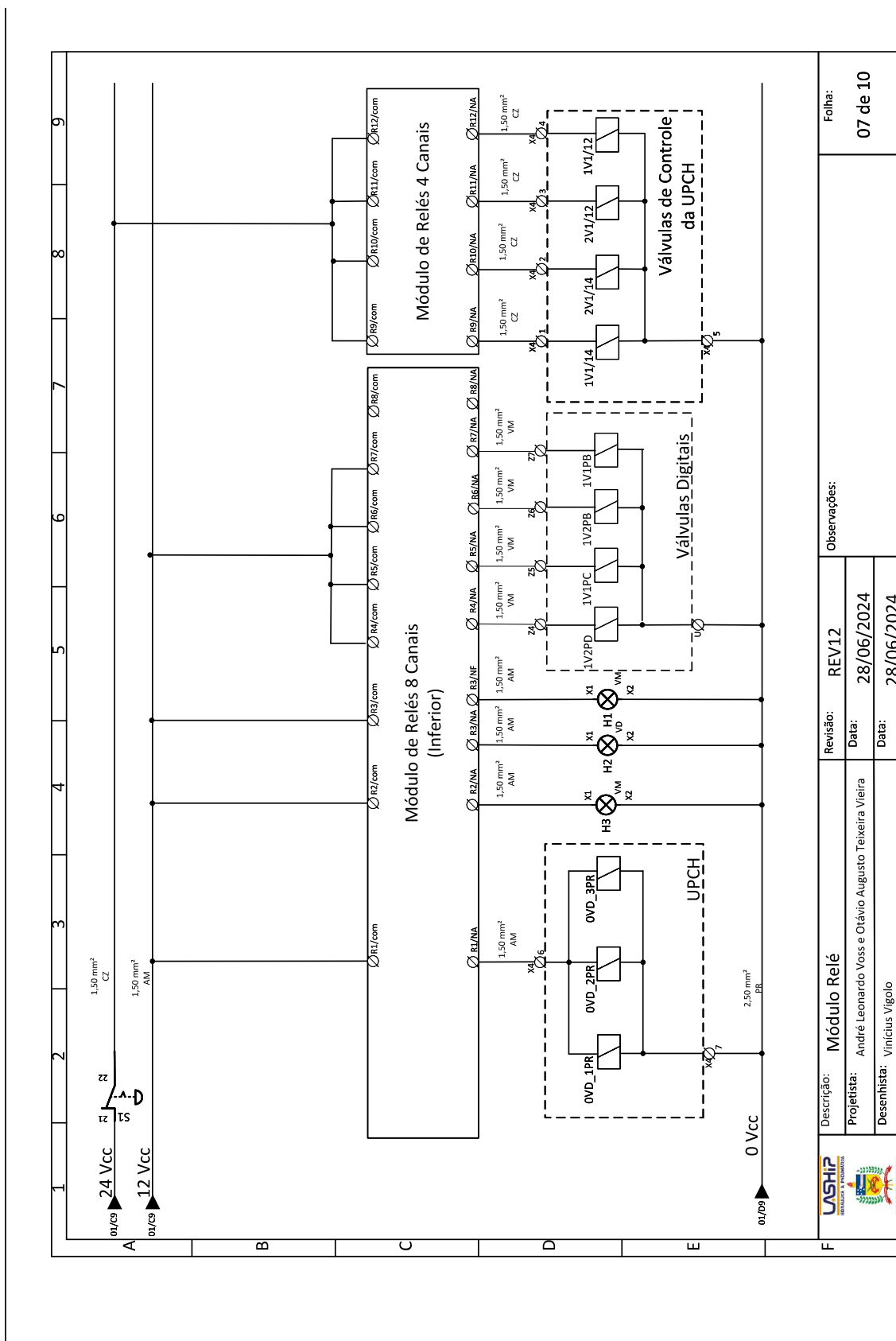
Figura 50 – Arduino Entradas - Digitais.



Descrição: <b>Arduino – Entradas digitais</b> Projetista: André Leonardo Voss e Otávio Augusto Teixeira Vieira Desenhista: Vinicius Vigolo	Observações:	Folha: 06 de 10
	Revisão: <b>REV12</b>	
	Data: <b>28/06/2024</b> Data: <b>28/06/2024</b>	

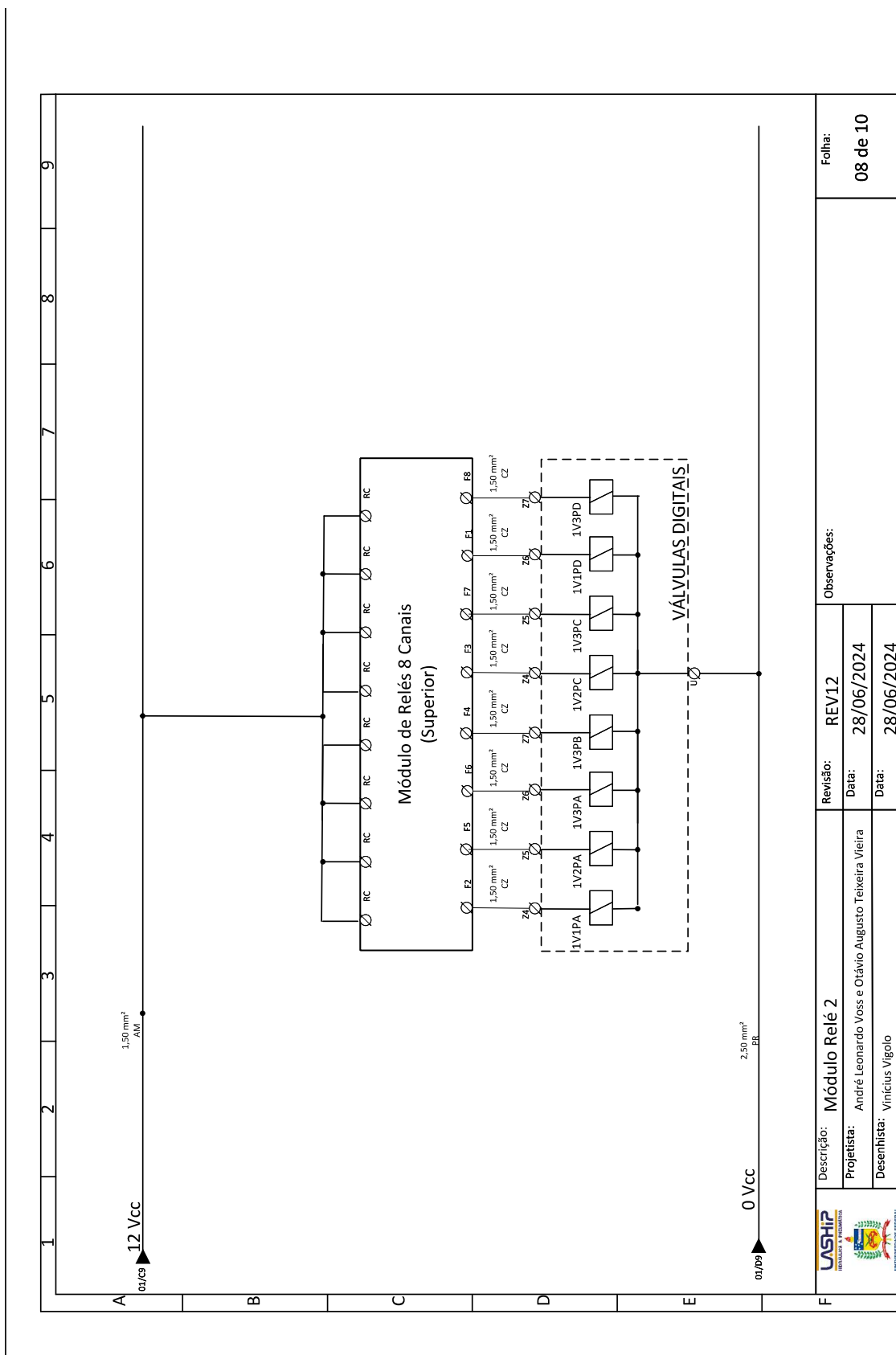
Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).


Figura 51 – Módulo Relé.



Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).

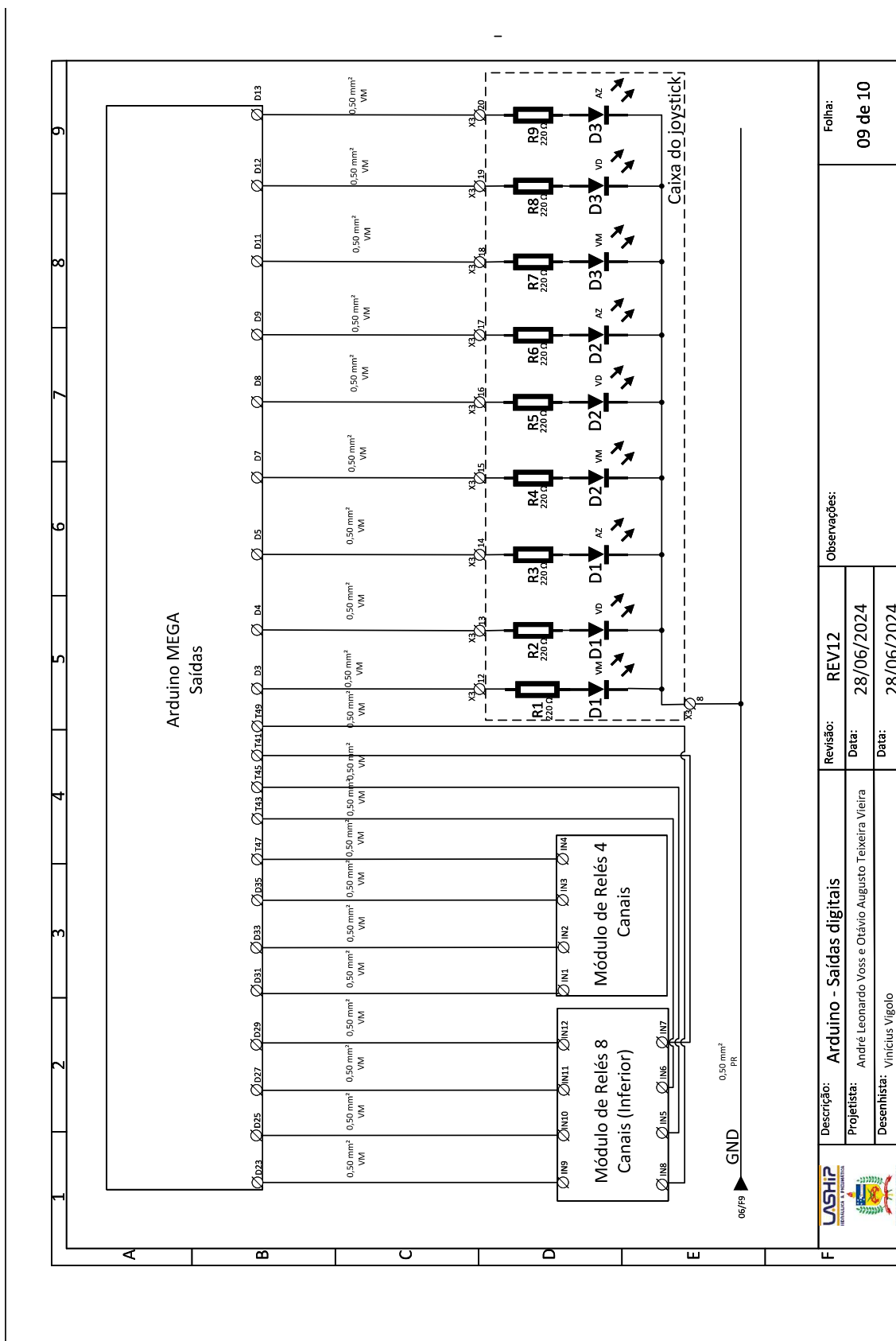
Figura 52 – Módulo Relé 2.



 INSTITUTO VASCO DA GAMA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	Descrição: <b>Módulo Relé 2</b>	Revisão: <b>REV12</b>	Observações:	Folha: <b>08 de 10</b>
	Projetista: <b>André Leonardo Voss e Otávio Augusto Teixeira Vieira</b>	Data: <b>28/06/2024</b>		
	Desenhista: <b>Vinicius Vigolo</b>	Data: <b>28/06/2024</b>		

Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).

Figura 53 – Arduino - Saídas.

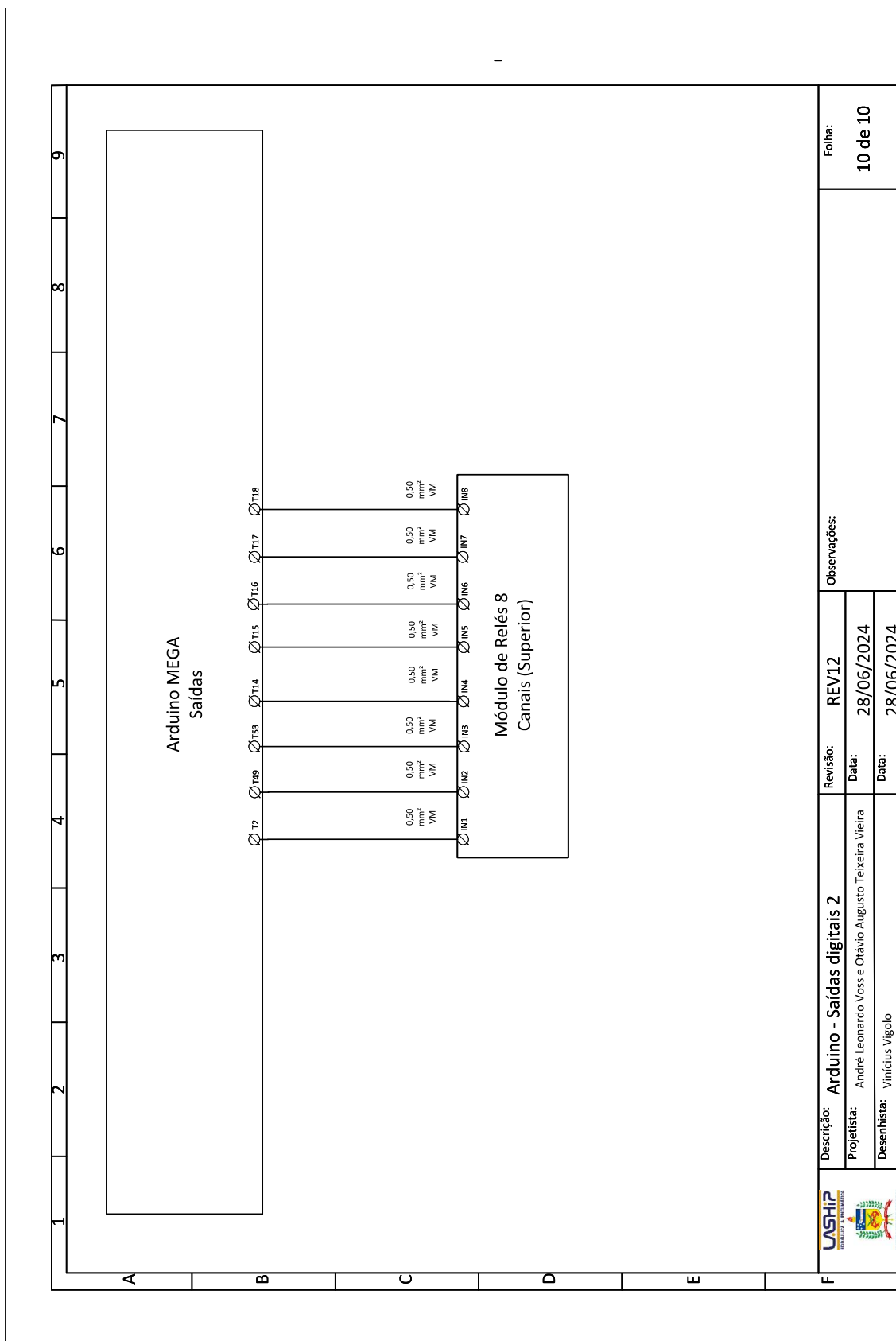


	Descrição: <b>Arduino - Saídas digitais</b>	Revisão: <b>REV12</b>	Observações:  Folha: <b>09 de 10</b>
	Projetista: <b>André Leonardo Voss e Otávio Augusto Teixeira Vieira</b>	Data: <b>28/06/2024</b>	
	Desenhista: <b>Vinicius Vigolo</b>	Data: <b>28/06/2024</b>	

Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).



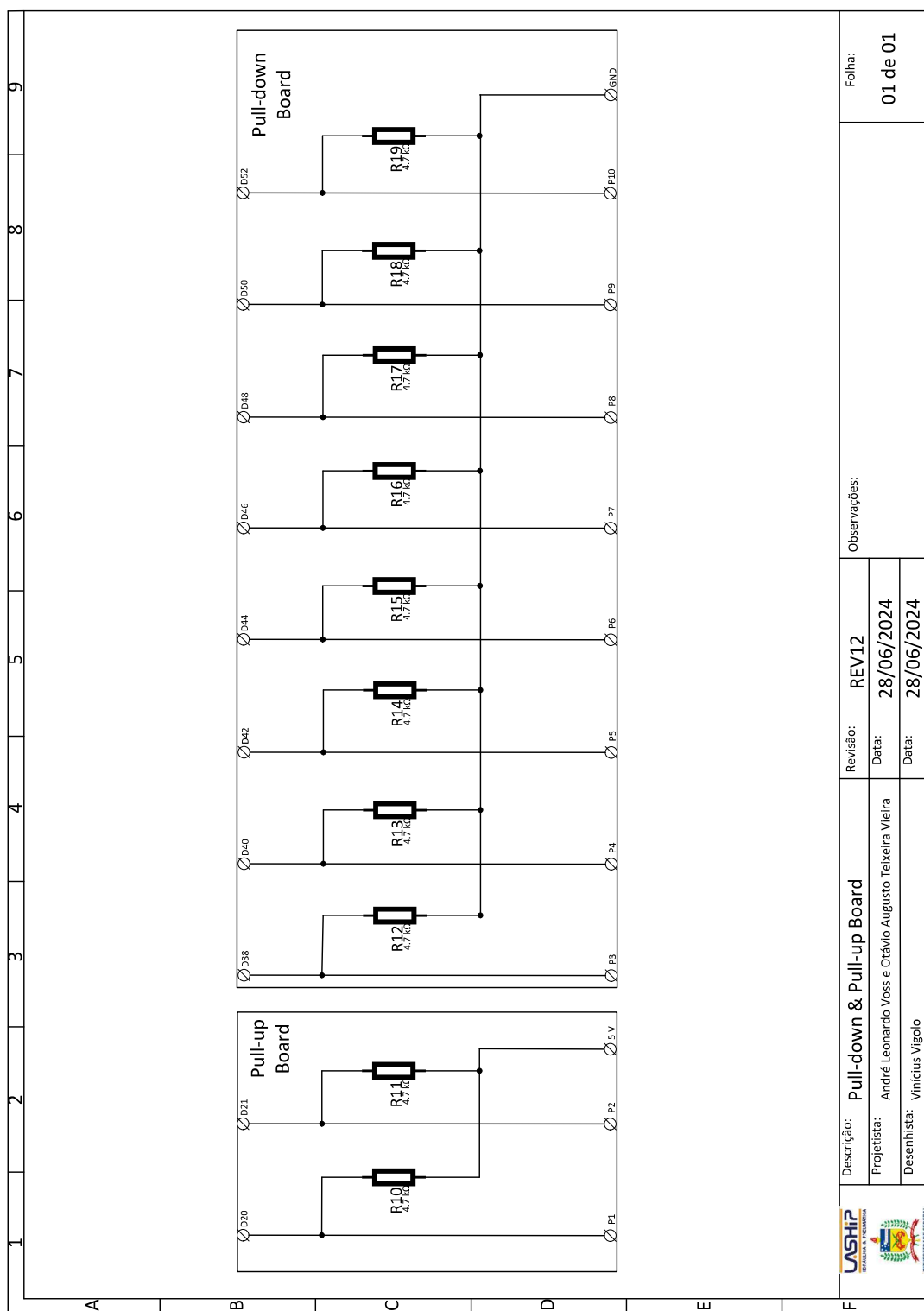
Figura 54 – Arduino - Saídas 2.



 LASHIP INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE  UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ	Descrição: <b>Arduino - Saídas digitais 2</b>	Revisão: <b>REV12</b>	Observações:  	Folha: <b>10 de 10</b>
	Projetista: André Leonardo Voss e Otávio Augusto Teixeira Vieira	Data: <b>28/06/2024</b>		
Desenhista: Vinícius Vígolo		Data: <b>28/06/2024</b>		

Fonte: Adaptado de (VOSS, 2019).

Figura 55 – Pull-down & Pull-up board.



Fonte: (VOSS, 2019).

Figura 56 – Caixa do joystick.

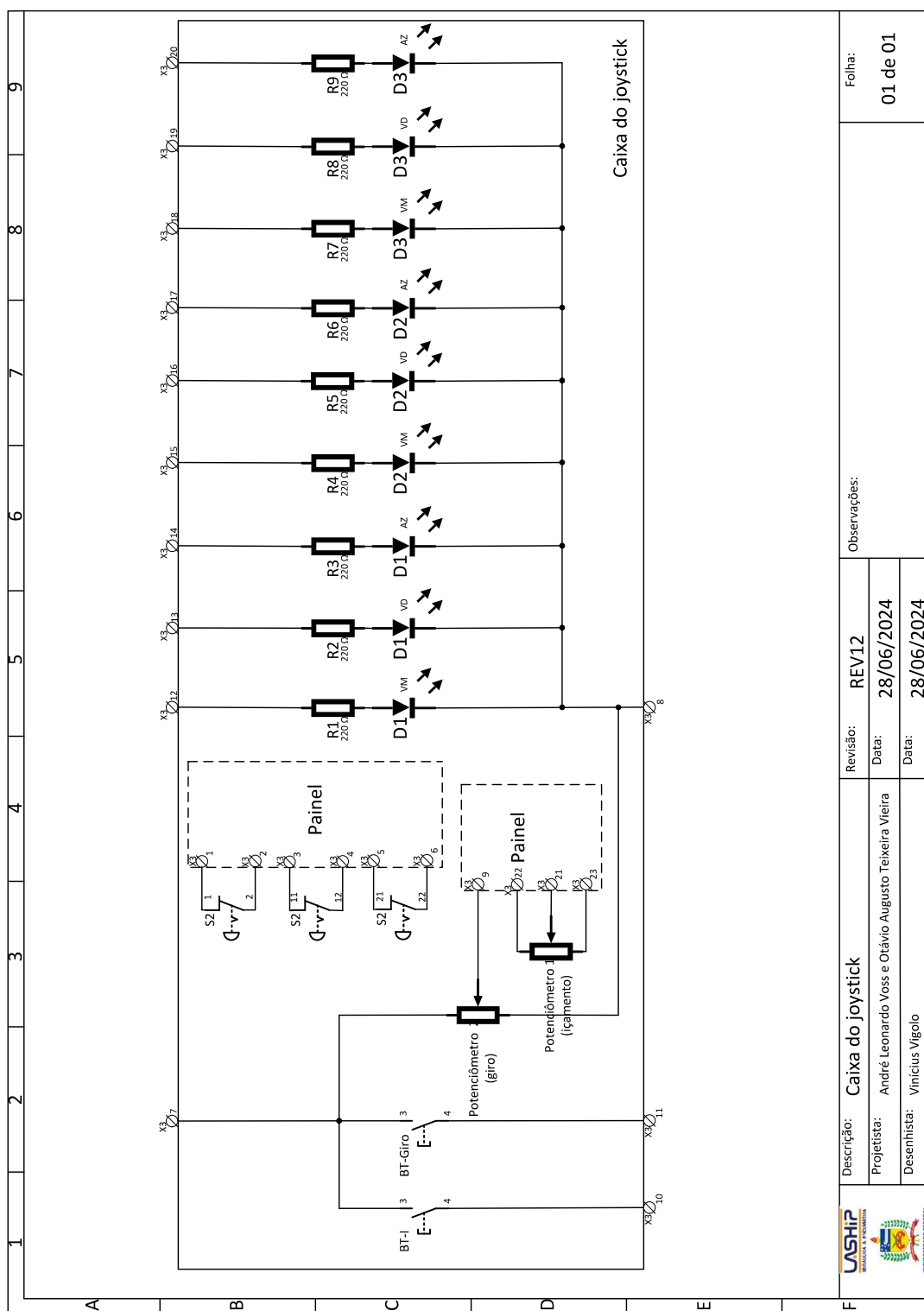
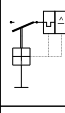
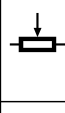

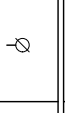
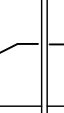
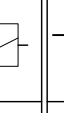
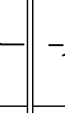

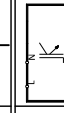
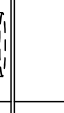

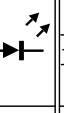
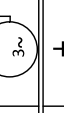

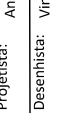


Figura 57 – Caixa do joystick.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A	Número	Símbolo	Referência	Número	Símbolo	Referência				
	1		Disjuntor monofásico	11		Potenciômetro				
B	2		Botão de emergência	12		Conectores bornes				
	3		Contato NA	13		Bobina válvulas				
C	4		Contato NF	14		Comutador 2 posições				
	5		Contato NA botoeira	15		Blindagem				
D	6		Inversor de frequência	16		Referência				
	7		Sinaleiro	17		Referência				
	8		Lâmpada LED	18		Referência				
E	9		Motor trifásico	19		Referência				
	10		Resistor	20		Referência				
F	Descrição: Simbologia Projetista: André Leonardo Voss e Otávio Augusto Teixeira Vieira Desenhista: Vinícius Vigolo			Revisão: REV12 Data: 28/06/2024 Data: 28/06/2024			Observações: A simbologia está de acordo com a IEC 60617.			Folha: 01 de 01

## ANEXO C – CÓDIGO DE SELEÇÃO DE PRESSÕES

```

1 clear all
2
3 %Area do cilindro
4 A0=[0.00094562 0.001348 0.00064088 0.00087650]; %[m2] Cilindro guindaste
5
6 cont=0;
7 save20=zeros(81,8,20); %defines matrix for best results
8 save20(1,2,:)=1e11;
9 step_diameters=3; %[mm]
10 step1_pressure=1; %[bar]
11 step2_pressure=5; %[bar]
12 step3_pressure=10; %[bar]
13
14 for p1=5:step1_pressure:10 %seeds in steps to swiipe the whole domain
15 for p2=10:step2_pressure:80
16 for p3=10:step3_pressure:120
17     p_ini=[p1 p2 p3]*1e+5; %input: p1 p2 p3 p4 p5 p6 [bar] -
18     > saida [Pa]
19     w=0;
20     for i=1:3
21         for j=1:3
22             for k=1:3
23                 for l=1:3
24                     w=w+1; %calculates all the force
25                     combinations for the provided pressures
26                     Fh_ini(w)=A0(1)*p_ini(i)-A0(2)*p_ini(j)+
27                     A0(3)*p_ini(k)-A0(4)*p_ini(l); %hydraulic force
28                 end
29             end
30         end
31     end
32     Fh_ini=sort(Fh_ini); %organize the force vector
33     Fh_ini=Fh_ini.'; %better form
34     length(Fh_ini); %shows the number of possible forces
35     % plot(1:length(Fh_ini),Fh_ini,"rx") %plots the forces
36     equally spaced
37     % hold on
38     % grid on
39
40     %---- defining a line between the first and last forces
41     %these two forces will always be the max and min
42     possible values for the
43     %available reservoir, pump and actuators
44     a= (Fh_ini(end)-Fh_ini(1))/(length(Fh_ini)-1); %defines
45     slope

```

```

40         b= Fh_ini(1) - a*1; %defines vertical adjust
41         %y=ax+b
42         % plot (1:length(Fh_ini),a*(1:length(Fh_ini))+b,'r-') %
plots line
43
44         p0=p_ini; %takes all pessure values for optimization
45         %lx=p_ini(1)*ones(size(p0)); % takes minimum pressure as
lower boundary
46         lx=[5e5 15e5 25e5];% takes minimum pressures as lower
boundary
47         %ux=p_ini(end)*ones(size(p0)); %takes maximum pressure
as upper boundary
48         ux=[7.5e5 80e5 120e5]; %takes maximum pressures as upper
boundary
49         %ceq(1)=p(1); %defines constraint
50         %ceq(2)=p(end);
51         %ceq=ceq'
52         %c=[];
53         x0=[p0']; %defines vector to be optimized
54
55         [x_opt, errsum_opt] = fmincon(@(x) erro(x,a,b,A0),x0
, [], [], [], [], lx,ux, [], optimoptions('fmincon', 'Display', 'off', '
TolFun',1e-6));
56
57         p_opt=x_opt(1:3);
58
59         %d_opt=x_opt(7:10);
60         %calculates the resulting forces (for the optimized
presures)
61         A_opt=A0; %Areas [m^2]
62         w=0;
63         for i=1:3
64             for j=1:3
65                 for k=1:3
66                     for l=1:3
67                         w=w+1;
68                         Fh_opt(w)=A_opt(1)*p_opt(i)-A_opt(2)*
p_opt(j)+A_opt(3)*p_opt(k)-A_opt(4)*p_opt(1); %hydraulic force
69                     end
70                 end
71             end
72         end
73         Fh_opt=sort(Fh_opt); %organize the force vector
74         Fh_opt=Fh_opt.'; %better form
75
76         %length(Fh_opt); %shows the number of possible forces
77         % plot(1:length(Fh_opt),Fh_opt,"b*") %plots the forces

```

```

optimized equally spaced
78     % legend('F_{initial}','ax+b','F_{optimal}')
79     % title('Forças Disponíveis')
80     % ylabel('Força [N]')
81     % xlabel('Ordem')
82     %hold off
83
84     %display('Forças[N] initial optimized')
85     %forces=[Fh_ini Fh_opt]
86     %display('Pressures[bar] initial optimized')
87     %pressures=[p_ini.' p_opt]*1e-5
88     %display('Diameters [mm] initial optimized')
89     %diameters=[d0' d_opt]*1e3
90     %errsum_opt;
91
92     %checks if interaction should be saved and, if so,
allocates the
93     %save20 matrix
94     cont=cont+1;
95     pos_save=21;
96     for iii=20:-1:1
97         if save20(1,2,iii)>errsum_opt
98             pos_save=pos_save-1;
99         else
100             iii=0;
101         end
102     end
103     if pos_save<21
104         for iiii=20:-1:pos_save+1
105             save20(:,:,iiii)=save20(:,:,iiii-1);%copies
values to new position
106         end
107         save20(1,1,pos_save)=cont;%puts the count in to
position
108         cont %shows count of found result
109         errsum_opt %show error
110         save20(1,2,pos_save)=errsum_opt;
111 %         save20(1:4,3,pos_save)=d0; %initial diameters
112         save20(1:3,4,pos_save)=p0; %initial pressures
113         save20(1:3,5,pos_save)=p_opt; %optimized pressures
114         save20(:,7,pos_save)=Fh_ini; %initial forces
115         save20(:,8,pos_save)=Fh_opt; %optimized forces
116
117         save('save20','save20'); %saves variable to file
118     end
119 end
120 end

```

```

121     end
122
123 Pressures = save20(1:3,5,1)/1e5
124
125 figure(1)
126 plot([1:numel(save20(:,8,1))],save20(:,8,1),'o')
127 title('Forces Profile','FontSize',12,'Fontname','Times New Roman')
128 xlabel('\itForce Number [-]','FontSize',12,'Fontname','Times New Roman
    ')
129 ylabel('\itForce [N]','FontSize',12,'Fontname','Times New Roman')
130 set(gca,'FontSize',12,'Fontname','Times New Roman')
131 grid on
132 xlim([0 numel(save20(:,8,1))])
133
134 function errsum= erro(x,a,b,A0)
135     %defines function for the sum of the squared errors between
    values
136     %(Fh) and a reference line (y=a*x+b)
137     p=x(1:3);
138     % d=x(7:10);
139     A=A0; %Areas [m^2]
140     w=0;
141     for i=1:3
142         for j=1:3
143             for k=1:3
144                 for l=1:3
145                     w=w+1;
146                     Fh(w)=A(1)*p(i)-A(2)*p(j)+A(3)*p(k)-A(4)*p(l); %
    hydraulic force
147                 end
148             end
149         end
150     end
151     Fh=sort(Fh); %organize the force vector
152     errsum1=0;
153     errsum=0;
154     for i=1:length(Fh)
155         err=(Fh(i)-(a*i+b))^2;%defines the difference between the value
    and the line. Also squares it
156         errsum1=errsum1+err; %sums the squared error to the total
157     end
158     if abs((abs(Fh(1))-abs(Fh(end))))<0.1*(Fh(end))
159         errsum=errsum1*1e-3;
160     else
161         errsum=errsum1;
162     end
163 end

```



```
164
165 function [c,ceq]= nlcon(x)
166     d=x(7:10);
167     c=[];
168     ceq= [d(1)+d(3)-(d(2)+d(4))];
169 end
```

Listing C.1 – Código de seleção de pressões de BURGOS GONÇALVES.



