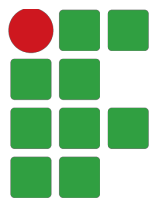


**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiano

**DESENVOLVIMENTO DE VEÍCULO NÃO TRIPULADO E
ENERGETICAMENTE EFICIENTE UTILIZANDO
MECANISMO *ROCKER-BOGIE* E DIAGRAMA DE
ACKERMANN**

Deivid Batista Sousa Ribeiro
Matheus Souza Teles

Instituto Federal Goiano
Campus Trindade
19 de dezembro de 2024



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiano

**DESENVOLVIMENTO DE VEÍCULO NÃO TRIPULADO E
ENERGETICAMENTE EFICIENTE UTILIZANDO
MECANISMO *ROCKER-BOGIE* E DIAGRAMA DE
ACKERMANN**

Deivid Batista Sousa Ribeiro
Matheus Souza Teles

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, orientado pelo Prof. Dr. Geovanne Pereira Furriel, e coorientado pelo Prof. Dr. Cleber Asmar Ganzarolli, aprovado em 18 de dezembro de 2024.

Instituto Federal Goiano
Campus Trindade
19 de dezembro de 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas (SIBI) – Instituto Federal Goiano

R484

Ribeiro, Deivid Batista Sousa.

Desenvolvimento de veículo não tripulado e energeticamente eficiente utilizando mecanismo Rocker-Bogie e Diagrama de Ackermann [manuscrito] / Deivid Batista Sousa Ribeiro; Matheus Souza Teles. – Trindade, GO: IF Goiano, 2024.

68 fls. : tabs.

Orientador: Prof. Dr. Geovanne Pereira Furriel.

Co-orientador: Prof. Dr. Cleber Asmar Ganzarolli.

Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, 2024.

1. Veículo não tripulado. 2. Mecanismo Rocker-Bogie. 3. Geometria de Ackermann. 4. Tração Integral 6x6. 5. Fabricação Digital. 6. Eficiência Energética. I. Teles, Matheus Souza. II. Furriel, Geovanne Pereira. III. Ganzarolli, Cleber Asmar. IV. Título. V. Instituto Federal Goiano.

CDU 629.3

Ficha elaborada por Johnathan Pereira Alves Diniz – Bibliotecário/CRB 1 nº 2376



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 116/2024 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 18 dias do mês de dezembro de 2024, às 10 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Geovanne Pereira Furriel (orientador), Luiz Alberto do Couto (membro) e Paulo Vinícius da Silva Resende (membro externo IFG), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “Desenvolvimento de veículo não tripulado e energeticamente eficiente utilizando mecanismo rocker-bogie e diagrama de Ackermann” do discente Deivid Batista Sousa Ribeiro Matrícula nº 2020108202640066 e do discente Matheus Souza Teles, Matrícula nº 2019108202640230 do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IF Goiano – Campus Trindade. A palavra foi concedida aos estudantes para a apresentação oral do TC, houve arguição dos candidatos pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO dos estudantes. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Geovanne Pereira Furriel

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Luiz Alberto do Couto

Membro

PAULO VINICIUS DA SILVA
RESENDE:03232307175

Assinado de forma digital por
PAULO VINICIUS DA SILVA
RESENDE:03232307175
Dados: 2024.12.19 11:24:42 -03'00'

Paulo Vinícius da Silva Rezende

Membro Externo - IFG

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geovanne Pereira Furriel, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2024 17:59:29.
- **Luiz Alberto do Couto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/12/2024 18:42:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/12/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 663370

Código de Autenticação: 6642c4a7ab



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Trindade

Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75389-269

(62) 3506-8000

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Deivid Batista Sousa Ribeiro; Matheus Souza Teles

Matrícula:

2020108202640066; 2019108202640230

Título do trabalho:

DESENVOLVIMENTO DE VEÍCULO NÃO TRIPULADO E ENERGETICAMENTE EFICIENTE UTILIZANDO MECANISMO ROCKER-BOGIE E DIAGRAMA DE ACKERMANN

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 20 / 12 / 2024

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente

 **DEIVID BATISTA SOUSA RIBEIRO**
Data: 18/12/2024 21:20:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

 **MATHEUS SOUZA TELES**
Data: 18/12/2024 21:06:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Trindade

Local

18 / 12 / 2024

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente

 **GEOVANNE PEREIRA FURRIEL**
Data: 18/12/2024 21:26:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento; Porque é melhor a sua mercadoria do que artigos de prata, e maior o seu lucro que o ouro mais fino. Mais preciosa é do que os rubis, e tudo o que mais possas desejar não se pode comparar a ela.”

*PROVÉRBIOS 3, 13-15
Bíblia Sagrada.*

“O desejo profundo da humanidade pelo conhecimento é justificativa suficiente para nossa busca contínua. É nossa meta não é nada menos do que uma descrição completa do universo onde vivemos.”

*STEPHEN HAWKING
Uma Breve História do Tempo, 1988.*

A todos aqueles que de alguma forma me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, pela força, sabedoria e resiliência que nos permitiram superar os desafios ao longo desta jornada.

Nossa mais profunda gratidão vai aos nossos pais, que, com dedicação, amor e sacrifícios, nos proporcionaram as condições necessárias para chegarmos até aqui, sendo pilares fundamentais em nossas vidas.

Agradecemos especialmente aos nossos orientadores, Professor Dr. Geovanne Pereira Furriel e Professor Dr. Cleber Asmar Ganzaroli, por sua orientação incansável, prontidão e suporte inestimável desde o início até a conclusão deste trabalho. Sua paciência, conhecimento e comprometimento foram indispensáveis para o desenvolvimento do projeto.

Agradecemos, com igual consideração, ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) – Campus Trindade, pelo apoio e permissão para uso dos laboratórios. A infraestrutura, os recursos e o ambiente acadêmico proporcionados pela instituição foram fundamentais para que pudéssemos desenvolver nossas habilidades e alcançar nossos objetivos.

Estendemos nossos agradecimentos ao Professor Me. Paulo Vinicius da Silva Resende, cuja gentil consultoria e generosa assistência na usinagem de peças foram cruciais para a realização prática deste trabalho. Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão à Professora Me. Brunna Carolinne Rocha Silva Furriel pelo inestimável auxílio durante a produção deste trabalho. Suas revisões criteriosas e as valiosas sugestões contribuíram significativamente para a qualidade e o aprimoramento deste projeto. Seu apoio foi fundamental para que este trabalho fosse concluído com excelência.

Também expressamos nossa sincera gratidão ao Instituto Federal de Goiás (IFG) - Campus Goiânia, por disponibilizar os maquinários que tornaram possível a execução deste projeto.

Agradecemos ao Instituto de Tecnologia Anexo pela generosa disponibilização de maquinário. Sua contribuição foi indispensável para a execução de etapas fundamentais deste projeto, e somos profundamente gratos pelo apoio e confiança depositados.

Por fim, dedicamos um agradecimento especial aos amigos e colegas que, de forma direta ou indireta, contribuíram com apoio, incentivo e colaboração ao longo desta caminhada. Cada gesto de ajuda foi essencial para que pudéssemos alcançar este marco tão importante.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um veículo não tripulado com tração integral 6x6, destinado a operar em terrenos irregulares, com aplicações voltadas para automação agrícola e ambientes de difícil acesso. A metodologia envolveu a modelagem em 3D, a fabricação das peças por corte a laser, usinagem, eletroerosão a fio e impressão 3D, além da implementação da geometria de Ackermann no sistema de esterçamento. A estrutura foi construída com perfis de alumínio e componentes mecanicamente robustos, e a alimentação foi realizada por um sistema combinado de bateria estacionária de chumbo-ácido e painel fotovoltaico, visando eficiência energética e operação sustentável. Os resultados demonstraram boa estabilidade estrutural e eficiência na superação de terrenos irregulares e inclinações suaves em linha reta. No entanto, foram identificadas limitações importantes no sistema de direção, devido ao torque insuficiente dos servomotores, e no sistema de tração, com perda de aderência em terrenos gramados. Apesar dessas limitações, o sistema desenvolvido valida a aplicação do mecanismo *rocker-bogie* em ambientes terrestres e representa base promissora para estudos futuros em automação agrícola e exploração de terrenos de difícil acesso. As melhorias sugeridas, como a substituição dos motores por componentes mais robustos e a otimização estrutural, podem ampliar significativamente a eficiência e a aplicabilidade do veículo.

Palavras-chave: Veículo não tripulado. Mecanismo *Rocker-Bogie*. Geometria de Ackermann. Tração Integral 6x6. Fabricação Digital. Eficiência Energética.

DEVELOPMENT OF AN UNMANNED AND ENERGY-EFFICIENT VEHICLE USING THE ROCKER-BOGIE MECHANISM AND ACKERMANN STEERING GEOMETRY

ABSTRACT

This work presents the development of an unmanned vehicle with 6x6 all-wheel drive, designed to operate on irregular terrains, with applications focused on agricultural automation and hard-to-reach environments. The methodology involved 3D modeling, manufacturing components through laser cutting, machining, wire electrical discharge machining (EDM), and 3D printing, as well as implementing Ackermann geometry in the steering system. The structure was built using aluminum profiles and mechanically robust components, and the power supply was provided by a combined system of lead-acid stationary batteries and photovoltaic panels, aiming for energy efficiency and sustainable operation. The results demonstrated good structural stability and efficiency in overcoming irregular terrains and gentle inclines in straight-line motion. However, significant limitations were identified in the steering system due to insufficient torque of the servomotors and the traction system, with loss of adhesion on grassy surfaces. Despite these limitations, the developed system validates applying the *rocker-bogie* mechanism in terrestrial environments. It represents a promising foundation for future studies in agricultural automation and exploration of challenging terrains. Suggested improvements, such as replacing the motors with more robust components and optimizing the structural design, can significantly enhance the vehicle's efficiency and applicability.

Keywords: Unmanned Vehicle. *Rocker-Bogie* Mechanism. Ackermann Geometry. 6x6 All-Wheel Drive. Digital Manufacturing. Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 Protótipos de <i>rovers</i> de exploração da NASA.	4
2 Representação esquemática do mecanismo <i>rocker-bogie</i>	5
3 Perfil de alumínio extrudado v-slot 30x30 mm.	7
4 Comparação entre sistemas de direção sem (esquerda) e com (direita) a geometria de Ackermann.	10
5 Representação gráfica da geometria de Ackermann.	11
6 Bateria estacionária de chumbo-ácido.	13
7 Motor de passo NEMA23.	14
8 Microcontrolador Espressif Esp32.	15
9 Sistema de esterçamento das rodas do <i>bogie</i>	21
10 Vista explodida dos grupos rígidos.	23
11 Caixa principal com compartimentos deslizantes.	23
12 Sistema de trilho para ajuste da posição da bateria.	24
13 Montagem do pivô do <i>bogie</i>	25
14 Montagem do pivô do <i>rocker</i>	25
15 Vista explodida da junta de esterçamento.	26
16 Sistema de conexão da barra de torção ao mecanismo <i>rocker-bogie</i>	27
17 Roda montada com sistema de redução e proteção.	28
18 Roda completa montada na estrutura <i>rocker-bogie</i>	28
19 <i>Driver</i> do relé.	30
20 Diagrama elétrico do controle remoto.	31
21 Corte a laser das chapas de união.	33
22 Usinagem dos eixos do <i>rover</i>	34
23 Soldagem dos eixos nas chapas de fixação.	34
24 Eletroerosão das engrenagens movidas.	35
25 Simulação de deformação estrutural sob carga de 500 N.	40
26 Distribuição dos esforços de compressão e tração nos segmentos do mecanismo.	41
27 Chapas após corte a laser.	43
28 Eixos usinados.	44
29 Eixos usinados já soldados às chapas de união.	44
30 Engrenagens movidas finalizadas.	45
31 Mecanismo <i>rocker-bogie</i> em ação.	47
32 Sistema completo da barra de torção montado.	47
33 Compartimentos deslizantes completamente expandidos.	48
34 Conexões elétricas do <i>rover</i>	49
35 <i>Rover</i> concluído.	50

36	Vista superior da placa de circuito impresso.	51
37	Vista superior do modelo 3D da placa de circuito impresso.	51
38	Vista inferior do modelo 3D da placa de circuito impresso.	52
39	Placa controladora do <i>rover</i> finalizada.	52
40	Vista superior do projeto 3D do controle remoto.	53
41	Vista isométrica do projeto 3D do controle remoto.	54
42	Controle remoto finalizado.	54
43	<i>Rover</i> montado e com as rodas do <i>bogie</i> esterçadas conforme Diagrama de Ackermmann.	57
44	Ensaio do <i>rover</i> em ambiente relevante.	59
45	Ensaio do <i>rover</i> em terrenos inclinados.	59

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 Resumo dos materiais, componentes e processos adotados.	17
2 Parâmetros gerais para cálculo do mecanismo <i>rocker-bogie</i>	19
3 Propriedades do material utilizado na simulação.	20
4 Resumo dos procedimentos experimentais.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NASA	–	Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço dos Estados Unidos
AENC	–	Administração Espacial Nacional da China
CAD	–	Desenho Assistido por Computador
CAM	–	Fabricação Assistida por Computador
ESA	–	Agência Espacial Europeia
2D	–	Duas dimensões
3D	–	Três dimensões
PLA	–	Ácido poliláctico
FDM	–	Modelagem por Deposição Fundida
TIG	–	Gás Inerte de Tungstênio
MIG	–	Gás Inerte de Metal
GHz	–	Giga Hertz
WEDM	–	Eletroerosão a Fio
SAE	–	Sociedade Internacional de Engenheiros Automotivos
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	–	Norma Brasileira
ASTM	–	Sociedade Americana de Testes e Materiais
ANSI	–	Instituto Nacional Americano de Padrões
ADC	–	Conversor Analógico-Digital
BLE	–	Bluetooth de Baixo Consumo de Energia
FHSS	–	Espectro Expandido por Salto de Frequência
I2C	–	Interface de Circuito Integrado
ISM	–	Banda Industrial, Científica e Médica
RX	–	Receptor
SPI	–	Interface Serial Periférica
TX	–	Transmissor
UART	–	Receptor-Transmissor Assíncrono Universal
GEE	–	Gases de Efeito Estufa
PWM	–	Modulação por Largura de Pulso
CC	–	Corrente Contínua
LED	–	Diodo Emissor de Luz
TBJ	–	Transistor Bipolar de Junção
RF	–	Rádio Frequência
GFSK	–	Chaveamento por Deslocamento de Frequência Gaussiano
CRC	–	Verificação de Redundância Cíclica
CNC	–	Controle Numérico Computadorizado
MDF	–	Painel de Fibra de Densidade Média
PVC	–	Policloreto de Vinila
PCB	–	Placa de Circuito Impresso

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Conceito e Aplicações de <i>Rovers</i>	3
2.1.1 Mecanismo <i>Rocker-Bogie</i>	5
2.2 Materiais e Componentes Estruturais	6
2.2.1 Perfis de Alumínio Extrudado	6
2.2.2 Aço SAE 1020	7
2.3 Processos de Fabricação	8
2.3.1 Usinagem e Corte	8
2.3.2 Impressão 3D	8
2.3.3 Soldagem	8
2.3.4 Ferramentas CAD e CAM	9
2.4 Sistemas Mecânicos e Transmissão	9
2.4.1 Geometria de Ackermann	10
2.4.2 Sistemas de Redução e Transmissão de Torque	12
2.5 Sistemas Elétricos e de Controle	12
2.5.1 Baterias Estacionárias de Chumbo-Ácido	13
2.5.2 Motores de Passo	13
2.5.3 Microcontrolador ESP32	14
2.5.4 Módulo de Comunicação NRF24L01	15
2.6 Energia Solar Fotovoltaica e Conversores CC-CC	16
2.7 Resumo dos Principais Materiais, Componentes e Processos	17
2.8 Considerações Finais	18
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	19
3.1 Projeto do Mecanismo <i>Rocker-Bogie</i>	19
3.1.1 Cálculo Dimensional do Mecanismo <i>Rocker-Bogie</i>	19
3.1.2 Metodologia para Simulação Estrutural	20
3.2 Implementação do Sistema de Direção com Geometria de Ackermann	20
3.3 Modelagem 3D do <i>Rover</i>	22

3.3.1	Grupos Rígidos	22
3.3.2	Partes Móveis	24
3.3.3	Modelagem da Barra de Torção	26
3.3.4	Modelagem das Rodas e Sistema de Redução	27
3.4	Projeto Eletrônico do <i>Rover</i>	29
3.4.1	Ciclo de Controle do Sistema	29
3.4.2	Circuito <i>Driver</i> do Relé	29
3.4.3	Integração dos Dispositivos Periféricos	30
3.4.4	Projeto do Rádio Controle	31
3.4.5	Projeto do Sistema de Alimentação	32
3.5	Processos de Fabricação	32
3.5.1	Corte a Laser de Chapas	32
3.5.2	Usinagem dos Eixos	33
3.5.3	Soldagem dos Eixos nas Chapas de Fixação	34
3.5.4	Pintura Eletrostática das Chapas de Fixação	34
3.5.5	Fabricação das Engrenagens Movidas	35
3.5.6	Corte dos Perfis de Alumínio	35
3.5.7	Fabricação de Compartimentos e Gavetas	36
3.5.8	Impressão 3D de Componentes	36
3.6	Ensaio de Validação do <i>Rover</i>	36
3.6.1	Ensaio de Direcionalidade do <i>Rover</i>	36
3.6.2	Ensaio de Rodagem em Ambiente Relevante	37
3.6.3	Ensaio em Superfícies Inclinadas	37
3.6.4	Ensaio de Validação do Sistema de Geometria de Ackermann	38
3.6.5	Resumo dos Procedimentos	39
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES		40
4.1	Simulações Estruturais	40
4.1.1	Deformação Estrutural	40
4.1.2	Distribuição dos Esforços de Compressão e Tração	41
4.1.3	Análise das simulações estruturais	42
4.2	Fabricação Mecânica do <i>Rover</i>	42
4.2.1	Corte a Laser das Chapas de União	42
4.2.2	Usinagem dos Eixos	43
4.2.3	Soldagem dos Eixos às Chapas de União	44
4.2.4	Tratamento Superficial: Pintura Eletrostática	45
4.2.5	Fabricação das Engrenagens Movidas	45
4.2.6	Corte dos Perfis Estruturais de Alumínio	45
4.2.7	Análise da Fabricação Mecânica	46

4.3	Montagem do <i>Rover</i>	46
4.3.1	Análise da Montagem do <i>Rover</i>	48
4.4	Sistema Elétrico do <i>Rover</i>	49
4.4.1	Placa de Circuito Impresso do Controlador do <i>Rover</i>	50
4.4.2	Controle Remoto	53
4.4.3	Análise do sistema elétrico desenvolvido	55
4.5	Ensaio de Validação Inicial do <i>Rover</i>	55
4.5.0.1	Ensaio de Direcionalidade do <i>Rover</i>	55
4.5.1	Implementação e Ensaio da Geometria de Ackermann	56
4.5.2	Ensaio de Percurso em Ambiente Relevante	58
4.5.2.1	Ensaio em Superfícies Inclinadas	59
4.5.3	Análise dos Ensaio de Validação	60
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES		61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64
CAPÍTULO APÊNDICE A - DETALHAMENTOS E DIAGRAMAS		69
A.1	Corte e Detalhamento das Engrenagens Movidas	70
A.2	Detalhamento dos Conectores de Perfis 1 de 2	71
A.3	Detalhamento dos Conectores de Perfis 2 de 2	75
A.4	Detalhamento dos Eixos	78
A.5	Perfis 30x30 para Montagem do <i>Rocker-Bogie</i> e Dimensões	79
A.6	Plano de Corte da Carenagem e Compartimentos	80
A.7	Plano de Corte dos Conectores de Perfis 20x20 e 30x30	83
A.8	Diagrama Elétrico	85
A.9	Diagrama Esquemático da Placa de Circuito Impresso da Controladora Principal do <i>Rover</i>	86
A.10	Materiais Utilizados	87
A.11	Memorial de Cálculo do Mecanismo <i>Rocker-Bogie</i>	88
A.12	Código-Fonte do Microcontrolador Receptor (<i>Rover</i>)	90
A.12.1	Código Principal	90
A.12.2	Código auxiliar, controle dos motores	92
A.12.3	Código auxiliar, comunicação	96
A.13	Código-Fonte do Microcontrolador Transmissor (Controle Remoto)	98
A.13.1	Código Principal	98

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A robótica tem transformado profundamente o modo como interagimos com o ambiente, oferecendo soluções inovadoras que atendem a setores tão diversos quanto a exploração espacial, a agricultura de precisão e o monitoramento de ambientes desafiadores. Entre as tecnologias mais bem-sucedidas nesse campo, destaca-se o *mecanismo rocker-bogie*, amplamente reconhecido por sua robustez e eficiência ao superar terrenos irregulares e obstáculos complexos. Originalmente concebido para missões espaciais lideradas por agências como a *NASA* e a *Administração Espacial Nacional da China (AENC)*, o sistema consolidou sua eficácia em cenários adversos, como a superfície de Marte, apresentando grande potencial para aplicações em contextos terrestres.

Veículos exploratórios como os *rovers* Sojourner, Spirit e Opportunity são exemplos marcantes do sucesso do mecanismo *rocker-bogie*, garantindo locomoção estável em superfícies rochosas e acidentadas. Mais recentemente, o *rover* Perseverance, com a integração de tecnologias avançadas de automação e controle, ampliou os padrões de desempenho e autonomia operacional (NASA, 2024; SANDBHOR SANKET KACHALE, 2024). No entanto, o uso desse sistema não está restrito ao contexto espacial: projetos como o *Pesti-Bot*, voltado para tarefas agrícolas automatizadas, e o *Scarab*, desenvolvido para exploração de crateras, reforçam a versatilidade dessa solução (S BHOOPESH D, 2021; WETTERGREEN et al., 2009).

Apesar de seu potencial, a aplicação do mecanismo *rocker-bogie* em cenários terrestres ainda enfrenta desafios significativos. Na agricultura, por exemplo, maquinários convencionais apresentam limitações de eficiência e estabilidade em terrenos irregulares, agravadas por elevados custos energéticos e operacionais. Além disso, há uma lacuna na integração de sistemas de mobilidade robustos com soluções sustentáveis de geração de energia, como os sistemas baseados em fontes solares. Diante dessas limitações, emerge a necessidade de desenvolver um veículo não tripulado que alie robustez estrutural, eficiência energética e capacidade de navegação em solos irregulares.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um veículo 6x6, controlado remotamente e equipado com o mecanismo *rocker-bogie*, capaz de operar de forma estável e eficiente em terrenos irregulares. A proposta envolve a concepção e modelagem técnica do veículo, a construção de sistemas mecânicos e eletrônicos integrados, e a implementação de um sistema de alimentação por energia solar para garantir eficiência energética. A validação experimental será realizada em laboratório e em campo, com a análise do desempenho em termos de estabilidade, eficiência energética e mobilidade em diferentes condições de terreno.

A relevância deste estudo reside na necessidade de soluções tecnológicas que combinem automação avançada, sustentabilidade energética e desempenho operacional em contextos desafiadores, como na agricultura de precisão. A locomoção eficiente em solos irregulares continua sendo um obstáculo significativo para o uso de maquinários tradicionais, enquanto o mecanismo *rocker-bogie* oferece uma alternativa robusta e comprovada para resolver essa questão. A integração de um sistema de energia solar, por sua vez, apresenta uma abordagem sustentável e economicamente viável, alinhada com as crescentes demandas por tecnologias de baixo impacto ambiental.

Portanto, o presente estudo busca contribuir para o desenvolvimento de veículos não tripulados eficientes e sustentáveis, apresentando uma solução inovadora que alia robustez mecânica e eficiência energética. Espera-se que os resultados deste trabalho validem a aplicabilidade do mecanismo *rocker-bogie* em cenários terrestres, ampliando suas possibilidades de uso em aplicações como a automação agrícola e o monitoramento de áreas de difícil acesso. Além disso, a proposta oferece uma base sólida para futuras inovações tecnológicas, com impacto tanto na pesquisa científica quanto na solução de problemas práticos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do *rover*, abordando os conceitos essenciais, tecnologias aplicadas e soluções adotadas. Serão discutidos os princípios de funcionamento dos *rovers*, os materiais e componentes estruturais utilizados, os processos de fabricação envolvidos, os sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos, além das estratégias para garantir eficiência energética e sustentabilidade. Esse embasamento teórico é fundamental para compreender as escolhas técnicas realizadas ao longo do projeto.

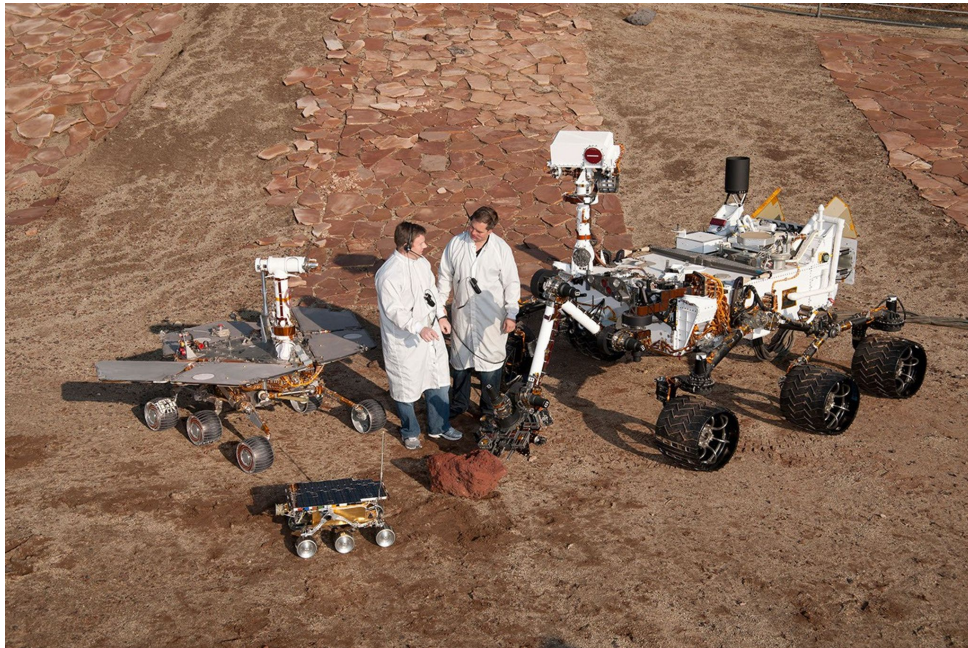
2.1 Conceito e Aplicações de *Rovers*

Os *rovers* são veículos projetados para operar em ambientes adversos, como superfícies planetárias, desempenhando um papel essencial na coleta de dados científicos em locais de difícil acesso. Desde as primeiras missões lunares da NASA, esses veículos evoluíram com a integração de tecnologias avançadas, como sistemas de suspensão adaptativos e análise local (SERAJI, 1999; KAKDE; CHOUDHARY, 2023).

O sistema *rocker-bogie*, amplamente utilizado em missões da NASA como o Mars Pathfinder e Perseverance, destaca-se por sua capacidade de manter as rodas em contato com o solo em terrenos irregulares, garantindo estabilidade e superação de obstáculos sem a necessidade de molas (SANDBHOR SANKET KACHALE, 2024; KAKDE; CHOUDHARY, 2023). Esse sistema também encontra aplicações em contextos terrestres, como na agricultura de precisão, onde os *rovers* automatizam tarefas como monitoramento de solos e pulverização de culturas, aumentando a eficiência e a produtividade (G. HARSHIT RAI, 2023; S BHOOPESH D, 2021).

A Figura 1 apresenta a evolução dos principais *rovers* desenvolvidos pela NASA, evidenciando a progressão tecnológica ao longo das décadas. No centro, destaca-se o Sojourner, que pousou em Marte em 1997, seguido pelo Spirit e Opportunity (2004), e pelo Curiosity (2012), representado à direita (NASA, 2024).

Figura 1 - Protótipos de *rovers* de exploração da NASA.



Fonte: [NASA \(2024\)](#).

Além das aplicações espaciais, os *rovers* têm sido amplamente utilizados na agricultura de precisão, automatizando tarefas como monitoramento de solos, plantio e pulverização, o que aumenta a eficiência e reduz a necessidade de mão de obra. O sistema *rocker-bogie* apresenta vantagens significativas, como maior estabilidade em terrenos irregulares, eficiência energética e adaptação a tarefas repetitivas, melhorando a produtividade agrícola (KAKDE; CHOUDHARY, 2023; SANDBHOR SANKET KACHALE, 2024; G. HARSHIT RAI, 2023; S BHOOPESH D, 2021).

Outros projetos exemplificam a versatilidade dos *rovers*. O *Scarab*, por exemplo, utiliza suspensões ajustáveis para exploração de crateras lunares com navegação em baixa luminosidade, enquanto veículos biomiméticos como os *Tumbleweeds*, movidos a vento, são capazes de explorar grandes áreas com eficiência energética (WETTERGREEN et al., 2009; HAJOS et al., 2005). Já o *Pesti-Bot*, que integra um sistema rotativo ao mecanismo *rocker-bogie*, demonstra a aplicação de tecnologias robóticas avançadas no setor agrícola, otimizando a acessibilidade e sustentabilidade em operações de campo (S BHOOPESH D, 2021; VAIDHYANATHAN LOKESH T, 2023).

Esses avanços reforçam a importância dos *rovers* em diferentes cenários, evidenciando sua aplicação em ambientes extremos e em contextos cotidianos, como a agricultura,

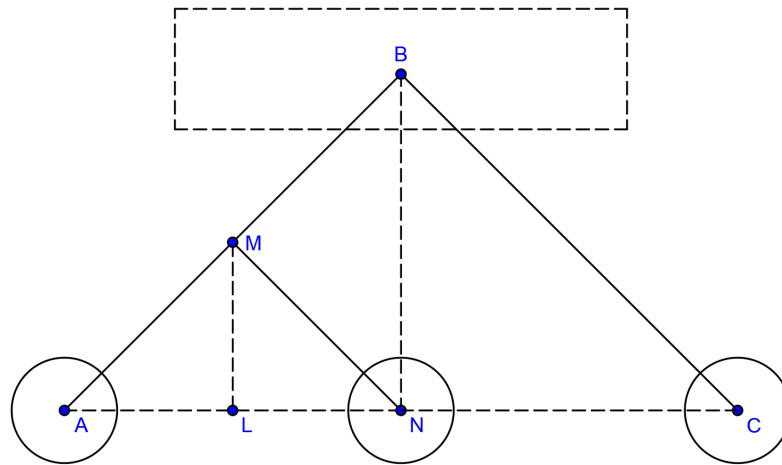
onde tecnologias robóticas são fundamentais para atender às crescentes demandas por automação e eficiência.

2.1.1 Mecanismo *Rocker-Bogie*

O mecanismo *rocker-bogie* é amplamente utilizado em veículos exploratórios, como *rovers* espaciais, devido à sua capacidade de adaptação a terrenos irregulares. Sua configuração é composta por dois triângulos semelhantes, um denominado *rocker* e outro denominado *bogie*, conectados por um pivô central. Essa relação entre triângulos permite a distribuição uniforme da carga aplicada, proporcionando estabilidade ao veículo (KAKDE; CHOUDHARY, 2023).

No contexto deste projeto, o triângulo *bogie* possui arestas com metade do comprimento (módulo) das arestas do triângulo *rocker*, mantendo os mesmos ângulos internos. A representação geométrica do mecanismo pode ser observada na Figura 2, que ilustra a relação entre os dois triângulos.

Figura 2 - Representação esquemática do mecanismo *rocker-bogie*.



Essa base teórica é crucial para a definição dos parâmetros que governam o projeto, incluindo dimensões, ângulos e estabilidade mecânica.

O desenvolvimento dos *rovers*, especialmente em contextos como a exploração espacial e a agricultura de precisão, exige a utilização de materiais leves e resistentes que garantam o desempenho estrutural e a durabilidade do sistema. A seguir, serão apresentados os materiais e componentes estruturais selecionados para o projeto deste trabalho.

2.2 Materiais e Componentes Estruturais

A estrutura do *rover* utiliza perfis de alumínio extrudado (liga 6063-T5) e componentes em aço SAE 1020, selecionados pela combinação entre leveza, resistência mecânica e viabilidade econômica. O alumínio 6063-T5 apresenta alta ductilidade e resistência à corrosão, além de facilidade de usinagem e soldagem, características que o tornam ideal para estruturas modulares (JUNIOR, 2019; AL., 2023).

Para elementos submetidos a esforços moderados, como eixos e chapas de união, o aço SAE 1020 oferece boa tenacidade e excelente soldabilidade, garantindo confiabilidade estrutural e custo-benefício (BEJO et al., 2021; AZEVEDO et al., 2017).

2.2.1 Perfis de Alumínio Extrudado

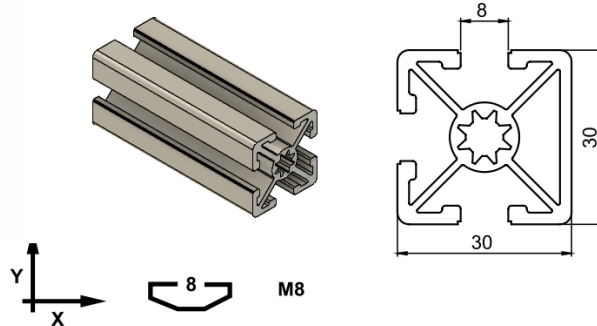
Os perfis de alumínio extrudado, especialmente os da liga 6063-T5, destacam-se por sua alta resistência, leveza e resistência à corrosão, características fundamentais para estruturas modulares. Sua aplicação é frequente em setores como a construção civil e o transporte, devido à facilidade de usinagem, corte e soldagem, bem como à ampla disponibilidade no mercado (JUNIOR, 2019; AL., 2023; THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2009).

A liga 6063-T5 apresenta excelente ductilidade e resistência específica, com acabamento superficial de alta qualidade, facilitando processos de fabricação e montagem. Sua composição química, contendo magnésio e silício, passa por envelhecimento artificial, resultando na formação de partículas Mg_2Si , responsáveis pelo aumento da dureza e resistência. Normas técnicas, como a ABNT NBR 8116 e as especificações ANSI H35.2(M), garantem a padronização e a confiabilidade de suas propriedades mecânicas e dimensionais (SILVA; PERERA, 2020; BARSOUM; KHAN, 2014; THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2009).

O perfil de alumínio extrudado do tipo *v-slot* 30x30 mm, ilustrado na Figura 3, é amplamente utilizado na construção modular devido à sua resistência e facilidade de montagem.

Figura 3 - Perfil de alumínio extrudado v-slot 30x30 mm.

30x30 M8 3R



30x30 M8 2R Ø44

Fonte: Adaptado de [FAMAK \(2015\)](#).

2.2.2 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 foi escolhido para a fabricação de eixos e chapas de união dos perfis de alumínio, devido ao seu baixo custo e propriedades mecânicas adequadas para aplicações com esforços moderados. Classificado como um aço de baixo carbono, com teor inferior a 0,25%, ele oferece alta ductilidade, tenacidade e excelente soldabilidade, sendo amplamente utilizado em processos de conformação e soldagem ([BEJO et al., 2021](#)).

Sua composição homogênea favorece operações de usinagem eficiente, com baixo desgaste de ferramentas e otimização do tempo produtivo ([ANJOS, 2022](#)). Essa combinação de resistência mecânica e viabilidade econômica torna o SAE 1020 ideal para componentes estruturais que requerem confiabilidade com custos controlados ([AZEVEDO et al., 2017](#)).

Além disso, o aço SAE 1020 se destaca em processos de soldagem, como TIG, garantindo qualidade nas juntas e confiabilidade estrutural ([BEJO et al., 2021](#)). Dessa forma, o uso deste material proporciona um equilíbrio entre desempenho técnico e custo, consolidando sua aplicabilidade em projetos industriais diversos ([JUNIOR et al., 2018](#)).

A escolha dos materiais, como o alumínio 6063-T5 e o aço SAE 1020, requer processos de fabricação precisos e eficientes para garantir a qualidade dos componentes estruturais. A próxima seção detalha os métodos de fabricação empregados na construção do *rover*.

2.3 Processos de Fabricação

Os processos de fabricação aplicados na construção do *rover* devem ser selecionados para garantir precisão, eficiência e adaptabilidade em componentes modulares e complexos. Técnicas como usinagem de precisão, impressão 3D e soldagem são integradas, aliadas ao uso de ferramentas CAD/CAM, assegurando a qualidade e o desempenho estrutural do sistema.

2.3.1 Usinagem e Corte

A usinagem e o corte são amplamente utilizados para obter peças com alta precisão dimensional e acabamento de qualidade. Técnicas como o torno mecânico e o corte a laser permitem trabalhar com materiais como chapas metálicas, polímeros e madeira, garantindo eficiência e minimizando desperdícios de material (MOURALOVA et al., 2020; NAGIMOVA; PERVEEN, 2019).

A eletroerosão a fio (WEDM) destaca-se na usinagem de materiais duros e componentes complexos. Utilizando fios de molibdênio, essa técnica oferece acabamento superficial refinado e tolerâncias rigorosas, sendo essencial para peças críticas em sistemas robóticos (MOURALOVA et al., 2020). Quando combinadas a ferramentas CAD e CAM, essas tecnologias tornam o processo de fabricação mais econômico e confiável, especialmente em aplicações como sistemas de movimentação de *rovers* (DAS; JOSHI, 2021).

2.3.2 Impressão 3D

A impressão 3D com polímero PLA (ácido polilático) é uma solução eficiente e sustentável para prototipagem e produção em pequena escala. O PLA, derivado de fontes renováveis como o amido de milho, apresenta boas propriedades mecânicas e alta compatibilidade com a tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM) (AL., 2017; RAJPUROHIT; DAVE, 2018).

O controle de parâmetros, como espessura da camada e padrão de preenchimento, permite otimizar a resistência estrutural das peças. Para aplicações mecânicas exigentes, ajustes na densidade de preenchimento e na orientação das camadas melhoram a rigidez e reduzem deformações sob carga elevada (RAJPUROHIT; DAVE, 2018; AL., 2015). Além disso, a impressão 3D promove sustentabilidade, pois minimiza desperdícios de material, consolidando-se como uma tecnologia central em projetos modernos.

2.3.3 Soldagem

A soldagem é um processo crucial na montagem de estruturas metálicas do *rover*. Técnicas como a soldagem TIG e a MIG são amplamente utilizadas devido à sua estabili-

dade e adaptabilidade a diferentes materiais e espessuras (SCHWEDERSKY et al., 2011; BARRA, 2008).

O processo TIG é especialmente eficaz para metais não ferrosos, garantindo alta precisão e qualidade nas juntas soldadas. Por outro lado, a soldagem MIG destaca-se pela produtividade elevada, sendo ideal para aplicações que requerem eficiência em tempo e custo. A escolha adequada dos gases de proteção, como misturas de argônio e hidrogênio, otimiza o desempenho, reduzindo defeitos e garantindo a resistência estrutural das peças (SCHWEDERSKY et al., 2011).

2.3.4 Ferramentas CAD e CAM

A integração de ferramentas CAD (Desenho Assistido por Computador) e CAM (Manufatura Assistida por Computador) proporciona eficiência no desenvolvimento e fabricação de sistemas complexos. *Softwares* como o Fusion360 permitem a modelagem tri-dimensional, simulações estruturais e o planejamento da fabricação, facilitando a análise e correção de falhas antes da produção (SONG et al., 2018; SAORÍN et al., 2019).

O Fusion360, com sua plataforma baseada em nuvem, facilita a colaboração remota e a integração com processos como o corte a laser e a impressão 3D. No desenvolvimento de sistemas como o *rocker-bogie*, ferramentas de análise estrutural permitem estudar a distribuição de cargas e a estabilidade mecânica, garantindo melhor desempenho do sistema (SONG et al., 2018; AMORIM; FRANÇA, 2017).

Além disso, o uso de softwares específicos, como o FTOOL, auxilia na análise estrutural interativa de sistemas mecânicos. O FTOOL permite simular estruturas planas submetidas a diferentes condições de carga, fornecendo informações sobre forças internas e deformações estruturais (MARTHA; RANGEL, 2022; SHIMABUKURO; OLIVEIRA, 2020). Essa análise é essencial para otimizar o projeto de estruturas sujeitas a condições operacionais exigentes, como as enfrentadas pelos *rovers*.

Os processos de fabricação apresentados permitem a construção de componentes essenciais para os sistemas mecânicos, como engrenagens e estruturas de suporte. A seguir, serão discutidos os sistemas de transmissão e geometria de direção, que desempenham um papel central na mobilidade e desempenho do *rover*.

2.4 Sistemas Mecânicos e Transmissão

Os sistemas mecânicos desempenham um papel central no desenvolvimento de veículos projetados para operar em terrenos irregulares, como os *rovers*. Entre as principais soluções adotadas, destacam-se a geometria de Ackermann, responsável por otimizar a dinâmica de direção, e os sistemas de redução e transmissão de torque, fundamentais para

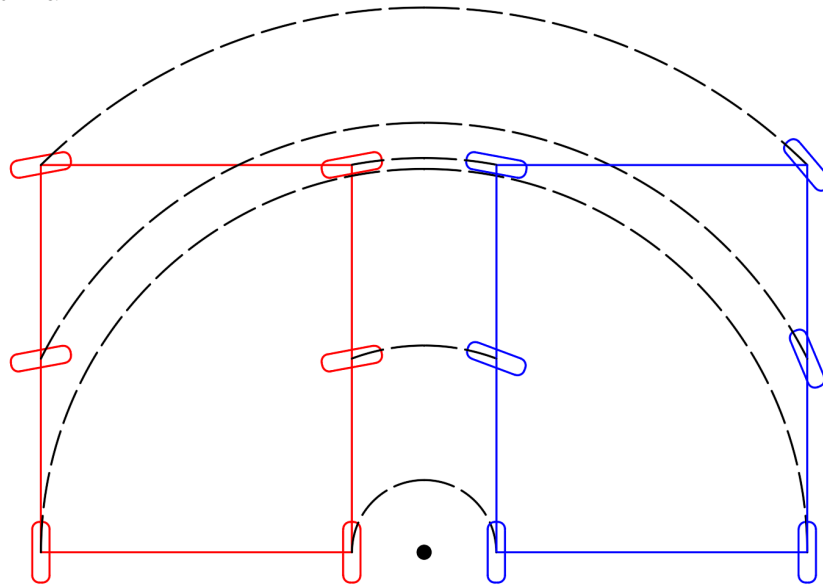
garantir eficiência e precisão no movimento.

2.4.1 Geometria de Ackermann

A geometria de Ackermann é um princípio amplamente utilizado em sistemas de direção com o objetivo de minimizar o desgaste dos pneus, reduzir o atrito e melhorar a estabilidade do veículo durante a realização de curvas. Esse conceito ajusta os ângulos de esterçamento das rodas internas e externas, assegurando que percorram trajetórias com raios distintos e concentrem-se em um ponto comum de convergência. Ao evitar deslizamentos laterais, a aplicação correta desse modelo otimiza a eficiência energética e proporciona maior precisão em manobras, especialmente em curvas fechadas (ZHAO XIANG LIU; DAI, 2013; CHOI JUN SEOK PARK; LEE, 2008).

Durante uma curva, as rodas internas percorrem um caminho com raio menor em comparação às rodas externas. Dessa forma, para que todas as rodas sigam trajetórias concêntricas, os ângulos de esterçamento devem ser calculados e ajustados conforme a distância entre os eixos e o raio de curvatura desejado. A Figura 4 ilustra a diferença entre sistemas de direção com e sem a aplicação da geometria de Ackermann.

Figura 4 - Comparação entre sistemas de direção sem (esquerda) e com (direita) a geometria de Ackermann.



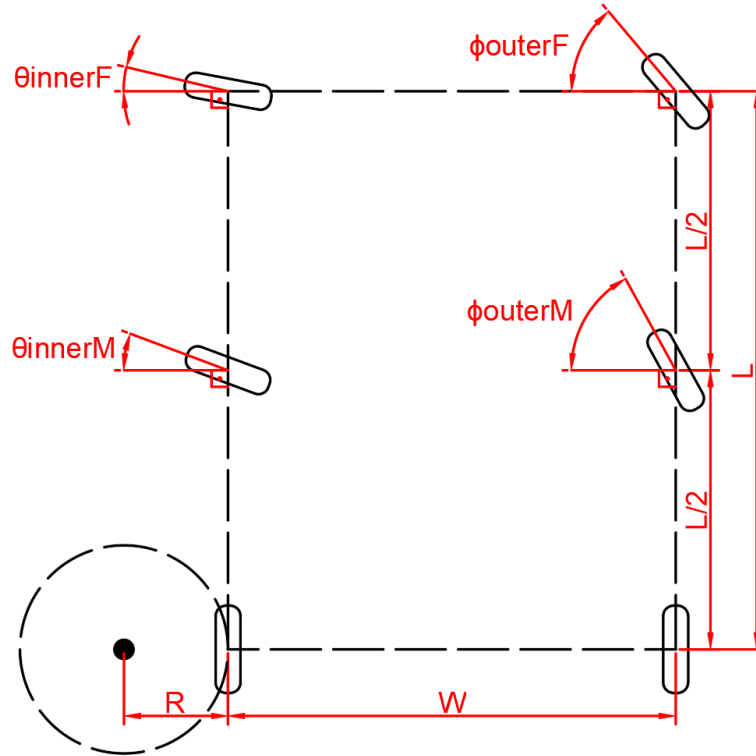
Em veículos com configurações de tração 6x6, como o *rover* desenvolvido neste trabalho, a implementação da geometria de Ackermann assume papel ainda mais relevante devido à complexidade de distribuição das forças ao longo dos eixos. A correta

coordenação dos ângulos de esterçamento melhora a manobrabilidade e reduz os esforços mecânicos no sistema de direção. Estudos e simulações com veículos industriais, como o FABOT, evidenciam que a combinação desse modelo com controles eletrônicos resulta em maior precisão, especialmente em terrenos irregulares ou ambientes confinados (CHOI JUN SEOK PARK; LEE, 2008; MITCHELL; SCOTT, 2006).

O controle coordenado dos ângulos de esterçamento é viabilizado por sensores de posição e atuadores eletrônicos, que ajustam os movimentos em tempo real. Essa abordagem garante que todas as rodas sigam suas respectivas trajetórias concêntricas com precisão (ZHAO XIANG LIU; DAI, 2013). Além disso, a integração de diferenciais eletrônicos permite a distribuição dinâmica do torque entre as rodas, otimizando a tração em superfícies adversas e reduzindo os esforços mecânicos no sistema (ZHAO XIANG LIU; DAI, 2013; MITCHELL; SCOTT, 2006).

Na prática, a geometria de Ackermann pode ser representada conforme o diagrama ilustrado na Figura 5. As linhas perpendiculares às rodas se encontram no ponto central da curva, garantindo que todas as rodas estejam alinhadas com a trajetória ideal.

Figura 5 - Representação gráfica da geometria de Ackermann.



A combinação entre geometria de Ackermann, sensores eletrônicos e algoritmos de

controle proporciona uma solução robusta para o sistema de direção, atendendo aos requisitos de eficiência, estabilidade e manobrabilidade. Em particular, em veículos destinados a aplicações em terrenos adversos, como o *rover* proposto, a implementação dessa técnica é essencial para assegurar o desempenho ideal do sistema.

2.4.2 Sistemas de Redução e Transmissão de Torque

O sistema de redução e transmissão de torque é essencial para adaptar a rotação e a força fornecida por um motor às necessidades específicas do veículo, garantindo o movimento controlado e eficiente. Esse sistema atua por meio de redutores mecânicos, compostos principalmente por engrenagens, que realizam a conversão entre velocidade angular e torque mecânico. Segundo [Budynas e Nisbeth \(2016\)](#), o torque é amplificado quando a velocidade do motor é reduzida, obedecendo à relação inversamente proporcional entre essas duas grandezas.

No caso de veículos, como os *rovers*, as engrenagens desempenham papel central na transmissão de potência. Engrenagens de redução, dispostas em pares, transferem o movimento rotacional do motor para as rodas, reduzindo a velocidade de saída e aumentando o torque. Essa transmissão ocorre através do contato entre os dentes das engrenagens, que realizam uma troca eficiente de forças, com perdas mínimas por atrito.

A relação de transmissão é definida pela razão entre o número de dentes das engrenagens motora e movida. Quando a engrenagem motora possui menos dentes que a engrenagem movida, ocorre uma redução de velocidade e um consequente aumento do torque. Essa característica é fundamental para aplicações que demandam elevada força de tração em velocidades baixas, como a locomoção em terrenos irregulares. Além disso, engrenagens fabricadas com materiais como aço SAE 1020, submetidos a tratamentos térmicos, oferecem maior resistência ao desgaste e durabilidade, garantindo o bom desempenho do sistema de transmissão ([BUDYNAS; NISBETH, 2016](#)).

A eficiência dos sistemas mecânicos, como a geometria de Ackermann e os mecanismos de transmissão de torque, depende da integração com sistemas elétricos e eletrônicos que garantem o controle preciso e a automação do movimento. A próxima seção aborda os sistemas necessários para o funcionamento do *rover*.

2.5 Sistemas Elétricos e de Controle

Os sistemas elétricos, eletrônicos e de controle são fundamentais para a operação eficiente de veículos controlados remotamente, integrando armazenamento de energia, processamento, acionamento e comunicação sem fio. Os principais componentes envolvidos incluem baterias estacionárias, motores de passo, microcontroladores e módulos de

comunicação, garantindo o funcionamento preciso do veículo em ambientes adversos.

2.5.1 Baterias Estacionárias de Chumbo-Ácido

As baterias estacionárias de chumbo-ácido são amplamente utilizadas em sistemas que exigem armazenamento confiável de energia devido ao seu baixo custo, robustez e maturidade tecnológica (ANDRADE, 2014; LOPES, 2017; FERREIRA, 2023). Compostas por eletrodos de chumbo e dióxido de chumbo imersos em ácido sulfúrico, essas baterias oferecem ciclos repetidos de carga e descarga, sendo adequadas para projetos com alta demanda de estabilidade energética (AL., 2017). A Figura 6 demonstra como se parece uma bateria estacionária de chumbo-ácido.

Figura 6 - Bateria estacionária de chumbo-ácido.



Fonte: Freedom by Heliar (2024).

Apesar de apresentarem menor densidade energética em comparação a baterias de íon-lítio, as baterias de chumbo-ácido se destacam pela confiabilidade e facilidade de reciclagem, com até 99% de seus componentes reutilizáveis, tornando-se uma opção sustentável (FERREIRA, 2023). Sua escolha para este projeto justifica-se pelo custo-benefício e pela capacidade de fornecer energia contínua e robusta para sistemas embarcados.

2.5.2 Motores de Passo

Os motores de passo são amplamente utilizados em aplicações que exigem controle preciso de posição e velocidade. Seu funcionamento baseia-se na excitação sequencial de enrolamentos no estator, gerando campos magnéticos que posicionam o rotor em incrementos angulares definidos (ACARNLEY, 2002). Motores de passo híbridos, por exemplo,

combinam ímãs permanentes com enrolamentos no estator, oferecendo maior torque de retenção e menor ângulo de passo, características essenciais para aplicações de alta precisão (ATHANI, 1997).

Neste projeto, os motores de passo são responsáveis pelo controle preciso de movimento do *rover*, permitindo torque constante em baixas velocidades sem necessidade de *feedback* contínuo. Sua operação em malha aberta simplifica o sistema de controle, reduzindo custos e complexidade (NISE, 2015). Além disso, a ausência de escovas e comutadores garante maior durabilidade e eficiência operacional em ambientes adversos (ATHANI, 1997; MINH et al., 2025). A Figura 7 demonstra a aparência de motor de passo do tipo NEMA23.

Figura 7 - Motor de passo NEMA23.



Fonte: Forseti Soluções (2024).

2.5.3 Microcontrolador ESP32

O microcontrolador ESP32, desenvolvido pela *Espressif Systems*, é uma solução de alto desempenho para aplicações de automação e controle devido à sua arquitetura de dois núcleos Tensilica Xtensa LX6. Essa característica permite a execução simultânea de múltiplas tarefas, como leitura de sensores e processamento de comunicação sem fio (VINOD et al., 2024).

O ESP32 integra conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth* com baixo consumo de energia, incluindo suporte para os protocolos BLE e *Wi-Fi Direct*, possibilitando comunicação eficiente em tempo real (POTHIRASAN; RAJASEKARAN, 2016). Modos de operação de baixo consumo, como *Deep-Sleep*, reduzem significativamente a demanda energética, tornando-o ideal para sistemas embarcados que necessitam de autonomia prolongada (SUJIWA; SUHADATA, 2023).

A combinação entre processamento em tempo real, conectividade *wireless* e ampla variedade de periféricos, como conversores ADC de 12 bits e interfaces SPI e I2C, assegura a confiabilidade do controle do *rover* em aplicações remotas e automatizadas (HU et al., 2017). A Figura 8 demonstra a aparência de um microcontrolador Espressif Esp32.

Figura 8 - Microcontrolador Espressif Esp32.



Fonte: Mouser Electronics (2024).

2.5.4 Módulo de Comunicação NRF24L01

O módulo NRF24L01 é um transceptor de Rádio Frequência (RF) que opera na faixa ISM de 2,4 GHz, destacando-se pelo baixo consumo de energia e alta confiabilidade na comunicação sem fio. Utilizando o protocolo *Enhanced ShockBurst*, o módulo suporta pacotes de até 32 bytes, garantindo transmissão eficiente e integridade dos dados (YU-ANSHENG; XI, 2010).

Sua taxa de transmissão pode atingir até 2 Mbps, com consumo de apenas 11,3mA em modo de transmissão, sendo uma opção eficiente para sistemas alimentados por baterias (CHRIST et al., 2011). A interface SPI facilita a integração com microcontroladores, como o ESP32, permitindo a operação em redes mestre-escravo, onde um transmissor pode se comunicar com múltiplos receptores (HU et al., 2017).

Além disso, o NRF24L01 incorpora técnicas como o Espectro Expandido por Salto de Frequência (FHSS), que minimiza interferências e melhora a robustez da comunicação em ambientes adversos (MAHBUB, 2019). Essa capacidade é essencial para o controle remoto de veículos, assegurando uma transmissão confiável e de baixa latência em cenários desafiadores, como monitoramento agrícola e robótica móvel.

Os sistemas elétricos e eletrônicos apresentados são necessários para o controle e automação do *rover*. No entanto, garantir sua operação em ambientes remotos exige estratégias eficientes de geração e gestão de energia, como o uso de painéis fotovoltaicos e conversores CC-CC, tema discutido a seguir.

2.6 Energia Solar Fotovoltaica e Conversores CC-CC

A eficiência energética é um aspecto crucial para garantir a autonomia operacional do *rover*, especialmente em ambientes remotos. O sistema elétrico converte energia solar em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos, armazenando-a de forma eficiente em baterias estacionárias. Controladores de carga protegem o sistema contra sobrecargas, enquanto conversores CC-CC ajustam os níveis de tensão para alimentar os subsistemas do veículo (BIGGI, 2013; CAVALCANTE, 2024).

Os painéis fotovoltaicos representam a principal fonte de energia, convertendo a luz solar em eletricidade por meio de células solares agrupadas em módulos. Esses sistemas aumentam a capacidade de geração em termos de corrente e tensão, fornecendo energia limpa e contínua (BIGGI, 2013). Para gerenciar a energia gerada, utiliza-se um controlador de carga que protege contra sobrecarga e descarga excessiva, direcionando a eletricidade para os subsistemas do veículo, como motores e controladores eletrônicos (CAVALCANTE, 2024).

Adicionalmente, um conversor CC-CC do tipo *buck* ajusta os níveis de tensão, garantindo compatibilidade com os dispositivos embarcados, como servomotores e placas de controle. Através da modulação por largura de pulso (PWM), o conversor estabiliza a saída mesmo diante de variações na entrada, armazenando e liberando energia de forma controlada com auxílio de indutores e capacitores (REITER et al., 2024). Essa integração resulta em um sistema alinhado com os princípios de eficiência energética, especialmente relevante para veículos operando em locais remotos e isolados.

A transição para fontes renováveis, como a energia solar, tem ganhado destaque devido à necessidade de reduzir impactos ambientais e diversificar a matriz energética. A energia fotovoltaica é solução promissora, principalmente no Brasil, onde altos índices de irradiação solar oferecem um potencial significativo para geração de eletricidade limpa (JUNIOR et al., 2019; ALMEIDA et al., 2016).

A dependência de combustíveis fósseis é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas globais. Tecnologias sustentáveis, como os sistemas fotovoltaicos, apresentam soluções viáveis para reduzir esses efeitos ao substituir fontes não renováveis por alternativas limpas e eficientes (JUNIOR et al., 2019).

No contexto do *rover*, a integração de sistemas fotovoltaicos oferece vantagens como independência energética e redução dos custos operacionais. Isso é especialmente relevante em aplicações agrícolas e ambientes remotos, onde o acesso à rede elétrica convencional é limitado (ALMEIDA et al., 2016). Tecnologias como módulos de silício monocristalino e policristalino, reconhecidas por sua alta eficiência de conversão energética, ampliam a autonomia operacional do veículo e reforçam sua aplicabilidade em sistemas sustentáveis (ALMEIDA et al., 2016).

Projetos experimentais têm comprovado a viabilidade de veículos movidos exclusivamente por energia solar, apresentando ganhos significativos em eficiência e autonomia (PIOVANI et al., 2015). Apesar dos desafios iniciais, como custos de implementação e necessidade de incentivos, avanços contínuos indicam um cenário promissor para a integração entre veículos elétricos e fontes solares (JUNIOR et al., 2019).

Portanto, a adoção de tecnologias fotovoltaicas no *rover* não apenas promove um modelo sustentável e resiliente, mas também oferece benefícios econômicos e ambientais ao reduzir a dependência de fontes não renováveis. O *rover*, ao incorporar sistemas de energia limpa, posiciona-se como uma solução inovadora, eficiente e alinhada com as demandas contemporâneas de desenvolvimento sustentável.

2.7 Resumo dos Principais Materiais, Componentes e Processos

Para facilitar a revisão dos conceitos apresentados neste capítulo, a Tabela 1 sintetiza os principais materiais, componentes e processos de fabricação discutidos no desenvolvimento do *rover*.

Tabela 1 - Resumo dos materiais, componentes e processos adotados.

Categoria	Material/Componente	Características Principais
Materiais Estruturais	Alumínio 6063-T5	Leveza, resistência à corrosão e fácil usinagem
Materiais Estruturais	Aço SAE 1020	Tenacidade, soldabilidade e custo-benefício
Processos de Fabricação	Corte a laser	Precisão e minimização de perdas
Processos de Fabricação	Impressão 3D (PLA)	Sustentabilidade e prototipagem rápida
Componentes Elétricos	Bateria de chumbo-ácido	Baixo custo, robustez e alta confiabilidade
Componentes Eletrônicos	Microcontrolador ESP32	Conectividade <i>wireless</i> e baixo consumo

2.8 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos e tecnologias que fundamentam o desenvolvimento do *rover*. Inicialmente, discutiram-se os aspectos conceituais e as aplicações dos *rovers*, desde os avanços tecnológicos aplicados em missões espaciais até sua adaptação em contextos terrestres, com destaque para a agricultura de precisão.

Em seguida, foram abordados os materiais e processos de fabricação adotados, evidenciando a importância da escolha de ligas metálicas leves e resistentes, como o alumínio 6063-T5 e o aço SAE 1020, aliados a técnicas avançadas de fabricação, como usinagem de precisão, impressão 3D e soldagem. A integração de ferramentas CAD e CAM foi destacada como fundamental para otimizar o desenvolvimento e a análise estrutural do projeto.

Os sistemas mecânicos, elétricos e de controle foram discutidos em detalhes, ressaltando a importância da geometria de Ackermann e dos mecanismos de redução e transmissão de torque na otimização da mobilidade em terrenos irregulares. Além disso, os sistemas eletrônicos, como motores de passo, microcontroladores ESP32 e o módulo de comunicação NRF24L01, foram apresentados como soluções eficazes para garantir controle preciso e comunicação eficiente no veículo.

Por fim, abordaram-se as estratégias de eficiência energética, com ênfase na utilização de painéis fotovoltaicos, controladores de carga e conversores CC-CC, promovendo autonomia e eficiência ao sistema. A integração de tecnologias renováveis foi destacada como uma solução viável e inovadora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, especialmente em aplicações agrícolas.

Com os fundamentos apresentados neste capítulo, é possível compreender as escolhas técnicas e as tecnologias adotadas no desenvolvimento do *rover*, servindo como base para o detalhamento das etapas experimentais e de implementação apresentadas nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A primeira etapa do desenvolvimento consistiu na concepção inicial do *rover* por meio do mapeamento de todos os itens e componentes necessários para a construção. Foram levantados os materiais e equipamentos mecânicos, como motores de passo, perfis de alumínio extrudado (selecionados conforme a norma ABNT NBR 8116, baseada na ASTM ANSI H35.2-M), rolamentos, mancais e parafusos. Na parte elétrica e eletrônica, especificaram-se componentes como bateria de chumbo-ácido estacionária, cabos e dispositivos eletrônicos. Todos os itens estão detalhados na lista de materiais presente no Apêndice A.10.

3.1 Projeto do Mecanismo *Rocker-Bogie*

O desenvolvimento do mecanismo *rocker-bogie* foi dividido em duas etapas principais: o cálculo dimensional e a análise estrutural. O processo seguiu princípios geométricos e de engenharia, utilizando modelagem computacional para dimensionar e validar as propriedades mecânicas da estrutura.

3.1.1 Cálculo Dimensional do Mecanismo *Rocker-Bogie*

Os parâmetros iniciais do projeto foram definidos com base na literatura especializada (VERMA et al., 2017) e estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros gerais para cálculo do mecanismo *rocker-bogie*.

Parâmetro	Descrição	Módulo [mm]
Dr	Diâmetro da roda	210,00
Ct	Comprimento do mecanismo (segmento $ AC + Dr$)	1550,00
At	Altura total do mecanismo ($ BN $, 45°)	670,00
Aca	Altura da caixa central	240,00
Acp	Altura entre a base da caixa e o pivô do <i>rocker</i>	140,00

Com base nesses parâmetros, a estrutura foi projetada utilizando dois triângulos isósceles semelhantes com razão de 2:1, o que garante aproveitamento de material e estabilidade estrutural.

3.1.2 Metodologia para Simulação Estrutural

A simulação estrutural foi realizada para avaliar a resistência e a deformação do mecanismo sob carregamento estático. O modelo tridimensional foi gerado em software de modelagem 3D e analisado no software *Ftool*. A carga estática aplicada foi de 500 N, representando uma condição conservadora. As propriedades do material, liga de alumínio 6063 T5, estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades do material utilizado na simulação.

Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade (E)	69.000 N/mm ²
Resistência ao escoamento (σ_y)	276 MPa
Área da seção transversal (A)	347 mm ²
Coefficiente de Poisson	0,33

As condições de contorno incluíram restrições nos pontos de apoio da estrutura, simulando as interações reais do sistema com o solo. A análise gerou mapas de deformação e esforços, permitindo a avaliação dos deslocamentos máximos e dos segmentos mais solicitados.

3.2 Implementação do Sistema de Direção com Geometria de Ackermann

Durante o desenvolvimento do *rover*, foi identificado um problema relacionado à capacidade de realizar curvas de forma eficiente. Para resolver essa questão, implementou-se um sistema de esterçamento no *bogie*, baseado na geometria de Ackermann. O sistema foi acionado por servomotores controlados eletronicamente, permitindo ajustes dinâmicos nos ângulos de esterçamento das rodas.

A implementação consistiu no desenvolvimento de um algoritmo para o cálculo dos ângulos ideais de cada roda, com base nos parâmetros do raio de curvatura desejado (R) e nas dimensões do veículo. As equações utilizadas são as seguintes:

$$\phi_{\text{outerF}} = \tan^{-1} \left(\frac{L}{R + L} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

$$\theta_{\text{innerF}} = \tan^{-1} \left(\frac{L}{R} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

$$\phi_{\text{outerM}} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{L}{2}}{R + L} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

$$\theta_{\text{innerM}} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{L}{2}}{R} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

Onde: - ϕ_{outerF} e θ_{innerF} são os ângulos das rodas externas e internas do eixo dianteiro, respectivamente; - ϕ_{outerM} e θ_{innerM} são os ângulos das rodas externas e internas do eixo intermediário; - L é a distância entre os eixos traseiro e dianteiro; - R é o raio da curva desejada.

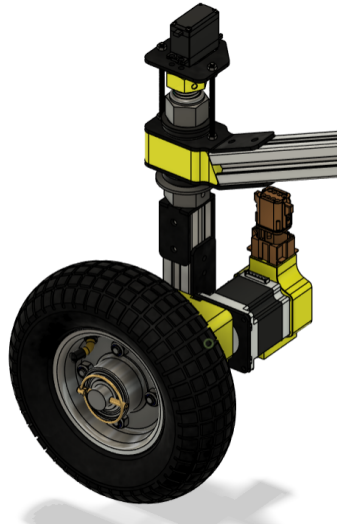
O sistema foi integrado ao microcontrolador principal, responsável por calcular os ângulos em tempo real e ajustar o posicionamento das rodas através de sinais PWM enviados aos servomotores. Adicionalmente, foi implementada uma redução dinâmica da velocidade dos motores das rodas internas à curva. Essa atenuação foi determinada pela relação:

$$\text{innerAtenuationFrequency} = \frac{R}{R + W} \quad (5)$$

onde W é a distância entre as rodas de um mesmo eixo.

A Figura 9 apresenta o sistema de esterçamento das rodas do *bogie* em fase de projeto.

Figura 9 - Sistema de esterçamento das rodas do *bogie*.



3.3 Modelagem 3D do *Rover*

Nesta seção, são apresentadas as etapas de modelagem 3D do *rover*. A modelagem técnica foi estruturada em dois sistemas principais: grupos rígidos e partes móveis. Esta abordagem metodológica foi fundamental para validar a funcionalidade, integração e precisão dimensional de cada componente antes da fabricação.

A modelagem tridimensional do *rover* foi realizada para definir a estrutura mecânica e seus componentes. A partir dos projetos individuais, cada parte foi organizada em grupos rígidos e partes móveis. A modelagem foi desenvolvida utilizando software CAD (*Computer-Aided Design*), permitindo a análise de interferências, alinhamento estrutural e integração mecânica.

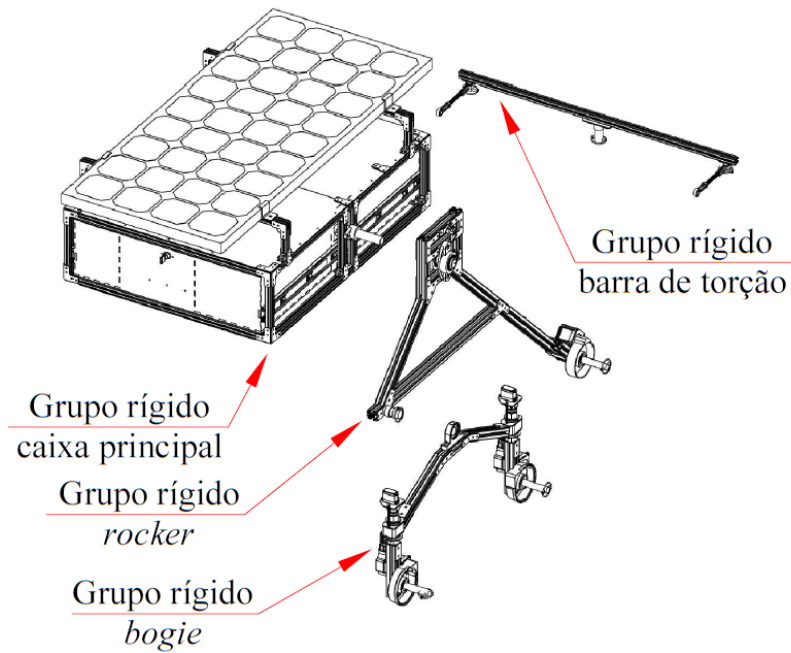
3.3.1 Grupos Rígidos

Os grupos rígidos compreendem os elementos estruturais fixos, responsáveis pela integridade e robustez do sistema. Os principais componentes incluem:

- Estrutura do *bogie*;
- Estrutura do *rocker*;
- Caixa principal;
- Barra de torção;
- Rodas (partes estáticas).

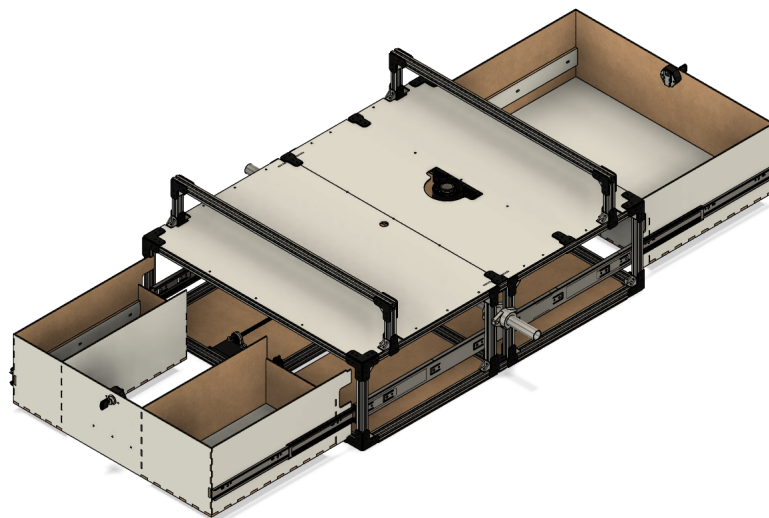
Os grupos rígidos foram projetados utilizando perfis de alumínio extrudado, conectados por chapas de união fabricadas por corte a laser e fixadas com parafusos e porcas do tipo martelo. A Figura 10 apresenta a organização e disposição dos grupos rígidos na forma explodida.

Figura 10 - Vista explodida dos grupos rígidos.



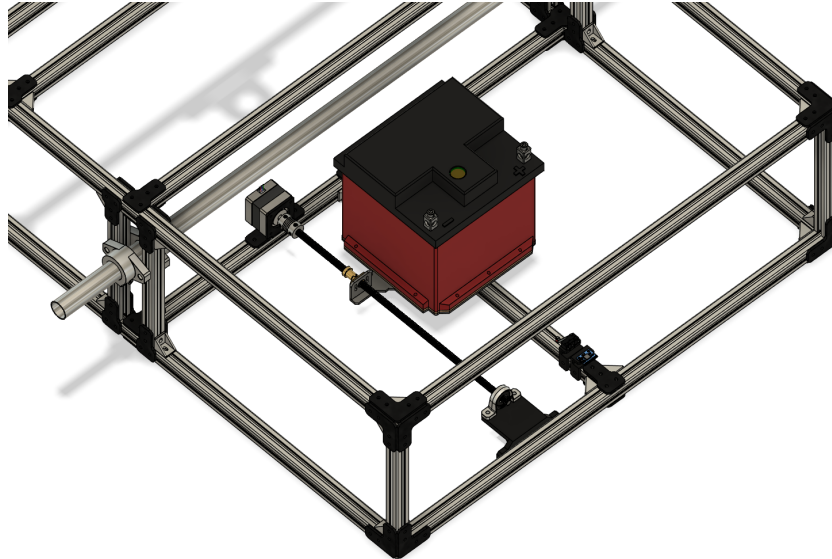
A caixa principal abriga os compartimentos deslizantes responsáveis pela organização dos componentes eletrônicos, tais como *drivers* dos motores, bateria e conversores CC-CC. O sistema de montagem utilizou colagem e parafusos para garantir precisão e robustez estrutural, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Caixa principal com compartimentos deslizantes.



Para o balanceamento do centro de gravidade, foi implementado um sistema de trilho com guia linear no compartimento da bateria (Figura 12). Este sistema permite ajustes manuais ou automatizados na posição da bateria, garantindo melhor distribuição de peso.

Figura 12 - Sistema de trilho para ajuste da posição da bateria.



3.3.2 Partes Móveis

As partes móveis foram projetadas para permitir a adaptabilidade do *rover* a terrenos irregulares. Essas partes incluem:

- Pivôs do *rocker* e do *bogie*;
- Junta de esterçamento das rodas;
- Componentes rotativos das rodas.

Nos pivôs do *rocker*, foram utilizados mancais com rolamentos autocompensadores para garantir um grau de liberdade e evitar esforços redundantes. Para os pivôs do *bogie*, foram aplicados rolamentos rígidos de esferas, como apresentado em Figura 13 e Figura 14.

Figura 13 - Montagem do pivô do *bogie*.

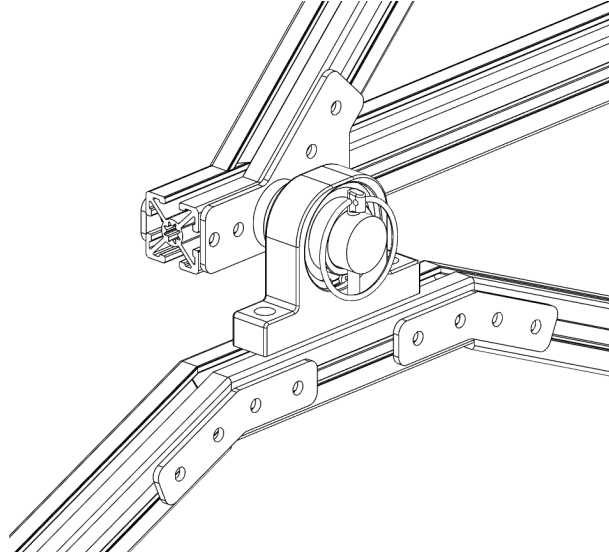
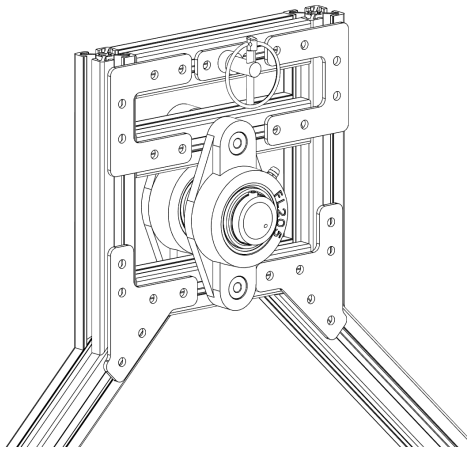
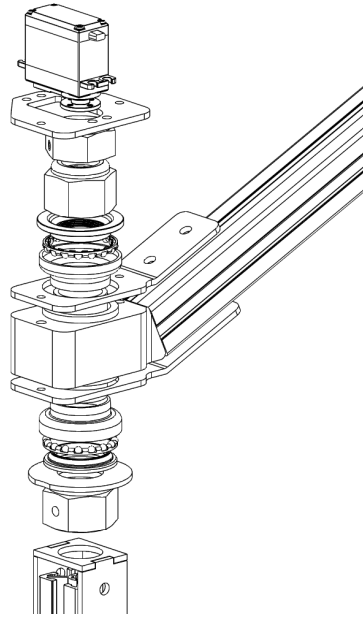


Figura 14 - Montagem do pivô do *rocker*.



A junta de esterçamento foi desenvolvida utilizando mancais impressos em 3D para suportar rolamentos axiais, permitindo o giro vertical das rodas durante a mudança de direção, como apresentado na Figura 15.

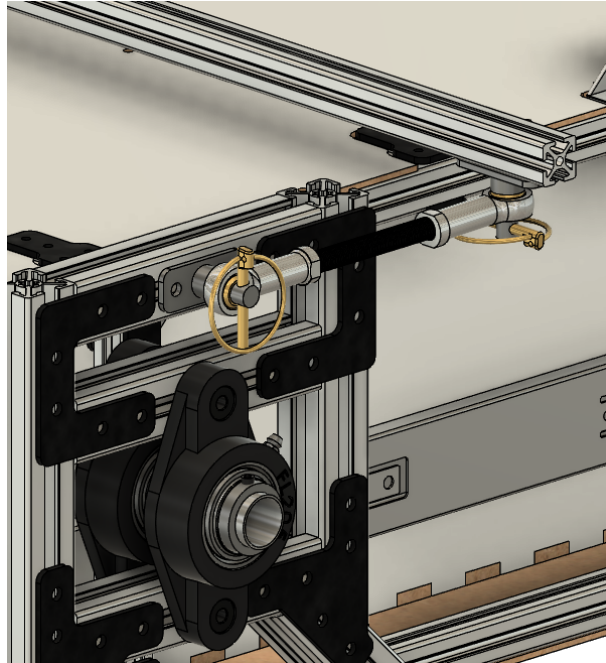
Figura 15 - Vista explodida da junta de esterçamento.



3.3.3 Modelagem da Barra de Torção

A barra de torção foi projetada para sincronizar o movimento do mecanismo *rocker-bogie*, garantindo a estabilidade da caixa principal em terrenos irregulares. A conexão utilizou terminais rotulares que permitem três graus de liberdade, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Sistema de conexão da barra de torção ao mecanismo *rocker-bogie*.



3.3.4 Modelagem das Rodas e Sistema de Redução

As rodas foram modeladas para integrar engrenagens responsáveis pela transmissão de torque, utilizando uma relação de redução de 1:8. As engrenagens foram fabricadas em aço 1020 (movida) e 1045 (motora) (JUNIOR, 2002).

A proteção do sistema de redução foi realizada por meio de uma carenagem impressa em PLA, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Roda montada com sistema de redução e proteção.

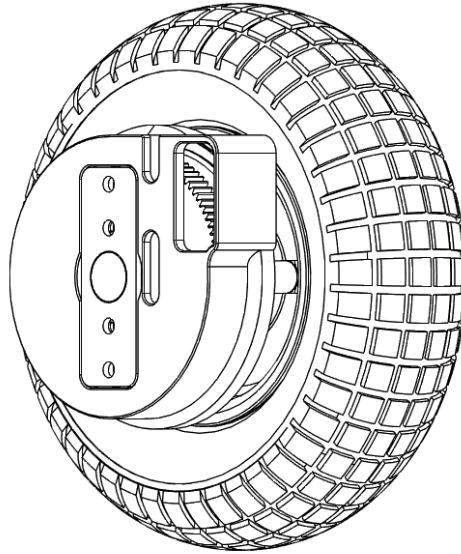
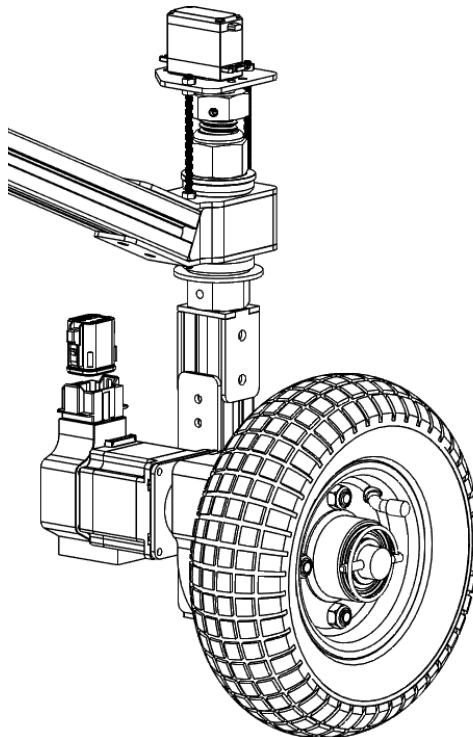


Figura 18 - Roda completa montada na estrutura *rocker-bogie*.



A modelagem 3D do *rover* possibilitou a identificação precisa de cada componente estrutural, rígido ou móvel, e permitiu a análise de sua funcionalidade e integração. A

partir dessa etapa, foram validadas as soluções mecânicas e iniciada a fase de fabricação, assegurando a viabilidade do projeto em termos de estrutura, adaptabilidade e funcionalidade.

3.4 Projeto Eletrônico do *Rover*

Esta seção apresenta o processo metodológico adotado para o desenvolvimento e implementação do projeto eletrônico e elétrico do *rover*. As etapas contemplam a concepção da arquitetura eletrônica, o desenvolvimento dos circuitos de controle, a integração dos dispositivos periféricos e a implementação do sistema de comunicação.

A arquitetura eletrônica do *rover* foi desenvolvida para garantir o controle eficiente dos componentes e integração com o sistema de comunicação remota. A base do sistema utilizou o microcontrolador ESP32, responsável por executar algoritmos de controle e coordenar os dispositivos periféricos. A Figura 20 ilustra o diagrama elétrico geral do controle remoto.

3.4.1 Ciclo de Controle do Sistema

O microcontrolador ESP32 lê os sinais enviados pelo controle remoto, processa os valores recebidos e calcula os parâmetros de controle necessários. O ciclo de controle segue as seguintes etapas:

- a) **Leitura dos Sinais do Controle Remoto:** Os dados dos canais analógicos do controle remoto são recebidos e tratados pelo ESP32.
- b) **Cálculo das Frequências e Ângulos:** Com base na geometria de Ackermann, os ângulos de esterçamento das rodas são calculados para garantir trajetórias eficientes.
- c) **Ajuste Dinâmico das Frequências:** A frequência aplicada aos motores internos é reduzida proporcionalmente, conforme o raio da curva desejada.
- d) **Aplicação dos Parâmetros aos Motores:** Os valores de frequência e ângulo são enviados aos *drivers* dos motores de passo e servomotores para executar o movimento.

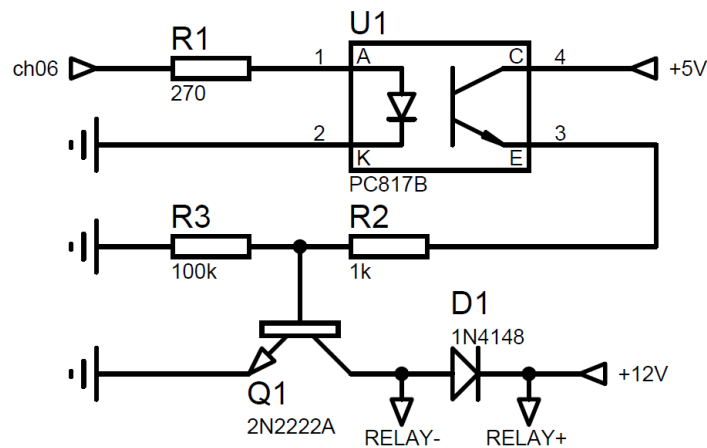
3.4.2 Circuito *Driver* do Relé

O circuito *driver* foi projetado para controlar o acionamento de cargas de alta corrente. Para garantir o isolamento elétrico entre o controle e a potência, utilizou-se um optoacoplador e um transistor bipolar de junção (TBJ).

A Figura 19 apresenta o circuito esquemático do *driver* do relé. O funcionamento é descrito a seguir:

- O microcontrolador aplica um sinal lógico ao optoacoplador, ativando o LED interno.
- O transistor polarizado permite a circulação de corrente na bobina do relé, acionando a comutação dos contatos.
- Um diodo de roda livre (D_1) foi inserido em antiparalelo para proteger o transistor contra sobretensões durante a desenergização da bobina.

Figura 19 - *Driver* do relé.



3.4.3 Integração dos Dispositivos Periféricos

Foram integrados os seguintes dispositivos periféricos ao sistema:

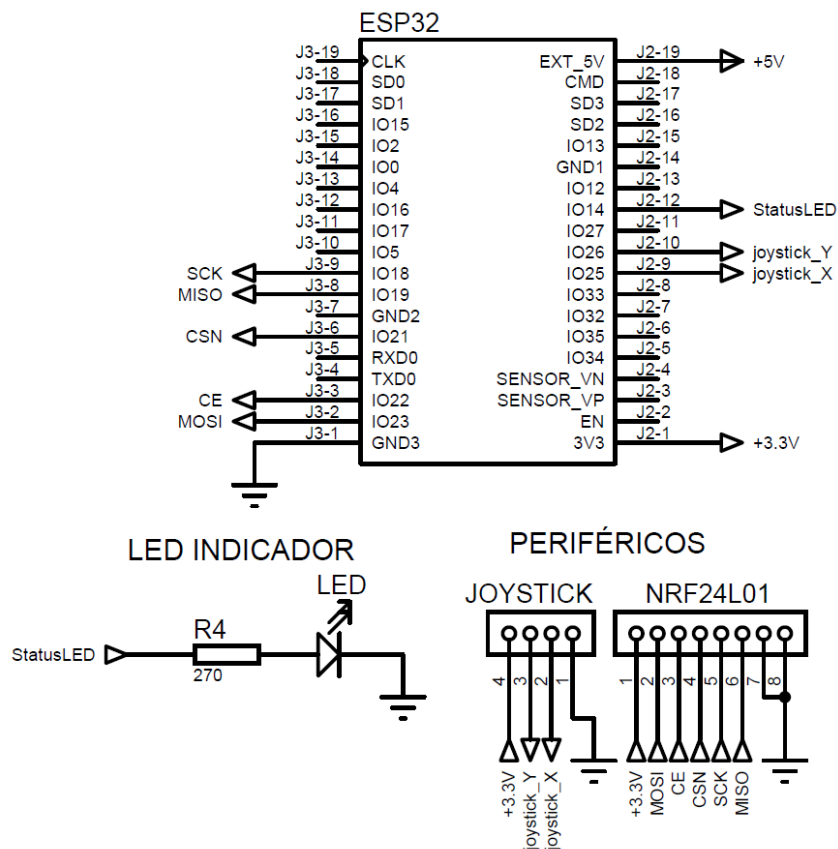
- Drivers TB6600:** Utilizados para o controle dos motores de passo, suportando até 4 A de corrente e permitindo *microstepping*.
- Servomotores MG996:** Atuadores para o sistema de direção, controlados por sinais PWM gerados pelo ESP32.
- Módulo NRF24L01:** Transceptor sem fio para comunicação remota, operando na frequência de 2,4 GHz e utilizando protocolo SPI para comunicação.

O uso integrado desses dispositivos permitiu a implementação de um sistema de controle robusto e eficiente.

3.4.4 Projeto do Rádio Controle

O rádio controle foi desenvolvido para permitir a comunicação remota entre o operador e o *rover*. O sistema é composto por um microcontrolador ESP32, um módulo *joystick* e o transceptor NRF24L01. A Figura 20 apresenta o diagrama elétrico do controle remoto.

Figura 20 - Diagrama elétrico do controle remoto.



O processo de comunicação segue os seguintes passos:

- Leitura dos Dados:** O *joystick* envia sinais analógicos referentes aos eixos *X* e *Y*, lidos pelo ESP32 através do conversor ADC.
- Envio dos Pacotes de Dados:** Os valores dos eixos são organizados em uma estrutura de dados e transmitidos pelo módulo NRF24L01 para o *rover*.
- Indicação Visual de Conexão:** Um LED integrado ao controle remoto pisca ao enviar pacotes, indicando a transmissão ativa.

3.4.5 Projeto do Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação do *rover* foi projetado para fornecer energia aos motores, *drivers*, servomotores e à placa controladora. Os principais componentes incluem:

- **Bateria de Chumbo-Ácido:** 12 V, 30 Ah, utilizada como fonte principal de alimentação.
- **Painel Solar:** Capacidade de 150 W, conectado a um controlador de carga para gerenciamento energético.
- **Conversor CC-CC:** Reduz a tensão da bateria de 12 V para 6 V, alimentando os servomotores e a placa controladora.

O sistema de alimentação foi projetado para garantir um fornecimento contínuo e eficiente de energia, com proteção contra sobrecargas e flutuações. O diagrama elétrico detalhado é apresentado no Apêndice A.8.

A metodologia adotada para o projeto eletrônico e elétrico do *rover* seguiu uma abordagem sistemática, desde a concepção da arquitetura até a implementação e integração dos componentes. O uso de tecnologias como ESP32, NRF24L01 e drivers TB6600 permitiu o desenvolvimento de um sistema de controle robusto, eficiente e adequado às necessidades do projeto. O sistema elétrico, com integração de painel solar e conversores CC-CC, garantiu autonomia energética ao *rover*, consolidando a viabilidade do projeto em aplicações reais.

3.5 Processos de Fabricação

Nesta seção são descritos os processos e procedimentos de fabricação utilizados para a construção do *rover*. Esta etapa abrange desde a seleção de materiais, técnicas de usinagem e corte, até a integração e montagem dos componentes estruturais, mecânicos e elétricos. Todas as operações foram planejadas para garantir precisão, resistência e funcionalidade, conforme as especificações do projeto.

3.5.1 Corte a Laser de Chapas

As chapas de união foram fabricadas em aço carbono 1020 com espessura de 3 mm. Esse material foi escolhido devido à sua resistência mecânica e boa usinabilidade. O plano de corte detalhado, apresentado no Apêndice A.7, foi elaborado para garantir dimensões precisas e posicionamento adequado das furações.

O processo de corte foi realizado em uma máquina CNC a laser, garantindo alta

precisão dimensional e acabamento adequado. A Figura 21 apresenta o corte em andamento, evidenciando o método aplicado.

Figura 21 - Corte a laser das chapas de união.



3.5.2 Usinagem dos Eixos

Os eixos foram fabricados a partir de tarugos maciços de aço carbono 1020 com diâmetro de 25,4 mm (1 polegada). A usinagem foi realizada por torneamento em torno mecânico, garantindo acabamento superficial e precisão dimensional, conforme detalhado no plano de trabalho descrito no Apêndice A.4.

Durante a usinagem, foram preparadas as extremidades para o acoplamento de mancais e rodas. A Figura 22 apresenta o processo de usinagem dos eixos.

Figura 22 - Usinagem dos eixos do *rover*.



3.5.3 Soldagem dos Eixos nas Chapas de Fixação

Com os eixos e as chapas de fixação finalizados, foi realizado o processo de soldagem. A técnica adotada foi a solda TIG utilizando varetas ER70S-3, apropriadas para a soldagem de aço carbono. Este método garantiu resistência e integridade estrutural, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Soldagem dos eixos nas chapas de fixação.



3.5.4 Pintura Eletrostática das Chapas de Fixação

Após a soldagem, as chapas de fixação foram submetidas à pintura eletrostática, com o objetivo de prevenir a oxidação. O processo foi realizado em ambiente contro-

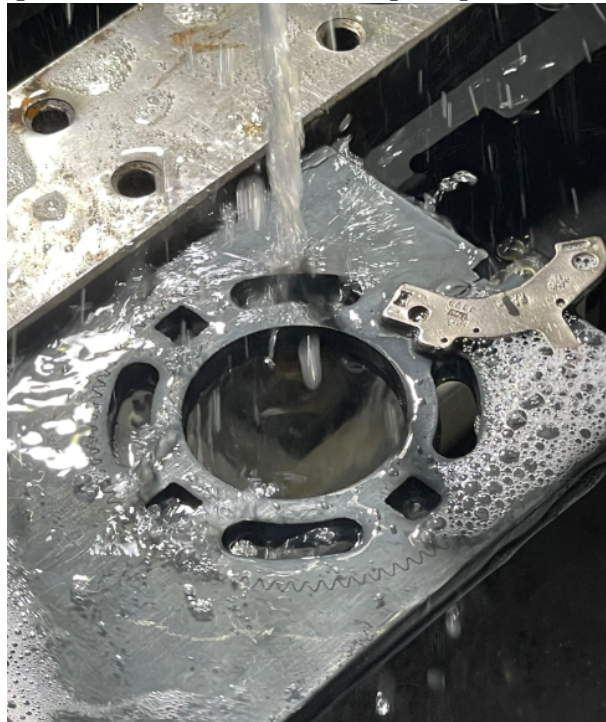
lado, com aplicação uniforme de pó polimérico seguido por cura térmica. Esse tratamento garantiu um revestimento rígido e resistente à corrosão.

3.5.5 Fabricação das Engrenagens Movidas

As engrenagens movidas foram fabricadas em aço carbono 1020 com espessura de 8 mm. O processo foi dividido em duas etapas:

1. Corte a Laser: Definição do contorno externo e das áreas internas para fixação.
2. Eletroerosão a Fio: Usinagem dos dentes das engrenagens, garantindo alta precisão e qualidade superficial, como apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Eletroerosão das engrenagens movidas.



As especificações completas das engrenagens estão detalhadas no Apêndice A.1.

3.5.6 Corte dos Perfis de Alumínio

Os perfis de alumínio estrutural de 30×30 mm foram preparados utilizando uma serra de esquadria, conforme o plano de corte descrito no Apêndice A.5. O processo garantiu cortes precisos e ângulos corretos, essenciais para a montagem da estrutura.

3.5.7 Fabricação de Compartimentos e Gavetas

Os compartimentos para alojamento dos componentes eletrônicos foram fabricados em MDF revestido com PVC. O corte foi realizado em máquina CNC a laser, conforme o plano de corte no Apêndice A.6.

- MDF 3 mm: Utilizado para as faces externas.
- MDF 6 mm: Utilizado para as bases, garantindo rigidez estrutural.

Os compartimentos foram projetados com encaixes precisos e montados com cola-gem e parafusos.

3.5.8 Impressão 3D de Componentes

As proteções de engrenagens, buchas e organizadores de cabos foram fabricados por impressão 3D utilizando PLA. O processo iniciou com a modelagem em software CAD, configurando os parâmetros de impressão (altura de camada, densidade de preenchimento e temperatura). Os componentes impressos passaram por inspeção visual e verificação dimensional para garantir conformidade com as especificações do projeto.

Os processos de fabricação descritos foram planejados e executados com precisão, abrangendo técnicas como corte a laser, usinagem, soldagem TIG, pintura eletrostática e impressão 3D. A combinação dessas técnicas garantiu a integridade estrutural, funcionalidade e qualidade dos componentes do *rover*. As etapas concluídas possibilitaram o início da montagem final, assegurando que todas as peças estivessem dentro das tolerâncias exigidas e prontas para integração.

3.6 Ensaios de Validação do *Rover*

Os ensaios de validação realizados tiveram como objetivo avaliar o funcionamento, a eficiência e o desempenho estrutural, elétrico e de controle do *rover*. Foram conduzidos testes de direcionalidade, rodagem em ambiente relevante, inclinação e validação do sistema de esterçamento com geometria de Ackermann. Cada ensaio foi projetado e executado com procedimentos específicos, garantindo uma análise detalhada dos subsistemas integrados.

3.6.1 Ensaio de Direcionalidade do *Rover*

O objetivo deste ensaio foi avaliar a capacidade de movimentação do *rover*, verificando deslocamentos para frente, para trás e manobras laterais (curvas à esquerda e à direita), além de validar o funcionamento do sistema de controle remoto e do sistema

elétrico.

Procedimentos:

- a) Posicionou-se o *rover* em um ambiente controlado com superfície plana.
- b) Executaram-se deslocamentos em linha reta (para frente e para trás) e manobras laterais.
- c) Monitoraram-se os comandos enviados pelo controle remoto e as respostas dos motores.
- d) Avaliou-se a integridade das conexões elétricas e dos circuitos, observando qualquer anomalia no sistema.

A metodologia garantiu que os movimentos do *rover* fossem observados e registrados, possibilitando a verificação de sua capacidade de executar manobras com precisão.

3.6.2 Ensaio de Rodagem em Ambiente Relevante

Este ensaio foi projetado para simular as condições reais de operação do *rover*, avaliando a resposta estrutural e mecânica em um terreno com características adversas.

Procedimentos:

- a) Selecionou-se um percurso composto por terreno de terra, com presença de pedras e irregularidades.
- b) Posicionou-se o *rover* na linha de partida e iniciou-se o deslocamento controlado.
- c) Monitoraram-se:
 - A capacidade de adaptação do sistema *rocker-bogie* às variações do terreno;
 - A estabilidade estrutural e a interação entre os subsistemas mecânicos.

Os deslocamentos foram realizados em intervalos controlados, e as respostas mecânicas e estruturais foram registradas para posterior análise.

3.6.3 Ensaio em Superfícies Inclinadas

Os ensaios em superfícies inclinadas foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar o desempenho dos motores de passo e a resposta estrutural do sistema ao transpor inclinações variadas.

Procedimentos:

- a) Prepararam-se superfícies com inclinações de 10° , 20° e 30° em um terreno coberto por gramíneas naturais.
- b) Posicionou-se o *rover* na base de cada plano inclinado.
- c) Executaram-se deslocamentos controlados até o topo do plano.
- d) Foram monitorados:
 - O torque gerado pelos motores de passo;
 - O desempenho das engrenagens sob esforço;
 - A resposta estrutural frente às condições impostas.

Os deslocamentos controlados em diferentes inclinações permitiram identificar possíveis limitações mecânicas e estruturais.

3.6.4 Ensaio de Validação do Sistema de Geometria de Ackermann

Este ensaio foi conduzido para validar o sistema de esterçamento do *rover*, implementado com base na geometria de Ackermann, em um ambiente laboratorial controlado.

Procedimentos:

- a) Posicionou-se o *rover* em superfície plana e delimitada.
- b) Executaram-se deslocamentos para frente e para trás, assim como manobras laterais (curvas à esquerda e à direita).
- c) Avaliaram-se:
 - A eficiência do sistema de esterçamento durante as manobras;
 - O alinhamento das rodas em relação à geometria de Ackermann;
 - A integração entre os subsistemas mecânico e elétrico.

Os testes foram realizados em um ambiente controlado, permitindo monitorar o comportamento do sistema de direção e identificar ajustes necessários para sua validação.

3.6.5 Resumo dos Procedimentos

Os ensaios realizados foram sistematicamente organizados para avaliar os principais aspectos funcionais do *rover*. A Tabela 4 apresenta um resumo dos procedimentos e objetivos de cada teste.

Tabela 4 - Resumo dos procedimentos experimentais.

Ensaio	Objetivo	Metodologia
Direcionalidade	Avaliar movimentação e controle remoto	Deslocamentos retos e curvos em superfície plana
Rodagem em ambiente relevante	Verificar resposta estrutural e tração	Percurso em terreno irregular
Superfícies inclinadas	Analisar torque e desempenho estrutural	Deslocamento em inclinações de 10° a 30°
Geometria de Ackermann	Validar sistema de esterçamento	Manobras laterais e deslocamentos controlados

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos neste trabalho, abrangendo a simulação estrutural, a fabricação das peças por diferentes processos, como corte a laser, usinagem e eletroerosão, a montagem do *rover*, seu dimensionamento elétrico e Placa de Circuito Impresso desenvolvida, e, por fim, os ensaios de validação realizados.

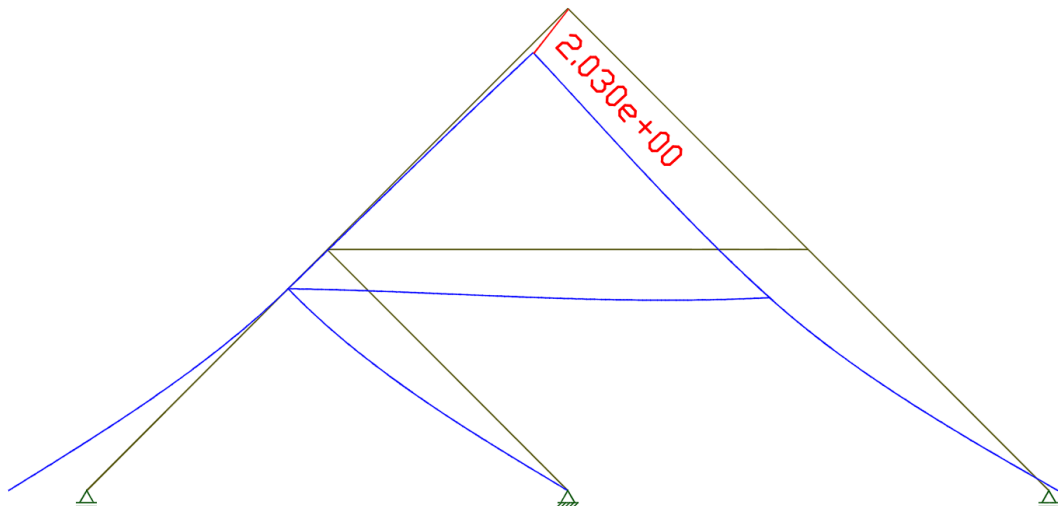
4.1 Simulações Estruturais

As simulações realizadas no software *Ftool* permitiram avaliar o comportamento do mecanismo *rocker-bogie* sob condições de carga estática. Através dessas análises, foi possível investigar as deformações estruturais e a distribuição de esforços de compressão e tração nos componentes críticos da estrutura. Os principais resultados obtidos são apresentados e discutidos a seguir.

4.1.1 Deformação Estrutural

A aplicação de uma carga de 500 N no pivô central do *rocker* resultou em um deslocamento máximo de 2,03 mm, conforme ilustrado na Figura 25. A deformação ocorreu principalmente devido à flambagem dos perfis de alumínio utilizados na estrutura.

Figura 25 - Simulação de deformação estrutural sob carga de 500 N.



Considerando a simetria do sistema e a presença de dois mecanismos *rocker-bogie*, o peso bruto total máximo suportado foi calculado com base na equação a seguir:

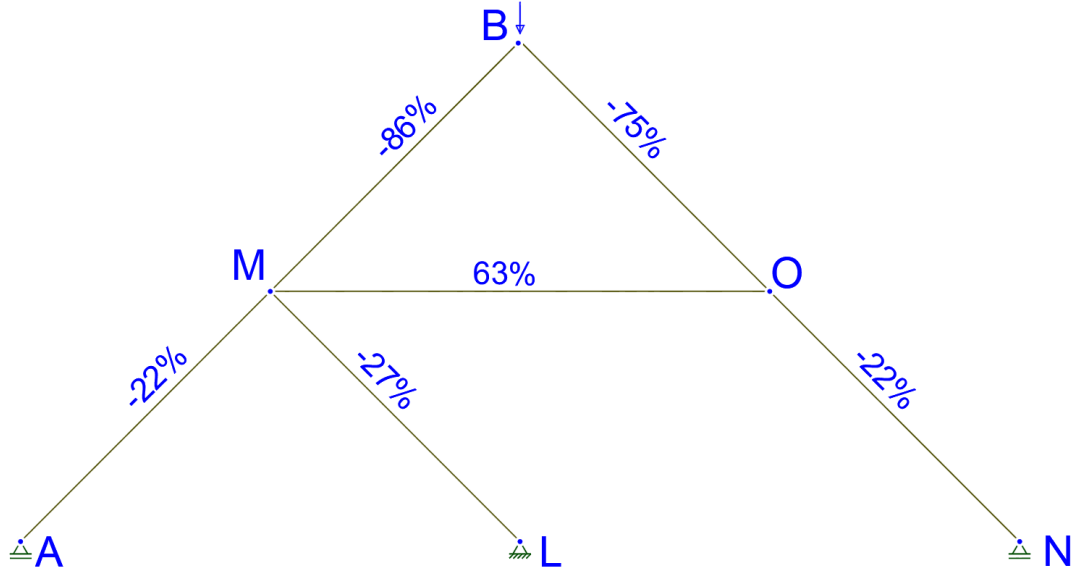
$$P_{BTMAX} = \frac{2 \cdot F_p}{g} = \frac{2 \cdot 500}{9,81} = 101,94 \text{ kg.} \quad (6)$$

Esse valor indica que o sistema pode suportar aproximadamente 101,94 kg sob carregamento estático normal, sem comprometer a integridade estrutural.

4.1.2 Distribuição dos Esforços de Compressão e Tração

A distribuição dos esforços de compressão e tração foi analisada para identificar os segmentos mais solicitados. A Figura 26 apresenta os resultados dessa análise, destacando o segmento $\overline{BM}$ como o mais crítico, suportando 86% da força aplicada no pivô.

Figura 26 - Distribuição dos esforços de compressão e tração nos segmentos do mecanismo.



Com base na resistência ao escoamento da liga de alumínio 6063 T5 (276 MPa) e na área da seção transversal do perfil (347 mm²), a força máxima suportada pelo segmento $\overline{BM}$ é determinada pela equação:

$$F_{max} = \frac{\sigma \cdot A}{0,86} = \frac{276 \cdot 347}{0,86} = 111362,8 \text{ N.} \quad (7)$$

O peso correspondente ao limite de escoamento é calculado como:

$$P_{MAX} = \frac{F_{max}}{g} = \frac{111362,8}{9,81} = 11351,97 \text{ kg.} \quad (8)$$

Esses valores demonstram que a estrutura apresenta alta resistência aos esforços de compressão e tração, garantindo sua robustez e segurança estrutural mesmo sob condições extremas.

4.1.3 Análise das simulações estruturais

Os resultados obtidos nas simulações estruturais confirmam o bom desempenho mecânico do mecanismo *rocker-bogie*. A deformação máxima de 2,03 mm é considerada mínima, não comprometendo a funcionalidade e estabilidade da estrutura. Esse resultado demonstra que os perfis de alumínio selecionados possuem a rigidez necessária para suportar cargas estáticas moderadas sem apresentar deformações significativas.

Além disso, a capacidade de suportar um peso bruto total de 101,94 kg confirma que o projeto atende às exigências operacionais para carregamentos normais. A análise dos esforços revelou que o segmento $\overline{BM}$ suporta a maior parte da carga aplicada (86%), exigindo atenção especial em seu dimensionamento e material.

A robustez do material selecionado, a liga de alumínio 6063 T5, foi validada ao demonstrar resistência suficiente para suportar cargas extremas até o limite de escoamento, com uma capacidade estrutural teórica de até 11351,97 kg. Isso confirma que o projeto é capaz de operar com segurança e eficiência mesmo em cenários adversos.

Portanto, os resultados das simulações estruturais comprovam que o projeto do mecanismo *rocker-bogie* atende plenamente aos requisitos de desempenho, resistência e segurança para as condições previstas.

4.2 Fabricação Mecânica do *Rover*

A fabricação mecânica do *rover* envolveu uma série de processos integrados, com foco na precisão dimensional, acabamento uniforme e resistência estrutural. A sequência lógica dos processos incluiu corte a laser, usinagem, soldagem, pintura e fabricação de engrenagens. Os principais resultados são apresentados a seguir.

4.2.1 Corte a Laser das Chapas de União

Os cortes realizados nas chapas de aço carbono SAE 1020 por meio do processo de corte a laser resultaram em peças com alta precisão dimensional e acabamento superficial uniforme, conforme ilustrado na Figura 27. O plano de corte detalhado assegurou que as chapas fossem fabricadas de acordo com as angulações especificadas no projeto, garantindo o alinhamento e a rigidez estrutural necessária.

Figura 27 - Chapas após corte a laser.



4.2.2 Usinagem dos Eixos

Os tarugos de aço SAE 1020 foram submetidos ao processo de usinagem , resultando em eixos de diferentes dimensões para aplicações específicas no sistema mecânico. Dentre os componentes fabricados, destacam-se:

- Seis eixos de 19 mm de diâmetro para montagem das rodas.
- Dois eixos de conexão entre *bogie* e *rocker*.
- Cinco eixos destinados ao suporte da barra de estabilização.

A usinagem foi realizada por torneamento de alta precisão , resultando em eixos com superfícies uniformes e dimensões rigorosamente compatíveis com as exigências do sistema mecânico. A Figura 28 apresenta os eixos finalizados.

Figura 28 - Eixos usinados.



4.2.3 Soldagem dos Eixos às Chapas de União

Os eixos usinados foram soldados às chapas de união utilizando o processo TIG com varetas ER70S-3. Esse método garantiu juntas de alta resistência mecânica e uniformidade estrutural. A qualidade das soldas foi avaliada visualmente e por inspeção técnica, confirmando a integridade e conformidade com os requisitos do projeto. A Figura 29 ilustra os eixos soldados às chapas.

Figura 29 - Eixos usinados já soldados às chapas de união.



4.2.4 Tratamento Superficial: Pintura Eletrostática

Para proteger as chapas de união contra oxidação e aumentar sua durabilidade, aplicou-se pintura eletrostática. Esse tratamento resultou em um revestimento uniforme, rígido e resistente, garantindo proteção contra os efeitos da corrosão em ambientes operacionais adversos.

4.2.5 Fabricação das Engrenagens Movidas

As engrenagens movidas foram fabricadas por meio de corte a laser e eletroerosão a fio, garantindo precisão geométrica e acabamento de alta qualidade. O corte a laser foi utilizado para conformação externa e definição das áreas internas, enquanto a eletroerosão assegurou a usinagem precisa dos dentes, garantindo o alinhamento funcional e desempenho adequado das transmissões mecânicas. A Figura 30 apresenta as engrenagens finalizadas.

Figura 30 - Engrenagens movidas finalizadas.



4.2.6 Corte dos Perfis Estruturais de Alumínio

Os perfis estruturais de alumínio 30×30 mm foram cortados com serra de esquadria, seguindo rigorosamente as dimensões e ângulos especificados no projeto. A elevada precisão do corte garantiu a integração eficiente dos perfis com os demais componentes do sistema *rocker-bogie*, resultando em um alinhamento estrutural robusto e facilitando o processo de montagem.

4.2.7 Análise da Fabricação Mecânica

Os resultados da fabricação mecânica do *rover* demonstram a eficácia dos processos selecionados para atender às exigências estruturais e funcionais do projeto. A sequência organizada dos processos – corte, usinagem, soldagem, tratamento superficial e fabricação de engrenagens – garantiu a precisão dimensional, rigidez estrutural e durabilidade necessárias.

Destaca-se que o corte a laser e a eletroerosão a fio foram fundamentais para a obtenção de componentes com alta precisão geométrica, especialmente nas chapas de união e engrenagens. O processo de soldagem TIG assegurou juntas de alta resistência, contribuindo significativamente para a robustez estrutural. Além disso, o tratamento superficial por pintura eletrostática foi crucial para aumentar a vida útil das peças em ambientes operacionais adversos.

A integração dos perfis estruturais de alumínio e eixos usinados permitiu um alinhamento eficiente entre os componentes, refletindo diretamente na qualidade final do *rover*. Dessa forma, os processos de fabricação atendem aos requisitos de projeto, validando a escolha dos materiais e métodos empregados como eficazes e tecnicamente viáveis.

4.3 Montagem do *Rover*

A montagem do *rover* foi executada de forma satisfatória, validando o planejamento detalhado e a qualidade dos processos de fabricação aplicados. Todas as peças projetadas foram alocadas com precisão em seus respectivos locais, considerando interferências, compatibilidade dimensional e funcionalidade do conjunto.

A integração dos subsistemas mecânicos e estruturais teve destaque, principalmente na montagem do sistema *rocker-bogie*. Os perfis de alumínio estruturais foram fixados utilizando chapas de união e parafusos em aço inoxidável, conforme especificado no projeto. Métodos de fixação robustos foram aplicados, incluindo a utilização de cola adesiva de alta resistência como trava química, assegurando estabilidade e rigidez estrutural. A Figura 31 demonstra o funcionamento do mecanismo *rocker-bogie*, simulando a superação de dois obstáculos simultaneamente enquanto mantém todas as rodas em contato com o solo.

Figura 31 - Mecanismo *rocker-bogie* em ação.



A caixa principal, construída com perfis de alumínio de 20×20 mm, apresentou rigidez e precisão dimensional, facilitando a integração com o sistema *rocker-bogie*. A barra de torção foi fixada estrategicamente, com reforço adicional proporcionado por cantoneiras e conexões com terminais rotulares, garantindo resistência adequada aos esforços mecânicos durante a operação. A Figura 32 demonstra o sistema da barra de torção montado, com o prisioneiro, os terminais rotulares, eixos e perfis estruturais.

Figura 32 - Sistema completo da barra de torção montado.



As rodas e motores de passo foram instalados cuidadosamente, com ênfase na distância ideal entre as engrenagens e aplicação de espaçadores impressos em PLA. Os ajustes finais incluíram o aperto dos parafusos e componentes, garantindo alinhamento correto e eliminação de folgas ou sobrecargas nos eixos dos motores. Esses cuidados contribuíram para o desempenho adequado do sistema de tração.

Os compartimentos deslizantes foram projetados e instalados na caixa principal, proporcionando organização interna eficiente e proteção adequada para os sistemas elétricos e eletrônicos. As chapas superiores e inferiores de 3 mm de espessura foram adicionadas ao conjunto, resultando em um acabamento uniforme e na proteção física dos componentes internos, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Compartimentos deslizantes completamente expandidos.



4.3.1 Análise da Montagem do *Rover*

A montagem do *rover* foi conduzida com êxito, confirmando a eficácia do planejamento e a qualidade dos processos de fabricação aplicados. A precisão dimensional das peças foi crucial para o sucesso da montagem, garantindo alinhamento geométrico e compatibilidade funcional entre os componentes. O uso de fixadores robustos e métodos adicionais, como a aplicação de cola adesiva de alta resistência, assegurou estabilidade estrutural e resistência a vibrações.

O sistema *rocker-bogie* apresentou desempenho satisfatório, com fixações seguras e um encaixe preciso entre os perfis estruturais e as chapas de união. O reforço proporcionado pelas cantoneiras e pelos terminais rotulares na barra de torção foi fundamental para suportar os esforços mecânicos durante a operação. Esse detalhamento estrutural minimiza os riscos de falhas mecânicas e melhora a resiliência operacional do *rover*.

A instalação das rodas e motores de passo foi executada com cuidado, considerando o torque e a distância ideal entre as engrenagens. A aplicação de espaçadores impressos em PLA auxiliou no alinhamento funcional, contribuindo para um movimento fluido e eficiente do sistema de tração. A eliminação de folgas e o ajuste preciso do torque nos componentes mecânicos garantem a durabilidade e desempenho adequado do sistema ao

longo do tempo.

A montagem dos compartimentos deslizantes e a adição das chapas superiores e inferiores destacaram-se como soluções eficazes para organização e proteção dos sistemas eletrônicos. O acabamento uniforme e a resistência conferida pelas chapas de 3 mm reforçam a robustez e durabilidade da estrutura, atendendo às condições operacionais especificadas no projeto.

4.4 Sistema Elétrico do *Rover*

O sistema elétrico do *rover* foi projetado e implementado com base em um diagrama elétrico detalhado, assegurando a integração eficiente dos subsistemas. As conexões elétricas, realizadas com o auxílio de fusíveis de proteção e barramentos borneira para derivação de alimentação, garantiram a integridade e segurança do circuito elétrico, conforme demonstrado na Figura 34.

Figura 34 - Conexões elétricas do *rover*.



A bateria de chumbo-ácido de 12 V e 30 Ah forneceu energia estável aos drivers dos motores de passo, permitindo o funcionamento contínuo do sistema elétrico ao longo dos ciclos operacionais. O painel solar de 150 W apresentou desempenho satisfatório durante os ensaios, recarregando a bateria dentro das condições de irradiação solar simuladas. O controlador de carga desempenhou um papel essencial no gerenciamento energético, protegendo os circuitos contra sobrecargas e distribuindo a energia de forma uniforme aos dispositivos conectados.

O conversor CC-CC *buck*, responsável pela conversão de tensão de 12 V para 6 V, assegurou a corrente adequada para alimentar os servomotores e o controlador principal,

garantindo operação estável e contínua do sistema integrado. A Figura 35 apresenta o *rover* finalizado após a implementação do sistema elétrico.

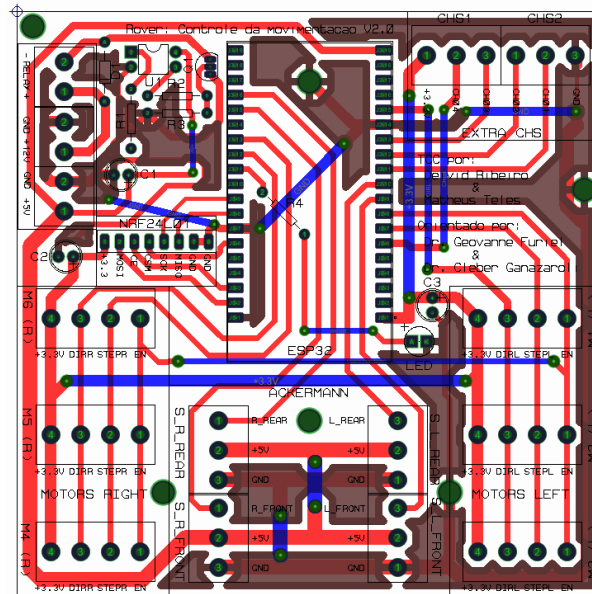
Figura 35 - *Rover* concluído.



4.4.1 Placa de Circuito Impresso do Controlador do *Rover*

A Placa de Circuito Impresso (PCB) foi desenvolvida para integrar o microcontrolador ESP32 aos dispositivos periféricos e demais componentes eletrônicos. A Figura 36 apresenta uma vista superior da PCB, exibindo suas trilhas, *pads*, *vias* e demais elementos elétricos.

Figura 36 - Vista superior da placa de circuito impresso.



Um modelo 3D da PCB foi gerado para facilitar a visualização do layout e montagem dos componentes, conforme ilustrado nas Figuras 37 e 38.

Figura 37 - Vista superior do modelo 3D da placa de circuito impresso.

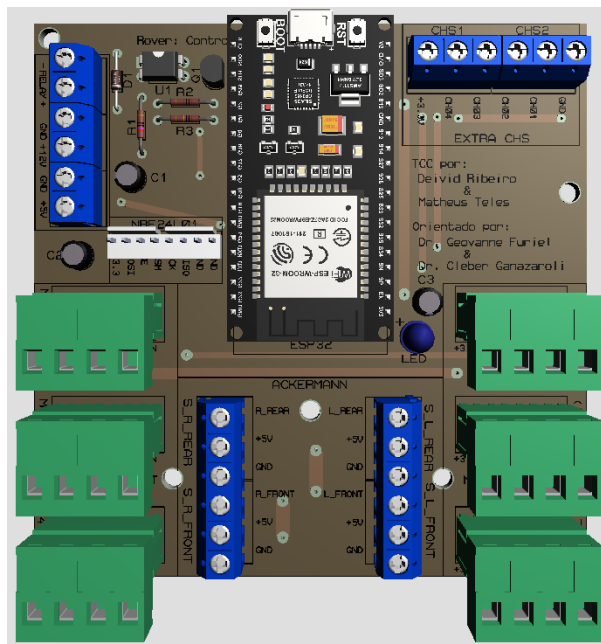
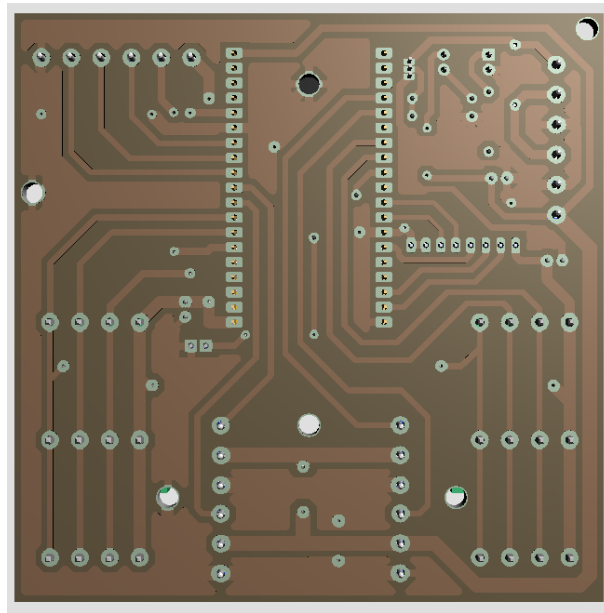
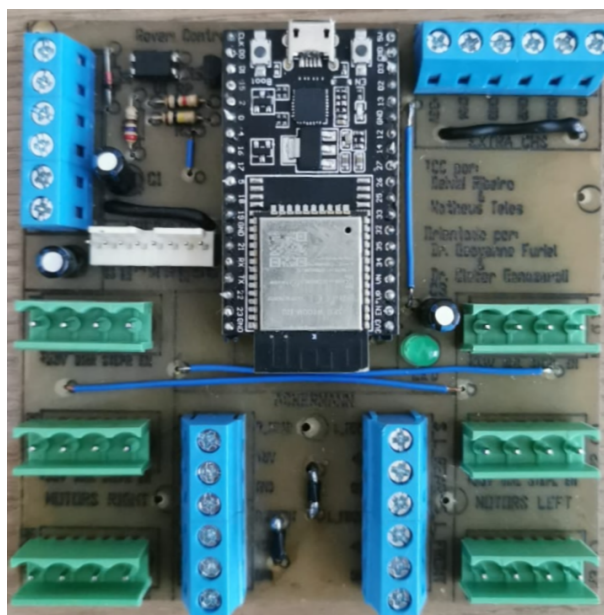


Figura 38 - Vista inferior do modelo 3D da placa de circuito impresso.



O processo de fabricação incluiu gravação a laser para definição das trilhas, seguido por corrosão com percloroeto de ferro (FeCl_3). O resultado final da PCB foi inspecionado e validado, conforme demonstrado na Figura 39.

Figura 39 - Placa controladora do *rover* finalizada.



4.4.2 Controle Remoto

O controle remoto foi projetado com uma carcaça impressa em 3D para garantir ergonomia durante o uso do joystick e proteger os componentes eletrônicos internos. O projeto digital é apresentado nas Figuras 40 e 41, enquanto a versão final do controle finalizado é apresentado na Figura 42.

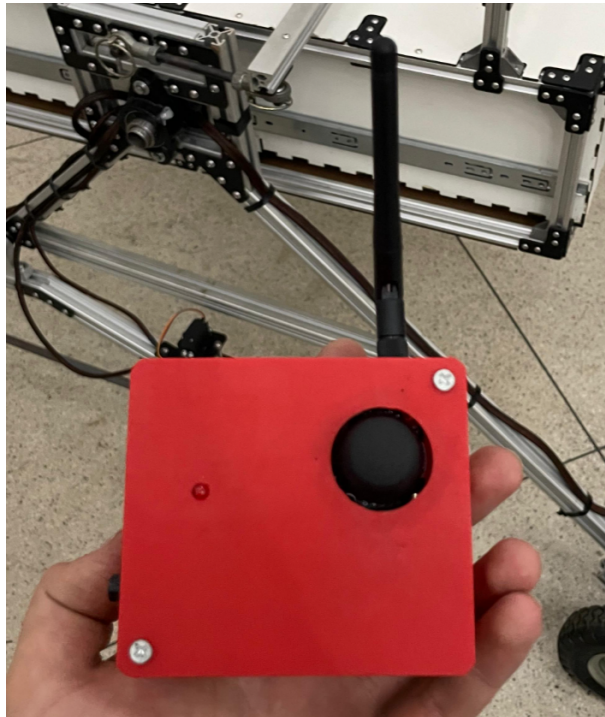
Figura 40 - Vista superior do projeto 3D do controle remoto.



Figura 41 - Vista isométrica do projeto 3D do controle remoto.



Figura 42 - Controle remoto finalizado.



4.4.3 Análise do sistema elétrico desenvolvido

Os resultados obtidos confirmam a eficácia do sistema elétrico desenvolvido para o *rover*. A integração entre bateria, painel solar, controlador de carga e conversor CC-CC demonstrou um gerenciamento energético eficiente, garantindo a operação contínua dos componentes elétricos. A estabilidade do fornecimento de energia foi validada durante os ensaios, destacando a importância do controlador na proteção contra sobrecargas e flutuações.

A confecção da Placa de Circuito Impresso (PCB) mostrou-se precisa e funcional, permitindo a integração do microcontrolador ESP32 com os periféricos eletrônicos. A aplicação do método de gravação a laser e corrosão com FeCl_3 resultou em uma placa final de alta qualidade, atendendo às especificações do projeto.

O desenvolvimento do controle remoto, com carcaça impressa em 3D, combinou ergonomia e proteção para os componentes eletrônicos, assegurando um manuseio confortável e eficiente do sistema de controle.

Portanto, o sistema elétrico do *rover* atendeu plenamente aos requisitos técnicos e funcionais, garantindo eficiência energética, proteção dos circuitos e estabilidade operacional durante os ensaios realizados.

4.5 Ensaios de Validação Inicial do *Rover*

Os ensaios de validação inicial foram conduzidos para analisar o funcionamento e desempenho dos subsistemas do *rover*, abordando aspectos estruturais, elétricos e de controle. Ensaios de direcionalidade, inclinação e percurso em ambiente relevante foram realizados para simular condições operacionais, fornecendo dados fundamentais para ajustes no projeto.

4.5.0.1 Ensaio de Direcionalidade do *Rover*

Nos ensaios iniciais de direcionalidade, avaliou-se o deslocamento linear e as manobras laterais. Contudo, o sistema original apresentou limitações ao desacelerar os motores de um lado ou inverter a rotação para giros no próprio eixo. Mesmo operando com torque máximo, o *rover* não alcançou a precisão esperada, resultando em esforços mecânicos excessivos e torções significativas na estrutura.

Durante os ensaios, a técnica inicial de realizar curvas por desaceleração de motores de um lado e aceleração do outro revelou-se ineficiente. Esse método gerou esforços mecânicos excessivos, resultando em momentos torsores significativos nos mancais responsáveis pela conexão entre a estrutura *rocker-bogie* e a caixa principal. A repetição dessas mano-

bras evidenciou a necessidade de um sistema de direção mais eficiente. Assim, propôs-se a implementação da geometria de Ackermann como uma solução para otimizar a capacidade de manobra e reduzir o desgaste estrutural.

Essas limitações evidenciaram a necessidade de um sistema de esterçamento mais eficiente. Assim, iniciou-se o desenvolvimento da geometria de Ackermann como solução para reduzir os esforços mecânicos e otimizar a mobilidade do *rover*. Apesar dessas falhas, o sistema de controle remoto foi validado com sucesso, executando todos os comandos programados de forma satisfatória e comprovando a integridade elétrica e funcional dos subsistemas.

4.5.1 Implementação e Ensaio da Geometria de Ackermann

A implementação da geometria de Ackermann foi fundamental para otimizar a capacidade de realização de curvas no *rover*, garantindo que as rodas seguissem trajetórias ideais. A combinação entre os ajustes dos ângulos de esterçamento e o controle dinâmico da velocidade das rodas internas resultou em:

- Realização de curvas suaves em diferentes raios;
- Redução do atrito lateral, proporcionando melhor eficiência energética;
- Maior precisão e controle durante manobras.

Equações implementadas no microcontrolador possibilitaram a adaptação dinâmica dos parâmetros de direção em tempo real. A validação prática demonstrou o potencial da geometria de Ackermann para proporcionar manobrabilidade e estabilidade em veículos autôpropelidos como o *rover*. A Figura 43 demonstra o funcionamento do sistema de esterçamento do seguindo os ângulos definidos pelo Diagrama de Ackermann.

Figura 43 - *Rover* montado e com as rodas do *bogie* esterçadas conforme Diagrama de Ackermann.



Os ângulos são calculados a partir do algoritmo apresentado a seguir, que é um trecho extraído do código-fonte completo disponibilizado no Apêndice A.12.2.

```
//angulo da roda externa no eixo dianteiro
phi_outerF = atan ( c / ( y + c ) ) * 180 / M_PI;
//angulo da roda interna no eixo dianteiro
theta_innerF = atan ( c / y ) * 180 / M_PI;
//angulo da roda externa no eixo intermediario
phi_outerM = atan ( ( c / 2 ) / ( y + c ) ) * 180 / M_PI;
//angulo da roda interna no eixo intermediario
theta_innerM = atan ( ( c / 2 ) / y ) * 180 / M_PI;
```

Onde:

- c é a distância entre o eixo traseiro e o eixo dianteiro, equivalente a L na Figura 5;
- y é a distância entre o ponto central da circunferência e o centro da roda interna equivalente a R na Figura 5;
- ϕ_{outerF} , θ_{innerF} , ϕ_{outerM} e θ_{innerM} são os ângulos de cada roda esterçante, conforme ilustrado na Figura 5;
- M_PI representa a constante matemática π .

Para avaliar o desempenho da implementação, foram realizados ensaios experimentais focados no sistema de esterçamento. Durante os ensaios, os servomotores MG996R, com torque nominal de 13 kgfcm, foram insuficientes para realizar o movimento de esterçamento adequado quando o *rover* estava em contato com o solo. Esse comportamento evidenciou que os esforços mecânicos superaram a capacidade de torque dos servomotores utilizados, comprometendo a eficiência das manobras e a funcionalidade em condições reais de operação.

Durante os ensaios, constatou-se que os servomotores MG996R utilizados, com torque nominal de 13 kgfcm, foram insuficientes para realizar o esterçamento adequado das rodas quando o *rover* estava em contato com o solo. Em contrapartida, os ensaios realizados com o *rover* sobre a bancada demonstraram que o sistema de esterçamento funcionou de forma eficaz, permitindo a rotação das rodas nos ângulos calculados pela geometria de Ackermann com base nos comandos do controle remoto.

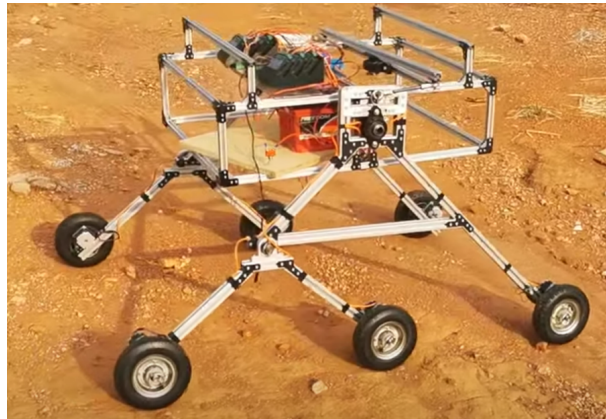
Diante desses resultados, torna-se evidente a necessidade de substituir os servomotores por componentes com maior capacidade de torque, a fim de atender às exigências do sistema de direção durante a operação do *rover* em condições reais de uso.

4.5.2 Ensaio de Percurso em Ambiente Relevante

Os ensaios foram realizados em terrenos compostos por terra, pedras e irregularidades topográficas, representando as condições de uso esperadas. O comportamento estrutural do *rover* demonstrou estabilidade e resistência frente às adversidades, confirmando a robustez do sistema.

Entretanto, observou-se uma movimentação axial indesejada na conexão entre *rocker* e *bogie*, indicando a necessidade de ajustes para restringir os movimentos exclusivamente radiais ao transpor obstáculos. Esse comportamento comprometeu parcialmente a funcionalidade do sistema *rocker-bogie*, evidenciando a necessidade de ajustes para restringir os movimentos exclusivamente radiais, conforme especificado no projeto. A Figura 44 ilustra o comportamento do *rover* durante os ensaios.

Figura 44 - Ensaio do *rover* em ambiente relevante.



4.5.2.1 Ensaio em Superfícies Inclinadas

Durante os ensaios em superfícies inclinadas, o *rover* apresentou bom desempenho em inclinações suaves, superando os obstáculos com sucesso. Contudo, em ângulos mais acentuados, observou-se perda de tração, especialmente em terrenos gramados, comprometendo o avanço.

Além disso, os motores de passo demonstraram insuficiência de torque para superar inclinações mais exigentes, mesmo em terrenos menos desafiadores. A Figura 45 apresenta o desempenho do *rover* em terrenos inclinados.

Figura 45 - Ensaio do *rover* em terrenos inclinados.



4.5.3 Análise dos Ensaios de Validação

Os resultados dos ensaios de validação inicial indicam que o *rover* apresentou bom desempenho geral, com pontos de destaque e limitações identificadas durante os ensaios.

A implementação da geometria de Ackermann demonstrou melhorias significativas na eficiência das manobras, reduzindo o atrito lateral e proporcionando curvas mais suaves. Contudo, os servomotores utilizados foram insuficientes em torque, necessitando substituição para garantir a funcionalidade do sistema de direção em condições operacionais.

Os ensaios de percurso em ambiente relevante confirmaram a estabilidade estrutural do *rover*, com destaque para a resistência ao transpor terrenos irregulares. Entretanto, a movimentação axial entre *rocker* e *bogie* requer ajustes para otimizar o comportamento dinâmico da estrutura.

Nos ensaios em superfícies inclinadas, o desempenho foi satisfatório em inclinações suaves, mas as limitações de tração e torque comprometeram o avanço em terrenos mais íngremes. Isso evidencia a necessidade de reavaliar os motores de passo ou implementar mecanismos auxiliares para melhorar a capacidade de locomoção em inclinações mais severas.

Além das limitações identificadas nos subsistemas de direção e tração, os problemas de montagem também impactaram os resultados dos ensaios. A carenagem desenvolvida apresentou atrito excessivo entre as peças móveis, aumentando o esforço mecânico do sistema e comprometendo a eficiência da movimentação. Essa observação destaca a importância de otimizações no projeto das carenagens e demais componentes estruturais, com o objetivo de minimizar interferências e garantir um funcionamento mais eficiente do *rover*.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu um veículo não tripulado com tração integral 6x6, utilizando o mecanismo *rocker-bogie*, voltado para aplicações em automação agrícola e ambientes de difícil acesso. As etapas contemplaram a concepção, modelagem, prototipagem e construção do sistema, priorizando eficiência energética e robustez estrutural. A integração entre o sistema mecânico adaptativo e o sistema elétrico com painéis solares garantiu um funcionamento eficiente em condições adversas, destacando a viabilidade do uso de tecnologias sustentáveis.

Os objetivos gerais e específicos definidos no início do estudo foram parcialmente alcançados. O sistema *rocker-bogie* demonstrou capacidade de superar terrenos irregulares, validando sua robustez estrutural e funcionalidade em cenários práticos. O sistema elétrico, por sua vez, integrou de forma eficaz uma bateria estacionária e um painel solar, proporcionando autossuficiência energética parcial e alinhando o projeto com práticas sustentáveis.

A implementação da geometria de Ackermann melhorou significativamente a manobrabilidade do veículo, permitindo a realização de curvas suaves e controladas. No entanto, os servomotores MG996R apresentaram torque insuficiente para o esterçamento das rodas em contato com o solo, limitando o desempenho do sistema de direção em condições operacionais reais. Em testes realizados em bancada, o sistema mostrou-se funcional, comprovando a validade da solução teórica implementada.

Desafios e Limitações

Apesar dos resultados positivos, os testes experimentais revelaram desafios importantes que devem ser considerados em aperfeiçoamentos futuros:

- A técnica inicial de curvas por desaceleração e inversão de motores gerou esforços mecânicos excessivos, resultando em momentos torsores significativos nos mancais de conexão entre o *rocker* e o *bogie*.
- A perda de tração em terrenos inclinados, especialmente em superfícies gramadas, evidenciou a insuficiência de torque dos motores de passo utilizados no sistema de tração.
- Movimentos axiais indesejados no acoplamento entre o *rocker* e o *bogie* comprometeram parcialmente a funcionalidade do sistema, indicando a necessidade de ajustes estruturais para restringir deslocamentos não planejados.

- Problemas de montagem, como o atrito excessivo gerado pela carenagem, aumentaram o esforço mecânico do sistema e reduziram sua eficiência de movimentação.

Essas limitações destacam a importância de melhorias no sistema mecânico, elétrico e estrutural para atender às demandas operacionais previstas no projeto.

Contribuições Científicas e Tecnológicas

Como contribuição científica e tecnológica, este estudo demonstrou a aplicabilidade do mecanismo *rocker-bogie* em veículos não tripulados voltados para automação agrícola e operações em ambientes de difícil acesso. A integração eficiente do sistema elétrico com fontes renováveis, como o painel solar, representa um avanço significativo na busca por soluções sustentáveis e energeticamente autônomas.

Além disso, o desenvolvimento e a validação prática do veículo 6x6 apresentam um potencial promissor para servir de base em futuros estudos voltados à robótica móvel e agricultura de precisão, fornecendo uma plataforma mecanizada adaptativa para terrenos complexos.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nos desafios e limitações identificados, algumas melhorias são propostas para aperfeiçoar o sistema desenvolvido:

- Substituir os servomotores atuais por modelos com maior torque, garantindo o funcionamento adequado da geometria de Ackermann em condições operacionais reais;
- Realinhar as rodas em relação à estrutura do *rocker-bogie*, visando otimizar a distribuição das forças e reduzir o desgaste prematuro dos componentes;
- Aperfeiçoar o acoplamento entre o *rocker* e o *bogie*, restringindo movimentos axiais indesejados e aumentando a estabilidade estrutural;
- Reavaliar os motores de passo, optando por componentes com maior capacidade de torque, especialmente para aplicações em terrenos inclinados e com alta resistência mecânica;
- Reduzir o atrito gerado pela carenagem, otimizando seu projeto para evitar interferências com peças móveis e melhorar a eficiência mecânica;

- Implementar pneus específicos para diferentes tipos de solo, como superfícies arenosas ou lamacentas, a fim de garantir maior aderência e adaptabilidade a cenários operacionais variados;
- Alterar a condição de contorno nas simulações de carga, substituindo a hipótese de eixo perfeitamente rígido por uma representação mais realista, considerando grau de liberdade que há no eixo que liga o *bogie* ao *rocker*;
- Utilizar a metodologia 5W2H¹ para estruturar e implementar as melhorias propostas.

Considerações Finais

O desenvolvimento deste projeto contribui para a evolução de tecnologias mecanizadas aplicadas à automação agrícola e robótica móvel. O *rover* concebido apresentou resultados relevantes ao demonstrar a viabilidade técnica e energética do sistema, com foco em sustentabilidade e adaptação a terrenos complexos. Embora desafios tenham sido identificados, as soluções propostas abrem caminhos promissores para aprimoramentos futuros, reforçando o potencial do sistema como uma plataforma robusta e eficiente em aplicações reais.

¹A metodologia 5W2H consiste em responder sete perguntas essenciais para planejamento e execução de tarefas: *What* (O que será feito?), *Why* (Por que será feito?), *Where* (Onde será feito?), *When* (Quando será feito?), *Who* (Quem fará?), *How* (Como será feito?) e *How much* (Quanto custará?).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACARNLEY, P. **Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice**. 4th. ed. London, UK: IET Control Engineering Series, 2002. 13
- AL., A. L. et. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in pla with an open-source 3-d printer. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 5, p. 604–617, 2015. 8
- AL., G. Ćwikła et. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of fdm/fff 3d-printed parts. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 227, p. 012033, 2017. 8
- AL., J. J.-A. et. Energy dissipation enhancement of thin-walled 6063-t5 aluminium tubes by combining a triggering mechanism and heat treatment. **Metals**, v. 13, n. 922, 2023. 6
- AL., R. L. C. et. Aspectos essenciais das baterias chumbo-Ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 889–911, 2017. 13
- ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTO, O. C. do E.; SACRAMENTO, T. C. B. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Revista Científica - Nome não especificado no documento**, Não especificado no documento, p. 1–7, 2016. 16, 17
- AMORIM, F. L.; FRANÇA, M. B. Surface modification of tool steel by electrical discharge machining with molybdenum powder mixed in dielectric fluid. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, p. 4255–4267, 2017. 9
- ANDRADE, F. L. M. de. **Sistema de carregamento de baterias de chumbo-ácido de baixo custo**. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2014. 13
- ANJOS, L. M. dos. **Universidade Federal do Ceará - Repositório Institucional**, p. 1–46, 2022. Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva. Disponível em: <<<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/64679>>>. 7
- ATHANI, V. V. **Stepper Motors: Fundamentals, Applications and Design**. New Delhi, India: New Age International, 1997. ISBN 978-8122410068. 14
- AZEVEDO, A. V. R. d. F.; SILVA, R. E. A.; CALDAS, A. G. d. A.; ANDRADE, A. R. Estudo teórico experimental das propriedades mecânicas em ligas de aço sae 1020 e sae 1045. **Instituto Federal da Paraíba**, 2017. 6, 7
- BARRA, S. R. Os efeitos da pulsação térmica na soldagem mig/mag. **Corte e Conformação de Metais**, p. 98–118, outubro 2008. 9
- BARSOUM, I.; KHAN, F. Modeling of ductile crack propagation in expanded thin-walled 6063-t5 aluminum tubes. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 80, p. 160–168, 2014. 6

BEJO, F. G.; JÚNIOR, S. A. V.; CAMINAGA, C. Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos aços sae 1045 e sae 1020 em diferentes condições metalúrgicas. **Matéria**, v. 26, n. 3, 2021. 6, 7

BIGGI, R. R. **O uso da luz solar como fonte de energia elétrica através de sistema fotovoltaico – SF**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. 16

BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. 12

CAVALCANTE, R. de S. Estudo sobre controladores de carga para sistemas de microgeração híbrida eólico-solar. **Universidade Federal de Campina Grande - Repositório Institucional**, p. 1–60, 2024. Orientador: Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero. Disponível em: <<<https://repositorio.ufcg.br>>>. 16

CHOI JUN SEOK PARK, B. S. L. M. W.; LEE, M. H. Ackerman geometry and four-wheel steering systems. **International Conference on Control, Automation and Systems**, p. 197–202, 2008. 10, 11

CHRIST, P.; NEUWINGER, B.; WERNER, F.; RÜCKERT, U. Performance analysis of the nrf24l01 ultra-low-power transceiver in a multi-transmitter and multi-receiver scenario. **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, p. 1–6, 2011. 15

DAS, S.; JOSHI, S. N. Measurement and analysis of molybdenum wire erosion and deformation during wire electric discharge machining of ti-6al-4v alloy. **Measurement**, v. 179, p. 109440, 2021. 8

FAMAK. **Catálogo Técnico 2015: Perfil de Alumínio Modular**. FAMAK Soluções Industriais: [s.n.], 2015. Disponível em: <<[Caminhoparaoarquivo fornecido](#)>>. Último acesso em: 13 de março de 2024. 7

FERREIRA, R. T. Análise da viabilidade econômica da substituição de banco de baterias: chumbo-ácido x ni-cd, considerando diferentes temperaturas ambiente. **Universidade Federal do Espírito Santo**, 2023. 13

Forseti Soluções. **Motor de Passo NEMA 23**. 2024. Último acesso em: 27 de novembro de 2024. Disponível em: <<<https://loja.forsetisolucoes.com.br/motor-de-passo-nema-23>>>. 14

Freedom by Heliar. **Produtos Freedom Estacionária**. 2024. Último acesso em: 27 de novembro de 2024. Disponível em: <<<https://www.freedomestacionaria.com.br/produtos>>>. 13

G. HARSHIT RAI, N. K. M. N. R. P. R. C. G. M. M. Implementation of rocker bogie mechanism in agriculture. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 11, n. 5, p. 5343–5344, 2023. Disponível em: <<<https://www.ijraset.com>>>. 3, 4

HAJOS, G. A.; JONES, J. A.; BEHAR, A. An overview of wind-driven rovers for planetary exploration. **43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, p. 1–9, 2005. Disponível em: <<<https://arc.aiaa.org>>>. 4

HU, D.; KE, H.; FU, W. Research and design of control system based on nrf24l01 for intellectualized vehicle. **2017 IEEE 6th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)**, p. 685–690, 2017. 15

JUNIOR, A. A. dos S. **Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos**. 1ª edição. ed. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 27

JUNIOR, A. F. G. **Projeto, construção e caracterização de um triciclo em liga de alumínio 6063-T5**. Tese de Doutorado. Doutorado — Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, Brasil, 2019. 6

JUNIOR, A. S. N.; MIRANDA, R. d. S.; CUNHA, A. P. A. Análise de propriedades mecânicas e microestruturais do aço sae 1020. In: **Engenharias Mecânica e Industrial: Projetos e Fabricação**. [S.l.]: Atena Editora, 2018. 7

JUNIOR, E. F. C.; JUNIOR, J. U.; SERATIUK, A. R.; TONOLO, E. A. Energia solar fotovoltaica e automóveis elétricos: a combinação de um modelo para redução de emissões de carbono na cidade de curitiba. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, p. 653–678, 2019. Disponível em: <<<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts>>>. 16, 17

KAKDE, P. N.; CHOUDHARY, D. S. K. Design and fabrication of rocker-bogie mechanism. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 11, n. VI, p. 3224–3228, 2023. ISSN 2321-9653. Disponível em: <<<https://www.ijraset.com>>>. 3, 4, 5

LOPES, R. R. de O. **Sistema de monitoramento de baterias chumbo-ácido estacionárias para a determinação do estado de carga e do estado de saúde**. Campina Grande, Brasil: [s.n.], 2017. Relatório de Estágio. 13

MAHBUB, M. Design and implementation of multipurpose radio controller unit using nrf24l01 wireless transceiver module and arduino as mcu. **International Journal of Digital Information and Wireless Communications**, v. 9, n. 2, p. 61–72, 2019. 15

MARTHA, L. F.; RANGEL, R. L. Ftool: Three decades of success as an educational program for structural analysis. **Proceedings of the XLIII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**, p. 1–10, 2022. Available online: <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool>>. 9

MINH, T. V.; ANH, N. T.; TUNG, T. T. Torque measurement system design for step motor 23hs30-3004s. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 15, n. 1, p. 19073–19077, 2025. 14

MITCHELL, A. S. W. C.; SCOTT, I. Analysis of ackermann steering geometry. **SAE Technical Paper Series**, 2006. 11

MOURALOVA, K.; BENES, L.; PROKES, T.; BEDNAR, J.; ZAHRADNICEK, R.; FRIES, J. Machining of pure molybdenum using wedm. **Measurement**, v. 163, p. 108010, 2020. 8

Mouser Electronics. **ESP32-DevKitC-32E - Espressif Systems**. 2024. Último acesso em: 17 de dezembro de 2024. Disponível em: <<<https://mou.sr/3zRl3Mr>>>. 15

NAGIMOVA, A.; PERVEEN, A. A review on laser machining of hard to cut materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 2440–2447, 2019. 8

NASA. **Three Generations of Rovers with Standing Engineers**. 2024. Último acesso em: 27 de novembro de 2024. Disponível em: <<<https://science.nasa.gov/resource/three-generations-of-rovers-with-standing-engineers/>>>. 1, 3, 4

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. ISBN 978-85-7307-940-3. 14

PIOVANI, J. T.; LEITE, C. T. P.; SANTOS, G. F. dos; SILVA, M. P. da; SANTOS, M. E. dos; SOPHILIO, N. C.; XAVIER, R. Carro elétrico movido a energia solar. **Revista Científica - Nome não especificado no documento**, v. 17, p. 5–12, 2015. ISSN 1980-7341. 17

POTHIRASAN, N.; RAJASEKARAN, M. P. Automatic vehicle to vehicle communication and vehicle to infrastructure communication using nrf24l01 module. **2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)**, p. 400–405, 2016. 14

RAJPUROHIT, S. R.; DAVE, H. K. Effect of process parameters on tensile strength of fdm printed pla part. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 8, p. 1317–1324, 2018. 8

REITER, R. A.; REITER, R. D. de O.; PÉRES, A. Controlador de carga de acordo com a portaria 396 do inmetro. **Departamento de Engenharia Elétrica e de Telecomunicações - Universidade Regional de Blumenau (FURB)**, p. 1–20, 2024. Contato: reiter@terra.com.br, aperes.furb@gmail.com. Disponível em: <<<https://exampleurl.com>>>. 16

S BHOOPESH D, A. K. C. B. A. N. P. Design and fabrication of rocker-bogie pesti-bot using rotary mechanism. **2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)**, p. 681–683, 2021. 1, 3, 4

SANDBHOR SANKET KACHALE, A. B. A. G. K. K. P. S. R. Design and development of an autonomous rover application using a rocker-bogie mechanism in agriculture. **International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)**, v. 4, n. 5, p. 562–564, 2024. Disponível em: <<<https://www.ijarsct.co.in>>>. 1, 3, 4

SAORÍN, J. L.; TORRE-CANTERO, J. de la; DÍAZ, D. M.; LÓPEZ-CHAO, V. Cloud-based collaborative 3d modeling to train engineers for the industry 4.0. **Applied Sciences**, v. 9, p. 4559, 2019. 9

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; OKUYAMA, M. P.; SILVA, R. H. G. e. Soldagem tig de elevada produtividade: Influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. **Soldagem e Inspeção**, v. 16, n. 4, p. 333–340, 2011. Recebido em 27/08/2010; Texto final em 03/12/2011. 9

SERAJI, H. Traversability index: A new concept for planetary rovers. **Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, v. 3, p. 2006–2010, 1999. Disponível em: <<<https://ieeexplore.ieee.org/document/770401>>>. 3

SHIMABUKURO, T.; OLIVEIRA, M. L. S. M. Analysis of mechanical structures using advanced modeling techniques. **International Journal of Structural Engineering**, v. 25, p. 320–330, 2020. 9

SILVA, G. I. P. D.; PERERA, W. C. Improvement of the mechanical properties of aluminum 6063-t5 extrudates by varying the aging condition cost-effectively. **Conference Paper**, 2020. 6

SONG, P. P.; QI, Y. M.; CAI, D. C. Research and application of autodesk fusion360 in industrial design. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 359, p. 012037, 2018. 9

SUJIWA, A.; SUHADATA. Design and construction of a self-balancing robot using long range control based on nrf24l01. **Journal of Applied Electrical & Science Technology**, v. 5, n. 2, p. 34–36, 2023. 14

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **ANSI H35.2(M): Dimensional Tolerances for Aluminum Mill Products**. Metric. Arlington, VA, USA, 2009. American National Standards Institute. Disponível em: <<<https://www.aluminum.org>>>. 6

VAIDHYANATHAN LOKESH T, M. S. S. M. K. K. Y. An approach for design and fabrication of solar powered terrain vehicle under rocker bogie mechanism. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 11, n. 1, p. 1679–1681, 2023. Disponível em: <<<https://www.ijraset.com>>>. 4

VERMA, A.; YADAV, C.; SINGH, B.; GUPTA, A.; MISHRA, J.; SAXENA, A. Design of rocker-bogie mechanism. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**, v. 2, n. 5, p. 312–338, 2017. ISSN 2456-2165. Disponível em: <<<http://www.ijisrt.com>>>. 19

VINOD, D. N.; KAMALESH, A.; BHASKAR, B.; TEJA, B. R. Riddance of weed using an agri-robot employed by arduino and esp32 cam. **2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)**, p. 1–7, 2024. 14

WETTERGREEN, D.; JONAK, D.; KOHANBASH, D.; MORELAND, S.; SPIKER, S.; TEZA, J.; WHITTAKER, W. Design and experimentation of a rover concept for lunar crater resource survey. **47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition**, p. 1–8, 2009. Disponível em: <<<https://arc.aiaa.org>>>. 1, 4

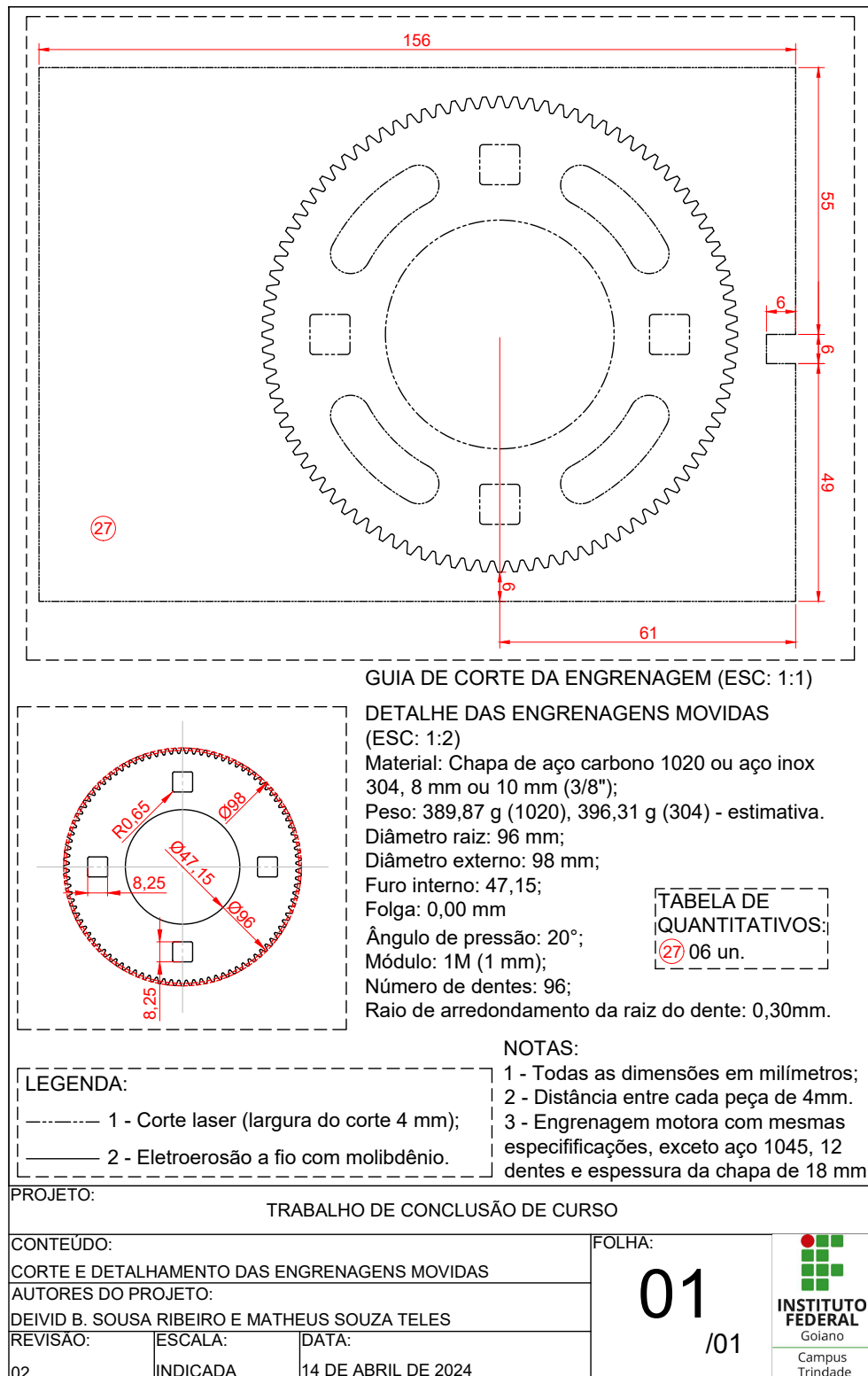
YUANSHENG, L.; XI, H. Analysis of the maximal transmission rate based on nrf24l01 chip system. **2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science**, p. 1–4, 2010. 15

ZHAO XIANG LIU, Z.-J. F. J.-S.; DAI, J. S. Design of an ackermann-type steering mechanism. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 227, n. 11, p. 2549–2562, 2013. 10, 11

CAPÍTULO

APÊNDICE A - DETALHAMENTOS E DIAGRAMAS

A.1 Corte e Detalhamento das Engrenagens Movidas



A.2 Detalhamento dos Conectores de Perfis 1 de 2

[LEGENDA:
(ESC: 1:6)

01

Quantidade: 32 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 46,31 g (1020), 47,08 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø4,2 mm.

02

Quantidade: 36 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 28,23 g (1020), 28,70 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø4,2 mm.

03

Quantidade: 8 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 46,58 g (1020), 47,35 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø6,2 mm.

04

Quantidade: 6 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 64,99 g (1020), 66,06 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø6,2 mm.

DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 1/2.

(ESC: 1:2)

Material: Aço carbono 1020 ou aço inox 304;
Espessura: 1/8" ou 3 mm.

NOTAS:

1 - Todas as dimensões em milímetros.

TABELA DE QUANTITATIVOS:

01 32 un.	06 02 un.	11 02 un.
02 36 un.	07 01 un.	12 04 un.
03 08 un.	08 02 un.	13 06 un.
04 06 un.	09 02 un.	14 02 un.
05 08 un.	10 06 un.	15 08 un.

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 1/2

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISAO:

ESCALA:

DATA:

INDICADA

14 DE ABRIL DE 2024

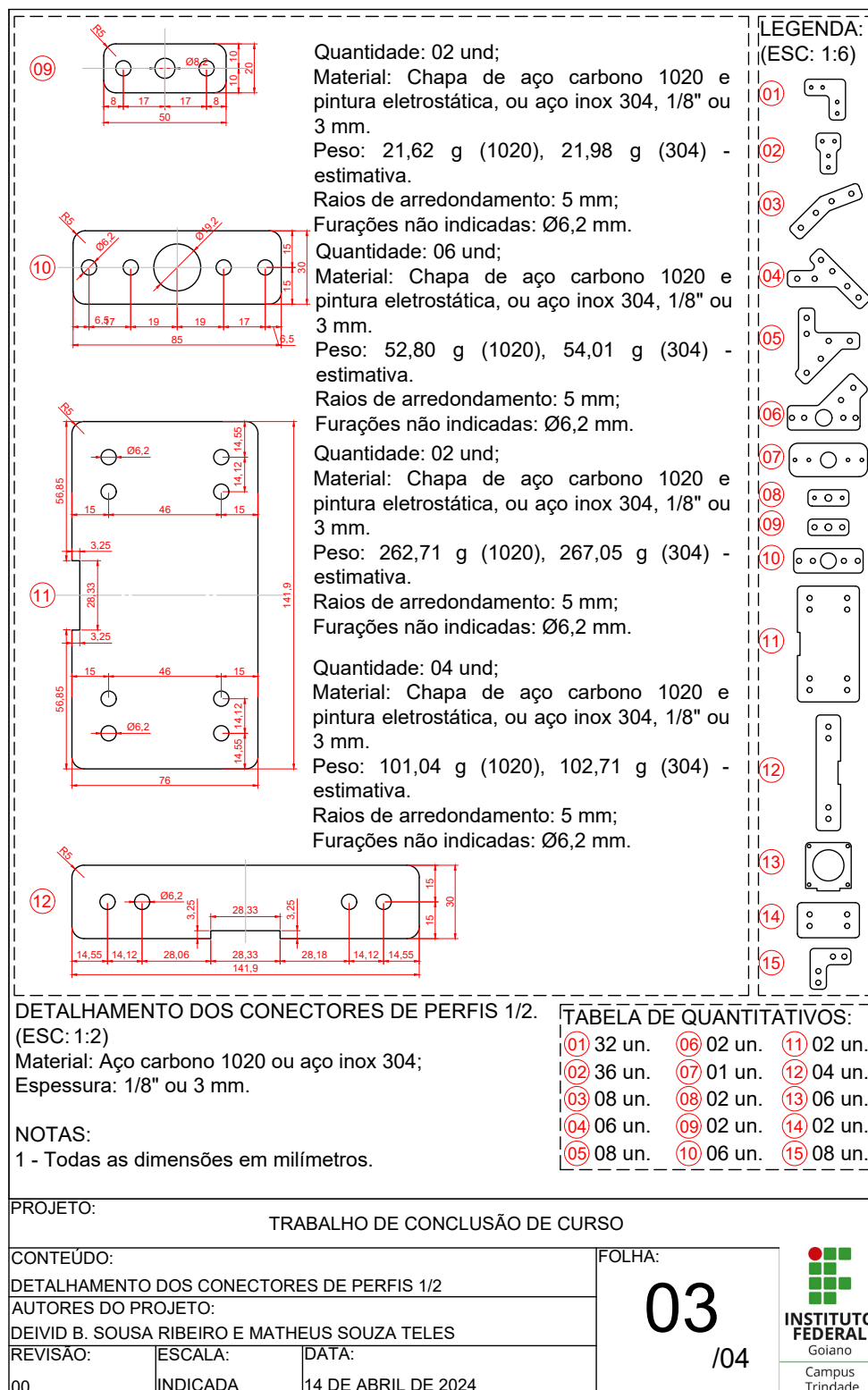
FOLHA:

01

/04

**INSTITUTO
FEDERAL**
Goiano

Campus
Trindade



DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 1/2.
(ESC: 1:2)
Material: Aço carbono 1020 ou aço inox 304;
Espessura: 1/8" ou 3 mm.

NOTAS:
1 - Todas as dimensões em milímetros.

TABELA DE QUANTITATIVOS:

01 32 un.	06 02 un.	11 02 un.
02 36 un.	07 01 un.	12 04 un.
03 08 un.	08 02 un.	13 06 un.
04 06 un.	09 02 un.	14 02 un.
05 08 un.	10 06 un.	15 08 un.

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 1/2

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISÃO: 00 **ESCALA:** INDICADA **DATA:** 14 DE ABRIL DE 2024

FOLHA:

03

/04

INSTITUTO FEDERAL
Goiano
Campus Trindade

13

Quantidade: 06 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 50,38 g (1020), 51,22 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø4,2 mm.

14

Quantidade: 02 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 78,81 g (1020), 80,12 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø6,2 mm.

15

Quantidade: 08 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 36,43 g (1020), 37,03 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø6,2 mm.

LEGENDA:
(ESC: 1:6)

DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 1/2.
(ESC: 1:2)
Material: Aço carbono 1020 ou aço inox 304;
Espessura: 1/8" ou 3 mm.

NOTAS:
1 - Todas as dimensões em milímetros.

TABELA DE QUANTITATIVOS:

01 32 un.	06 02 un.	11 02 un.
02 36 un.	07 01 un.	12 04 un.
03 08 un.	08 02 un.	13 06 un.
04 06 un.	09 02 un.	14 02 un.
05 08 un.	10 06 un.	15 08 un.

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 1/2

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISÃO:

00

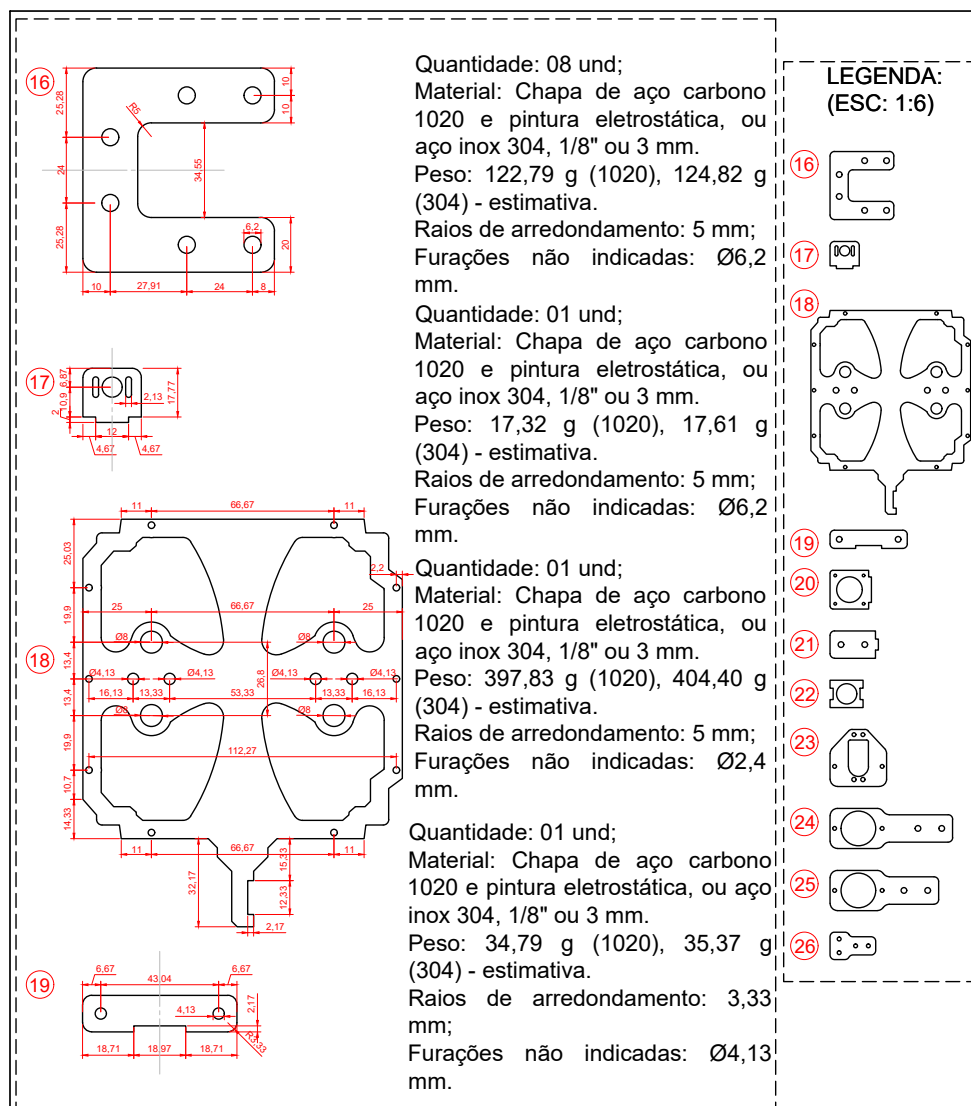
FOLHA:

04

/04

INSTITUTO FEDERAL
Goiano
Campus Trindade

A.3 Detalhamento dos Conectores de Perfis 2 de 2



DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 2/2.

(ESC: 1:2)

Material: Aço carbono 1020 ou aço inox 304;
Espessura: 1/8" ou 3 mm.

NOTAS:

1 - Todas as dimensões em milímetros.

TABELA DE QUANTITATIVOS:

16	08 un.	21	08 un.	26	04 un.
17	01 un.	22	04 un.		
18	01 un.	23	04 un.		
19	01 un.	24	04 un.		
20	01 un.	25	04 un.		

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

DETALHAMENTO DOS CONECTORES DE PERFIS 2/2

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISÃO:

ESCALA:

DATA:

100

INDICADA

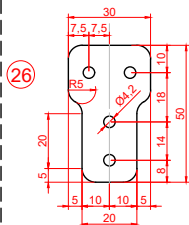
14 DE ABRIL DE 2024

FOLHA:

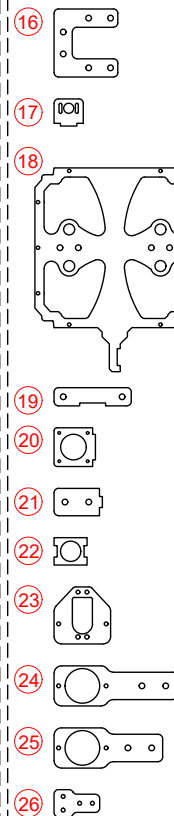
01

/03





Quantidade: 04 und;
Material: Chapa de aço carbono 1020 e pintura eletrostática, ou aço inox 304, 1/8" ou 3 mm.
Peso: 26,68 g (1020), 27,12 g (304) - estimativa.
Raios de arredondamento: 5 mm;
Furações não indicadas: Ø4,2 mm.



16	08 un.	21	08 un.	26	04 un.
17	01 un.	22	04 un.		
18	01 un.	23	04 un.		
19	01 un.	24	04 un.		
20	01 un.	25	04 un.		

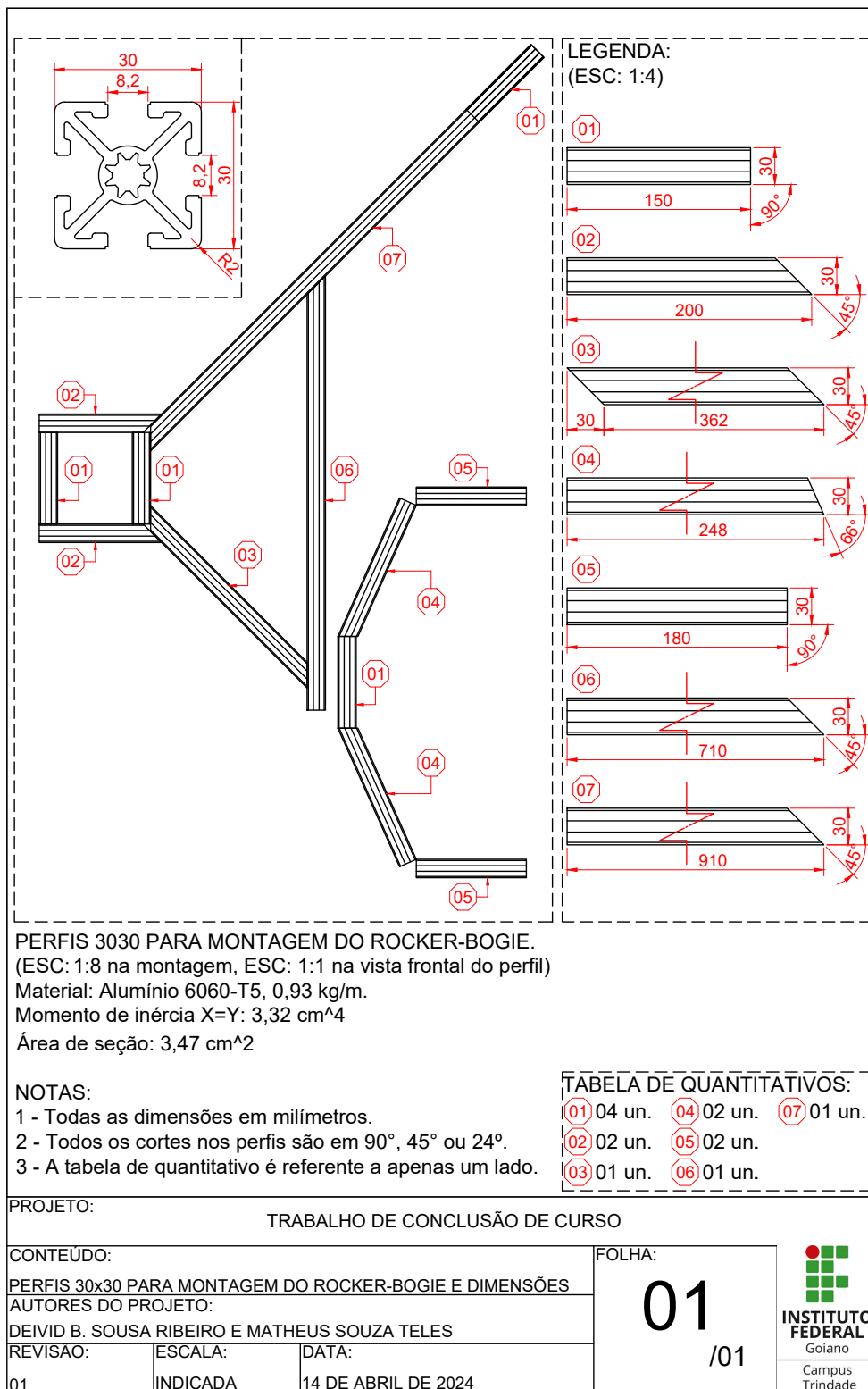


A.4 Detalhamento dos Eixos

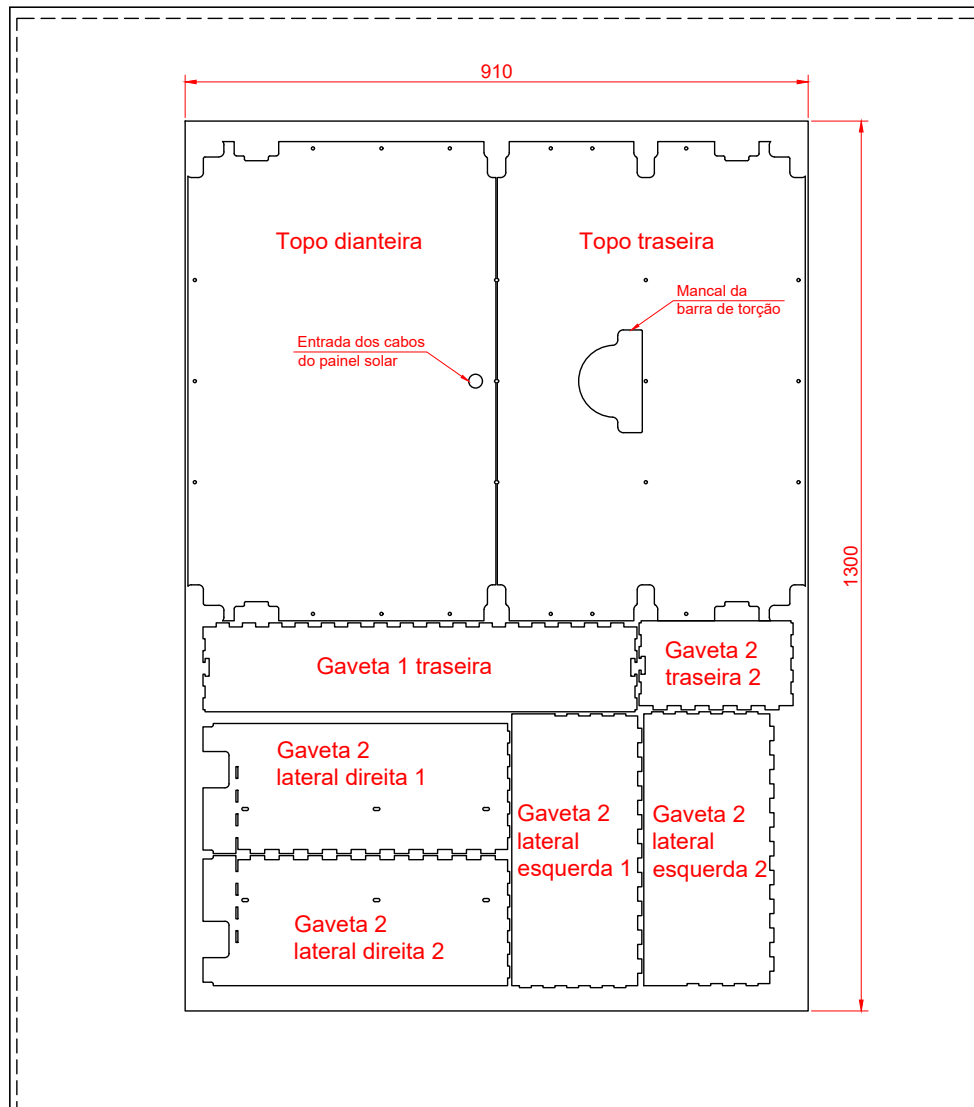
EIXO DO TERMINAL ROTULAR	Quantidade: 4 und; Material: Tarugo maciço de aço carbono 1020 e galvanização, ou aço inox 304; Peso: 24,36 g (1020), 24,76 g (304) - estimativa.	NOTAS: 1 - Todas as dimensões em milímetros. 2 - Todas as vistas são superiores, exceto a vista frontal do tubo do eixo do rocker. 3- Tolerância de 0,02 mm para os eixos. 4 - Utilizar bedame em todas as quinas
EIXO DO BOGIE	Quantidade: 2 und; Material: Tarugo maciço de aço carbono 1020 e galvanização, ou aço inox 304; Peso: 246,39 g (1020), 250,46 g (304) - estimativa.	
EIXO DA BARRA DE TORÇÃO	Quantidade: 1 und; Material: Tarugo maciço de aço carbono 1020 e galvanização, ou aço inox 304; Peso: 278,38 g (1020), 282,98 g (304) - estimativa.	
EIXO DAS RODAS	Quantidade: 6 und; Material: Tarugo maciço de aço carbono 1020 e galvanização, ou aço inox 304; Peso: 287,11 g (1020), 291,85 g (304) - estimativa.	
EIXO DO ROCKER	Quantidade: 1 und; Material: Tubo redondo de aço carbono 1020 e galvanização, ou aço inox 304, parede de 3mm; Peso: 1435,99 g (1020), 1459,71 g (304) - estimativa.	

PROJETO: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			FOLHA: 01 /01	
CONTEÚDO: DETALHAMENTO DOS EIXOS				
AUTORES DO PROJETO: DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES				
REVISÃO: 03	ESCALA: 1:1	DATA: 14 DE ABRIL DE 2024		

A.5 Perfis 30x30 para Montagem do *Rocker-Bogie* e Dimensões



A.6 Plano de Corte da Carenagem e Compartimentos



PLANO DE CORTE DOS CONEC. DE PERFIS. (ESC: 1:8)

Material: MDF, acrílico ou policarbonato 3 mm;

Dimensões LxC: 1300x900 mm, espessura de 1/8" ou 3 mm.

NOTAS:

1 - Todas as dimensões em milímetros;

2 - Distância entre cada peça de 3 mm.

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

PLANO DE CORTE DA CARENAGEM E COMPARTIMENTOS

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISÃO:

01

ESCALA:

INDICADA

DATA:

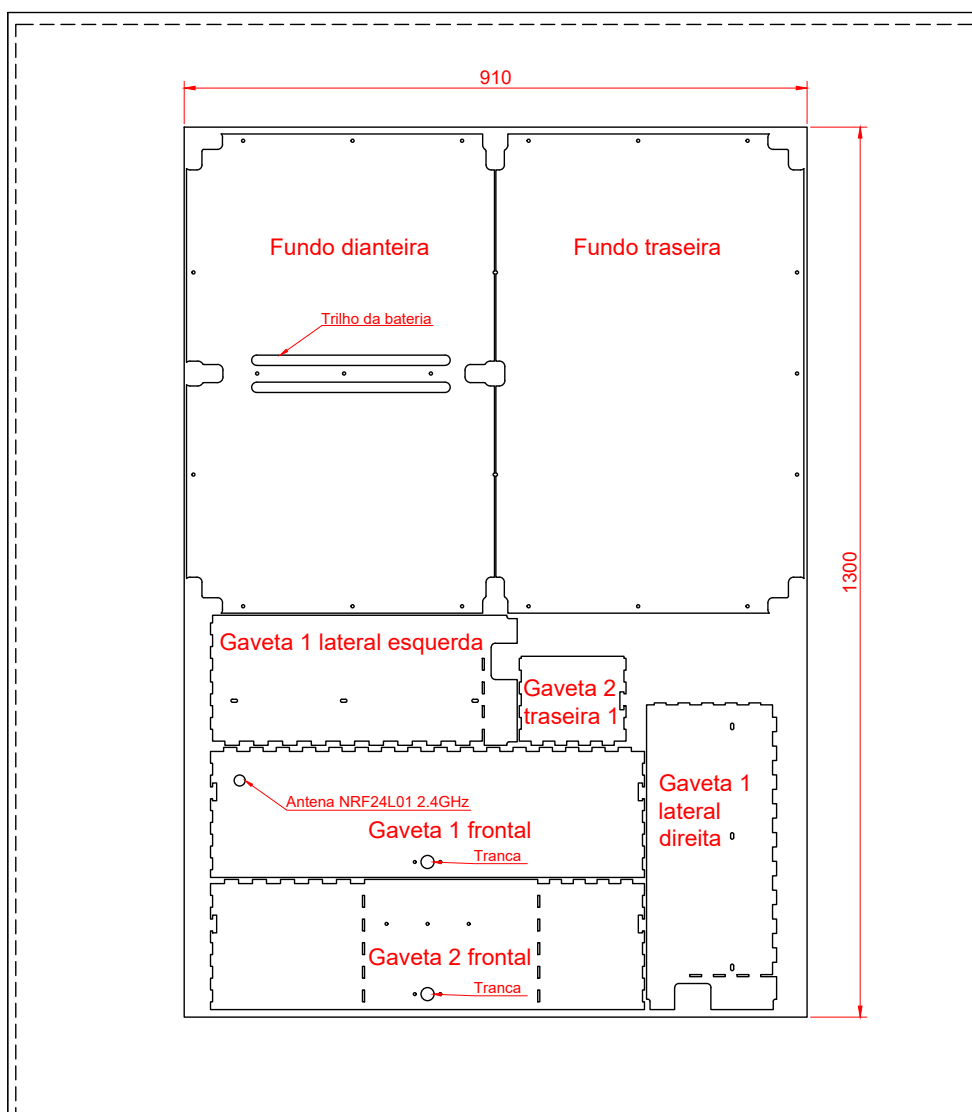
14 DE ABRIL DE 2024

FOLHA:

01

/03





PLANO DE CORTE DOS CONEC. DE PERFIS. (ESC: 1:8)

Material: MDF, acrílico ou policarbonato 3 mm;

Dimensões LxC: 1300x900 mm, espessura de 1/8" ou 3 mm.

NOTAS:

1 - Todas as dimensões em milímetros;

2 - Distância entre cada peça de 3 mm.

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

PLANO DE CORTE DA CARENAGEM E COMPARTIMENTOS

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISÃO:

ESCALA:

DATA:

01

INDICADA

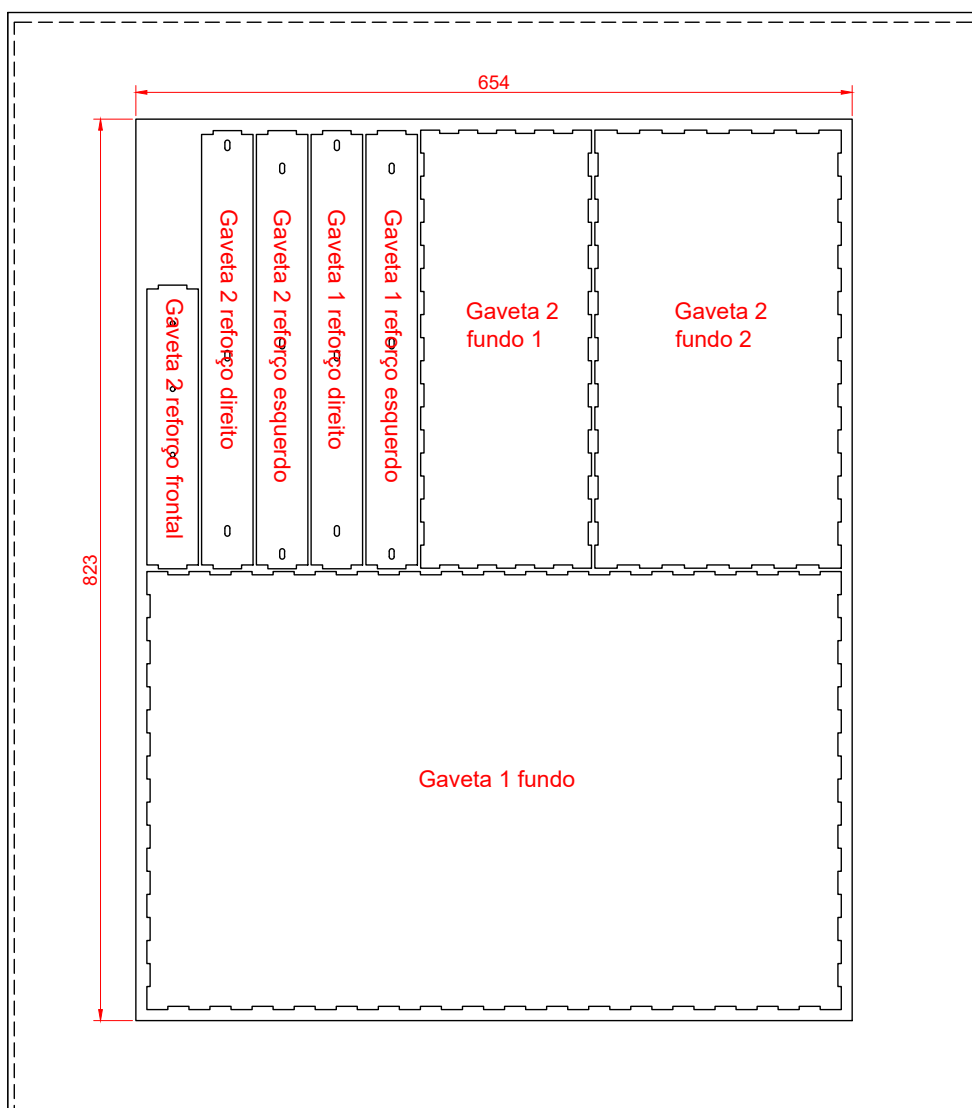
14 DE ABRIL DE 2024

FOLHA:

02

/03





PLANO DE CORTE DOS CONEC. DE PERFIS. (ESC: 1:5)

Material: MDF, acrílico ou policarbonato 6 mm;

Dimensões LxC: 823x654 mm, espessura de 1/4" ou 6 mm.

NOTAS:

1 - Todas as dimensões em milímetros;

2 - Distância entre cada peça de 3 mm.

PROJETO:

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTEÚDO:

PLANO DE CORTE DA CARENAGEM E COMPARTIMENTOS

AUTORES DO PROJETO:

DEIVID B. SOUSA RIBEIRO E MATHEUS SOUZA TELES

REVISÃO:

ESCALA:

DATA:

01

INDICADA

14 DE ABRIL DE 2024

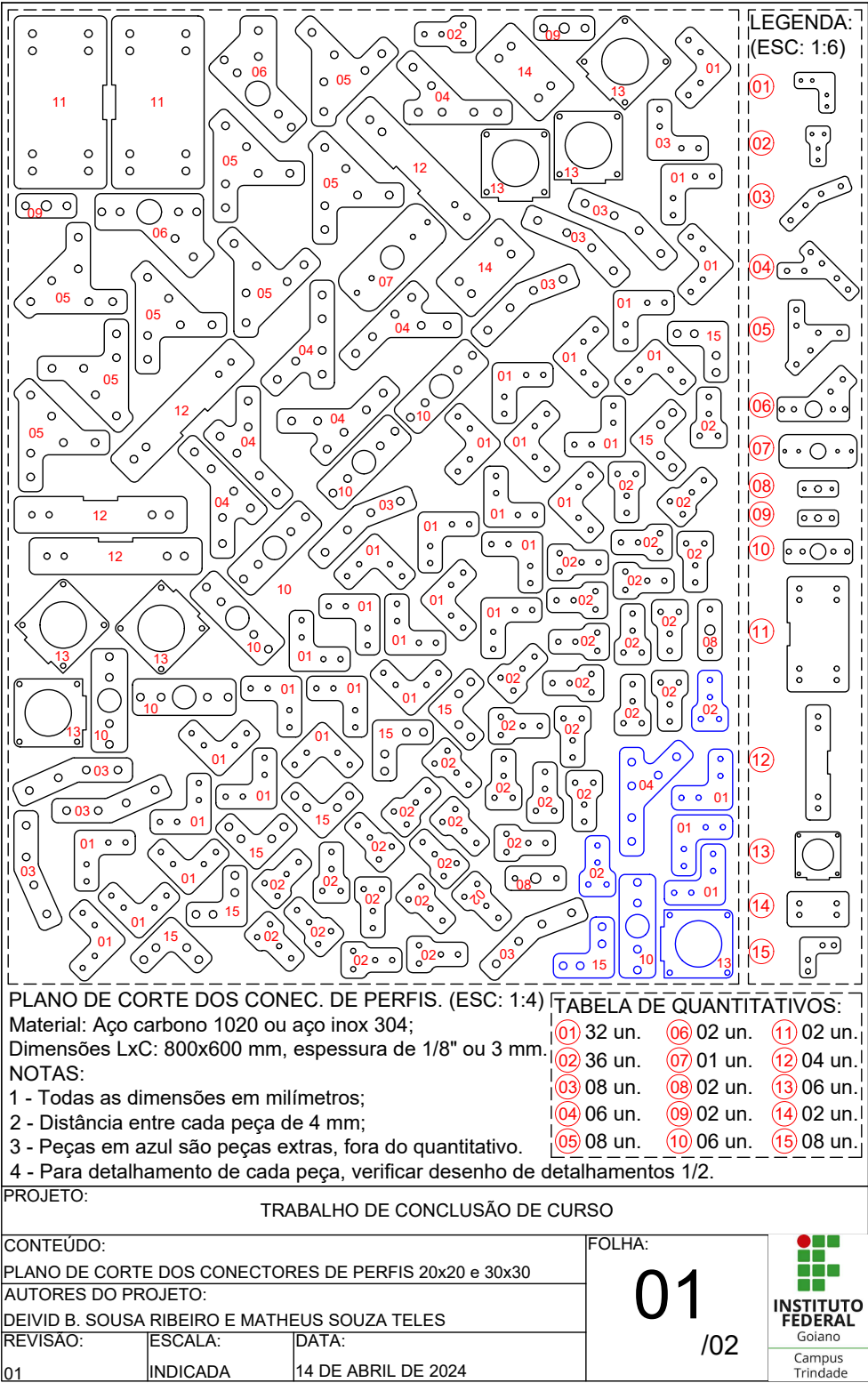
FOLHA:

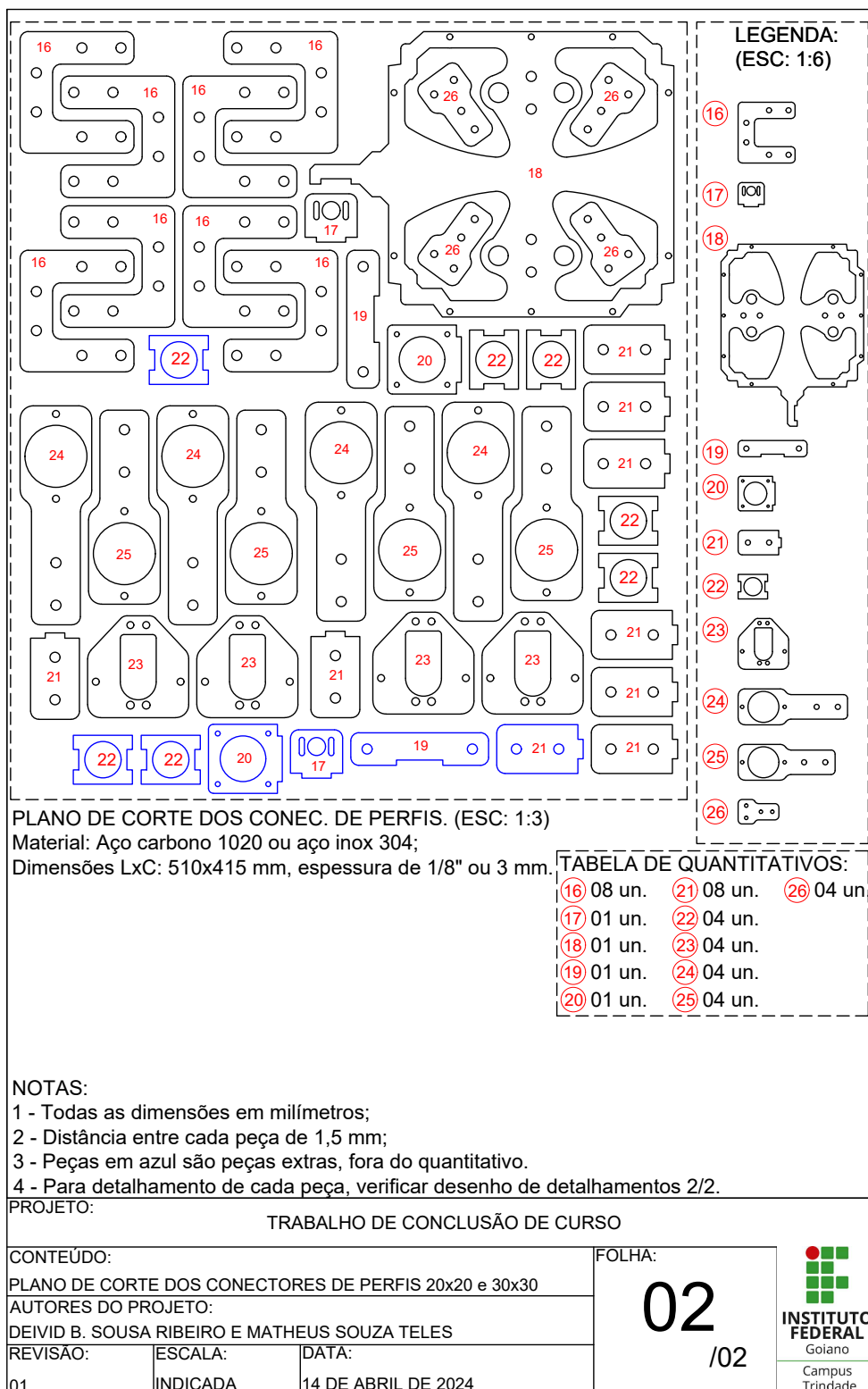
03

/03

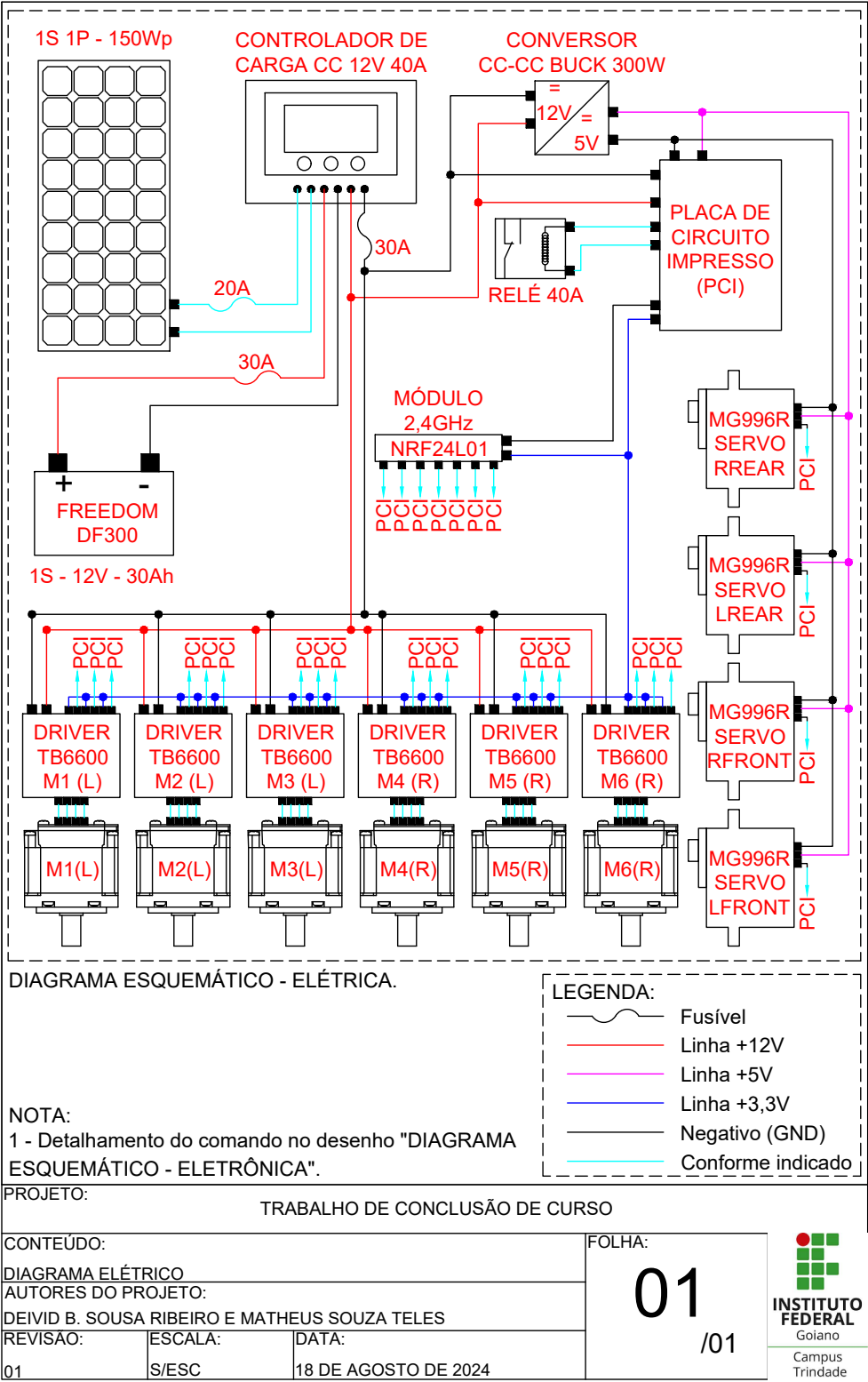


A.7 Plano de Corte dos Conectores de Perfis 20x20 e 30x30

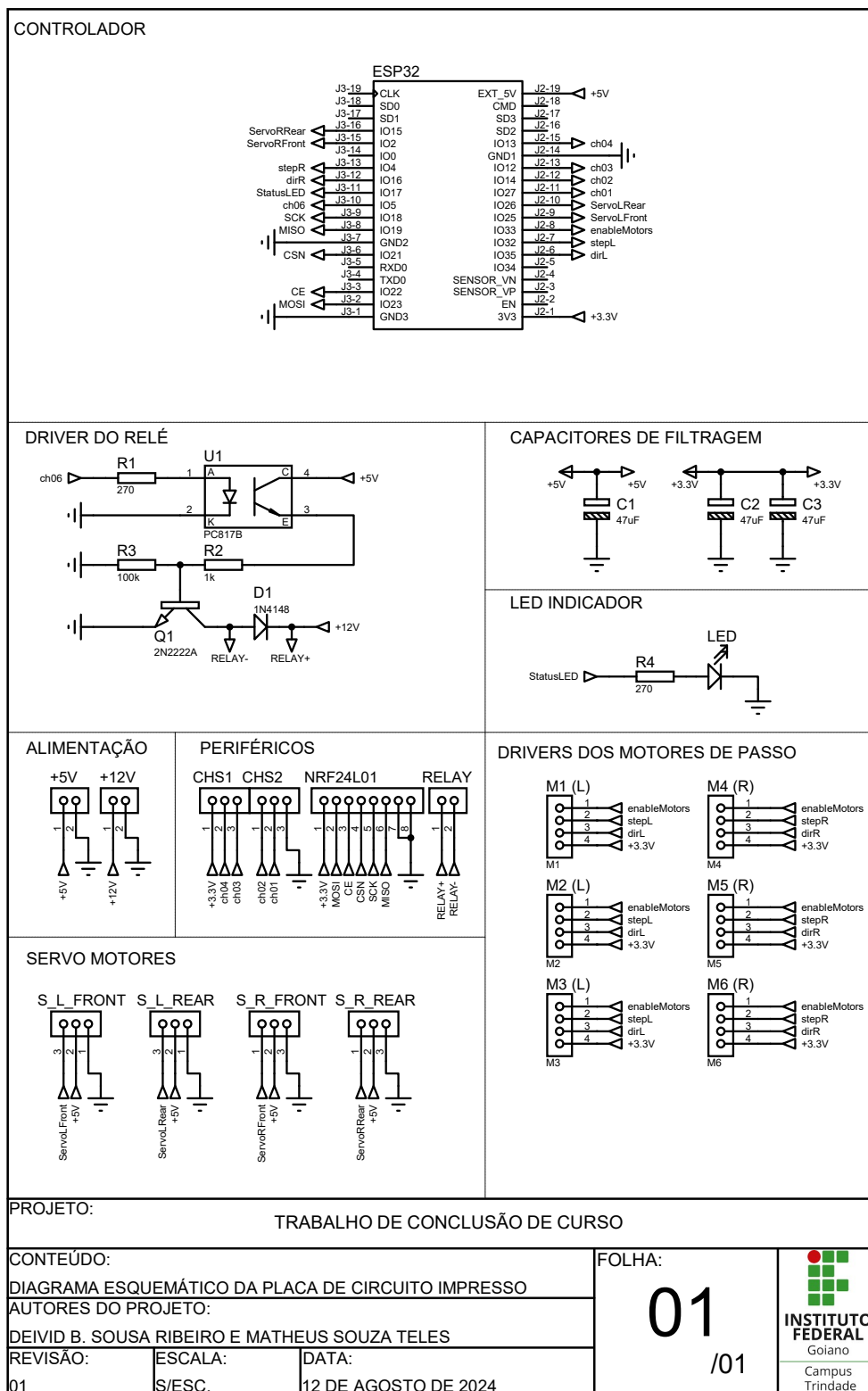




A.8 Diagrama Elétrico



A.9 Diagrama Esquemático da Placa de Circuito Impresso da Controladora Principal do *Rover*



A.10 Materiais Utilizados

Materiais Mecânicos	
Componente	Quantidade
Arroela de pressão 5/16"	48 und.
Barra roscada 3/16"x1000mm aço galvanizado	1 und.
Cantoneira 38x38x1,5mm em alumínio / p perfis base 15 e 20, M5	48 und.
Corrediça	4 und.
Engrenagens tipo spur, módulo 1 (m1), 12 dentes (12t), p/ eixo 1/4", 18 mm	6 und.
Mancal com rolamento obm ucfl 205	4 und.
Mancal de eixo fixo com rolamento 6005zz-d25-l40	2 und.
Mancal fixo shf25, suporte 25mm	2 und.
Parafuso francês inox ou aço galvanizado 5/16"x2.3/4"	24 und.
Parafuso M3x30mm inox	24 und.
Parafuso M4x14mm inox	16 und.
Parafuso M4x8mm inox	500 und.
Parafuso M6x10mm aço galvanizado	300 und.
Perfil estrutural em alumínio 20x20 v-slot - canal 6. 1000mm	4 und.
Perfil estrutural em alumínio 20x20 v-slot - canal 6. 200mm	5 und.
Perfil estrutural em alumínio 20x20 v-slot - canal 6. 600mm	3 und.
Perfil estrutural em alumínio 20x20 v-slot - canal 6. 660mm	4 und.
Perfil estrutural em alumínio 20x20 v-slot - canal 6. 940mm	1 und.
Perfil estrutural em alumínio 20x20 v-slot - canal 6. 950mm	3 und.
Pino quebra dedo com argola liso 3/16" x 2"	15 und.
Porca martelo M4 canal 6 p/ perfil v-slot	500 und.
Porca martelo M6 canal 8 p/ perfil v-slot	300 und.
Porca nylon (autotravante) 3/16"	24 und.
Porca nylon (autotravante) 5/16"	24 und.
Prisioneiro M10 X 150	2 und.
Rolamento 6204zz	4 und.
Tarugo de aço carbono 1020 1.1/4"x1000mm	1 und.
Terminal rotular fêmea direita M10 x 1,50	2 und.
Terminal rotular fêmea esquerda M10 x 1,50	2 und.
Tubo aço inox 1" x 1m	1 und.
Materiais Elétricos e Eletrônicos	
Componente	Quantidade
Bateria 30Ah	1 und.
Controlador de carga 30A	1 und.
Conversor CC-CC buck 25a	1 und.
Drivers tb6600	6 und.
Esp32	2 und.
Módulo <i>joystick</i>	1 und.
Módulo de radiofrequência NRF24L01	2 und.
Motores de passo 12kgfcm	6 und.
Painel solar 150W	1 und.
Servo motores mg996r 13kgfcm	4 und.

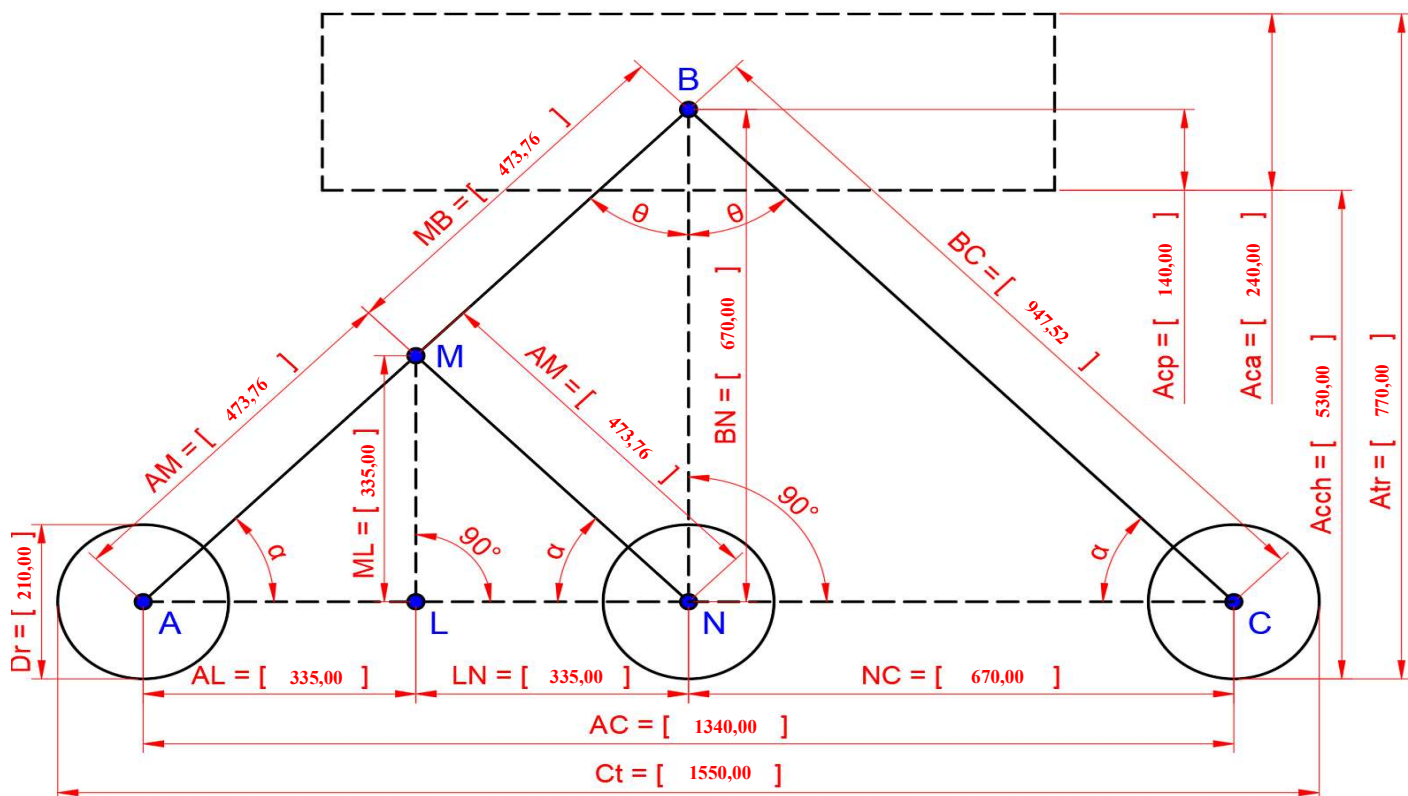
A.11 Memorial de Cálculo do Mecanismo *Rocker-Bogie*

MEMORIAL DE CÁLCULO DO MECANISMO ROCKER-BOGIE

Os cálculos abaixo representados são baseados no método utilizado em Design Of Rocker-Bogie Mechanism (Verma et al., 2017).

Parâmetros para o cálculo: (Segmentos de reta representados em negrito, ângulos em *índice*, triângulo do Rocker semelhante ao do Bogie, $ABC=2*AMN$)

PARÂMETRO	MÓDULO	UNIDADE	DESCRIÇÃO/EQUAÇÃO
Dr	210,00	mm	Diâmetro da roda.
Ct ($ AC +Dr$)	1550,00	mm	Comprimento total do mecanismo (segmento $ AC $ + Dr).
At ($ BN $)	670,00	mm	Altura total do mecanismo, do chão ao pivô do Rocker (ponto B). Para 45° , $ AC /2$.
Aca	240,00	mm	Altura da caixa central (base da caixa ao topo).
Acp	140,00	mm	Altura entre a base da caixa e o pivô do Rocker (ponto B).
ABC	90,00	° (graus)	$ABC = AMN = 2*arctg(AN / BN) = 2*\theta$
θ	45,00	° (graus)	$\theta = ABN = CBN = AML = NML = ABC/2$.
α	45,00	° (graus)	$\alpha = NAM = NCB = ACB = CAB = (180-ABC)/2$.
$ BC $	947,52	mm	$ BC ^2 = BN ^2 + NC ^2$
$ AC $	1340,00	mm	$ AC = Ct - Dr$.
$ AN = NC $	670,00	mm	$ AN = NC = AC /2$.
$ AM = MB = MN $	473,76	mm	$ AM = MB = MN = BC /2$. Devido a semelhança entre o triângulo ABC e triângulo AMN.
$ ML $	335,00	mm	$ ML = BC /2$
$ AL = LN $	335,00	mm	$ AL = LN = AN /2$
Acch	530,00	mm	Acch = At - Acp. Altura da base da caixa ao chão.
Atr	770,00	mm	Atr = Aca + Acch. Altura total do rover.



Desenho fora de escala em módulo e ângulo.

A.12 Código-Fonte do Microcontrolador Receptor (*Rover*)

A.12.1 Código Principal

Listing A.1 - Arquivo principal do ESP32 receptor (RX.ino)

```
1
2 #include <ESP32Servo.h>
3 #include <SPI.h>
4 #include <nRF24L01.h>
5 #include <RF24.h>
6 #include "Communication.h"
7 #include "Motors.h"
8
9 // Definicao das GPIOs
10 const int dirPinL = 13;           // GPIO de direcao lado ESQUERDO
    (TB6600)
11 const int dirPinR = 16;           // GPIO de direcao lado DIREITO
    (TB6600)
12 const int stepPinL = 32;          // GPIO de passo lado ESQUERDO
    (TB6600)
13 const int stepPinR = 4;           // GPIO de passo lado DIREITO
    (TB6600)
14 const int pinServoLFront = 25;    // GPIO servo ESQUERDO DIANTEIRO
    (MG996R)
15 const int pinServoLRear = 26;     // GPIO servo ESQUERDO TRASEIRO
    (MG996R)
16 const int pinServoRFront = 2;     // GPIO servo DIREITO DIANTEIRO
    (MG996R)
17 const int pinServoRRear = 15;     // GPIO servo DIREITO TRASEIRO
    (MG996R)
18 const int statusLED = 17;         // GPIO LED STATUS
19 const int CE_PIN = 22;            // GPIO CE (NRF24L01)
20 const int CSN_PIN = 21;          // GPIO CSN (NRF24L01)
21 const int ch01 = 27;              // GPIO CH01
22 const int ch02 = 14;              // GPIO CH02
23 const int ch03 = 12;              // GPIO CH03
24 const int ch04 = 35;              // GPIO CH04 (APENAS INPUT)
25 const int ch05 = 5;              // GPIO CH05
26
27 // Definição de parametros gerais
28 const int maxFrequency = 2000;    // Hz
29 const int minFrequency = 600;     // Hz
30 const int WTD_communication = 500; // ms
31 const float JSdeathzone = 0.2;    // % de zona morta
32 const int chassisLength = 1340;   // mm
33 const int trackDistance = 1075;   // mm
34 const int maxExtertion = 45;      // Graus
```

```

35 const int servoDegrees = 270;           // Graus
36 const int offsetServoLFront = 0;        // Graus
37 const int offsetServoLRear = 0;         // Graus
38 const int offsetServoRFront = 0;        // Graus
39 const int offsetServoRRear = 0;         // Graus
40
41 // Definição de variáveis globais
42 int x, y, frequencyL, frequencyR;
43
44 void setup() {
45     Serial.begin(115200); // Inicializa a comunicação serial
46
47     // Inicializa a comunicação NRF24L01
48     radioBegin();
49
50     //Iniciando as tasks de frequência
51     startFrequencyStepL(stepPinL);
52     startFrequencyStepR(stepPinR);
53     setupDirPin(dirPinL, dirPinR);
54     setupServos();
55
56 }
57
58 void loop() {
59
60     // Recebe os valores lidos dos pinos JSx e JSy
61     getParameters(x, y);
62
63     // Retira o offset do potenciômetro (define como zero do joystick a
        posição média)
64     y -= 2048;
65
66     // Define a direção
67     if (y < 0){
68         changeDirectionFW(); // Define a direção para frente
69         y = (-1) * y;
70     } else {
71         changeDirectionRT(); // Define a direção para trás
72     }
73
74     // Mapeia a frequência
75     if(y > (2048 * JSdeathzone)){
76         frequencyL = map(y, (2048 * JSdeathzone), 2048, minFrequency,
            maxFrequency);
77         frequencyR = map(y, (2048 * JSdeathzone), 2048, minFrequency,
            maxFrequency);
78     } else{

```

```

79     frequencyL = 0;
80     frequencyR = 0;
81 }
82
83 // Aplica curvatura no caso de precisar
84 ackermann(x);
85
86 // Aplica a frequencia
87 FrequencyStepL(frequencyL);
88 FrequencyStepR(frequencyR);
89
90 }

```

A.12.2 Código auxiliar, controle dos motores

Listing A.2 - Código auxiliar para controlar os motores (Motors.h)

```

1
2 #ifndef MOTORS_H
3 #define MOTORS_H
4
5 #include <Arduino.h>
6 #include <ESP32Servo.h>
7 #include <math.h>
8 #include <stdio.h>
9 #include "Communication.h"
10
11 // Variaveis globais do header
12 volatile int halfPeriodL = 0;
13 volatile int halfPeriodR = 0;
14
15 // Variaveis externas
16 extern const int dirPinL;
17 extern const int dirPinR;
18 extern const int pinServoLRear;
19 extern const int pinServoLFront;
20 extern const int pinServoRFront;
21 extern const int pinServoRRear;
22 extern const int servoDegrees;
23 extern const float JSdeathzone;
24 extern const int chassisLength;
25 extern const int trackDistance;
26 extern int frequencyL;
27 extern int frequencyR;
28 extern const int offsetServoLFront;
29 extern const int offsetServoLRear;
30 extern const int offsetServoRFront;
31 extern const int offsetServoRRear;

```

```

32
33
34 // Criando objetos Servo
35 Servo servoRear;
36 Servo servoRFront;
37 Servo servoLRear;
38 Servo servoLFront;
39
40 void setupServos(){
41
42     //Definindo GPIO como output
43     pinMode(pinServoLRear, OUTPUT);
44     pinMode(pinServoLFront, OUTPUT);
45     pinMode(pinServoRFront, OUTPUT);
46     pinMode(pinServoRRear, OUTPUT);
47
48     // Anexando os servos aos seus pinos
49     servoRRear.attach(pinServoRRear);
50     servoRFront.attach(pinServoRFront);
51     servoLRear.attach(pinServoLRear);
52     servoLFront.attach(pinServoLFront);
53
54     // Movendo os servos para a posicao inicial
55     servoRRear.write(offsetServoRRear + servoDegrees/2);
56     servoRFront.write(offsetServoRFront + servoDegrees/2);
57     servoLRear.write(offsetServoLRear + servoDegrees/2);
58     servoLFront.write(offsetServoLFront + servoDegrees/2);
59 }
60
61 void ackermann(int x){
62
63     double y = abs(x-2048); // Distancia entre o ponto centro da
64                             // circunferencia e o centro da roda interna;
65     double c = chassisLength; // Distancia entre o eixo traseiro e o
66                             // eixo dianteiro;
67
68     double phi_outerF = 0;
69     double theta_innerF = 0;
70     double phi_outerM = 0;
71     double theta_innerM = 0;
72
73     double innerAttenuationFrequency = 1;
74
75     if (y > (2048 * JSdeathzone)){
76
77         //angulo da roda externa eixo dianteiro
78         phi_outerF = atan(c/(y+c))*180/M_PI;
79
80         //angulo da roda externa eixo traseiro
81         phi_outerM = atan(c/(y-c))*180/M_PI;
82
83         //angulo da roda interna eixo dianteiro
84         theta_innerF = atan(c/(y+c))*180/M_PI;
85
86         //angulo da roda interna eixo traseiro
87         theta_innerM = atan(c/(y-c))*180/M_PI;
88     }
89 }

```

```

77     //angulo da roda interna eixo dianteiro
78     theta_innerF = atan(c/y)*180/M_PI;
79     //angulo da roda externa eixo intermedi rio
80     phi_outerM = atan((c/2)/(y+c))*180/M_PI;
81     //angulo da roda interna eixo intermedi rio
82     theta_innerM = atan((c/2)/y)*180/M_PI;
83
84     //Atenuacao da frequencia para o lado interno da curvatura
85     innerAtenuationFrequency = y/(y+trackDistance);
86 }
87
88     //Verifica se a curva e para a direita, e se sim, aplica os
      angulos e atenua a frequencia,
89     if (x < 2048){
90         servoRear.write(servoDegrees/2 - theta_innerM);
91         servoRFront.write(servoDegrees/2 - theta_innerF);
92         servoLRear.write(servoDegrees/2 - phi_outerM);
93         servoLFront.write(servoDegrees/2 - phi_outerF);
94         frequencyR = innerAtenuationFrequency*frequencyR;
95     } else{
96         servoRear.write(servoDegrees/2 + theta_innerM);
97         servoRFront.write(servoDegrees/2 + theta_innerF);
98         servoLRear.write(servoDegrees/2 + phi_outerM);
99         servoLFront.write(servoDegrees/2 + phi_outerF);
100        frequencyL = innerAtenuationFrequency*frequencyL;
101    }
102
103    return;
104 }
105
106 // Funcao para inicializar os GPIOs de direcao
107 void setupDirPin(int dirPinL_local, int dirPinR_local){
108     pinMode(dirPinL_local, OUTPUT);
109     pinMode(dirPinR_local, OUTPUT);
110 }
111
112 // Funcao para mudar direcao para tras
113 void changeDirectionRT(){
114     digitalWrite(dirPinL, HIGH);
115     digitalWrite(dirPinR, LOW);
116 }
117
118 // Funcao para mudar direcao para frente
119 void changeDirectionFW(){
120     digitalWrite(dirPinL, LOW);
121     digitalWrite(dirPinR, HIGH);
122 }

```

```

123
124 // Funcao da task para gerar frequencia em stepPinL
125 void frequencyTaskL(void *parameter) {
126     int gpioPin = *((int*)parameter);
127     pinMode(gpioPin, OUTPUT);
128
129     while (true) {
130         if (halfPeriodL > 0) {
131             digitalWrite(gpioPin, HIGH);
132             delayMicroseconds(halfPeriodL);
133             digitalWrite(gpioPin, LOW);
134             delayMicroseconds(halfPeriodL);
135         } else {
136             digitalWrite(gpioPin, LOW);
137         }
138     }
139 }
140
141 // Funcao da task para gerar frequencia em stepPinR
142 void frequencyTaskR(void *parameter) {
143     int gpioPin = *((int*)parameter);
144     pinMode(gpioPin, OUTPUT);
145
146     while (true) {
147         if (halfPeriodR > 0) {
148             digitalWrite(gpioPin, HIGH);
149             delayMicroseconds(halfPeriodR);
150             digitalWrite(gpioPin, LOW);
151             delayMicroseconds(halfPeriodR);
152         } else {
153             digitalWrite(gpioPin, LOW);
154         }
155     }
156 }
157
158 // Funcao para iniciar a task de frequencia em stepPinL
159 void startFrequencyStepL(int gpioPin) {
160     pinMode(gpioPin, OUTPUT);
161     xTaskCreatePinnedToCore(
162         frequencyTaskL,          // Funcao da task
163         "Frequency Task L",      // Nome da task
164         2048,                    // Tamanho da stack em bytes
165         new int(gpioPin),         // Parametro (pino GPIO)
166         1,                       // Prioridade da task
167         NULL,                    // Task handle
168         0                         // Nucleo onde a tarefa sera executada
169     );

```

```

170 }
171
172 // Funcao para iniciar a task de frequencia em stepPinR
173 void startFrequencyStepR(int gpioPin) {
174     pinMode(gpioPin, OUTPUT);
175     xTaskCreatePinnedToCore(
176         frequencyTaskR,          // Funcao da task
177         "Frequency Task R",      // Nome da task
178         2048,                    // Tamanho da stack em bytes
179         new int(gpioPin),        // Parametro (pino GPIO)
180         1,                      // Prioridade da task
181         NULL,                   // Task handle
182         1                        // Nucleo onde a tarefa sera executada
183     );
184 }
185
186 // Funcao para alterar a frequencia de stepPinL
187 void FrequencyStepL(int frequencyL) {
188     if (frequencyL > 0){
189         halfPeriodL = (1000000 / frequencyL) / 2;
190     } else{
191         halfPeriodL = 0;
192     }
193 }
194
195 // Funcao para alterar a frequencia de stepPinR
196 void FrequencyStepR(int frequencyR) {
197     if (frequencyR > 0){
198         halfPeriodR = (1000000 / frequencyR) / 2;
199     } else{
200         halfPeriodR = 0;
201     }
202 }
203
204 #endif

```

A.12.3 Código auxiliar, comunicação

Listing A.3 - Código auxiliar responsável pela comunicação (Communication.h)

```

1
2 #ifndef COMMUNICATION_H
3 #define COMMUNICATION_H
4
5 #include <Arduino.h>
6 #include <SPI.h>
7 #include <nRF24L01.h>
8 #include <RF24.h>

```



```

9
10 // GPIO definidos externamente
11 extern const int CE_PIN;
12 extern const int CSN_PIN;
13 extern const int statusLED;
14
15 // Variaveis externas
16 extern const int WTD_communication;
17
18 // Variaveis locais
19 unsigned long lastDataReceivedTime;
20
21 // Enderecos do receptor e transmissor
22 const byte receiverAddress[5] = {'R', '0', 'V', '3', 'R'};
23
24 // Instancias
25 RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
26
27 // Estrutura para os dados recebidos
28 struct __attribute__((packed)) DefDataReceived {
29     int16_t JSx = 2048;
30     int16_t JSy = 2048;
31     bool ch01 = false;
32     bool ch02 = false;
33     bool ch03 = false;
34     bool ch04 = false;
35 };
36
37 // Instancia da estrutura
38 DefDataReceived dataReceived;
39
40 // Declaracao de funcoes
41 void radioBegin();
42 void getData();
43 void getParameters(int &x, int &y);
44
45 // Funcao para retornar os valores de JSx e JSy
46 void getParameters(int &x, int &y) {
47     getData();
48     x = dataReceived.JSx;
49     y = dataReceived.JSy;
50 }
51
52 // Funcao para iniciar a funcao do radio
53 void radioBegin() {
54     pinMode(statusLED, OUTPUT);
55     radio.begin();

```

```

56     radio.setPALevel(RF24_PA_MAX, 1);
57     radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
58     radio.openReadingPipe(1, receiverAddress);
59     radio.startListening();
60 }
61
62 void getData() {
63     if (radio.available()) {
64         radio.read(&dataReceived, sizeof(dataReceived));
65         digitalWrite(statusLED, HIGH);
66         lastDataReceivedTime = millis();
67     }
68     else {
69         if(millis() - lastDataReceivedTime > WTD_communication){
70             digitalWrite(statusLED, LOW);
71         }
72     }
73 }
74 }
75
76 #endif

```

A.13 Código-Fonte do Microcontrolador Transmissor (Controle Remoto)

A.13.1 Código Principal

Listing A.4 - Arquivo principal do ESP32 transmissor (TX.ino)

```

1
2 //Bibliotecas
3 #include <arduino.h>
4 #include <SPI.h>
5 #include <nRF24L01.h>
6 #include <RF24.h>
7
8 //GPIO
9 const int CE_PIN = 22;
10 const int CSN_PIN = 21;
11 const int statusLED = 14;
12 const int JSx = 25;
13 const int JSy = 26;
14
15 // Endereco do receptor
16 const byte receiverAddress[5] = {'R', '0', 'V', '3', 'R'};
17
18 // Instancias
19 RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
20

```

```

21 // Estrutura para os dados a serem enviados
22 struct __attribute__((packed)) DataPackage {
23     int16_t JSx;    // Primeiro inteiro
24     int16_t JSy;    // Segundo inteiro
25     bool ch01;      // Primeiro booleano
26     bool ch02;      // Segundo booleano
27     bool ch03;      // Terceiro booleano
28     bool ch04;      // Quarto booleano
29 };
30
31 // Instancia da estrutura
32 DataPackage dataToSend;
33
34 // Declaracao das funcoes
35 void radioBegin();
36 void getData();
37 void sendData();
38
39 //Definição das funções
40 void radioBegin(){
41     Serial.println("ESP32 Transmitter Starting");
42     radio.begin();
43     radio.setPALevel(RF24_PA_MAX, 1);
44     radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
45     radio.openWritingPipe(receiverAddress); // Configura o endereço do
        receptor
46     radio.stopListening(); // Define o módulo para transmissão
47 }
48
49 void getData(){
50     dataToSend.JSx = analogRead(JSx);
51     dataToSend.JSy = analogRead(JSy);
52     dataToSend.ch01 = false;
53     dataToSend.ch02 = false;
54     dataToSend.ch03 = false;
55     dataToSend.ch04 = false;
56 }
57
58 void sendData(){
59
60     bool success = radio.write(&dataToSend, sizeof(dataToSend));
61
62     if (success) {
63         //Serial.println("Data sent successfully:");
64         Serial.print("JSx: "); Serial.println(dataToSend.JSx);
65         Serial.print("JSy: "); Serial.println(dataToSend.JSy);
66         Serial.print("ch01: "); Serial.println(dataToSend.ch01);

```

```

67     Serial.print("ch02: "); Serial.println(dataToSend.ch02);
68     Serial.print("ch03: "); Serial.println(dataToSend.ch03);
69     Serial.print("ch04: "); Serial.println(dataToSend.ch04);
70     Serial.println("");
71     digitalWrite(statusLED, HIGH);
72 } else {
73     Serial.println("falha");
74     digitalWrite(statusLED, LOW);
75 }
76 }
77
78 // Setup
79 void setup() {
80     Serial.begin(115200);
81     pinMode(statusLED, OUTPUT);
82     pinMode(JSx, INPUT);
83     pinMode(JSy, INPUT);
84     radioBegin();
85 }
86
87 // Loop
88 void loop() {
89
90     // Preenche os dados a serem enviados
91     getData();
92
93     // Envia os dados
94     sendData();
95
96     // Delay
97     delay(25);
98
99 }

```