

Projeto de uma Impressora 3D baseada num braço robótico de 6-eixos

GONÇALO ALEXANDRE LOPES MAIA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho de Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor André Rui Dantas Carvalho
Doutor Ricardo José Fontes Portal

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Vogais:

Doutor Marco Alexandre de Oliveira Leite
Doutor André Rui Dantas Carvalho

Projeto de uma Impressora 3D baseada num braço robótico de 6-eixos

GONÇALO ALEXANDRE LOPES MAIA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho de Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor André Rui Dantas Carvalho, ISEL/IPL
Doutor Ricardo José Fontes Portal, ISEL/IPL

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Marco Alexandre de Oliveira Leite, IST/UL
Doutor André Rui Dantas Carvalho, ISEL/IPL

Agradecimentos

Primeiramente aos meus orientadores, professor André Carvalho e professor Ricardo Portal, pela oportunidade de integrar este projeto, pelo apoio contínuo, orientação e disponibilidade constante ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

À minha namorada Teresa, por todo o amor, apoio, motivação e compreensão ao longo de todo o meu percurso académico. Obrigado por teres estado sempre a meu lado e, claro, pelas sugestões ao longo do projeto.

À minha família, em especial à minha mãe Sara, ao meu padrasto Ricardo e aos meus irmãos Tomás e Afonso, pelo apoio incondicional ao longo destes anos e por me terem dado as melhores condições possíveis para que concluísse o meu percurso académico com êxito. Serei sempre grato pelo vosso esforço.

Aos meus amigos e colegas, que tornaram esta jornada mais leve e enriquecedora, tanto pelas partilhas de conhecimento e momentos de estudo em conjunto, como pelos convívios, risadas e momentos de descontração, que ajudaram a equilibrar o percurso com companheirismo e boa disposição.

A todos, sem exceção, muito obrigado.

Declaração de integridade

Declaro que este trabalho de projeto é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

Lisboa, 25 de junho de 2025

O autor

Gonçalo Maia

Projeto de uma Impressora 3D baseada num braço robótico de 6-eixos

Resumo

A evolução do fabrico aditivo tem levado à exploração de novas abordagens para a impressão 3D, incluindo a utilização de braços robóticos. Estes sistemas, em comparação com os sistemas convencionais, oferecem maior flexibilidade e permitem a impressão em superfícies complexas. Ainda assim, apresentam desafios ao nível do controlo, precisão e robustez estrutural.

Este trabalho consiste no desenvolvimento do projeto mecânico de um sistema de impressão 3D utilizando um braço robótico de 6 eixos. O objetivo é demonstrar a viabilidade desta solução através do estudo e conceção da estrutura necessária para suportar o processo de extrusão. Para tal, este trabalho aborda todo os processos para o desenvolvimento do projeto, desde a definição dos pressupostos, desenvolvimento do projeto mecânico, e validação do sistema através da realização de simulações. Inicialmente é realizada uma análise ao contexto atual do fabrico aditivo, da robótica e da aliança entre estes dois temas. Ao longo do desenvolvimento do trabalho são apresentados os métodos adotados, tais como seleção e modelação de componentes, soluções encontradas para resolução de problemas, verificações numéricas, comparação de resultados, procedimentos iterativos para melhoria do projeto e obtenção de um modelo final. Na fase final deste documento são realizadas simulações estáticas e dinâmicas para verificação do modelo obtido.

O projeto tem como finalidade apresentar uma solução acessível e de fácil implementação, que poderá servir como base para aplicações educacionais ou para explorar novas possibilidades na conciliação entre fabrico aditivo e robótica.

Palavras-chave: Fabrico Aditivo, Braço Robótico, Projeto Mecânico, Simulações Numéricas.

Designing a 3D Printer based on a 6-axis Robotic Arm

Abstract

The evolution of additive manufacturing has led to the exploration of new approaches for 3D printing, including the use of robotic arms. Compared to conventional systems, these systems offer greater flexibility and allow printing on complex surfaces. However, they present challenges in terms of control, precision, and structural robustness.

This work focuses on the mechanical design of a 3D printing system using a 6-axis robotic arm. The goal is to demonstrate the feasibility of this solution through the study and design of the structure required to support the extrusion process. The work addresses all stages of the project development, from defining assumptions, designing the mechanical structure, and validating the system through simulations. Initially, an analysis of the current context of additive manufacturing, robotics, and the integration of these two fields is conducted. Throughout the development of the project, methods such as component selection and modelling, solutions to identified problems, numerical analyses, result comparisons, iterative procedures for project improvement, and the final model are presented. In the final phase, static and dynamic simulations are carried out to verify the model's performance.

The project aims to present an accessible and easily implementable solution, which could serve as a foundation for educational applications or explore new possibilities in the integration of additive manufacturing and robotics.

Keywords: Additive Manufacturing, Robotic Arm, Mechanical Design, Numerical Simulations.

Lista de siglas e acrónimos

Siglas e acrónimos

| | |
|-------|---|
| 3D | Tridimensional |
| ABS | Acrilonitrilo Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>) |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BJ | Jato de Material Ligante (<i>Binder Jetting</i>) |
| CAD | Projeto Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>) |
| CNC | Controlo Numérico Computorizado |
| CV | Caixa de Velocidades |
| DC | Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>) |
| DED | Deposição de Energia Dirigida (<i>Directed Energy Deposition</i>) |
| FFF | Fabrico por filamentos fundidos (<i>Fused Filament Fabrication</i>) |
| GdL | Grau de Liberdade |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| ME | Extrusão de material (<i>Material Extrusion</i>) |
| MJ | Jato de material (<i>Material Jetting</i>) |
| PBF | Fusão em Leito de Pó (<i>Power Bed Fusion</i>) |
| PC | Policarbonato |
| PETG | Polietileno Tereftalato Glicol |
| PLA | Polímero de Ácido Poliláctico |
| SCARA | <i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i> |
| SL | Estratificação de camadas (<i>Sheet Lamination</i>) |
| SLA | Estereolitografia (<i>Stereolithography</i>) |
| SLS | Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i>) |
| UV | Ultravioleta |
| VP | Fotopolimerização em tanque (<i>Vat Photopolymerization</i>) |

Índice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | ENQUADRAMENTO DO PROJETO E A SUA RELEVÂNCIA | 1 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO PROJETO | 2 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO DOCUMENTO | 3 |
| 2 | ESTADO DA ARTE | 5 |
| 2.1 | FABRICO ADITIVO | 5 |
| 2.1.1 | <i>Introdução ao fabrico aditivo</i> | 5 |
| 2.1.2 | <i>Tecnologias de impressão 3D</i> | 6 |
| 2.1.3 | <i>Materiais utilizados para impressão 3D</i> | 8 |
| 2.1.4 | <i>Visão geral das aplicações da impressão 3D</i> | 10 |
| 2.1.5 | <i>Vantagens e limitações do fabrico aditivo comparativamente a métodos de produção convencionais</i> | 11 |
| 2.2 | ROBÓTICA | 13 |
| 2.2.1 | <i>Contextualização, tipologia e aplicações na indústria</i> | 13 |
| 2.2.2 | <i>Braços robóticos no contexto do fabrico aditivo</i> | 15 |
| 2.2.3 | <i>Desenvolvimento de braços robóticos: Casos de Estudo</i> | 16 |
| 2.2.4 | <i>Desafios e limitações dos braços robóticos no fabrico aditivo</i> | 20 |
| 3 | METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO BRAÇO ROBÓTICO | 23 |
| 3.1 | PRESSUPOSTOS DO PROJETO | 23 |
| 3.1.1 | <i>Volume e velocidade de impressão</i> | 23 |
| 3.1.2 | <i>Material a imprimir: PLA</i> | 23 |
| 3.1.3 | <i>Impressão em câmara aberta</i> | 24 |
| 3.1.4 | <i>Graus de Liberdade (GdL) do sistema</i> | 24 |
| 3.1.5 | <i>Seleção do tipo de atuadores</i> | 25 |
| 3.1.6 | <i>Precisão da impressão e flexão admissível</i> | 25 |
| 3.1.7 | <i>Componentes das juntas do braço robótico</i> | 25 |
| 3.1.8 | <i>Estrutura do braço robótico e outras considerações</i> | 26 |
| 3.2 | MODELO INICIAL DE SIMULAÇÃO NO MATLAB/SIMULINK | 27 |
| 3.2.1 | <i>Importância da simulação no desenvolvimento inicial do projeto</i> | 27 |
| 3.2.2 | <i>Modelo de simulação inicial utilizado</i> | 27 |
| 3.2.3 | <i>Alteração da trajetória do robô</i> | 31 |
| 3.2.4 | <i>Seleção da extrusora</i> | 34 |
| 3.2.5 | <i>Primeira iteração do modelo Simulink/MATLAB</i> | 38 |
| 3.3 | PROJETO DA JUNTA PRINCIPAL DO BRAÇO ROBÓTICO (JUNTA 3) | 44 |
| 3.3.1 | <i>Seleção e projeto de componentes</i> | 44 |
| 3.3.2 | <i>Segunda iteração do modelo Simulink/MATLAB</i> | 56 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.4 | PROJETO DA JUNTA QUE ASSENTA NA BASE GIRATÓRIA (JUNTA 2) | 57 |
| 3.4.1 | <i>Seleção do motor da junta 2</i> | 57 |
| 3.4.2 | <i>Terceira iteração do modelo Simulink/MATLAB</i> | 61 |
| 3.5 | PROJETO DA BASE GIRATÓRIA (JUNTA 1)..... | 63 |
| 3.5.1 | <i>Seleção e projeto de componentes</i> | 63 |
| 3.6 | PROJETO DO PUNHO DO ROBÔ..... | 68 |
| 3.6.1 | <i>Seleção e projeto de componentes</i> | 68 |
| 3.7 | CONFIGURAÇÃO FINAL DO ROBÔ | 70 |
| 3.7.1 | <i>Modelo final</i> | 70 |
| 3.7.2 | <i>Esquema da cablagem e filamento</i> | 70 |
| 4 | SIMULAÇÕES DE VERIFICAÇÃO | 73 |
| 4.1 | IMPORTÂNCIA DA REALIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES E REQUISITOS A CUMPRIR..... | 73 |
| 4.2 | SIMULAÇÕES DE VERIFICAÇÃO REALIZADAS | 73 |
| 4.2.1 | <i>Validação do volume de impressão</i> | 73 |
| 4.2.2 | <i>Estudos dinâmicos</i> | 74 |
| 4.2.3 | <i>Estudo estático</i> | 82 |
| 4.3 | ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS | 84 |
| 4.3.1 | <i>Contextualização das análises realizadas</i> | 84 |
| 4.3.2 | <i>Análise dos resultados dos estudos dinâmicos</i> | 85 |
| 4.3.3 | <i>Análise dos resultados do estudo estático</i> | 87 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO | 89 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 89 |
| 5.2 | TRABALHO FUTURO | 90 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 91 |
| | APÊNDICES..... | 99 |
| | ANEXOS..... | 129 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1 - INTEGRAÇÃO DE UM BRAÇO ROBÓTICO COM A IMPRESSÃO 3D (3D NATIVES, 2022). | 2 |
| FIGURA 2.1 – OS 7 TIPOS DE TECNOLOGIA DE FABRICO ADITIVO: A) VAT PHOTOPOLYMERIZATION; B) POWER BED FUSION; C) MATERIAL EXTRUSION; D) MATERIAL JETTING; E) BINDER JETTING; F) SHEET LAMINATION; G) DIRECTED ENERGY DEPOSITION (ADAPTADO DE AHANGAR ET AL. (2019)). | 7 |
| FIGURA 2.2 – PRINCIPAIS MÉTODOS DE FABRICO ADITIVO: A) SLA; B) SLS; C) FFF (ADAPTADO DE FORMLABS (N.D.)). | 8 |
| FIGURA 2.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE ROBÔS DE ACORDO COM A SUA ESTRUTURA MECÂNICA: A) CARTESIANO; B) SCARA; C) ARTICULADO; D) PARALELO/DELTA; E) CILÍNDRICO; F) POLAR/ESFÉRICO (ADAPTADO DE (MACHINEDESIGN, 2016)). | 14 |
| FIGURA 2.4 – (A) IMAGEM REAL DO ROBÔ DESENVOLVIDO POR BÁRÁNY & RÓNAI (2023); (B) ESPAÇO DE TRABALHO DO ROBÔ. (ADAPTADO DE BÁRÁNY & RÓNAI (2023)). | 17 |
| FIGURA 2.5 – (A) IMAGEM REAL DO ROBÔ DESENVOLVIDO EM ALI ET AL. (2023); (B) CONTEXTO DE FUNCIONAMENTO. (ADAPTADO DE ALI ET AL. (2023)). | 17 |
| FIGURA 2.6 – BRAÇO ROBÓTICO COLABORATIVO COM 6-EIXOS, DE BAIXO CUSTO, DESENVOLVIDO E APRESENTADO EM ANANIAS (2022). | 18 |
| FIGURA 2.7 – BRAÇO ROBÓTICO DE 6-EIXOS PARA IMPRESSÃO 3D, DESENVOLVIDO EM LUU ET AL. (2021). (ADAPTADO DE LUU ET AL. (2021))..... | 19 |
| FIGURA 2.8 – (A) ROBÔ IRB 140, DA ABB ROBOTICS; (B) ESPAÇO DE TRABALHO NO ROBÔ IRB 140, DA ABB ROBOTICS. (ADAPTADO DE BAQUERO-SUÁREZ & HEREDIA (2013))..... | 19 |
| FIGURA 3.1 – ESQUEMA DOS GRAUS DE LIBERDADE DO SISTEMA E NUMERAÇÃO DAS JUNTAS. | 24 |
| FIGURA 3.2 – CALHAS DE ALUMÍNIO EXTRUDIDO (REXROTH: A BOSCH COMPANY, N.D.). | 26 |
| FIGURA 3.3 – CONFIGURAÇÃO INICIAL DO FICHEIRO "INITCTRLPOS" ONDE SURGEM PARÂMETROS COMO DIMENSÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO E COMPRIMENTO DAS BARRAS. | 28 |
| FIGURA 3.4 – CONFIGURAÇÃO INICIAL DO FICHEIRO "INITCTRLPOS" ONDE SURGEM PARÂMETROS COMO CENTROS DE MASSA, MASSAS E INÉRCIAS. | 28 |
| FIGURA 3.5 – PROCESSO DE LINEARIZAÇÃO DO ROBÔ DO MODELO INICIAL NO SIMULINK..... | 29 |
| FIGURA 3.6 – CONTROLO DA VELOCIDADE DAS JUNTAS DO ROBÔ DO MODELO INICIAL NO SIMULINK. | 29 |
| FIGURA 3.7 – DEFINIÇÃO DA TRAJETÓRIA DO ROBÔ E CONTROLO DA POSIÇÃO DAS JUNTAS DO MODELO INICIAL NO SIMULINK..... | 30 |
| FIGURA 3.8 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA E MOVIMENTO DO ROBÔ NO ESPAÇO DE TRABALHO, GERADA PELO MODELO INICIAL NO SIMULINK. | 30 |
| FIGURA 3.9 – (A) MODELO DO CUBO COM DIMENSÕES 20x20x20 MM CRIADO NO SOLIDWORKS; (B) MODELO IMPORTANDO DO SOLIDWORKS PARA O CURA..... | 31 |
| FIGURA 3.10 – FATIAMENTO DO CUBO NO CURA..... | 32 |
| FIGURA 3.11 – PORÇÃO CÓDIGO G DO CUBO COM 20x20x20 MM EXPORTADO DO CURA. | 33 |
| FIGURA 3.12 – A) TRAJETÓRIA DO ROBÔ IMPLEMENTADA NO MATLAB; B) MOVIMENTAÇÃO DA EXTREMIDADE DO ROBÔ SEGUNDO OS EIXOS X E Y, BEM COMO A POSIÇÃO DA MESMA AO LONGO DO TEMPO. | 34 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 3.13 – TRÊS CONFIGURAÇÕES ESTRUTURAIS TESTADAS NO SOLIDWORKS <i>SIMULATION</i> : A) PIOR POSIÇÃO IRREALISTA; B) PIOR POSIÇÃO COM A PONTA NA BASE DO VOLUME DE IMPRESSÃO; C) PIOR POSIÇÃO COM A PONTA NO VÉRTICE MAIS AFASTADO DO VOLUME DE IMPRESSÃO. | 35 |
| FIGURA 3.14 – ESTUDO ESTÁTICO PARA A PIOR POSIÇÃO IRREALISTA. | 36 |
| FIGURA 3.15 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO ESTÁTICA REALIZADA À ESTRUTURA, NA PIOR POSIÇÃO IRREALISTA, E COM UMA CARGA DE 100 N. | 36 |
| FIGURA 3.16 – VALORES DA DEFORMADA RESULTANTE EM FUNÇÃO DA CARGA APLICADA PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES. | 37 |
| FIGURA 3.17 – PROPRIEDADES DA SECÇÃO DAS CALHAS SELECIONADAS, RECOLHIDAS DO SOLIDWORKS. | 39 |
| FIGURA 3.18 – A) IMAGEM REAL DA EXTRUSORA <i>BIQU H2 V2S Revo</i> (BIQU EQUIPMENT, N.D.); E B) O MODELO 3D UTILIZADO. | 39 |
| FIGURA 3.19 – DADOS DA EXTRUSORA E DAS CALHAS RECOLHIDOS PARA O FICHEIRO DE TEXTO. | 40 |
| FIGURA 3.20 – CÓDIGO DE IMPORTAÇÃO E CRIAÇÃO DAS MATRIZES DE INÉRCIA DA EXTRUSORA. | 41 |
| FIGURA 3.21 – IMPORTAÇÃO DA ÁREA DA SECÇÃO DA CALHA PARA O FICHEIRO SIMULINK, E ALTERAÇÃO DO COMPRIMENTO DO ÚLTIMO MÓDULO DO ROBÔ, CORRESPONDENTE À ALTURA DA EXTRUSORA. | 42 |
| FIGURA 3.22 – CÁLCULO DAS MASSAS DOS TROÇOS E IMPORTAÇÃO DA MASSA DA EXTRUSORA, PARA O FICHEIRO SIMULINK. | 42 |
| FIGURA 3.23 – CÁLCULO DAS MATRIZES DE INÉRCIA DOS TROÇOS E IMPORTAÇÃO DA MATRIZ DE INÉRCIA DA EXTRUSORA, PARA O FICHEIRO SIMULINK. | 43 |
| FIGURA 3.24 – POTÊNCIA A DEBITAR PELOS MOTORES DAS JUNTAS APÓS A PRIMEIRA ITERAÇÃO DO MODELO SIMULINK/MATLAB. | 43 |
| FIGURA 3.25 – BINÁRIO NECESSÁRIO DOS MOTORES DAS JUNTAS APÓS A PRIMEIRA ITERAÇÃO DO MODELO SIMULINK/MATLAB. | 43 |
| FIGURA 3.26 – MOTOR NEMA 17, MODELO 17HS08-1004-ME1K (STEPPERONLINE, N.D.). | 44 |
| FIGURA 3.27 – CURVA DE BINÁRIO DO MOTOR NEMA 17 MODELO 17HS08-1004-ME1K (STEPPERONLINE, N.D.). | 45 |
| FIGURA 3.28 – CAIXA DE VELOCIDADES PLANETÁRIA COM RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO 50:1, MODELO MG17-G50 (STEPPERONLINE, N.D.). | 46 |
| FIGURA 3.29 – A) DISTÂNCIA ENTRE A PONTA DO VEIO DE SAÍDA DO MOTOR 17HS08-1004-ME1K E A SUA FACE DE ENCOSTO; B) DISTÂNCIA ENTRE O FUNDO DA ZONA DE ACOPLAMENTO E A FACE DE ENCOSTO DA CAIXA DE VELOCIDADE. | 46 |
| FIGURA 3.30 – ESPAÇADOR DO MOTOR: A) FACE QUE ESTARÁ EM CONTACTO COM O OUTRO ESPAÇADOR; B) FACE QUE ESTARÁ EM CONTACTO COM O MOTOR. | 47 |
| FIGURA 3.31 – ESPAÇADOR DA CAIXA DE VELOCIDADES: A) FACE QUE ESTARÁ EM CONTACTO COM A CAIXA DE VELOCIDADES; B) FACE QUE ESTARÁ EM CONTACTO COM O OUTRO ESPAÇADOR. | 47 |
| FIGURA 3.32 – SUPORTE DOS ESPAÇADORES DA JUNTA 3. | 48 |
| FIGURA 3.33 – SUPORTE DA CALHA, RESPONSÁVEL PELA LIGAÇÃO ENTRE A CALHA E OS COMPONENTES ROTATIVOS DA JUNTA. | 48 |
| FIGURA 3.34 – ACOPLADOR 1 DA JUNTA PRINCIPAL DO ROBÔ (JUNTA 3). | 49 |
| FIGURA 3.35 – ACOPLADOR 2 DA JUNTA PRINCIPAL DO ROBÔ (JUNTA 3). | 49 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 3.36 – PARTE INFERIOR DA CHUMACEIRA DE SUPORTE DOS ACOPLADORES 1 E 2 DA JUNTA 3. | 50 |
| FIGURA 3.37 – PARTE SUPERIOR DA CHUMACEIRA DE SUPORTES DOS ACOPLADORES 1 E 2 DA JUNTA 3. | 50 |
| FIGURA 3.38 – TRAVÃO ELETROMAGNÉTICO MODELO SWB-01 (STEPPERONLINE, N.D.). | 51 |
| FIGURA 3.39 – ACOPLADOR 3 DA JUNTA PRINCIPAL DO ROBÔ (JUNTA 3). | 51 |
| FIGURA 3.40 – A) ZONA CILÍNDRICA DO ACOPLADOR 1, ONDE É COLOCADO UM PARAFUSO PARA FIXAR O VEIO DE SAÍDA DA CV; B) CORTE DO ACOPLADOR 3 PARA EVITAR CONFLITOS ENTRE OS DOIS COMPONENTES. | 52 |
| FIGURA 3.41 – PARTE INFERIOR DA CHUMACEIRA DE SUPORTE DO ACOPLADOR 3 DA JUNTA 3. | 52 |
| FIGURA 3.42 – PARTE SUPERIOR DA CHUMACEIRA DE SUPORTE DO ACOPLADOR 3 DA JUNTA 3. | 53 |
| FIGURA 3.43 – BASE DA JUNTA PRINCIPAL (JUNTA 3). | 53 |
| FIGURA 3.44 – COMPONENTE DE LIGAÇÃO ENTRE A CALHA DO MÓDULO ANTERIOR E A BASE DA JUNTA 3. | 54 |
| FIGURA 3.45 – CONFIGURAÇÃO FINAL DA JUNTA 3. | 54 |
| FIGURA 3.46 – BINÁRIO DO MOTOR DA JUNTA 3, O ESTUDO REALIZADO NO SOLIDWORKS <i>MOTION</i> | 55 |
| FIGURA 3.47 – BINÁRIO NECESSÁRIO DOS MOTORES DAS JUNTAS APÓS A SEGUNDA ITERAÇÃO DO MODELO SIMULINK/MATLAB. | 56 |
| FIGURA 3.48 – MOTOR NEMA 17, MODELO 17HS15-1504-ME1K (STEPPERONLINE, N.D.). | 57 |
| FIGURA 3.49 – CURVA DE BINÁRIO DO MOTOR NEMA 17 MODELO 17HS15-1504-ME1K (STEPPERONLINE, N.D.). | 57 |
| FIGURA 3.50 – A) DISTÂNCIA ENTRE A PONTA DO VEIO DE SAÍDA DO MOTOR 17HS15-1504-ME1K E A SUA FACE DE ENCOSTO; B) DISTÂNCIA ENTRE O FUNDO DA ZONA DE ACOPLAMENTO E A FACE DE ENCOSTO DA CAIXA DE VELOCIDADE. | 59 |
| FIGURA 3.51 – CONFIGURAÇÃO FINAL DA JUNTA 2. | 59 |
| FIGURA 3.52 – MODELO DE TESTE PARA SE AVALIAR O BINÁRIO DA JUNTA 2, NO SOLIDWORKS <i>MOTION</i> | 60 |
| FIGURA 3.53 – GRÁFICO DO BINÁRIO DO MOTOR DA JUNTA 2, NO ESTUDO 1 REALIZADO AO MODELO DE TESTE NO SOLIDWORKS <i>MOTION</i> | 60 |
| FIGURA 3.54 – GRÁFICO DO BINÁRIO DO MOTOR DA JUNTA 2, NO ESTUDO 2 REALIZADO AO MODELO DE TESTE NO SOLIDWORKS <i>MOTION</i> | 61 |
| FIGURA 3.55 – BINÁRIO NECESSÁRIO DOS MOTORES DAS JUNTAS APÓS A TERCEIRA ITERAÇÃO DO MODELO SIMULINK/MATLAB. | 62 |
| FIGURA 3.56 – BINÁRIO NECESSÁRIO DO MOTOR DA JUNTA 1 APÓS A TERCEIRA ITERAÇÃO DO MODELO SIMULINK/MATLAB. | 62 |
| FIGURA 3.57 – CAIXA DE VELOCIDADES PLANETÁRIA COM RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO 5:1, MODELO MG17-G5 (STEPPERONLINE, N.D.). | 63 |
| FIGURA 3.58 – ENGRENAGENS UTILIZADAS NA BASE GIRATÓRIA. | 64 |
| FIGURA 3.59 – PLATAFORMA GIRATÓRIA DA BASE. | 64 |
| FIGURA 3.60 – VEIO DA BASE GIRATÓRIA. | 65 |
| FIGURA 3.61 – FLANGE DE LIGAÇÃO DO VEIO À PLATAFORMA. | 65 |
| FIGURA 3.62 – CHUMACEIRA DA BASE GIRATÓRIA. | 66 |
| FIGURA 3.63 – BASE DA BASE GIRATÓRIA. | 66 |
| FIGURA 3.64 – CONFIGURAÇÃO FINAL DA BASE GIRATÓRIA COM ALGUNS COMPONENTES COM TRANSPARÊNCIA APLICADA, PARA VERIFICAÇÃO DA FORMA DE MONTAGEM DO SISTEMA. | 67 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.65 – CONFIGURAÇÃO FINAL DA BASE GIRATÓRIA. | 67 |
| FIGURA 3.66 - JUNTA DE INCLINAÇÃO DO PUNHO. | 68 |
| FIGURA 3.67 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO PUNHO. | 69 |
| FIGURA 3.68 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO BRAÇO ROBÓTICO. | 70 |
| FIGURA 3.69 – ESQUEMA DA CABLAGEM E DA ALIMENTAÇÃO DA EXTRUSORA. | 71 |
| FIGURA 4.1 – POSIÇÕES LIMITE DO VOLUME DE TRABALHO DE 200x200x200 MM: A) POSIÇÕES 1 E 2; B) POSIÇÕES 3 E 4; C) POSIÇÕES 5 E 6; D) POSIÇÕES 7 E 8. | 74 |
| FIGURA 4.2 – TRAJETÓRIA UTILIZADA NO TESTE DINÂMICO DE VERIFICAÇÃO DOS MOTORES SELECIONADOS. | 75 |
| FIGURA 4.3 – TRAJETÓRIA REALIZADA NOS ESTUDOS DINÂMICOS REALIZADOS. | 75 |
| FIGURA 4.4 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 1, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> | 76 |
| FIGURA 4.5 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 2, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> | 76 |
| FIGURA 4.6 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 3, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> | 76 |
| FIGURA 4.7 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 4, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> | 77 |
| FIGURA 4.8 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 5, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> | 77 |
| FIGURA 4.9 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 6, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> | 77 |
| FIGURA 4.10 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 1, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> | 78 |
| FIGURA 4.11 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 2, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> | 78 |
| FIGURA 4.12 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 3, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> | 79 |
| FIGURA 4.13 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 4, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> | 79 |
| FIGURA 4.14 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 5, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> | 79 |
| FIGURA 4.15 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 6, UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> | 80 |
| FIGURA 4.16 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 2, PARA UMA VELOCIDADE DE 200 MM/S. | 80 |
| FIGURA 4.17 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 3, PARA UMA VELOCIDADE DE 200 MM/S. | 81 |
| FIGURA 4.18 – POSIÇÃO HORIZONTAL DO ROBÔ. | 81 |
| FIGURA 4.19 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO BINÁRIO DA JUNTA 2, PARA UM MOVIMENTO EM QUE O ROBÔ ATINGE UMA POSIÇÃO TOTALMENTE HORIZONTAL. | 82 |
| FIGURA 4.20 – MODELO UTILIZADO PARA O ESTUDO ESTÁTICO NO <i>SOLIDWORKS SIMULATION</i> | 82 |
| FIGURA 4.21 – FORÇAS E CONSTRANGIMENTOS APLICADOS AO MODELO UTILIZADO PARA O ESTUDO ESTÁTICO NO <i>SOLIDWORKS SIMULATION</i> | 83 |
| FIGURA 4.22 – MALHA UTILIZADA NO ESTUDO ESTÁTICO NO <i>SOLIDWORKS SIMULATION</i> | 83 |
| FIGURA 4.23 – DIAGRAMA DE CORES DA DEFORMADA VERTICAL, OBTIDO ATRAVÉS DO ESTUDO ESTÁTICO NO <i>SOLIDWORKS SIMULATION</i> | 84 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| TABELA 2.1 – PROCESSOS DE FABRICO ADITIVO E OS MATERIAIS QUE ESTAS PODEM PROCESSAR (ADAPTADO DE (MADHAVADAS <i>ET AL.</i> , 2022)). | 9 |
| TABELA 2.2 – RESUMO DOS MATERIAIS UTILIZADOS EM VÁRIAS APLICAÇÕES NOS SETORES AEROESPACIAL E AUTOMÓVEL (ADAPTADO DE ALAMI <i>ET AL.</i> (2023)). | 11 |
| TABELA 2.3 – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES E RESPETIVAS VANTAGENS DO FABRICO ADITIVO RELATIVAMENTE A MÉTODOS CONVENCIONAIS DE PRODUÇÃO (ADAPTADO DE ATTARAN (2017)). | 12 |
| TABELA 3.1 – PROPRIEDADES DA IMPRESSÃO DO CUBO NO CURA. | 32 |
| TABELA 3.2 – PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO EN AW 6060 UTILIZADA NAS CALHAS. | 35 |
| TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS DAS TRÊS EXTRUSORAS PRÉ-SELECIONADAS. | 38 |
| TABELA 3.4 – VALOR DA DEFORMADA RESULTANTE PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES, APLICANDO O PESO DA EXTRUSORA SELECIONADA. | 38 |
| TABELA 3.5 – DADOS RECOLHIDOS DO MODELO DA EXTRUSORA SELECIONADA. | 40 |
| TABELA 3.6 – VALORES DO BINÁRIO (EM N·M) E DA POTÊNCIA (W) DO MOTOR NEMA 17 MODELO 17HS08-1004-ME1K, EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE (EM RPM). | 45 |
| TABELA 3.7 – PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO 1060. | 55 |
| TABELA 3.8 – PROPRIEDADES DO ABS. | 55 |
| TABELA 3.9 – VALORES DO BINÁRIO (EM N·M) E DA POTÊNCIA (W) DO MOTOR NEMA 17 MODELO 17HS15-1504-ME1K, EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE (EM RPM). | 58 |
| TABELA 4.1 – VALORES DO BINÁRIO MÁXIMO (EM N·M) DE CADA JUNTA, OBTIDOS DO ESTUDO DINÂMICO UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>DATA POINTS</i> . | 78 |
| TABELA 4.2 – VALORES DO BINÁRIO MÁXIMO (EM N·M) DE CADA JUNTA, OBTIDOS DO ESTUDO DINÂMICO UTILIZANDO MOTORES DO TIPO <i>SEGMENTS</i> . | 80 |
| TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS DA MALHA UTILIZADA PARA O ESTUDO ESTÁTICO NO SOLIDWORKS <i>SIMULATION</i> . | 84 |
| TABELA 4.4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTUDO DINÂMICO 1 E OS VALORES LIMITE DEFINIDOS. | 85 |
| TABELA 4.5 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTUDO DINÂMICO 2 E OS VALORES LIMITE DEFINIDOS. | 86 |

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e a sua relevância

O fabrico aditivo, tipicamente designada como impressão 3D (tridimensional), tem sido impulsionada por avanços tecnológicos significativos nos últimos anos, e emergido como uma tecnologia revolucionária na produção de componentes, permitindo a construção de objetos camada por camada, partindo de um modelo digital (Kharat et al., 2023; Praveena et al., 2022). Esta evolução tem ampliado consideravelmente o espetro de aplicações da impressão 3D, tornando este processo de fabrico cada vez mais versátil na produção de componentes e produtos para as mais variadas áreas da indústria (Gao et al., 2015).

Com os avanços tecnológicos da impressão 3D, tem existido cada vez mais procura por soluções mais avançadas e automatizadas que possam ir ao encontro das necessidades da constante evolução do mercado. Tipicamente, as impressoras 3D utilizam um sistema robótico cartesiano XYZ para controlar o movimento e a deposição de material. Como é um sistema simples, este apresenta algumas limitações tais como a impossibilidade de controlar o plano de deposição e a orientação, a dificuldade de alcançar áreas de difícil acesso, a necessidade da criação de apoios para suportar elementos em balanço, entre outros (Dine & Vosniakos, 2018; Luu et al., 2021). Por outro lado, os braços robóticos apresentam uma maior flexibilidade, adaptabilidade e eficiência, capaz de vencer muitas das limitações das impressoras convencionais, pelo que têm sido alvo de investigação e desenvolvimento nos últimos anos (Bhatt et al., 2020). Um exemplo da conexão entre o fabrico aditivo e a robótica pode ser observado na Figura 1.1, onde é apresentada a integração de braços robóticos em processos de impressão 3D.

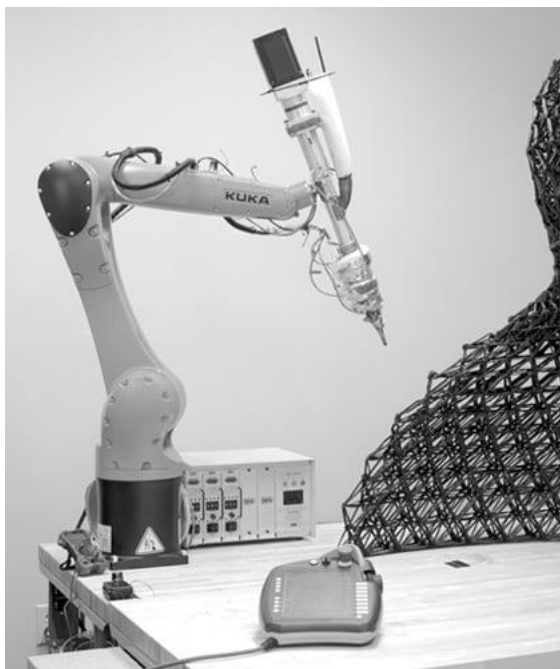


Figura 1.1 - Integração de um braço robótico com a impressão 3D (3D Natives, 2022).

Sendo assim, este projeto visa combinar os avanços na impressão 3D com as capacidades dos braços robóticos. Ao combinar estes aspetos, é possível criar um sistema que aproveita o melhor de ambas as tecnologias, abrindo um maior leque de possibilidades, e proporcionando soluções inovadoras e eficientes para uma variedade de desafios industriais e comerciais.

1.2 Motivação e objetivos do projeto

Tal como referido anteriormente, a impressão 3D, embora tenha muitas vantagens, tem também nos seus métodos convencionais muitas limitações. Este processo de fabrico tem sido cada vez mais associado a tecnologias mais recentes e avançadas, em particular aos braços robóticos, representando uma área de pesquisa em rápida expansão, impulsionada pela busca por soluções de produção mais eficientes, versáteis e adaptáveis às necessidades da indústria.

A motivação por detrás deste projeto surge das vastas oportunidades que a combinação das capacidades de um braço robótico e as vantagens do fabrico aditivo podem oferecer, bem como da possibilidade de vencer muitas das limitações associadas aos métodos convencionais de impressão 3D.

O objetivo principal deste trabalho final de mestrado é o desenvolvimento do projeto de um braço robótico de 6-eixos, de dimensões reduzidas, especialmente concebido para

impressão 3D. Para além disto, procura-se garantir que o sistema mecânico produza componentes tridimensionais com elevada precisão e qualidade.

Ao concluir este projeto, espera-se oferecer uma solução inovadora e funcional para o fabrico aditivo, abrindo novas possibilidades para a produção de peças personalizadas.

1.3 Estrutura do documento

O presente documento está dividido em cinco capítulos principais, divididos por vários subcapítulos, para além das referências bibliográficas, apêndices e anexos.

O capítulo inicial contextualiza o projeto, destacando a sua relevância e principais objetivos.

No segundo capítulo, é feita uma revisão do estado da arte, onde se exploram os conceitos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. São abordadas as bases do fabrico aditivo, os diferentes métodos de impressão 3D e os materiais mais utilizados. De seguida, é abordado o tema da robótica, analisando o papel dos braços robóticos neste contexto, bem como os desafios enfrentados na sua implementação.

O terceiro capítulo trata-se do capítulo principal do presente trabalho, e descreve a metodologia seguida para o desenvolvimento do braço robótico. São definidos os pressupostos do projeto e justificadas as escolhas técnicas, desde os atuadores até à precisão desejada. Posteriormente, detalha-se a construção do modelo de simulação, que serviu para validar a capacidade do sistema antes da implementação. Seguem-se as iterações do projeto, com foco na conceção e análise dos componentes mecânicos de cada junta do robô. No final, é apresentada a configuração final do sistema, incluindo o esquema da cablagem e a passagem do filamento.

No capítulo seguinte, são analisados os testes de verificação realizados através de simulações numéricas. A avaliação passa pela validação do volume de impressão, pelo estudo do comportamento dinâmico do robô e pela análise estrutural da sua resistência. Os resultados obtidos são posteriormente interpretados, permitindo verificar a eficácia do projeto.

Por fim, o último capítulo sintetiza as principais conclusões deste estudo e discute possíveis melhorias futuras. Com base nos resultados alcançados, são sugeridas direções para o aperfeiçoamento do sistema e para o desenvolvimento de trabalhos complementares.

2 Estado da Arte

2.1 Fabrico Aditivo

2.1.1 Introdução ao fabrico aditivo

A tecnologia de fabrico aditivo começou a ser desenvolvida no início dos anos 80, para aplicações industriais que consistiam na produção de protótipos e de pequenos componentes (Saleh Alghamdi et al., 2021). Em 1986, Chuck Hull, fundador da 3D Systems Corporation, patenteou o primeiro método de fabrico aditivo, conhecido como estereolitografia (SLA, do inglês *Stereolithography*) (Hull, 1986). Ao longo das últimas décadas, o fabrico aditivo tem-se desenvolvido de forma muito rápida, sendo uma tecnologia amplamente utilizada na indústria (Hu et al., 2023).

A produção aditiva envolve uma série de etapas que vão desde a criação do modelo CAD (*Computer-Aided Design*), até à obtenção física da peça desejada. A sua utilização varia conforme a complexidade e as exigências do produto em questão. Enquanto produtos mais simples podem recorrer ao fabrico aditivo apenas para prototipagem, produtos mais complexos podem requerer várias iterações ao longo do processo de desenvolvimento. De acordo com Ian Gibson et al. (2015), os processos de fabrico aditivo geralmente englobam, em maior ou menor grau, as seguintes oito etapas:

- **Criação do modelo CAD:** para iniciar a produção de peças por fabrico aditivo é necessário recorrer a programas de modelação, para que se possa obter uma representação sólida ou uma superfície tridimensional;
- **Processamento para impressão:** processamento do modelo virtual, que consiste no fatiamento do modelo por forma a criar-se uma trajetória de impressão;
- **Transferência do ficheiro para a impressora:** o ficheiro que descreve a peça e a trajetória a seguir para a impressão é transferido para a máquina de fabrico aditivo, onde poderá sofrer ajustes consoante os requisitos de tamanho, posição e orientação antes de se avançar para a construção;
- **Realização do *setup* da máquina:** antes do processo de fabrico propriamente dito, a máquina deverá ser configurada, regulando definições relativas a

parâmetros de construção, tais como material a utilizar, velocidade de impressão, espessura da camada, fonte de energia, entre outros;

- **Impressão do objeto:** o processo de produção é majoritariamente automático não requerendo muita supervisão, exigindo apenas monitorização do estado do objeto para prevenir erros, como falta de material, interrupções de energia ou falhas no programa;
- **Remoção do componente:** depois de terminada a impressão do componente, é necessário retirá-lo da base, tomando as devidas precauções de segurança para garantir que as temperaturas estejam baixas o suficiente ou que não haja movimentos indesejados da máquina;
- **Pós-processamento do componente:** após a retirada da máquina, as peças podem precisar de ser limpas, curadas, tratadas e/ou corrigidas antes de estarem prontas para utilização, podendo estar fragilizadas ou apresentar partes impressas de suporte que requerem uma remoção manual cuidadosa;
- **Aplicação final:** as peças podem estar prontas para utilização após a remoção, ou poderão ainda precisar de tratamento adicional ou acabamentos para alcançar a qualidade desejada ou necessitar de montagem com outros componentes para formar o produto final.

Além de abordar as fases do processo de fabrico aditivo, é essencial compreender as tecnologias de impressão 3D. Estas tecnologias desempenham um papel crucial nas etapas mencionadas anteriormente, influenciando diretamente a qualidade, precisão e eficiência do processo de fabrico.

2.1.2 Tecnologias de impressão 3D

De acordo com a International Organization for Standardization (ISO)/American Society for Testing and Materials (ASTM) (2021), as tecnologias de fabrico aditivo podem ser divididas em 7 categorias principais: *Vat Photopolymerization* (VP), *Power Bed Fusion* (PBF), *Material Extrusion* (ME), *Material Jetting* (MJ), *Binder Jetting* (BJ), *Sheet Lamination* (SL) e *Directed Energy Deposition* (DED). Dilberoglu et al. (2017), Lakkala et al. (2023), Y. Zhang et al. (2018) e Alexander et al. (2021) abordam estes 7 tipos de tecnologia de fabrico aditivo. *Vat Photopolymerization* (Figura 2.1a) consiste num processo que utiliza um fotopolímero líquido contido num reservatório e uma fonte de luz ultravioleta (UV) que, ao ser seletivamente aplicada, solidifica regiões específicas de uma peça sob uma plataforma em movimento. *Powder Bed Fusion* (Figura 2.1b) é um processo que utiliza um recipiente cheio de pó que é processado seletivamente usando uma fonte de energia, geralmente um laser de varrimento. *Material Extrusion* (Figura 2.1c), o processo mais comum de impressão 3D, consiste na deposição de material que vai sendo extrudido por um extrusor, formando uma peça camada a camada. No

processo de *Material Jetting* (Figura 2.1d) a impressora aquece as resinas até que se atinja a viscosidade necessária, enquanto as cabeças de extrusão lançam, de forma seletiva, milhares de gotículas de resina enquanto se movem pelo eixo longitudinal da plataforma, seguidos por fontes de luz UV que curam a resina pulverizada. *Binder Jetting* (Figura 2.1e) é um processo de fabrico no qual uma cabeça de extrusão deposita, em locais específicos, um agente de ligação líquido sobre uma fina camada de partículas de pó, construindo peças camada a camada. *Sheet Lamination* (Figura 2.1f) é uma metodologia de fabrico aditivo onde placas finas de material, normalmente fornecidas através de um sistema de rolos, são unidas por aquecimento, camada a camada, para formar uma peça única que é cortada num objeto tridimensional. *Directed Energy Deposition* (Figura 2.1g) consiste num processo que simultaneamente deposita material e fornece energia para processar esse material, através de um único dispositivo de deposição.

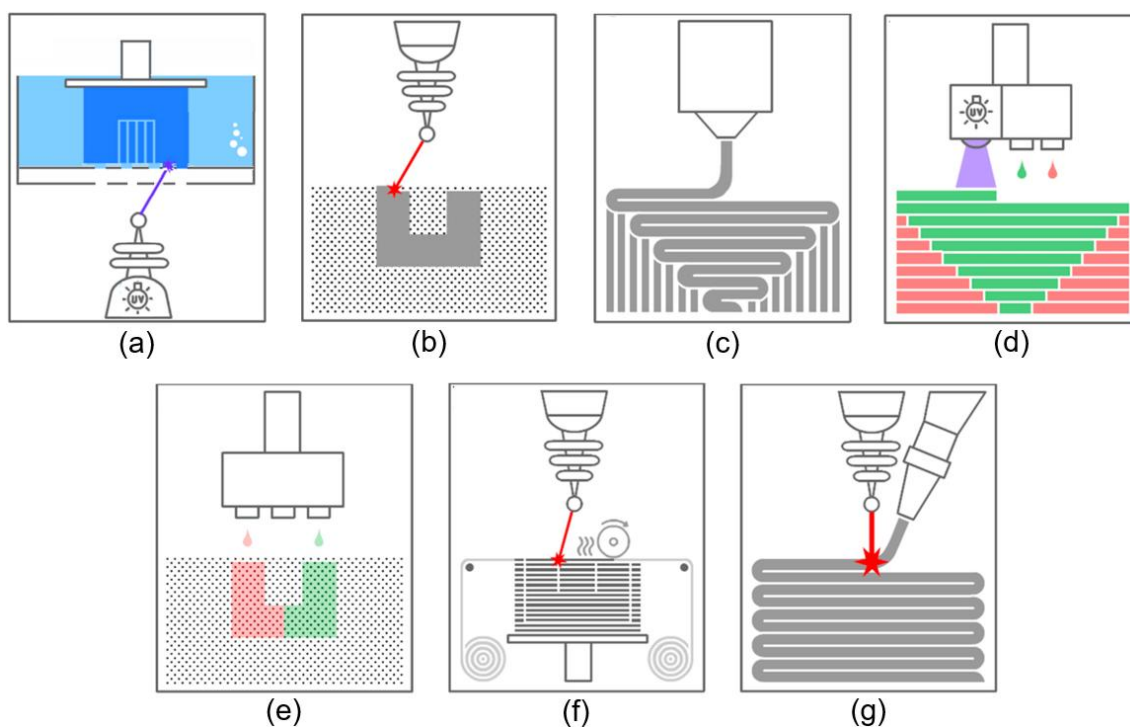


Figura 2.1 – Os 7 tipos de tecnologia de fabrico aditivo: a) Vat Photopolymerization; b) Power Bed Fusion; c) Material Extrusion; d) Material Jetting; e) Binder Jetting; f) Sheet Lamination; g) Directed Energy Deposition (adaptado de Ahangar et al. (2019)).

Incluídas nestas 7 categorias, existem várias técnicas de fabrico aditivo. Huang et al. (2020) definem as tecnologias *Stereolithography* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Fused Filament Fabrication* (FFF) como sendo 3 dos principais métodos de fabrico aditivo. SLA (Figura 2.2a) é o método de *Vat Photopolymerization* mais comum (Shah et al., 2023), podendo adotar uma abordagem de cima para baixo (com a fonte de luz UV acima) ou de baixo para cima (com a fonte de luz UV abaixo do reservatório), sendo conhecidos pela sua precisão elevada, embora mais lentos, e pela qualidade superior

de acabamento superficial. SLS (Figura 2.2b) é uma tecnologia de *Powder Bed Fusion*, que apresenta bastantes vantagens relativamente a outras tecnologias, dada a sua capacidade de produzir peças com alta precisão dimensional, excelentes propriedades mecânicas e qualidade superficial satisfatória, utilizando um feixe laser de elevada energia para sinterizar, de forma seletiva, materiais em pó (Yao et al., 2023). Já o processo FFF (Figura 2.2c) está incluído na categoria de *Material Extrusion*, e consiste na impressão de um objeto, camada a camada, através da deposição controlada de material de fundido, e seguindo uma trajetória predefinida (Brenken et al., 2018).

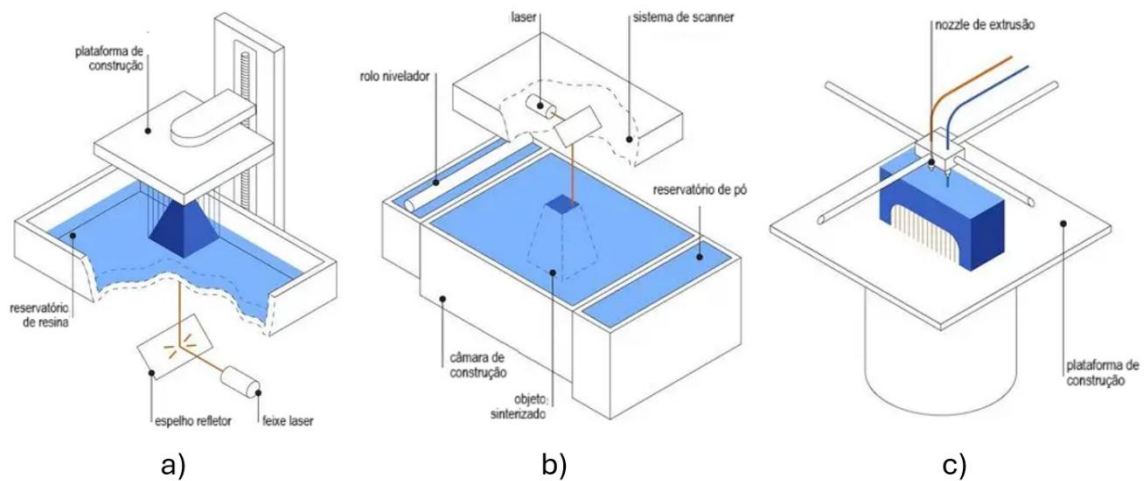


Figura 2.2 – Principais métodos de fabrico aditivo: a) SLA; b) SLS; c) FFF (adaptado de Formlabs (n.d.)).

Embora existam vários processos de fabrico aditivo que apresentam bastantes benefícios na sua utilização, é o processo FFF que predomina na indústria (Aquino Monteiro et al., 2023). Para a realização do projeto, o braço robótico de 6-eixos deverá ser capaz de imprimir componentes utilizando esta técnica de impressão 3D.

2.1.3 Materiais utilizados para impressão 3D

O sucesso e a eficácia do fabrico aditivo dependem, em grande parte, dos materiais utilizados durante o processo. O fabrico aditivo, através das suas várias tecnologias, tem a vantagem de poder utilizar diversos materiais como plásticos e polímeros, metais, cerâmicos, biomateriais, entre outros, para produzir componentes. A Tabela 2.1 apresenta as 7 famílias de tecnologias de fabrico aditivo, e os respetivos materiais que cada uma poderia processar.

Tabela 2.1 – Processos de fabrico aditivo e os materiais que estas podem processar (adaptado de (Madhavadas et al., 2022)).

| Processo de fabrico aditivo | Materiais utilizados |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Vat Photopolymerization</i> | Polímeros Cerâmicos |
| <i>Powder Bed Fusion</i> | Metais Polímeros Cerâmicos |
| <i>Material Extrusion</i> | Polímeros |
| <i>Material Jetting</i> | Polímeros Ceras |
| <i>Binder Jetting</i> | Metais Cerâmicos Polímeros |
| <i>Sheet Lamination</i> | Metais Cerâmicos |
| <i>Directed Energy Deposition</i> | Metais Cerâmicos Polímeros |

Os polímeros são os materiais mais comuns no fabrico aditivo, utilizados em diversas indústrias, tais como aeroespacial e automóvel, e em áreas como saúde, desporto e bens de consumo (Al Rashid & Koç, 2023). Um dos tipos de polímero mais utilizado é o Polímero de Ácido Poliláctico (PLA). Além do PLA, outros polímeros amplamente utilizados são o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS, do inglês *Acrylonitrile Butadiene Styrene*), conhecido pela sua durabilidade e resistência ao impacto, e o Policarbonato (PC), utilizado, principalmente, pela sua transparência e resistência ao calor (Yaragatti & Patnaik, 2020). No entanto, o PLA apresenta vantagens significativas, tais como a facilidade de impressão, a disponibilidade em diversas cores e acabamentos, a sua acessibilidade e biodegradabilidade (sob condições adequadas), características que o tornam ideal para o processo de fabrico aditivo de *Material Extrusion*, foco deste projeto (Jafferson & Chatterjee, 2021).

O fabrico aditivo de metais, nomeadamente titânio, aço inoxidável, alumínio e cobre, é amplamente utilizado em diversas indústrias, tais como aeroespacial, automóvel e biomédica, sendo capaz de produzir geometrias complexas de forma mais eficiente que os métodos de fabrico convencionais (Gardner, 2023). Apesar da ampla disponibilidade deste tipo de materiais no mercado, o maior investimento inicial nos equipamentos para o fabrico aditivo de metais torna os componentes produzidos mais caros. O método mais comum o *Powder Bed Fusion* (Chen et al., 2022; Pratheesh Kumar et al., 2021).

Os materiais cerâmicos também desempenham um papel importante no fabrico aditivo, sendo utilizados em aplicações que vão desde componentes biomédicos até componentes sujeitos a altas temperaturas para indústrias como a aeroespacial (Bhatia & Sehgal, 2021). A alumina e a zircónia são comumente utilizados devido às suas

propriedades mecânicas, químicas e físicas, tais como a resistência ao calor, à corrosão e ao desgaste. O fabrico aditivo de cerâmicos permite a produção de peças complexas que seriam difíceis ou impossíveis de fabricar através dos métodos tradicionais. No entanto, o custo e a velocidade de produção ainda são desafios, e o processo mais comum é o processo SLS (Dadkhah et al., 2023).

2.1.4 Visão geral das aplicações da impressão 3D

A crescente procura e utilização da impressão 3D em diversas áreas, nomeadamente na saúde e nos setores aeroespacial e automóvel, provém do facto de esta tecnologia apresentar vantagens compatíveis com os requisitos e necessidades desses mesmos setores da indústria. De uma forma mais abrangente, a impressão 3D oferece velocidade de produção, flexibilidade no design e menores custos, possibilitando a prototipagem rápida e a produção de peças que seriam difíceis de fabricar usando métodos de produção convencionais (Kanishka & Acherjee, 2023). O uso de uma ampla gama de materiais e a possibilidade de ser um processo sustentável também tornam a impressão 3D uma opção atrativa para diversas indústrias.

No contexto da área da saúde, a impressão 3D tem sido cada vez mais uma solução inovadora para responder a problemas complexos, seja em dispositivos médicos, em próteses, implantes ou produção de tecidos à medida, ou em prototipagem de modelos para testes de cirurgias (Kumar Panda et al., 2023).

Relativamente a áreas de engenharia, em particular nos ramos aeroespacial e automóvel, a impressão 3D tem desempenhado um papel importante, oferecendo soluções cada vez mais inovadoras e transformando os processos de fabrico. No setor aeroespacial, a impressão 3D traz como possibilidades a produção de componentes, contribuindo para uma redução do peso da aeronave, melhorando o seu desempenho aerodinâmico, facilitando o processo de projeto e reduzindo os custos (Blakey-Milner et al., 2021). No ramo automóvel, a impressão 3D tem transformado a produção dos veículos, intervindo não só em componentes mais pequenos como também na própria estrutura do automóvel. Esta modernização na produção de veículos oferece vantagens como a redução dos custos de fabrico e do peso, que por sua vez reduz os gastos de combustível aumentando a eficiência energética e reduzindo a libertação de gases de escape (Zhao et al., 2023). Na Tabela 2.2 é apresentado um resumo dos materiais utilizados no fabrico aditivo para diversas aplicações nos setores aeroespacial e automóvel.

Tabela 2.2 – Resumo dos materiais utilizados em várias aplicações nos setores aeroespacial e automóvel (adaptado de Alami et al. (2023)).

| Material | Aplicação no ramo aeroespacial | Aplicação no ramo automóvel |
|-----------|---|--|
| Polímeros | <ul style="list-style-type: none"> – Prototipagem – Componentes interiores e na cabine – Componentes não estruturais e sistemas de condutas – Componentes para drones | <ul style="list-style-type: none"> – Produção rápida de ferramentas e dispositivos de fixação – Protótipos funcionais e componentes para testes – Componentes personalizados – Materiais compósitos com polímeros |
| Metais | <ul style="list-style-type: none"> – Componentes de motores e turbinas – Componentes estruturais e fuselagens – Aplicações sujeitas a altas temperaturas – Sistemas de propulsão e componentes de foguetões – Componentes de satélites e sistemas de comunicação | <ul style="list-style-type: none"> – Componentes de motores – Componentes dos sistemas de transmissão – Sistemas de suspensão e componentes dos chassis – Sistemas de exaustão e componentes dos motores – Componentes dos sistemas de travagem |
| Cerâmicos | <ul style="list-style-type: none"> – Pás das turbinas e sistemas de combustão – Sistemas de propulsão – Compósitos de matriz cerâmicas para estruturas aeroespaciais – Componentes de satélites e sistemas de comunicação | <ul style="list-style-type: none"> – Componentes de travagem de alto desempenho – Componentes de motores e sistemas de exaustão – Rolamentos e componentes anti-desgaste – Velas e sistemas de ignição – Isoladores e componentes elétricos – Sensores e componentes eletrónicos |

Em suma, a impressão 3D tem vindo a transformar diversas áreas, promovendo novas soluções inovadoras capazes de eliminar problemas existentes. Com as vantagens que apresentam, as tecnologias de fabrico aditivo são capazes de aumentar a eficiência de processos e reduzir custos, sem afetar a qualidade dos componentes produzidos.

2.1.5 Vantagens e limitações do fabrico aditivo comparativamente a métodos de produção convencionais

O fabrico aditivo oferece muitas vantagens em relação aos métodos de produção convencionais, no entanto também apresenta desafios que precisam de ser considerados aquando da decisão sobre a melhor abordagem para o projeto e produção de um componente, objeto ou sistema para determinada aplicação.

Uma das principais vantagens das técnicas de fabrico aditivo é a capacidade de produzir peças complexas e personalizadas com mais facilidade quando comparadas com os métodos convencionais de produção. O fabrico aditivo permite, também, a prototipagem rápida como forma de testar produtos até obter a sua forma final e a produção de componentes apenas quando é feito um pedido, dada a sua velocidade de produção, o que resulta num menor nível de stock de componentes reduzindo os custos de posse e espaços ocupados com produtos (Tofail et al., 2018). Para além disto, outro aspeto fundamental é a redução do desperdício de material, uma vez que apenas é depositado material nas zonas estritamente necessárias, o que em métodos convencionais muitas

vezes não acontece, necessitando da remoção de grandes quantidades de material para se obter o componente desejado (Ahuja et al., 2015). Na Tabela 2.3 é apresentada uma lista de aplicações e respectivas vantagens do fabrico aditivo comparativamente aos métodos convencionais.

Tabela 2.3 – Exemplos de aplicações e respectivas vantagens do fabrico aditivo relativamente a métodos convencionais de produção (adaptado de Attaran (2017)).

| Áreas de aplicação | Vantagens relativamente a métodos convencionais de produção |
|---|---|
| Prototipagem rápida | <ul style="list-style-type: none"> – Redução do tempo até o produto estar disponível no mercado – Redução dos custos envolvidos em desenvolvimento de produto – Empresas mais eficientes e competitivas no que toca à inovação |
| Produção de peças de substituição | <ul style="list-style-type: none"> – Redução dos tempos de reparação – Redução do custo de mão-de-obra – Evitar custos elevados de armazenamento |
| Produção em pequena escala | <ul style="list-style-type: none"> – Pequenos lotes podem ser produzidos de forma economicamente eficiente – Eliminação do investimento em ferramentas |
| Produção de componentes personalizados | <ul style="list-style-type: none"> – Permite a personalização em massa com custos reduzidos – Produção rápida e no local de componentes personalizados para substituição |
| Produtos altamente complexos | <ul style="list-style-type: none"> – Produção de componentes altamente complexos com custos reduzidos |
| Produção de ferramentas | <ul style="list-style-type: none"> – Redução do custo da mão-de-obra – Evitar custos elevados de armazenamento – Permite a personalização em massa com custos reduzidos |
| Produção rápida | <ul style="list-style-type: none"> – Redução significativa do tempo de reparação – Custos relativamente reduzidos para produção de pequenas quantidades de um componente |
| Produção de componentes | <ul style="list-style-type: none"> – Permite a personalização em massa com custos reduzidos – Melhoria da qualidade – Redução da dimensão da cadeia de fornecimento – Redução dos custos envolvidos em desenvolvimento de produto – Ajuda na eliminação de excedentes de <i>stock</i> |
| Produção de componentes personalizados na hora e no local | <ul style="list-style-type: none"> – Eliminação de custos de armazenamento e de transporte – Redução dos tempos de inatividade – Redução da dimensão da cadeia de fornecimento – Redução da necessidade de grandes quantidades de <i>stock</i> – Maximização do ciclo de vida do produto |
| Componentes para reparação rápida | <ul style="list-style-type: none"> – Redução significativa do tempo de reparação – Possibilidade de modificação de componentes reparados para o a versão mais recente do projeto |

Ainda assim, o fabrico aditivo apresenta também algumas limitações. As limitações mais significativas são a reduzida velocidade de produção, quando comparada com métodos convencionais na produção de peças grandes, e a limitação das dimensões da peça a produzir, bem como o pós-processamento necessário para se obter o produto final (Kanishka & Acherjee, 2023). Além destas, também a variedade de materiais possíveis de processar é limitada, assim como a qualidade superficial, precisão dimensional e resistência mecânica das peças, que por vezes são inferiores à dos processos de fabrico convencionais (Y. Zhang et al., 2018).

2.2 Robótica

2.2.1 Contextualização, tipologia e aplicações na indústria

A procura pela excelência na qualidade, inovação tecnológica e criação de valor sempre foi incessante. Com o tempo, a crescente procura por produtos mais complexos e capazes, bem como a intensificação da concorrência, levaram à necessidade de melhorar todo o processo de produção. Nesse cenário, os robôs surgiram como uma solução essencial, sendo fundamentais para aumentar a produtividade, melhorar a segurança e garantir a sustentabilidade dos produtos (Sharma, 2017).

Estas exigências do mercado impulsionaram a evolução da automação industrial, resultando no desenvolvimento de diferentes tipos de robôs, cada um concebido para atender a necessidades específicas. Neste contexto, destacam-se os robôs industriais, colaborativos e móveis, que desempenham papéis fundamentais em variadas áreas de produção.

Os robôs industriais são os mais comuns, usados principalmente em fábricas para processos repetitivos tais como soldagem, pintura e montagem. Tipicamente são robôs grandes, potentes e operam com alta velocidade, necessitando de um espaço de trabalho e medidas de segurança rigorosas para proteger os operadores humanos (Singh & Banga, 2022).

Recentemente, surgiram os robôs colaborativos (também conhecidos como *cobots*) projetados, equipados e programados para trabalhar em segurança lado a lado com humanos (Polonara et al., 2024). Dado isto, estes robôs são mais flexíveis que os robôs industriais e ideais para ambientes de produção dinâmicos.

Os robôs móveis, por sua vez, combinam a locomoção com capacidades de manipulação, permitindo que se movam e realizem tarefas em diferentes locais. São, por estas razões, utilizados em áreas como logística de armazéns, agricultura e missões de resgate (Loganathan & Ahmad, 2023).

Além destas categorias gerais de robôs existe uma diversidade de manipuladores classificados com base na sua estrutura e nos tipos de movimento que realizam. De acordo com a International Federation of Robotics (2021), esses robôs, no que toca à estrutura mecânica, podem ser cartesianos (Figura 2.3a), SCARA (do inglês *Selective Compliance Assembly Robot Arm*) (Figura 2.3b), articulados (Figura 2.3c), paralelos/Delta (Figura 2.3d), cilíndricos (Figura 2.3e) e polares/esféricos (Figura 2.3f).

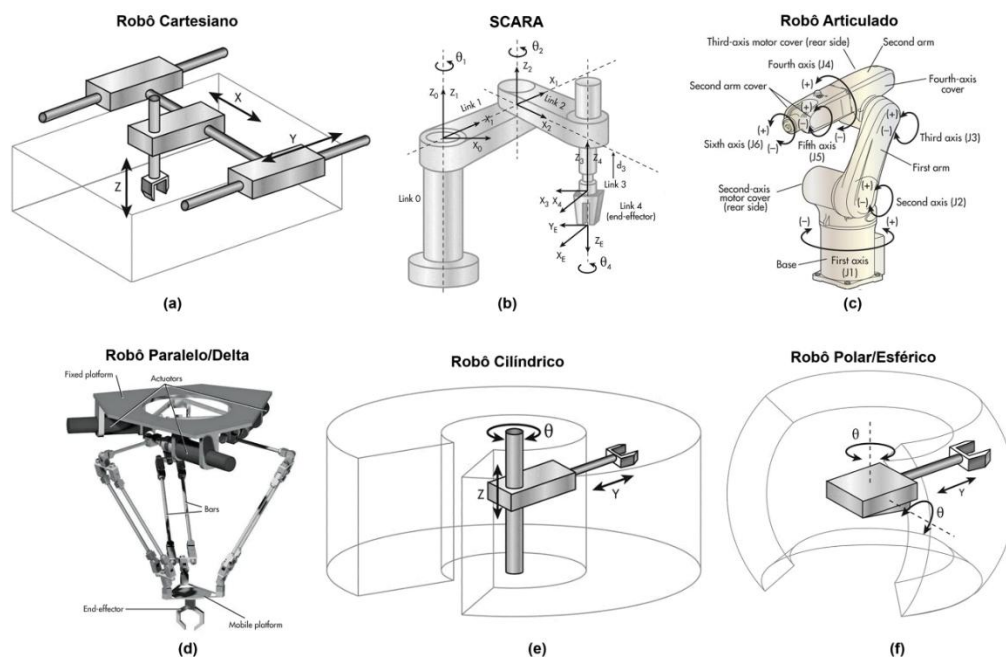


Figura 2.3 – Classificação dos tipos de robôs de acordo com a sua estrutura mecânica: a) Cartesiano; b) SCARA; c) Articulado; d) Paralelo/Delta; e) Cilíndrico; f) Polar/Esférico (adaptado de (MachineDesign, 2016)).

Wilson (2015), Singh & Banga (2022) e Zhang (2010) abordam estes robôs um a um, fornecendo uma descrição da configuração, valências e habituais aplicações dos mesmos.

Os robôs cartesianos possuem três articulações prismáticas, cujos eixos formam um sistema de coordenadas cartesianas, permitindo movimentos precisos e lineares ao longo dos eixos X, Y e Z, sendo amplamente utilizado para tarefas que exigem alta precisão e repetibilidade num espaço definido.

Os SCARA estão equipados com duas articulações rotativas paralelas, configuração esta que proporciona grande precisão nos movimentos horizontais, sendo ideal para e aplicações de montagem e de manipulação onde a precisão é crucial.

Os robôs articulados, foco deste trabalho, possuem pelo menos três articulações rotativas, o que lhes confere bastante flexibilidade e amplitude de movimento, tornando-os adequados para uma ampla gama de tarefas, tais como soldadura, pintura e processos complexos de montagem.

Os robôs paralelos (também conhecidos como Delta) possuem uma configuração que permite movimentos rápidos e precisos, sendo ideal para aplicações que exigem alta velocidade e precisão, como movimentação de componentes em linhas de montagem.

Os robôs cilíndricos possuem, tipicamente, pelo menos uma articulação rotativa e uma prismática, permitindo uma combinação de movimentos verticais e rotacionais, tornando-o adequado para tarefas como montagem e manipulação de peças dentro de um espaço de trabalho cilíndrico.

Por fim, os robôs polares ou esféricos são compostos por duas articulações rotativas e uma prismática, resultando numa configuração que oferece flexibilidade para mover-se ao longo de um volume esférico. Além da configuração estrutural, o desempenho dos robôs é avaliado com base em quatro parâmetros principais (Wilson, 2015):

- **Capacidade de carga:** peso máximo que o robô consegue suportar na extremidade onde se encontra a ferramenta, sem comprometer o funcionamento;
- **Repetibilidade:** capacidade do robô de retornar exatamente a um ponto onde esteve anteriormente ou de repetir com precisão um trajeto anteriormente realizado;
- **Alcance e Espaço de trabalho:** volume de trabalho em que o robô consegue desempenhar a sua função;
- **Velocidade:** tipicamente a velocidade máxima que o robô consegue alcançar ao realizar um trajeto definido.

Cada uma destas características de funcionamento influencia diretamente a capacidade dos robôs de desempenharem uma função em diferentes contextos industriais e operacionais. Para além disto, o controlo destes parâmetros converge para um desempenho mais otimizado nas suas aplicações típicas, como é o caso da montagem, manuseio de objetos, pintura, soldadura, entre outros (Bartoš et al., 2021).

Ainda assim, à medida que as exigências do mercado continuam a evoluir, as exigências colocadas às capacidades dos robôs são cada vez maiores. Um exemplo que potencia novas possibilidades de produção personalizada e de fabrico aditivo, e que será abordado e estudado na presente dissertação é a utilização de braços robóticos como sistemas de impressão 3D.

2.2.2 Braços robóticos no contexto do fabrico aditivo

A crescente procura por soluções mais avançadas de fabrico tem impulsionado a integração de braços robóticos com tecnologias de impressão 3D. Esta combinação aproveita a flexibilidade dos braços robóticos e a precisão da impressão 3D, criando mais oportunidades para processos de produção mais flexíveis, precisos e automatizados (Bhatt et al., 2020). Os robôs executam movimentos complexos durante a impressão, aumentando a capacidade de criar peças com geometrias mais complexas e em grande escala, muitas vezes impossíveis de realizar através dos sistemas convencionais de fabrico aditivo (Xu et al., 2022).

Por forma a garantir que o processo de impressão mantenha a precisão e seja eficiente, tornam-se essenciais soluções adequadas de software e hardware. São utilizadas ferramentas de simulação de trajetórias, sistemas de controlo do movimento e algoritmos de calibração, para que possam existir ajustes no movimento do robô ao longo de um trajeto definido (Xiang et al., 2021). Para além disto, também são utilizados

sensores que monitorizam e ajustam a velocidade e a quantidade de material extrudido enquanto a ferramenta está em movimento (Pham et al., 2016).

Estes avanços têm sido aplicados em diversas áreas da indústria, onde os braços robóticos têm mostrado resultados notáveis quando aliados à impressão 3D, evidenciando o potencial que esta metodologia tem.

Na indústria aeroespacial, os braços robóticos são utilizados na impressão de componentes complexos de aeronaves, drones e satélites, uma vez que permitirem a impressão de peças de geometria complexa em diversos materiais, como é o caso das ligas de titânio e compósitos. Bhatt et al. (2019), no seu trabalho, abordam casos de estudo práticos da indústria aeroespacial, mais concretamente a produção de asas para drones, o fabrico das *wingtips* de um avião e a criação de mantas de isolamento térmico multicamadas.

A indústria automóvel, como destacado por Tuazon et al. (2022) e Iftekar et al. (2023) nos seus estudos, tem integrado progressivamente a impressão 3D, que começou por ser utilizada para prototipagem rápida e fabricação de ferramentas. Atualmente, esta aliança entre os braços robóticos e as tecnologias de fabrico aditivo evoluiu para a fabricação de componentes complexos, como peças para motores feitas em ligas metálicas, e outros componentes integrantes no design feitas de polímeros como ABS, PLA e PC, trazendo bastantes benefícios para a indústria.

Na área da medicina, em particular na indústria biomédica, os braços robóticos são amplamente utilizados em contexto de fabrico aditivo, tendo-se tornado extremamente importantes. Gul et al. (2018) e Li et al. (2023) abordam vários casos de estudo notáveis, como a criação de próteses para reabilitação, pele eletrónica para fornecer sensações físicas a implantes, e a impressão de órgãos com tecido real para testes e desenvolvimento de medicamentos. Também são aplicados em reparações de tecidos cardíacos e vasculares, regeneração óssea em defeitos complexos e reparação de cartilagem e pele, especialmente em cenários de emergência, como grandes queimaduras e lesões articulares.

2.2.3 Desenvolvimento de braços robóticos: Casos de Estudo

Diversos estudos e dissertações têm explorado o desenvolvimento e fabrico de braços robóticos com finalidades distintas, incluindo tarefas de manipulação, automação e assistência em ambientes industriais e de investigação.

Bárány & Rónai (2023) projetaram um braço robótico de 4 eixos para uso educacional (Figura 2.4a), com recurso ao programa Autodesk Fusion 360 e fabricado com recurso a impressão 3D, utilizando a tecnologia de FFF. No seu trabalho, Bárány & Rónai (2023) realizaram vários testes ao funcionamento do robô, com recurso a pequenos objetos que foram manipulados. Nesses testes, foi avaliada a repetibilidade, onde se verificou que a precisão da mesma variava dentro de uma gama de 2 mm. Para a determinação

da carga máxima admissível do robô, o braço foi colocado numa posição totalmente horizontal (pior caso possível) e verificou-se que conseguiria suportar 0,140 kg. Relativamente ao espaço de trabalho (Figura 2.4b), o robô movimenta-se numa gama entre 0 e 204 mm na direção de projeção, e entre 0 e 275 mm na direção Z.

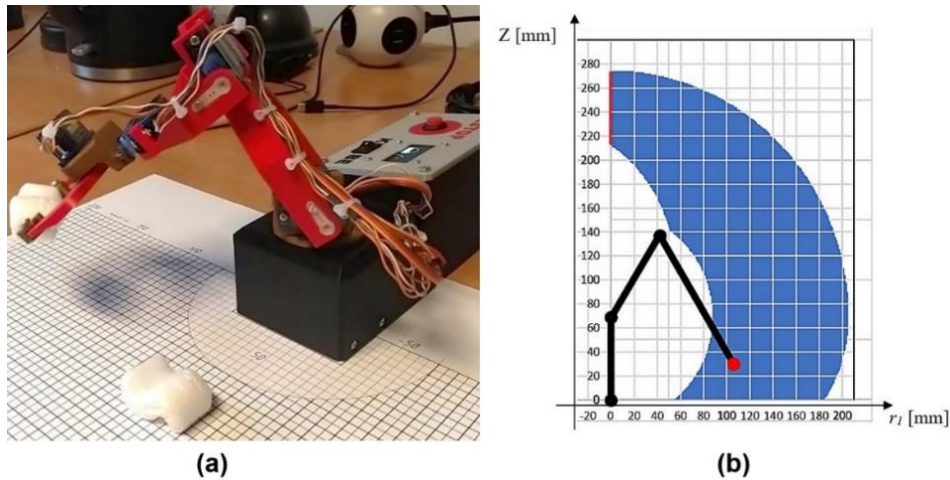


Figura 2.4 – (a) Imagem real do robô desenvolvido por Bárány & Rónai (2023); (b) Espaço de trabalho do robô. (Adaptado de Bárány & Rónai (2023)).

Ali et al. (2023) desenvolveram um robô com 5 graus de liberdade com vista à realização de tarefas de movimentação e triagem de objetos. Tal como Ali et al. (2023) indicam no seu estudo, dada a crescente procura e a escassez de mão de obra qualificada, especialmente em pequenas indústrias, os robôs tornaram-se vitais neste tipo de tarefas. O braço desenvolvido é feito de alumínio, oferecendo um bom rácio entre rigidez e peso, e consegue suportar uma carga com até 1 kg. O braço foi projetado e analisado utilizando os programas SOLIDWORKS e ANSYS. Na Figura 2.5a) surge uma imagem do robô desenvolvido e na Figura 2.5b) o contexto de funcionamento.

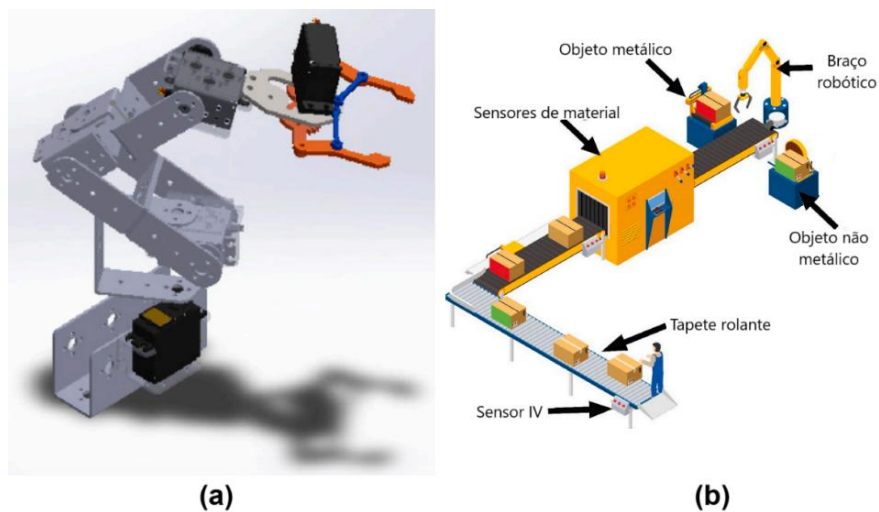


Figura 2.5 – (a) Imagem real do robô desenvolvido em Ali et al. (2023); (b) contexto de funcionamento. (Adaptado de Ali et al. (2023)).

Outro caso de estudo merecedor de menção é o de Ananias (2022). O trabalho desenvolvido consiste no projeto, fabrico e teste de um braço colaborativo articulado de 6-eixos, de baixo custo, dentro dos padrões normalizados (Figura 2.6). O objetivo do trabalho desenvolvido, segundo Ananias (2022), foi desenvolver uma solução no âmbito educacional, bem como de apoio a atividades de investigação, e para outras aplicações em que o robô fosse adequado. Os componentes do braço robótico foram projetados com recurso ao programa de modelação SOLIDWORKS, e fabricados por impressão 3D, tanto em PLA como em PETG (Polietileno Tereftalato Glicol, do inglês *Polyethylene Terephthalate Glycol*). Para verificar a viabilidade do robô, foram realizados testes para determinação da carga útil, do erro de posicionamento, da precisão e repetibilidade, entre outros mais relacionados ao controlo e eletrónica. Foi determinado que, no pior dos casos, o robô poderia suportar uma carga máxima de 0,314 kg. Relativamente a parâmetros como o erro de posicionamento e precisão, Ananias (2022) apresenta os valores obtidos provenientes de diversos testes em tabelas. Por fim, é dado a conhecer o volume de trabalho do braço robótico: eixo 1, -180 a 180 [°]; eixo 2, -30 a 210 [°]; e eixo 3, -160 a 160 [°]; alcance de até 434 mm na horizontal e uma altura de até 597 mm.



Figura 2.6 – Braço robótico colaborativo com 6-eixos, de baixo custo, desenvolvido e apresentado em Ananias (2022).

Em concordância com o tema da presente dissertação, também existem casos de estudo de braços robóticos projetados especificamente para atuar como impressoras 3D. Luu et al. (2021) descrevem o desenvolvimento de um sistema de impressão 3D, baseado num braço robótico industrial de 6-eixos, utilizando a tecnologia de FFF (Figura 2.7). Com o uso do sistema de impressão 3D baseado no robô, tornou-se possível imprimir em planos inclinados, algo que não pode ser alcançado por uma impressora 3D convencional (Luu et al., 2021). O robô foi testado para se analisar a capacidade do mesmo de imprimir em planos inclinados, sendo que Luu et al. (2021) chegou à conclusão de que, impressões cujo plano normal à direção de extrusão esteja a 80° relativamente à base de impressão são completamente factíveis. Luu et al. (2021) destaca também que a aliança entre braços robóticos e tecnologias de fabrico aditivo

são uma mais-valia para os processos de fabrico, apontando a necessidade de existir mais desenvolvimentos nesta área.

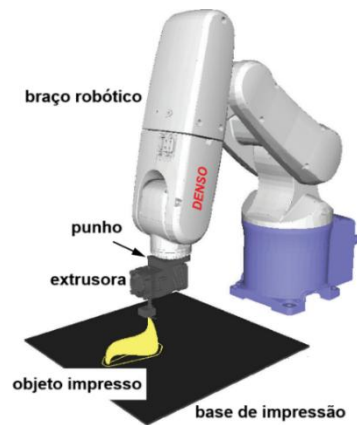


Figura 2.7 – Braço robótico de 6-eixos para impressão 3D, desenvolvido em Luu *et al.* (2021).
(Adaptado de Luu *et al.* (2021))

Outro exemplo de aplicação de braços robóticos no contexto do fabrico aditivo é apresentado por Pires (2021), onde se explora o uso de um braço robótico comercializado, como impressora 3D. O braço robótico utilizado foi o IRB 140, um robô com 6 graus de liberdade, e desenvolvido pela ABB Robotics (Figura 2.8a). O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade deste robô como posicionador de uma extrusora. Os testes consistiram na impressão de componentes em PLA, utilizando vários parâmetros de funcionamento. Com os resultados das impressões realizadas, Pires (2021) avaliou a qualidade das impressões, mencionando como alguns parâmetros, como a velocidade de impressão, influenciam as impressões e a sua qualidade. Pires (2021), nas conclusões apresentadas, destaca também que, com as modificações e melhorias adequadas, este processo de fabrico pode tornar-se ainda mais promissor. O espaço de trabalho deste robô é consideravelmente maior do que os espaços de trabalho dos restantes robôs analisados neste capítulo (Figura 2.8b). Isto ocorre uma vez que este robô já está em comercialização e não foi projetado para fins educativos, ao contrário de alguns dos casos de estudo anteriormente abordados.

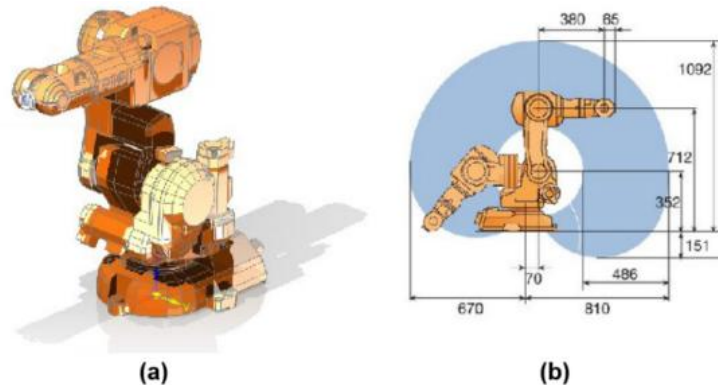


Figura 2.8 – (a) Robô IRB 140, da ABB Robotics; (b) Espaço de trabalho no robô IRB 140, da ABB Robotics. (Adaptado de Baquero-Suárez & Heredia (2013))

2.2.4 Desafios e limitações dos braços robóticos no fabrico aditivo

O uso de braços robóticos no contexto do fabrico aditivo apresenta vários desafios e limitações que podem afetar a eficácia e qualidade de um processo.

Um dos principais desafios é a precisão e repetibilidade. A capacidade dos braços robóticos de manter a precisão durante os movimentos é um desafio exigente, no entanto é fundamental para garantir a qualidade da impressão. Segundo Lidholm & Runnquist (2021), a principal causa de imprecisão e fraca repetibilidade dos braços robóticos é a oscilação que ocorre quando há uma paragem brusca de movimento, especialmente a velocidades mais altas, algo que pode ser melhorado com o uso de motores com maior binário e potência e velocidades de funcionamento mais baixas.

O controlo da velocidade e aceleração do robô, juntamente com a velocidade de extrusão é também um dos principais desafios desta tecnologia de fabrico. Pires (2021) analisou os efeitos do aumento da velocidade do robô (e consequente aumento de velocidade do braço robótico) no seu estudo, tendo obtido resultados distintos para velocidades diferentes. O teste consistia em imprimir um componente em forma de tubo retangular com os cantos arredondados. Pires (2021) conclui que a 30 mm/s, os cantos ficaram estáveis, mas a superfície apresentou menor qualidade; a 40 mm/s, obteve-se um excelente acabamento lateral e cantos perfeitos; já a 50 mm/s, o acabamento superficial foi ótimo, mas a qualidade dos cantos diminuiu; e a 60 mm/s, a qualidade da impressão deixou de ser aceitável, indicando o limite para obter resultados estáveis nas condições do teste. Um controlo otimizado da velocidade, tanto do robô como de extrusão, pode ser fulcral para a obtenção de bons resultados de impressão.

Outro desafio que é de elevada complexidade é a programação/controlo do braço robótico. Desenvolver e implementar trajetórias complexas para impressão incorre em algoritmos igualmente complexos e programas mais especializados (Yang et al., 2016). Uma limitação deste processo é o espaço para a impressão e a acessibilidade a pontos mais complicados. A área de impressão e a acessibilidade podem ser limitadas, dificultando o fabrico de objetos grandes ou com geometria complexa (Chattopadhyay et al., 2024). Os braços robóticos estarão sempre limitados por um volume de trabalho e pela sua flexibilidade, diretamente ligada ao número de graus de liberdade, pelo que robôs mais simples e pequenos estarão mais limitados no que toca ao fabrico de componentes maiores e mais complexos.

Além disso, a possibilidade de colisões é outro aspeto a ter atenção. Colisões podem ocorrer durante a operação do braço robótico, quando o volume de trabalho é interferido. Estas interferências, seja com o objeto em impressão ou com o próprio braço, podem resultar em falhas na impressão, em danos humanos e/ou no equipamento (Simas & Di Gregorio, 2021).

Por fim, um aspeto a ter em conta para a manutenção da qualidade dos componentes produzidos é a calibração. De acordo com T. Zhang et al. (2024), as principais fontes de imprecisão que levam à necessidade de calibração são erros no modelo cinemático, folgas e atrito nas juntas, deformações devido a cargas externas e variações de temperatura. Controlando estes fatores, é possível melhorar a orientação e exatidão da posição do robô.

3 Metodologia e Desenvolvimento do Braço Robótico

3.1 Pressupostos do Projeto

O ponto de partida para o desenvolvimento deste projeto foi a definição de um conjunto de pressupostos e limitações associadas ao mesmo. Estes foram estabelecidos para orientar o projeto e desenvolvimento do braço robótico, assegurando que as soluções propostas estivessem alinhadas com os objetivos definidos.

3.1.1 Volume e velocidade de impressão

Uma das primeiras condições estabelecidas foi o volume de impressão, definido em 200x200x200 mm. Este valor, embora não seja ideal para determinadas aplicações e possa estar sujeito a otimização, é bastante utilizado (Sljivic et al., 2017), e representa um volume inicial adequado para a dimensão do braço robótico que se pretende construir, permitindo também que se possa iniciar a escolha/projeto de alguns componentes com base nas suas dimensões próprias. O braço robótico deverá ser capaz de imprimir em qualquer ponto dentro deste volume.

Relativamente à velocidade de impressão, selecionou-se como requisito de projeto um valor de 50 mm/s. De acordo com Kamer et al. (2022), os valores típicos de velocidade para impressoras com funções e dimensões semelhantes à deste projeto estão entre os 40 e os 100 mm/s.

3.1.2 Material a imprimir: PLA

O material selecionado para a impressão foi o PLA, amplamente utilizado em aplicações de impressão 3D devido às suas características que facilitam o processamento e garantem bons resultados. O PLA, para além de ter vantagens relativas à sua biodegradabilidade, destaca-se pela sua baixa temperatura de fusão e pela estabilidade dimensional, características que minimizam problemas de deformação durante a

impressão (Wang et al., 2024). Estas propriedades tornam-no ideal para sistemas de câmara aberta, já que não exige controlo térmico rigoroso durante o processo. A sua versatilidade e acessibilidade, aliadas à facilidade de aquisição, tornam o PLA uma escolha lógica e prática para o material a imprimir pelo braço robótico.

3.1.3 Impressão em câmara aberta

O sistema foi projetado para imprimir em câmara aberta, eliminando a necessidade de isolamento térmico ou controlo rigoroso do ambiente de impressão. Esta abordagem é viabilizada pela escolha do PLA como material de impressão, devido à sua baixa taxa de retração térmica e elevada estabilidade dimensional (Barrasa et al., 2021).

Além disso, o PLA não emite vapores tóxicos ou odores intensos durante a impressão, tornando-o adequado para impressão em ambientes abertos (Wang et al., 2024). Estas características tornam o uso de câmara aberta uma escolha prática, permitindo simplificar este projeto e reduzir os custos associados a equipamentos adicionais.

3.1.4 Graus de Liberdade (GdL) do sistema

O braço robótico terá seis graus de liberdade, distribuídos entre as articulações. Os movimentos definidos incluem rotações segundo os eixos (z), (x), (x) e (x, y, z). A Figura 3.1 apresenta um esquema dos graus de liberdade do sistema robótico, bem como a numeração de cada junta para mais fácil identificação ao longo do documento. De forma respetiva, o primeiro GdL encontra-se na base giratória (junta 1), responsável por fazer rodar todo o braço robótico. Os segundo e terceiro GdLs estão nas duas juntas intermédias do robô (juntas 2 e 3). Já os três últimos GdLs estão localizados no punho do braço robótico, conhecidos como inclinação, guinada e rolamento, respetivamente (juntas 4, 5 e 6).

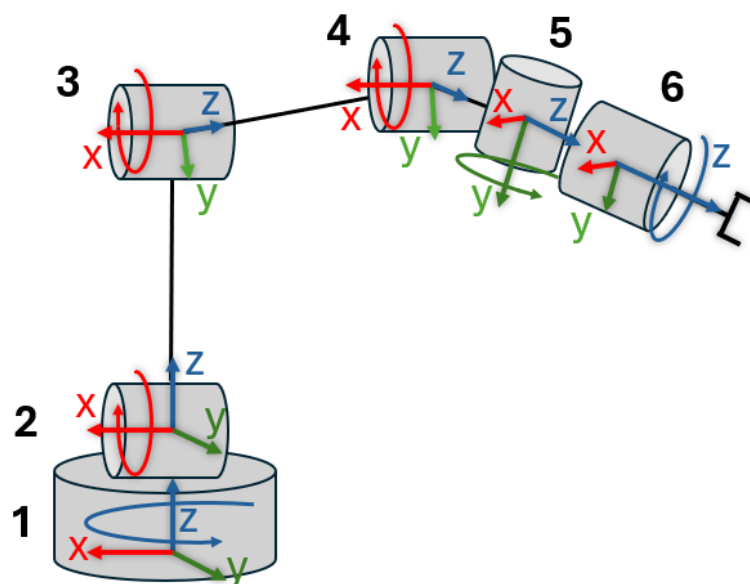


Figura 3.1 – Esquema dos graus de liberdade do sistema e numeração das juntas.

Esta configuração garante a flexibilidade necessária para que o braço execute movimentos complexos com precisão, enquanto mantém a simplicidade mecânica.

3.1.5 Seleção do tipo de atuadores

Para o desenvolvimento do braço robótico, foi realizada uma análise comparativa entre motores *stepper* e motores DC para aplicação nas juntas. Após uma avaliação detalhada, a escolha recaiu sobre motores *stepper* de anel fechado (também amplamente conhecidos como *Closed Loop Stepper Motors*), considerando que são a opção mais adequada para atender aos requisitos do projeto.

Os motores *stepper* em anel fechado combinam a alta precisão e repetibilidade dos *steppers* tradicionais com a capacidade de corrigir erros de posição a cada instante, graças à medição dos *encoders* integrados (Tang & Yu, 2022). Esta funcionalidade é essencial para assegurar a qualidade e a exatidão dos movimentos do braço robótico, necessários no processo de impressão 3D. Além disso, os motores *stepper* de anel fechado são amplamente utilizados em aplicações de alta precisão, como máquinas de controlo numérico computadorizado (CNC) e impressoras 3D, o que reforça a sua confiabilidade e adaptabilidade (Sharan & Onwubolu, 2013).

3.1.6 Precisão da impressão e flexão admissível

A definição de parâmetros como a precisão da impressão e a estabilidade e resistência mecânica são essenciais para o desenvolvimento de sistemas de impressão 3D, tais como braços robóticos, uma vez que estes aspetos estão diretamente ligados à qualidade do produto impresso.

Com base em estudos de mercado de impressoras 3D comerciais e nos requisitos técnicos do projeto, definiu-se uma precisão de mais ou menos 1/4 da altura da camada impressa, que tipicamente tem 0,2 mm. Este valor de precisão é frequentemente adotado em impressoras 3D comerciais (Bist et al., 2022; Drugă et al., 2021). Este critério serviu como ponto de partida para definir a precisão pretendida em $\pm 0,05$ mm. Paralelamente, a flexão admissível na ponta do braço foi limitada a este mesmo valor, de modo a minimizar desvios que possam comprometer a exatidão e a qualidade da impressão. Este é um requisito que acompanhará toda a fase de projeto, procurando-se minimizar o peso do braço, maximizando a rigidez da estrutura.

3.1.7 Componentes das juntas do braço robótico

As juntas são a parte mais importante e complexa de um braço robótico. É nestes subconjuntos que estão colocados os componentes responsáveis pela movimentação do braço robótico. Cada junta deverá estar equipada com os componentes necessários e adequados para os requisitos do projeto.

Para atender às condições estabelecidas, foram definidos como componentes essenciais para as juntas: motores compatíveis com os requisitos do sistema, nomeadamente motores *stepper* de anel fechado, que já incluem *encoders*; caixas de velocidades, muito utilizadas neste tipo de aplicações; travões que previnam movimentos descontrolados ou em situações de falha de energia, impedindo que o braço robótico caia; e sensores de limite para proteger o sistema contra sobrecargas (AZO Robotics, 2023).

3.1.8 Estrutura do braço robótico e outras considerações

Para que se cumprissem os parâmetros de precisão do processo de impressão das peças e flexão admissível do braço robótico, definiu-se que a estrutura do mesmo deveria ser em aço ou alumínio, e não em material impresso, como PLA ou ABS, uma vez que não oferecem a resistência e a estabilidade necessárias.

Através de análises de mercado e pesquisas de soluções semelhantes ao projeto a desenvolver, definiu-se que se iriam utilizar como componentes estruturais perfis modulares, nomeadamente, calhas de alumínio extrudido. Estes perfis de alumínio são utilizados em diversas aplicações, dada a sua boa resistência mecânica, baixo peso, facilidade de montagem, facilidade de aquisição, entre outros aspetos (AEC: Aluminum Extruders Council, 2024). Uma imagem deste tipo de calhas é apresentada na Figura 3.2.

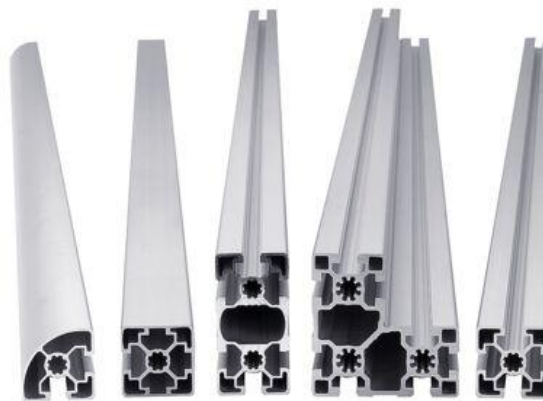


Figura 3.2 – Calhas de alumínio extrudido (Rexroth: A Bosch Company, n.d.).

Outro ponto crítico é a gestão de cabos e fios, que desempenham um papel fundamental na operação segura e eficiente do braço robótico. A estrutura deverá permitir uma organização adequada da cablagem, prevenindo interferências e danificação dos cabos. Para tal, o robô será projetado para que os cabos passem no interior da estrutura e estejam colocados por forma a que não interfiram com o movimento do braço robótico.

3.2 Modelo inicial de simulação no MATLAB/Simulink

3.2.1 Importância da simulação no desenvolvimento inicial do projeto

No início do desenvolvimento de um projeto como o de um braço robótico, a ausência de um sistema físico para análise e testes representa um desafio significativo. O facto de não existir um protótipo físico, torna-se difícil de prever como se comportaria o sistema, ajustar parâmetros e validar decisões de design.

Para que se tivesse um ponto de partida no projeto e se superasse algumas destas dificuldades, foi utilizado um modelo de simulação no MATLAB/Simulink. Este modelo serviu para criar uma representação virtual do sistema, com vista à realização de um processo iterativo de ajuste de parâmetros cinemáticos e dinâmicos, bem como parâmetros relativos ao peso, inércia e dimensões dos componentes, proporcionando uma base sólida para o avanço do projeto.

Este tipo de abordagem é amplamente utilizado em projetos de sistemas robóticos e outras aplicações semelhantes, como é o caso de Chotikunnan et al. (2023), de Lee & Kuo (2020) e de Al-khazarji et al. (2020), dado que permite otimizar o design antes da construção do sistema real, poupando tempo e recursos, ao mesmo tempo que assegura maior precisão e confiabilidade nos resultados finais.

3.2.2 Modelo de simulação inicial utilizado

Como mencionado anteriormente, foi utilizado um modelo de simulação de um braço robótico já existente no MATLAB/Simulink. Este modelo de simulação foi originalmente desenvolvido para representar um sistema baseado em tubos e adaptado a um espaço de trabalho com dimensões de 200x200x200 mm. A estrutura do modelo está organizada em módulos que incluem juntas e barras, permitindo uma representação precisa da dinâmica e das propriedades físicas do robô.

Por detrás da simulação, existe uma função designada por “*InitCtrlPos*”, que é o elemento principal para a inicialização e configuração de todo o modelo de simulação. Neste ficheiro são definidos os parâmetros fundamentais que sustentam a simulação e permitem a adaptação do contexto do projeto.

Inicialmente, tal como mencionado anteriormente, o ficheiro estava concebido para um modelo de tubos e um espaço de trabalho de 200x200x200 mm, e a estrutura do modelo era composta por sete barras. Destas sete barras, as três primeiras representam a parte principal do robô (estrutura da base e braços) e as últimas três correspondem ao punho do robô. O comprimento de cada barra está diretamente relacionado com o espaço de trabalho, sendo que as barras principais possuem o comprimento equivalente a l (que corresponde a 200 mm) e as restantes têm um tamanho reduzido, fixado em $0,1 \cdot l$ (correspondente a 20 mm). Cada um destes módulos inclui tanto a junta como a

respetiva barra associada. Na Figura 3.3 surge uma parte do código do ficheiro "*InitCtrlPos*" onde constam os parâmetros e aspetos mencionados anteriormente.

```

%% Physical Constants and Properties
g = 9.81;
rho = 7800;

%% Workspace Dimensions
l = 0.2;
lx = 1;
ly = 1;
lz = 1;

%% Link lengths
l01 = 0.1*1;
l12 = 0.1*1;
l23 = 1*1;
l34 = 1*1;

l45 = 0.1*1;
l56 = 0.1*1;
l67 = 0.1*1;

```

Figura 3.3 – Configuração inicial do ficheiro "*InitCtrlPos*" onde surgem parâmetros como dimensão do espaço de trabalho e comprimento das barras.

Para além disto, o ficheiro inclui funções para o cálculo de parâmetros como centros de massa, massas e inércias das diferentes barras. Na Figura 3.4 é apresentada uma parte do código onde surgem as funções para cálculo dos parâmetros mencionados.

```

%% Link Centers of mass
lcm01 = l01/2;
lcm12 = l12/2;
lcm23 = l23/2;
lcm34 = l34/2;
lcm45 = l45/2;
lcm56 = l56/2;
lcm67 = l67/2;

%% Link Masses an Inertias
m01 = rho*pi*l01*(d01*e01+e01^2);
m12 = rho*pi*l12*(d12*e12+e12^2);
m23 = rho*pi*l23*(d23*e23+e23^2);
m34 = rho*pi*l34*(d34*e34+e34^2);
m45 = rho*pi*l45*(d45*e45+e45^2);
m56 = rho*pi*l56*(d56*e56+e56^2);
m67 = rho*pi*l67*(d67*e67+e67^2);

I01 = TubeInertia(m01,l01,d01,e01);
I12 = TubeInertia(m12,l12,d12,e12);
I23 = TubeInertia(m23,l23,d23,e23);
I34 = TubeInertia(m34,l34,d34,e34);
I45 = TubeInertia(m45,l45,d45,e45);
I56 = TubeInertia(m56,l56,d56,e56);
I67 = TubeInertia(m67,l67,d67,e67);

```

Figura 3.4 – Configuração inicial do ficheiro "*InitCtrlPos*" onde surgem parâmetros como centros de massa, massas e inércias.

Outro aspeto relevante neste ficheiro é a definição de um parâmetro que especifica a posição inicial da base do robô em relação ao espaço de trabalho, bem como parâmetros que estabelecem os limites mínimos e máximos das saturações, garantindo que o modelo opera dentro de restrições físicas e mecânicas adequadas. Esta configuração inicial permite que as características do modelo sejam ajustadas conforme os requisitos do projeto.

Relativamente ao modelo de simulação propriamente dito, inclui um diagrama de blocos no Simulink, que reúne todo o conteúdo necessário para o funcionamento do sistema e execução da simulação. Este diagrama está dividido em diferentes secções.

Uma das secções mais importantes é relativa à linearização do robô. Dentro desta secção, inclui-se um processo de controlo não linear que realiza automaticamente o controlo gravítico do robô, evitando que este caia sob o efeito do próprio peso. Na Figura 3.5 é apresentada a secção do diagrama que realiza a linearização, designada por “*Feedback Linearization*”.

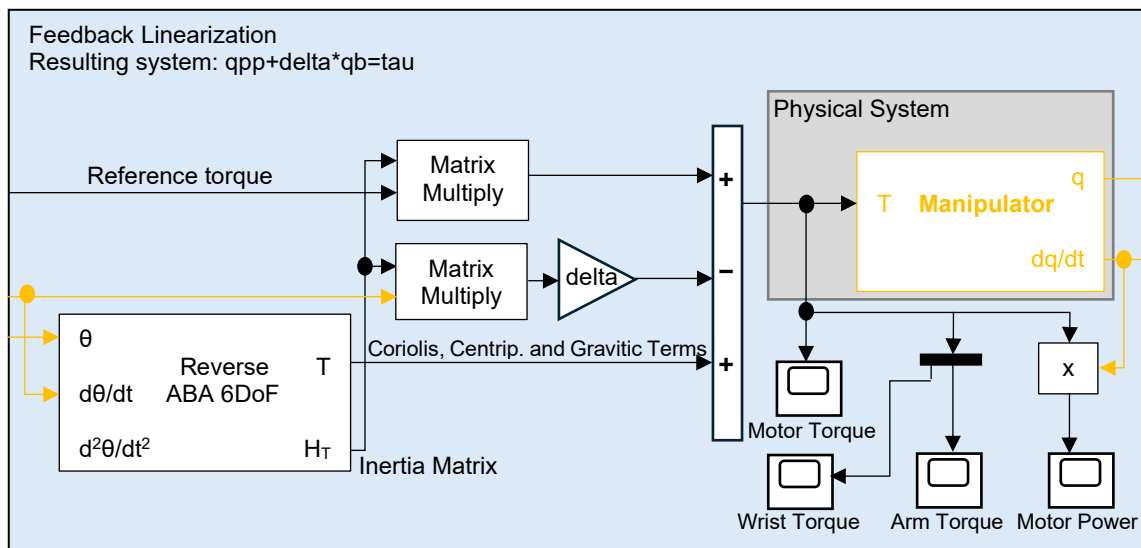


Figura 3.5 – Processo de linearização do robô do modelo inicial no Simulink.

Além disso, o diagrama integra também o controlo da velocidade das várias juntas do robô, dentro da secção designada por “*Joint Velocity Control Loop*” (Figura 3.6).

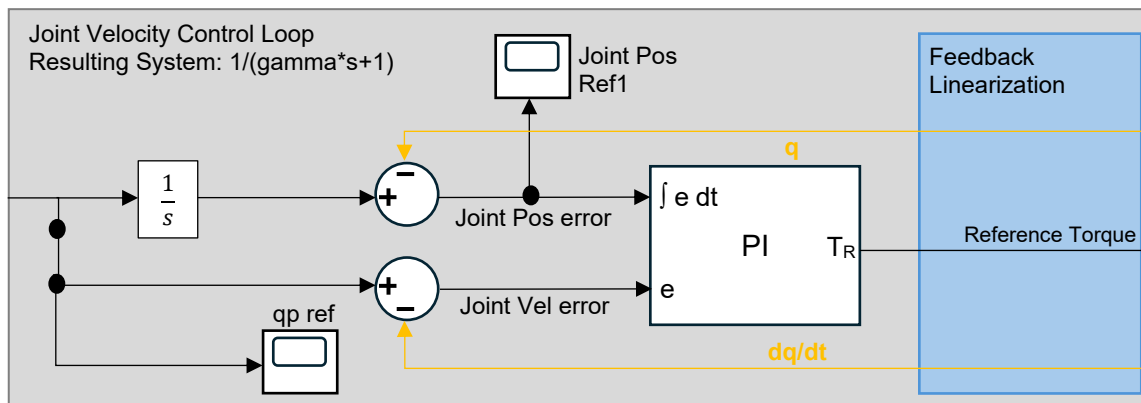


Figura 3.6 – Controlo da velocidade das juntas do robô do modelo inicial no Simulink.

Existe também um controlador de posição cartesiano (designado por “*Cartesian Position Control Loop*”), cuja função é converter as coordenadas cartesianas da trajetória fornecida, para o espaço de junta (Figura 3.7). Neste modelo inicial e como exemplo de funcionamento, a trajetória definida criava um movimento em espiral.

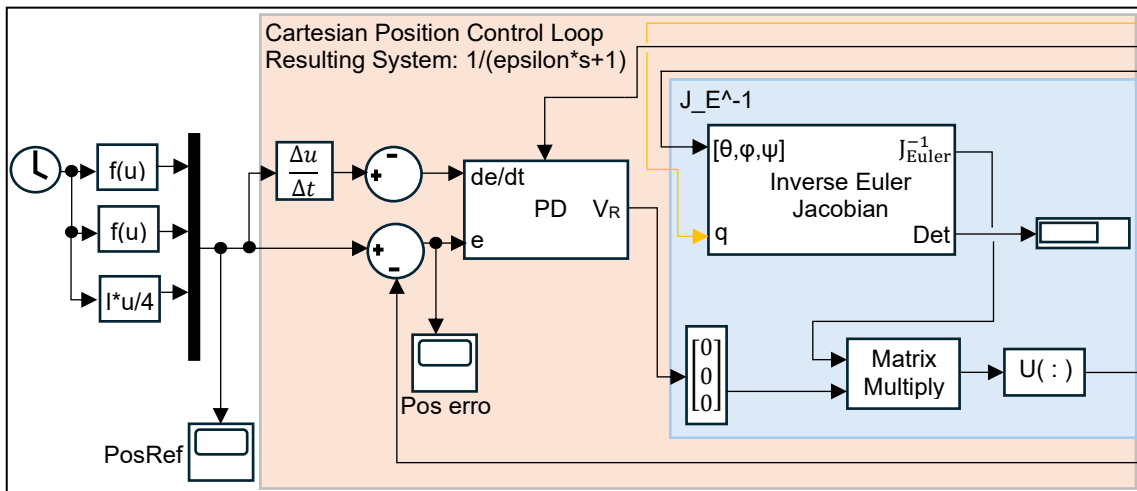


Figura 3.7 – Definição da trajetória do robô e controle da posição das juntas do modelo inicial no Simulink.

Quando se executa o programa, é aberta uma janela que apresenta uma representação visual do robô no espaço de trabalho, mostrando-o a realizar a trajetória simulada (Figura 3.8).

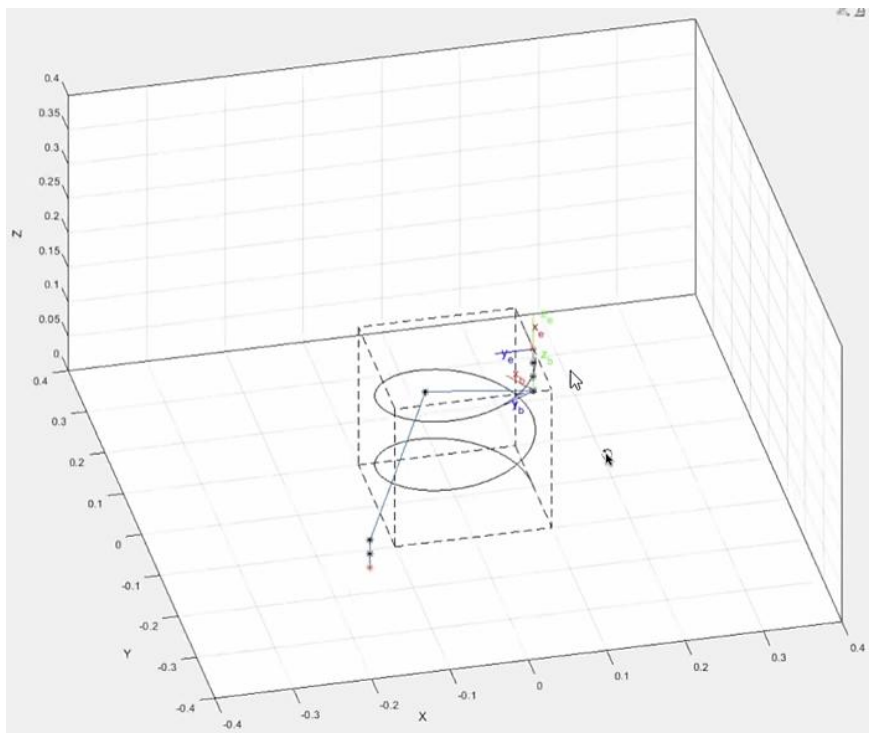


Figura 3.8 – Representação da estrutura e movimento do robô no espaço de trabalho, gerada pelo modelo inicial no Simulink.

Entre os dados fornecidos pelo modelo, um dos parâmetros mais relevantes para o projeto é o binário aplicado pelos motores nas juntas, identificado no diagrama de blocos como "*Motor Torque*". Estes valores são fundamentais para a seleção e dimensionamento correto dos motores, assegurando que o robô é capaz de cumprir os requisitos de funcionamento.

3.2.3 Alteração da trajetória do robô

A trajetória inicialmente definida criava um movimento em espiral, no entanto este movimento não corresponde a uma trajetória realista de uma impressora 3D. Sendo assim, foi necessário alterar a trajetória para uma que representasse melhor o processo de deposição de material. O objetivo era fazer o braço robótico passar por movimentos com ângulos retos, curvas apertadas, avanços e recuos, por forma a testar os motores das juntas nos diferentes tipos de movimentação a que estarão sujeitos.

Para tal, foi criado um modelo de um cubo com as dimensões 20x20x20 mm, com recurso ao SOLIDWORKS. Este modelo foi exportado (no formato .stl) e importado no programa CURA, um *software* de fatiamento de modelos 3D amplamente utilizado para prepará-los para impressão. Com recurso a este programa, o cubo foi convertido em camadas (processo de fatiamento) e gerado um ficheiro que continha todas as coordenadas e comandos do processo de impressão (também conhecido como código G). Na Figura 3.9a) é apresentado o modelo 3D do cubo com 20x20x20 mm modelado no SOLIDWORKS, e na Figura 3.9b) o mesmo modelo importado para o CURA.

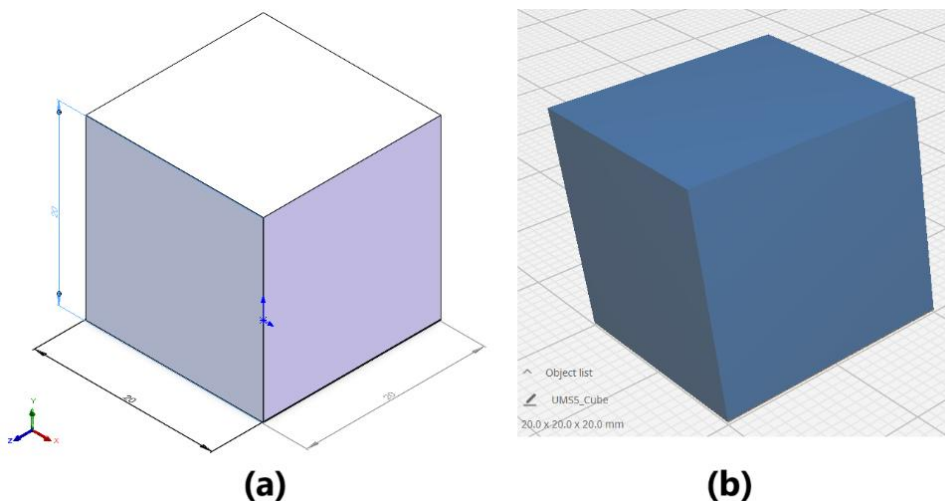


Figura 3.9 – (a) Modelo do cubo com dimensões 20x20x20 mm criado no SOLIDWORKS;
(b) modelo importando do SOLIDWORKS para o CURA.

Foram definidas condições de impressão com base nos requisitos do projeto e com o que tipicamente é utilizado em outras impressoras 3D. As propriedades do processo definido são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades da impressão do cubo no CURA.

| Configuração | Seleção |
|---------------------------|--------------------|
| Impressora | UltiMaker SS |
| Material de impressão | PLA azul AA 0.4 |
| Perfil | Fast - Engineering |
| Altura da camada | 0,2 mm |
| Densidade do Enchimento | 100% |
| Padrão do Enchimento | Zig Zag |
| Temperatura de Impressão | 205 °C |
| Temperatura da Plataforma | 60 °C |
| Velocidade de Impressão | 50 mm/s |

Procedeu-se então ao fatiamento do cubo, com o objetivo de se exportar o código G. Na Figura 3.10 é apresentada uma imagem do cubo fatiado, bem como o tempo que levaria a imprimir com base nas propriedades definidas, e a massa do componente.

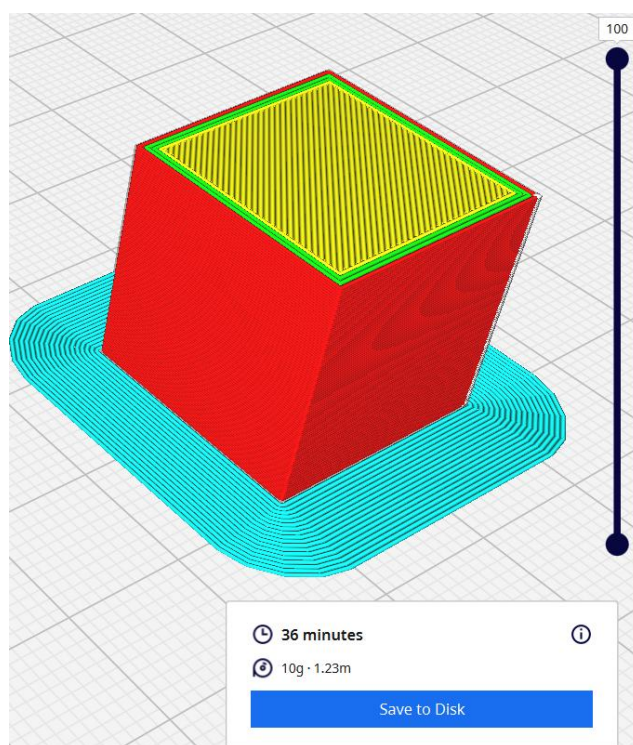


Figura 3.10 – Fatiamento do cubo no CURA.

Na Figura 3.11 surge uma parte do código G exportado a partir do modelo no CURA.

```

;START_OF_HEADER
;HEADER_VERSION:0.1
;FLAVOR:Griffin
;GENERATOR.NAME:Cura_SteamEngine
;GENERATOR.VERSION:5.6.0
;GENERATOR.BUILD_DATE:2023-11-28
;TARGET_MACHINE.NAME:Ultimaker S5
;EXTRUDER_TRAIN.0.INITIAL_TEMPERATURE:205
;EXTRUDER_TRAIN.0.MATERIAL.VOLUME_USED:4055
;EXTRUDER_TRAIN.0.MATERIAL.GUID:44a029e6-e31b-4c9e-a12f-9282e29a92ff
;EXTRUDER_TRAIN.0.NOZZLE.DIAMETER:0.4
;EXTRUDER_TRAIN.0.NOZZLE.NAME:AA 0.4
;BUILD_PLATE.INITIAL_TEMPERATURE:60
;BUILD_VOLUME.TEMPERATURE:28
;PRINT.TIME:1184
;PRINT.GROUPS:1
;PRINT.SIZE.MIN.X:147.93
;PRINT.SIZE.MIN.Y:102.93
;PRINT.SIZE.MIN.Z:0.2
;PRINT.SIZE.MAX.X:182.07
;PRINT.SIZE.MAX.Y:137.07
;PRINT.SIZE.MAX.Z:20
;SLICE_UUID:87cafdbb-b39b-4868-805c-917ce08cc2f8
;END_OF_HEADER
;Generated with Cura_SteamEngine 5.6.0
T0
M82 ;absolute extrusion mode

G92 E0
M190 S60
M109 S205
G280 S1
G0 Z20.001
G1 F2700 E-6.5
;LAYER_COUNT:100
;LAYER:0
M106 S255
M204 S1500
M205 X30 Y30
G1 F600 Z2.2
G0 F9000 X181.476 Y133.052 Z2.2
;TYPE:SKIRT
G1 F600 Z0.2
G1 F2700 E0

```

Figura 3.11 – Porção código G do cubo com 20x20x20 mm exportado do CURA.

Posteriormente, este código foi processado e adaptado para que se utilizasse apenas a trajetória definida por uma camada no MATLAB. Neste processo foi primeiramente realizada a extração das coordenadas do código G, seguidas de interpolações lineares, que permitiram uma transição mais suave entre os pontos da trajetória. Em seguida analisaram-se os efeitos da extrusão, considerando os comandos G0 (movimentos sem extrusão) e G1 (movimentos com extrusão). Foram ainda realizados outros processos adicionais para que a trajetória fosse aplicada corretamente no MATLAB. Este procedimento foi baseado e adaptado de (Gil, 2020).

Após a implementação da nova trajetória, o programa foi executado para validar o movimento do robô. A simulação permitiu visualizar a trajetória dentro do volume de trabalho, tal como surge na Figura 3.12a). Já na Figura 3.12b) surge a movimentação da extremidade do robô segundo os eixos x e y, bem como a posição da mesma ao longo do tempo.

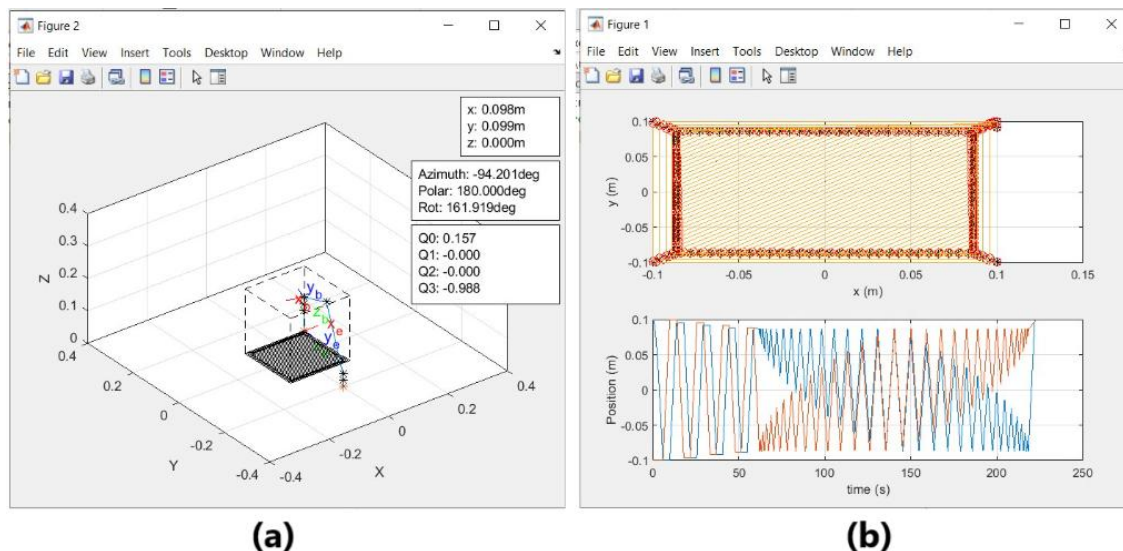


Figura 3.12 – a) Trajetória do robô implementada no MATLAB; b) movimentação da extremidade do robô segundo os eixos x e y, bem como a posição da mesma ao longo do tempo.

3.2.4 Seleção da extrusora

Para se selecionar a extrusora a utilizar no projeto, foi necessário considerar os pressupostos definidos, nomeadamente a precisão de 0,05 mm estabelecida. Este valor de precisão corresponde também à flexão admissível do braço robótico, pelo que características como o peso e dimensões da extrusora são fundamentais para a sua seleção.

Inicialmente, foram realizados estudos estáticos no SOLIDWORKS *Simulation* para avaliar o desempenho estrutural de diferentes configurações utilizando calhas com perfis de 20x20 mm e 40x40 mm, com o objetivo de determinar o peso máximo suportado por cada uma dessas configurações sem exceder a flexão admissível.

Os resultados mostraram que as calhas de 20x20 mm apresentavam uma margem de segurança muito reduzida, o que poderia comprometer a precisão do sistema. Por outro lado, as calhas de 40x40 mm demonstraram uma capacidade estrutural significativamente superior, tornando-se a opção mais viável para o projeto.

As três configurações testadas surgem na Figura 3.13. A Figura 3.13a) apresenta a estrutura numa posição totalmente horizontal, que embora irrealista para o funcionamento do braço robótico, corresponde ao pior cenário possível. Já as Figura 3.13b) e Figura 3.13c) apresentam configurações em que o ponto mais distante da

estrutura está, respetivamente, na base e no vértice mais afastado do volume de impressão. Todas as configurações foram modeladas através da opção “*Structural Member*”, que consiste na extrusão de um perfil selecionado (neste caso um perfil 40x40 mm e retirado dos catálogos oficiais do site da empresa *Rexroth*) ao longo de um *sketch* (para mais informações acerca do perfil utilizado, consultar o Anexo A).

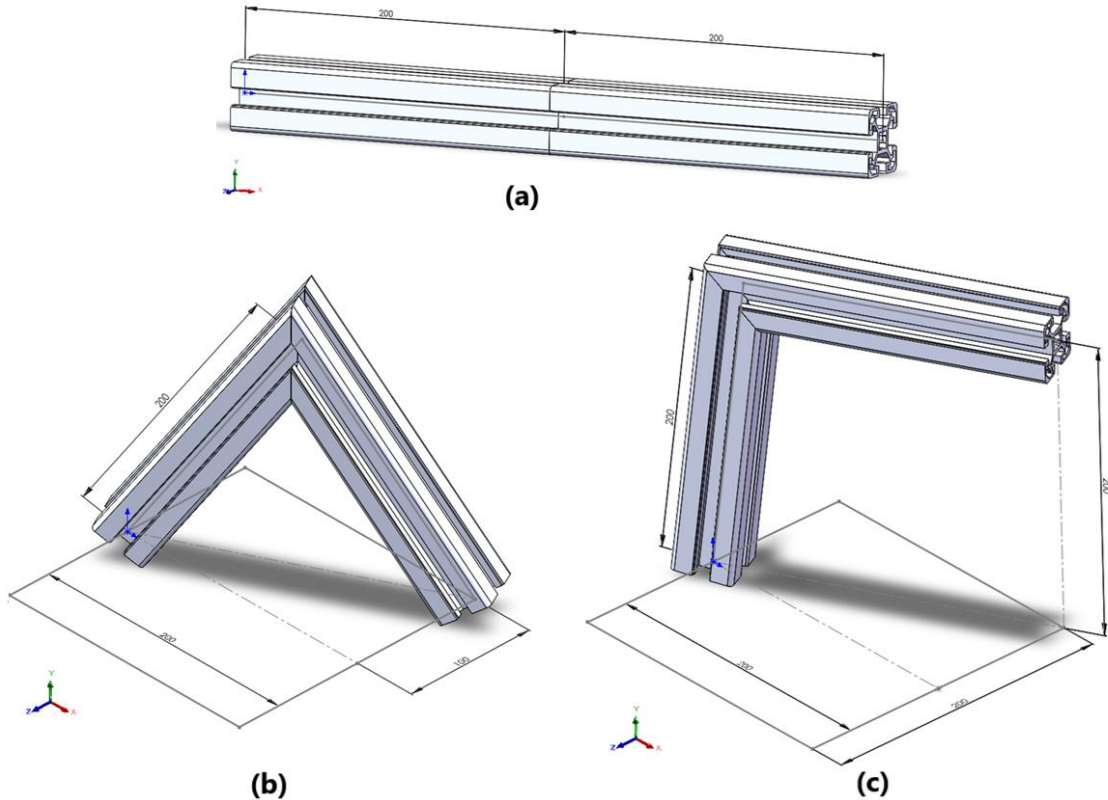


Figura 3.13 – Três configurações estruturais testadas no SOLIDWORKS *Simulation*: a) Pior posição irrealista; b) pior posição com a ponta na base do volume de impressão; c) pior posição com a ponta no vértice mais afastado do volume de impressão.

Relativamente aos estudos estáticos realizados, foram utilizados elementos do tipo viga e utilizada a liga de alumínio EN AW 6060 para as calhas, visto ser o material com que são feitas as mesmas (propriedades deste material no Anexo B). As propriedades deste material surgem na Tabela 3.2, tendo sido importadas para o SOLIDWORKS.

Tabela 3.2 – Propriedades da liga de alumínio EN AW 6060 utilizada nas calhas.

| Propriedade | Valor |
|-------------------------|------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 70 GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,34 |
| Módulo de Corte | 26,12 GPa |
| Densidade | 2700 kg/m ³ |
| Resistência à tração | 245 MPa |
| Tensão de Cedência | 195 MPa |

No que toca aos constrangimentos aplicados, tanto no nó da base, como no nó que une ambas as calhas, restringiu-se o movimento de translação em x, y e z, e apenas não se limitou a rotação em torno do eixo x (tal como indicado pelas setas a verde na Figura 3.14). Relativamente às cargas aplicadas, foi apenas colocada uma força pontual no nó da ponta da estrutura, que variou entre 1 N e 100 N (seta roxa na Figura 3.14). Estes constrangimentos e a carga reproduzem, de forma muito simplificada, o que ocorrerá na estrutura.

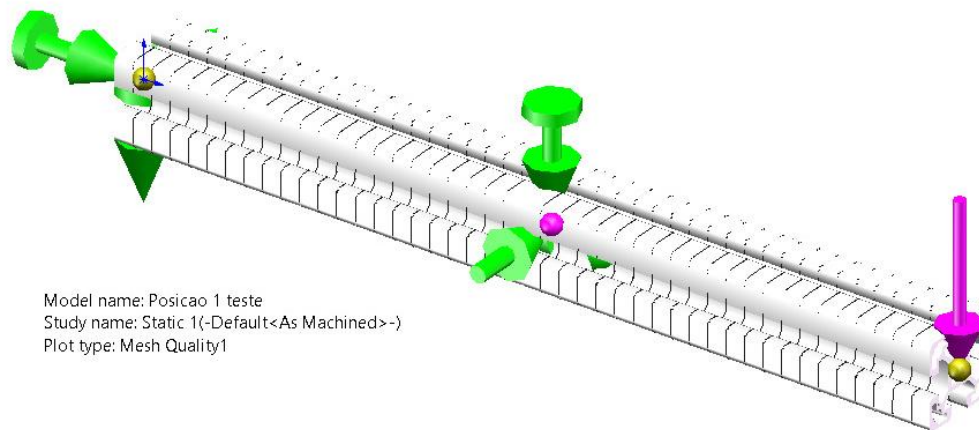


Figura 3.14 – Estudo estático para a pior posição irrealista.

Após a simulação, analisou-se a deformada máxima, verificando-se sempre, com base nos gráficos de tensão resultante, que a estrutura operava abaixo do limite de cedência, garantindo que não ocorria falha mecânica.. Na Figura 3.15 é apresentado o gráfico de cores da deformação resultante (em mm), depois de aplicada uma carga de 100 N na ponta da estrutura.

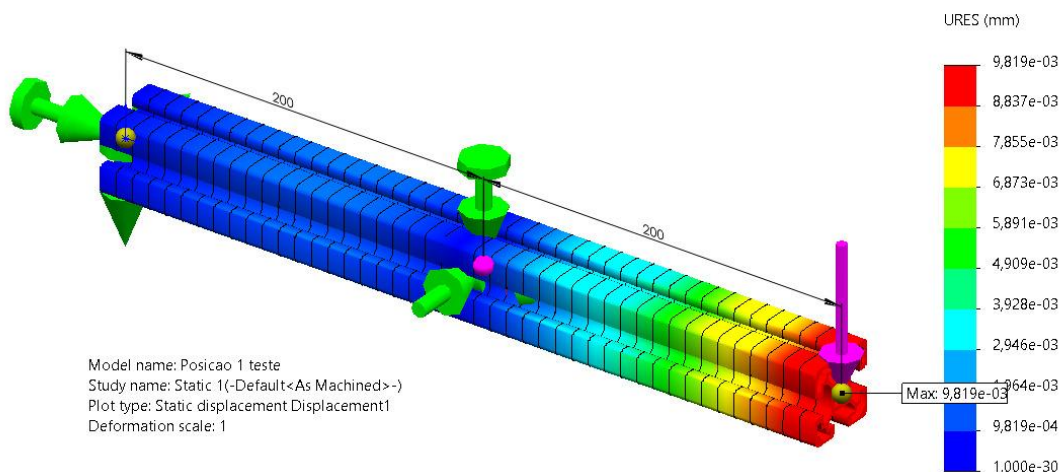


Figura 3.15 – Resultado da simulação estática realizada à estrutura, na pior posição irrealista, e com uma carga de 100 N.

Foram recolhidos valores de deformação resultante máxima para cargas aplicadas entre 1 N e 100 N, e para as três configurações anteriormente apresentadas. Com base nos

dados recolhidos, foi verificado o valor de carga máxima admissível para cada configuração, para que se não se ultrapassasse a flexão máxima admissível definida. Foi realizado um gráfico da evolução linear do valor da deformada resultante (em mm) em função da carga aplicada para as três configurações, que surge na Figura 3.16.

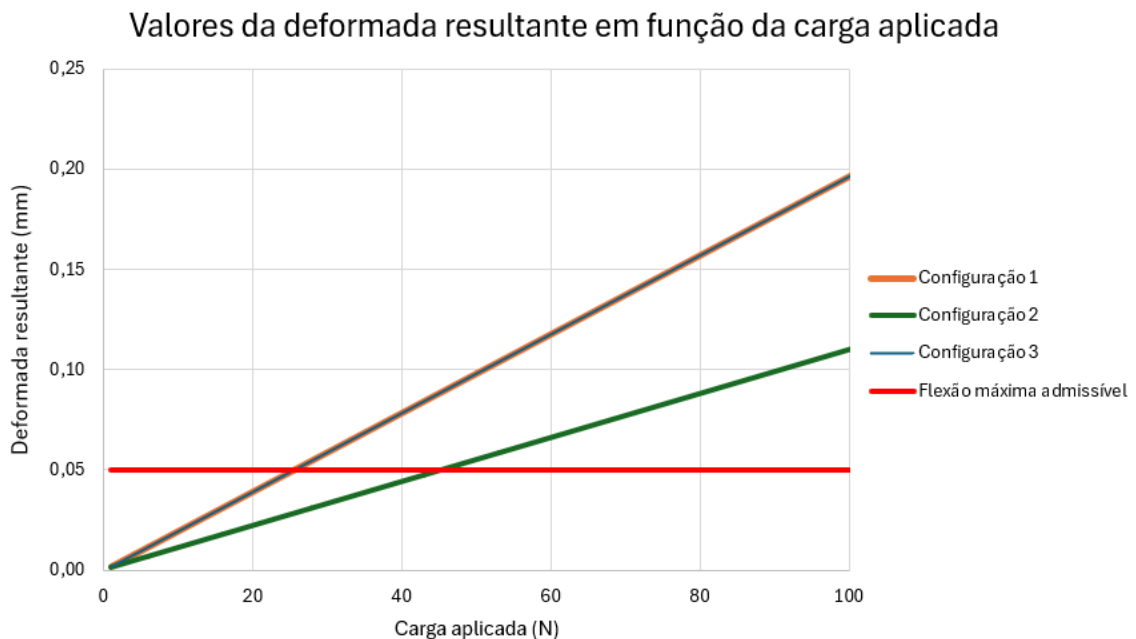


Figura 3.16 – Valores da deformada resultante em função da carga aplicada para as três configurações.

Através da leitura dos dados recolhidos, percebeu-se que a deformada resultante é praticamente igual tanto para a configuração 1 como para a configuração 3, e consideravelmente mais baixa para a configuração 2 (sendo esta última a configuração mais realista e a que vai ser utilizada em maior parte do processo de impressão). Para as configurações 1 e 3, para que não se ultrapasse o valor de flexão máxima admissível, o valor carga não deve ser superior a 25 N, ou seja, aproximadamente 2,5 kg. Já para a configuração 2, a carga não deverá exceder 45 N, isto é, aproximadamente 4,5 kg. É preciso ressaltar que todos os valores listados têm um coeficiente de segurança igual a 2, para que se tenha em conta outros aspetos não considerados na simulação simplificada que se realizou.

Com base nesses resultados, iniciou-se a pesquisa de mercado para identificar extrusoras que pudessem ser suportadas pela estrutura sem ultrapassar o limite de flexão estabelecido. Foram pré-selecionadas três extrusoras, analisadas segundo critérios como peso, dimensões e custo: *E3D Hemera*, *BIQU H2 V2S Revo* e *Bondtech QR*. Qualquer uma destas extrusoras analisadas utilizam um motor *stepper*, são compatíveis com filamentos de $1,75 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ e permitem a impressão de PLA. Na Tabela 3.3 surgem as características das três extrusoras, recolhidas dos catálogos dos fornecedores.

Tabela 3.3 – Características das três extrusoras pré-selecionadas.

| Extrusora | Massa (kg) | Dimensões (mm) | Preço (€) |
|-------------------------|------------|--------------------|-----------|
| <i>E3D Hemera</i> | 0,388 | 77 x 44 x 83 | 123,55 |
| <i>BIQU H2 V2S Revo</i> | 0,198 | 75,8 x 38,4 x 74,2 | 95,27 |
| <i>Bondtech QR</i> | 0,475 | 96 x 68 x 59 | 190,65 |

Com base nestes dados, e nos objetivos do projeto, selecionou-se a extrusora *BIQU H2 V2S Revo*. Das opções consideradas, esta extrusora é consideravelmente mais leve, mais barata e também é a mais compacta. Aplicando uma carga pontual igual ao peso desta extrusora (aproximadamente 1,94 N), obtiveram-se valores de deformada resultante para as três configurações, tal como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valor da deformada resultante para as três configurações, aplicando o peso da extrusora selecionada.

| Configurações | Deformada resultante (mm) |
|---------------|---------------------------|
| Posição 1 | $3,81 \times 10^{-3}$ |
| Posição 2 | $2,13 \times 10^{-3}$ |
| Posição 3 | $3,81 \times 10^{-3}$ |

Como é possível perceber pelos resultados obtidos, seja para as posições menos realistas, seja para a posição mais comum, o valor da deformada resultante é consideravelmente inferior. Apesar da simplicidade da simulação, pode perceber-se que a implementação da extrusora selecionada não iria criar problemas no que toca à resistência mecânica do braço robótico.

3.2.5 Primeira iteração do modelo Simulink/MATLAB

Na primeira iteração do modelo Simulink/MATLAB, foram feitas alterações com base na escolha das calhas de alumínio extrudido 40x40 mm como elementos estruturais do braço, bem como na seleção da extrusora.

Inicialmente o modelo estava estruturado para que os módulos fossem tubos, no entanto com a seleção das calhas o código foi adaptado. Primeiramente foram recolhidas as propriedades da secção das calhas, nomeadamente a área e a matriz do momento de inércia da secção. Estes dados foram recolhidos através do modelo 3D no SOLIDWORKS, tal como surge na Figura 3.17 (para mais informações acerca das calhas selecionadas, consultar o Anexo A.)

Propriedades da secção da calha de 40x40 mm:

Área:

$$A = 555,27 \text{ mm}^2$$

Segundos momentos de área:

$$I_x = 89367,4 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 89367,4 \text{ mm}^4$$

Massa:

$$m = 1,5 \text{ kg/m}$$

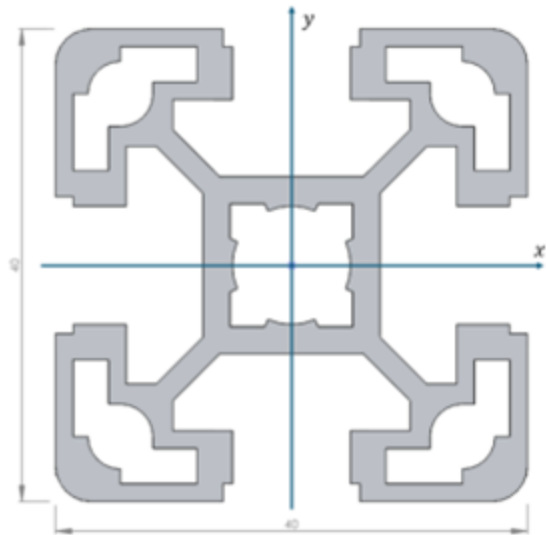


Figura 3.17 – Propriedades da secção das calhas selecionadas, recolhidas do SOLIDWORKS.

Tendo em conta que o código está formatado para que sejam calculados de forma automática os centros de massa, as massas e inércias dos módulos, eram apenas necessários recolher esses dados relativos às calhas.

Relativamente à extrusora, como se trata de um sistema não simétrico, foi necessário recolher mais dados. Tal como aconteceu para as calhas selecionadas, para a extrusora foi descarregado um modelo 3D, da base de dados de *Printables*. Este modelo contém as medidas exatas da extrusora, conforme o catálogo da mesma (para consultar o catálogo da extrusora selecionada, verificar o Anexo C). Na Figura 3.18a) é apresentada uma imagem da extrusora *BIQU H2 V2S Revo*, e na Figura 3.18b) uma imagem do modelo 3D utilizado.

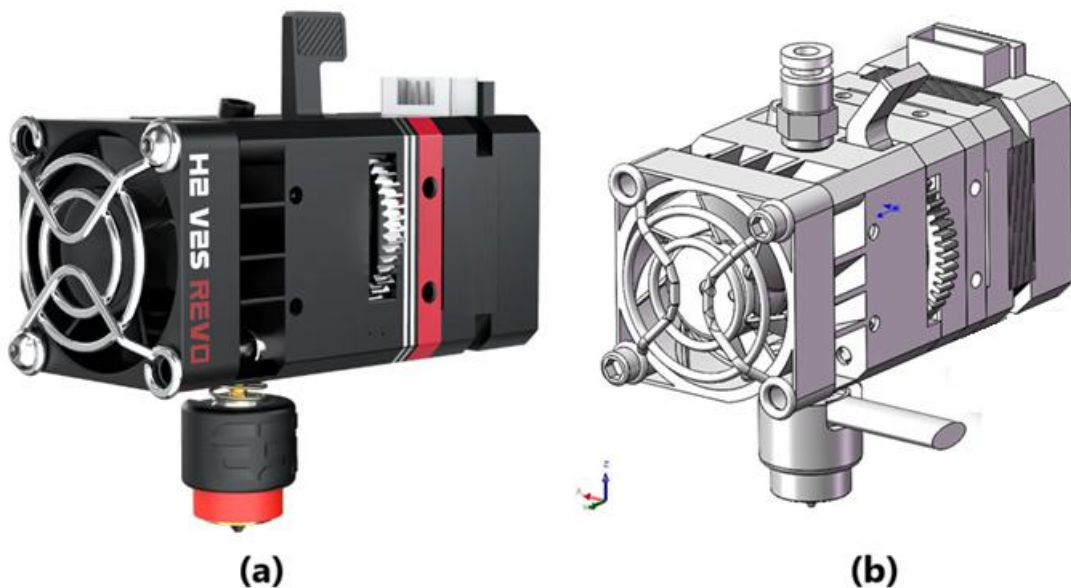


Figura 3.18 – a) Imagem real da extrusora *BIQU H2 V2S Revo* (BIQU Equipment, n.d.); e b) o modelo 3D utilizado.

Já no SOLIDWORKS, a massa do modelo foi substituída manualmente para o valor indicado pelo fabricante e foram recolhidos os momentos de inércia no centro de massa e a distância entre os extremos da extrusora (que servirão para indicar no Simulink qual o tamanho do último módulo do robô). Na Tabela 3.5 surgem os dados que foram recolhidos do modelo da extrusora.

Tabela 3.5 – Dados recolhidos do modelo da extrusora selecionada.

| Propriedade | Valor |
|--|---|
| Massa | 198 g |
| Volume | 35605 mm ³ |
| Centro de massa | X=-0,43 mm Y=17,66 mm Z=-2,49 |
| Principais eixos de inércia tirados no centro de massa | Ix= {0,00; 0,99; -0,15} Iy= {0,06; 0,15; 0,99} Iz= {1,00; -0,01; -0,06} |
| Principais momentos de inércia tirados no centro de massa | Px=54632,88 g·mm ² Py=89115,29 g·mm ² Pz=107414,42 g·mm ² |
| Momentos de inércia no centro de massa e alinhados com o sistema de coordenadas (g·mm ²) | Ixx=107345,80 Ixy=389,11 Ixz=1064,92 Iyx=389,11 Iyy=55373,15 Iyz=-4999,48 Izx=1064,92 Izy=-4999,48 Izz=88443,63 |

Estes dados foram registados num ficheiro de texto para que depois, através de adaptação do código MATLAB, se pudessem importar de forma mais simples. Na Figura 3.19 surge uma imagem dos dados recolhidos para o ficheiro de texto.

```

Área da secção da calha:
A 555.2e-6

Matriz do segundo momento de área da secção:
IIyy(1,1) 89367.64e-12
IIzz(2,2) 89367.64e-12
Ixx(3,3) 178735.29e-12

Matriz Inércia Extrusora:
Iextr(1,1) 107345.8e-9
Iextr(1,2) 389.11e-9
Iextr(1,3) 1064.92e-9
Iextr(2,1) 389.11e-9
Iextr(2,2) 55373.15e-9
Iextr(2,3) -4999.48e-9
Iextr(3,1) 1064.92e-9
Iextr(3,2) -4999.48e-9
Iextr(3,3) 88443.63e-9

Massa extrusora:
m67 0.198

```

Figura 3.19 – Dados da extrusora e das calhas recolhidos para o ficheiro de texto.

As entradas das matrizes surgem numa ordem distinta do SOLIDWORKS, uma vez que o sistema de eixos não está orientado da mesma forma.

Posto isto, foi criado um código secundário responsável por importar os dados da matriz de momentos de inércia da extrusora que foram colocados no ficheiro de texto (Figura 3.20).

```
function matriz_inercia_extrusora = ExtruderInertiaMatrix()
    % Abre o arquivo de texto para leitura
    fid = fopen('DadosGeometricosMassicos.txt', 'r');

    % Inicializa a matriz de inércia da extrusora
    matriz_inercia_extrusora = zeros(3);

    % Lê as linhas do arquivo de texto
    while ~feof(fid)
        linha = fgetl(fid);
        if startsWith(linha, 'Iextr')
            % Usa expressão regular para encontrar os índices na linha
            indices = regexp(linha, '\\((\\d+),(\\d+)\\)', 'tokens');

            % Se houver correspondência na expressão regular
            if ~isempty(indices)
                % Extrai os índices da matriz de inércia da extrusora
                indice1 = str2double(indices{1}{1});
                indice2 = str2double(indices{1}{2});

                % Divide a linha em partes
                partes = strsplit(linha);

                % Extrai os valores numéricos das partes
                valores = str2double(partes{end});

                % Atribui o valor à matriz de inércia da extrusora
                matriz_inercia_extrusora(indice1, indice2) = valores;
            end
        end
    end

    % Fecha o arquivo
    fclose(fid);
end
```

Figura 3.20 – Código de importação e criação das matrizes de inércia da extrusora.

Já no ficheiro principal (*InitPosCtrl*) foi realizada a adaptação do código por forma a implementarem-se as mudanças realizadas no modelo, em particular a substituição dos tubos por calhas, e a implementação da extrusora no último módulo do robô. Na Figura 3.21 e Figura 3.22 são apresentadas as modificações realizadas ao código. Na Figura 3.21 surge a importação da área da secção da calha a partir do ficheiro de texto, e a alteração do comprimento do último módulo do robô, correspondente à altura da extrusora.

```

%% Section area (m2)
% Abre o arquivo de texto para leitura
fid = fopen('DadosGeometricosMassicos.txt', 'r');

% Inicializa uma variável para armazenar a área
area = 0;

% Lê as linhas do arquivo de texto
while ~feof(fid)
    linha = fgetl(fid);
    if startsWith(linha, 'A')
        partes = strsplit(linha);
        area = str2double(partes{2});
        break;
    end
end

%% Link Lengths (m)
%% Base ao primeiro nó
l01 = 0.1*1;

%% Primeira nó à primeira junta
l12 = 0.1*1;
%% Primeira junta à segunda junta (primeiro braço)
l23 = 1*1;
%% Segunda junta à terceira junta (segundo braço)
l34 = 1*1;
%% Terceira junta à quarta junta (punho)
l45 = 0.1*1;
%% Quarta junta à quinta junta (punho)
l56 = 0.1*1;
%% Última junta ao ponto mais extremo do robô (ponto de extrusão)
l67 = 7.4e-3; % Introduzir diretamente a altura da extrusora (distância vertical)

```

Figura 3.21 – Importação da área da secção da calha para o ficheiro Simulink, e alteração do comprimento do último módulo do robô, correspondente à altura da extrusora.

Na Figura 3.22 e Figura 3.23 são calculadas as massas e as inércias dos troços e é importada a massa e a matriz de inércia da extrusora.

```

%% Link Masses and Inertias (kg)
%% Massas das ligações/módulos (calha, braço, junta)
m01 = area*l01*rho;
m12 = area*l12*rho;
m23 = area*l23*rho;
m34 = area*l34*rho;
m45 = area*l45*rho;
m56 = area*l56*rho;
%% Massa da extrusora
% Inicializa uma variável para armazenar a massa da extrusora
m67 = 0;

% Lê as linhas do arquivo de texto
while ~feof(fid)
    linha = fgetl(fid);
    if startsWith(linha, 'm67')
        partes = strsplit(linha);
        m67 = str2double(partes{2});
        break;
    end
end

```

Figura 3.22 – Cálculo das massas dos troços e importação da massa da extrusora, para o ficheiro Simulink.

```

%% Inércia das ligações/módulos (calha, braço, junta)
modulos_list = {'modulo01', 'modulo12', 'modulo023', 'modulo34', 'modulo45',
'modulo56'};

% Geração das variáveis desejadas
I01 = ModulesInertia(modulos_list{1}, 101, rho);
I12 = ModulesInertia(modulos_list{2}, 112, rho);
I23 = ModulesInertia(modulos_list{3}, 123, rho);
I34 = ModulesInertia(modulos_list{4}, 134, rho);
I45 = ModulesInertia(modulos_list{5}, 145, rho);
I56 = ModulesInertia(modulos_list{6}, 156, rho);
%% Inércia da extrusora
I67 = ExtruderInertiaMatrix();

```

Figura 3.23 – Cálculo das matrizes de inércia dos troços e importação da matriz de inércia da extrusora, para o ficheiro Simulink.

Com estas alterações implementadas, executou-se o programa com o objetivo de se verificar qual a potência e o binário necessário do motor da junta principal (junta 3). Será por esta junta que se iniciará o projeto. Consultando-se os gráficos da potência (Figura 3.24) e do binário (Figura 3.25) dos motores das juntas, foi possível perceber quais os valores de necessários para que as juntas cumprissem as condições de funcionamento.

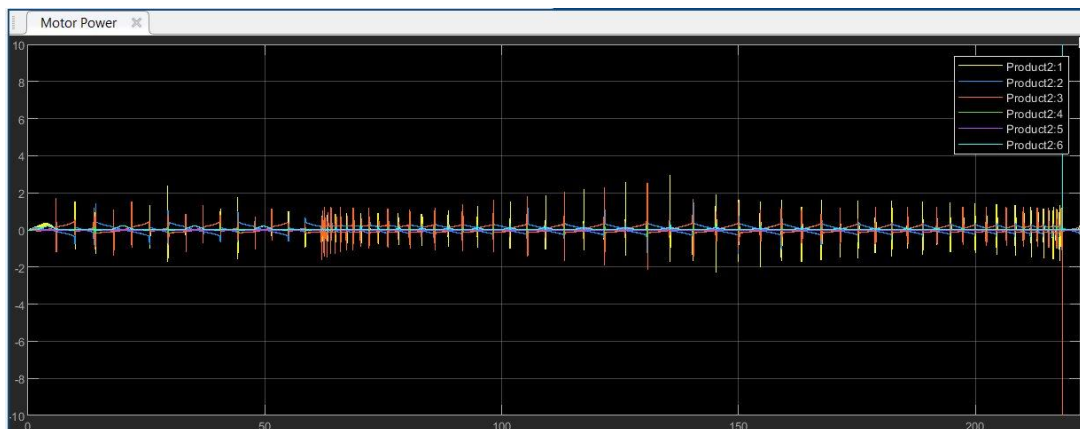


Figura 3.24 – Potência a debitar pelos motores das juntas após a primeira iteração do modelo Simulink/MATLAB.

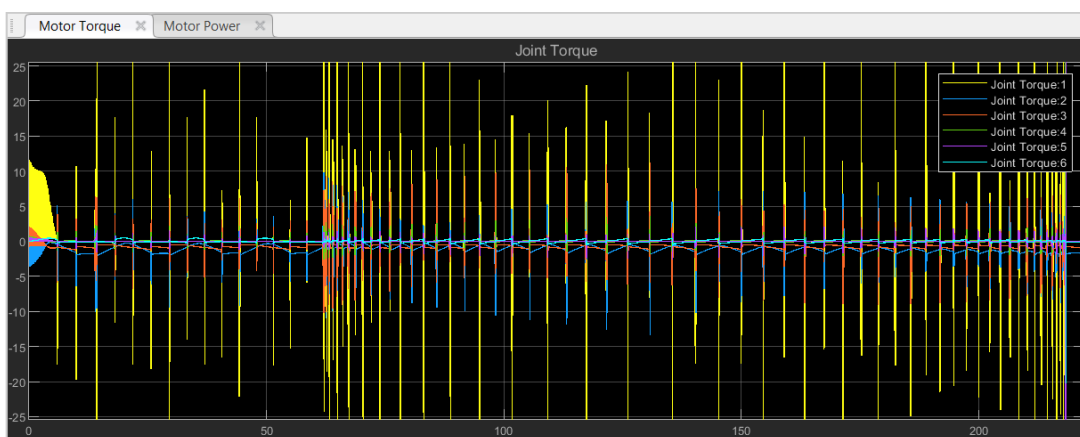


Figura 3.25 – Binário necessário dos motores das juntas após a primeira iteração do modelo Simulink/MATLAB.

Os picos apresentados em ambos os gráficos correspondem a erros de trajetória não resolvidos, que geram saltos durante as mudanças de direção do robô.

Através de uma análise detalhada dos gráficos, verificou-se que os valores extremos da potência dos motores não ultrapassavam 3 W (contabilizando os picos, permitindo uma abordagem mais conservadora e segura) e o binário não era superior a 5 N·m.

3.3 Projeto da junta principal do braço robótico (junta 3)

3.3.1 Seleção e projeto de componentes

Tal como mencionado no subcapítulo 3.1.7, as juntas devem ter um conjunto de componentes para que o sistema funcione de forma adequada. Dentro dos componentes listados como necessários para o projeto das juntas, o primeiro a ser selecionado é o motor. Com base nos valores da potência e binário necessários para os motores das juntas, procedeu-se à seleção e projeto dos componentes para a junta principal do braço robótico (junta 3).

De uma forma geral, o conjunto do motor e caixa de velocidades iriam necessitar de um binário de 5 N·m para que cumprissem os requisitos de funcionamento (e com uma margem de segurança). Sendo assim, o primeiro passo para o projeto da junta foi selecionar um motor adequado.

Consultou-se o *website* dos fornecedores de motores STEPPERONLINE, e analisaram-se as opções de motores stepper de anel fechado. Para além de um motor que fosse capaz de cumprir os requisitos de funcionamento, também era importante selecionar um que fosse compacto por forma a não ocupar demasiado espaço na junta, e que não fosse demasiado dispendioso.

Com base nestes critérios, selecionou-se o motor NEMA 17, modelo 17HS08-1004-ME1K. Na Figura 3.26 é apresentada uma imagem do motor.



Figura 3.26 – Motor NEMA 17, modelo 17HS08-1004-ME1K (STEPPERONLINE, n.d.).

Este é o mais compacto e mais leve dos motores NEMA 17, tendo uma massa de apenas 0,260 kg (para mais informações acerca do motor, consultar o Anexo D). Nos catálogos do fabricante era fornecida a curva de binário do motor, que surge na Figura 3.27.

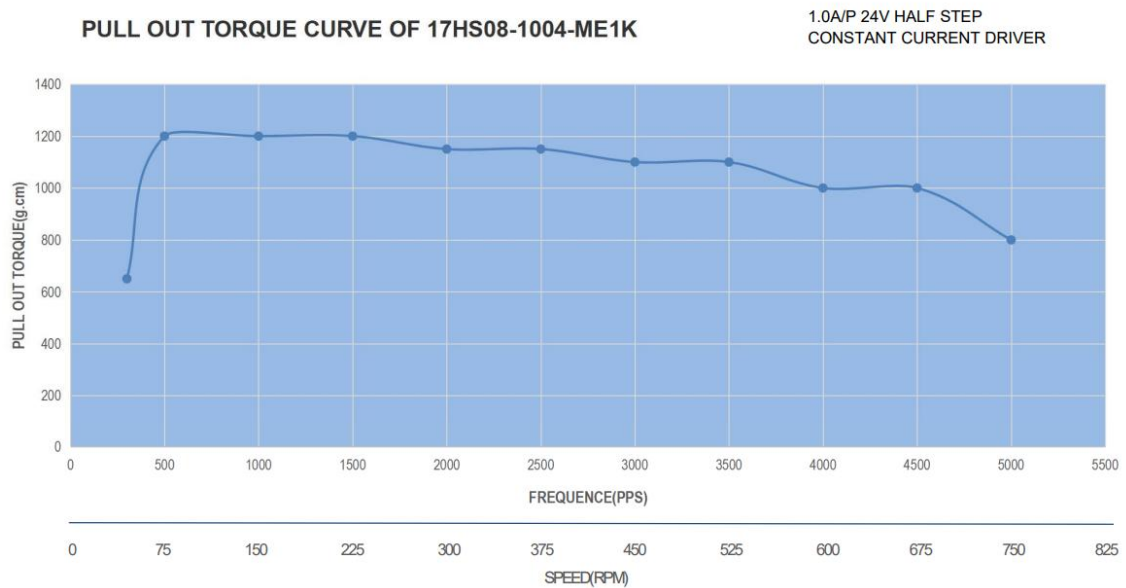


Figura 3.27 – Curva de binário do motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K (STEPPERONLINE, n.d.).

Convertendo os valores lidos em cada ponto do gráfico, foi possível construir a Tabela 3.6. Nesta tabela são apresentados os valores de binário (em N·m) e de potência (em W), em função da velocidade (em rpm).

Tabela 3.6 – Valores do binário (em N·m) e da potência (W) do motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K, em função da velocidade (em rpm).

| Ponto do gráfico | Velocidade (rpm) | Binário (N·m) | Potência (W) |
|------------------|------------------|-------------------------|--------------|
| Ponto 1 | 45 | $63,77 \times 10^{-3}$ | 0,3005 |
| Ponto 2 | 75 | $117,72 \times 10^{-3}$ | 0,9246 |
| Ponto 3 | 150 | $117,72 \times 10^{-3}$ | 1,8491 |
| Ponto 4 | 225 | $117,72 \times 10^{-3}$ | 2,7737 |
| Ponto 5 | 300 | $112,82 \times 10^{-3}$ | 3,5442 |
| Ponto 6 | 375 | $112,82 \times 10^{-3}$ | 4,4302 |
| Ponto 7 | 450 | $107,91 \times 10^{-3}$ | 5,0851 |
| Ponto 8 | 525 | $107,91 \times 10^{-3}$ | 5,9327 |
| Ponto 9 | 600 | $98,10 \times 10^{-3}$ | 6,1638 |
| Ponto 10 | 675 | $98,10 \times 10^{-3}$ | 6,9343 |
| Ponto 11 | 750 | $78,48 \times 10^{-3}$ | 6,1638 |

Olhando aos valores de binário, percebe-se que para um regime de funcionamento em torno dos 300 a 500 rpm, os valores de binário máximo do motor selecionado andam

em torno de 0,11 N·m. Para que se alcancem os 5 N·m indicados pelo programa do Simulink/MATLAB, é necessário aumentar o binário fornecido.

Para isto, foi selecionada uma caixa de velocidades (adiante mencionada como CV) planetária compatível com o motor NEMA 17 definido e que fosse capaz de fornecer a relação de transmissão necessária. No *website* do mesmo fornecedor do motor selecionado, existe uma CV compatível com o motor e com uma relação de transmissão 50:1 (modelo MG17-G50), sendo assim capaz de fornecer os 5 N·m necessários (para mais informações acerca da CV, consultar o Anexo E). A CV planetária selecionada surge na Figura 3.28.



Figura 3.28 – Caixa de velocidades planetária com relação de transmissão 50:1, modelo MG17-G50 (STEPPERONLINE, n.d.).

Embora estes dois componentes sejam compatíveis, isto é, o veio de saída do motor tem o mesmo diâmetro que a zona de acoplamento de veio da CV, os comprimentos destas duas partes de cada componente não são iguais. A distância entre a ponta do veio de saída do motor e a sua face de encosto é de 20 mm (Figura 3.29a), enquanto a distância entre o fundo da zona de acoplamento e a face de encosto da caixa de velocidade é 10,8 mm (Figura 3.29b).

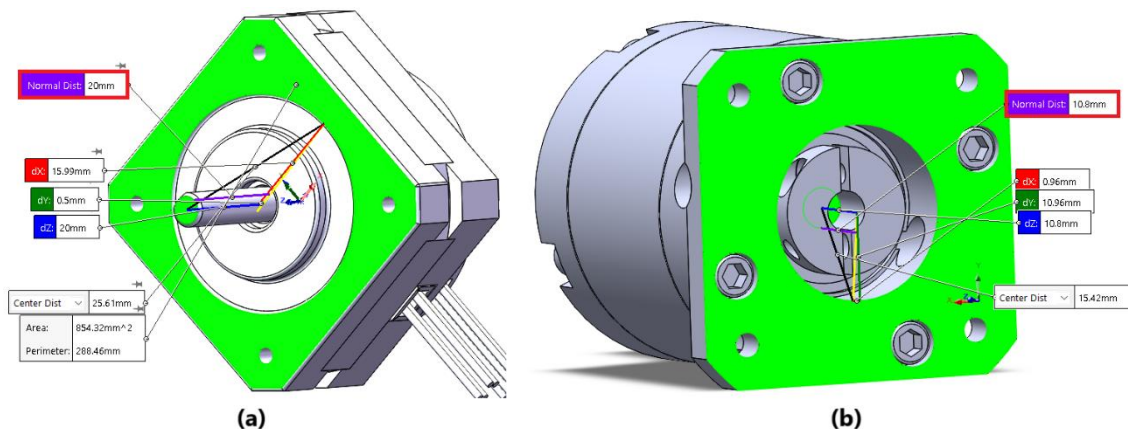


Figura 3.29 – a) Distância entre a ponta do veio de saída do motor 17HS08-1004-ME1K e a sua face de encosto; b) distância entre o fundo da zona de acoplamento e a face de encosto da caixa de velocidade.

Posto isto, optou-se pela colocação de espaçadores para que fosse possível fazer a conexão dos dois componentes de forma adequada. A distância que é necessária existir entre os dois componentes é de 9,2 mm, pelo que os espaçadores, em conjunto, deverão ter esta largura. O espaçador que estará em contacto com o motor é apresentado na Figura 3.30. A Figura 3.30a) trata-se da face que estará em contacto com o outro espaçador e a Figura 3.30b) corresponde à face que estará em contacto com o motor. Na Figura 3.31 surge o espaçador que estará acoplado à CV. A Figura 3.31a) trata-se da superfície que estará em contacto com a caixa de velocidade e a Figura 3.31b) corresponde à superfície que estará a contactar com o espaçador do motor.

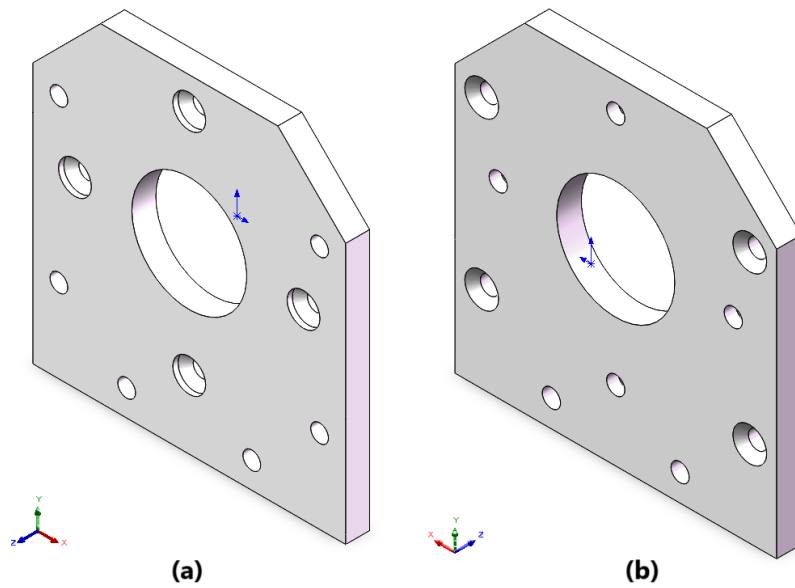


Figura 3.30 – Espaçador do motor: a) face que estará em contacto com o outro espaçador; b) face que estará em contacto com o motor.

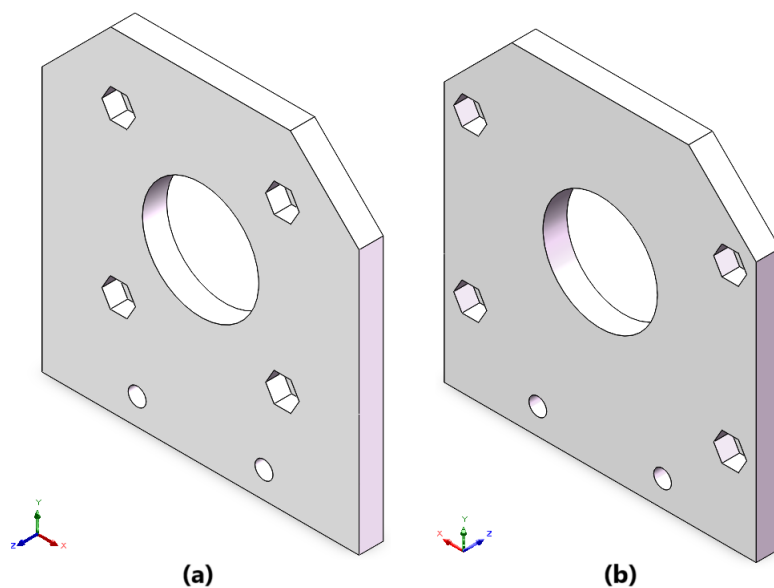


Figura 3.31 – Espaçador da caixa de velocidades: a) face que estará em contacto com a caixa de velocidades; b) face que estará em contacto com o outro espaçador.

Os dois espaçadores possuem furações para uma ligação aparafusada entre si e com um suporte inferior, que, por sua vez, estará fixado à base da junta. Este suporte surge apresentado na Figura 3.32.

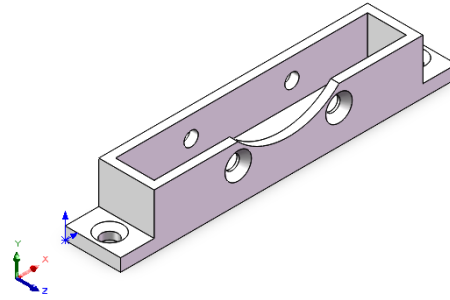


Figura 3.32 – Suporte dos espaçadores da junta 3.

Tanto os espaçadores como o suporte dos mesmos poderão ser fabricados em material impresso, como PLA ou ABS, visto que não estarão sujeitos a grandes esforços.

A calha de alumínio extrudido deverá ficar algures acima da CV, uma vez que é nesta zona do sistema que se espera que esteja o eixo do centro de massa da junta. Para que a calha esteja bem suportada, foram projetados dois suportes feitos de liga de alumínio que façam a ligação entre a calha e os componentes da junta propriamente dita. O objetivo seria que estes dois suportes estivessem a conectar componentes que rodavam de forma solidária com o veio de saída da CV e a calha, impondo assim rotação ao sistema. Na Figura 3.33 surge o suporte projetado e que, a par de outro suporte igual, estará aparafusado à calha. Como é possível visualizar, foram colocadas nervuras para uma melhor capacidade estrutural, bem como foi colocada uma saliência para maior facilidade de alinhamento entre suporte e calha e, conseqüentemente, maior facilidade de montagem.

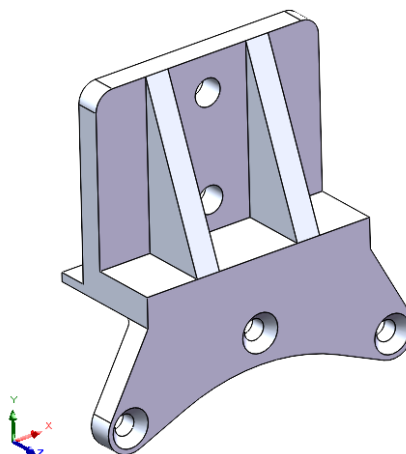


Figura 3.33 – Suporte da calha, responsável pela ligação entre a calha e os componentes rotativos da junta.

Como haverá dois suportes em cada lado da calha, foi necessário projetar um sistema conectado ao veio de saída da CV, capaz de sustentá-los enquanto transmite a rotação.

Primeiramente foi projetado o componente que faz a ligação direta entre o veio da CV e um dos suportes da calha. O componente deveria ter um escatel, uma vez que o veio também tem um escatel para colocação de uma chaveta de aço. A chaveta a colocar deverá ser a chaveta paralela A GB 1096-79 3x14. Para além disso, deveria ter uma zona em tubo com um diâmetro ligeiramente superior ao da carcaça da caixa de velocidades, para evitar desgastes. O componente projetado surge na Figura 3.34 (para facilidade de compreensão na leitura do documento, este componente será designado por “acoplador 1”). Como é possível perceber na imagem, também foram efetuadas remoções de material, para se reduzir ao máximo o peso.

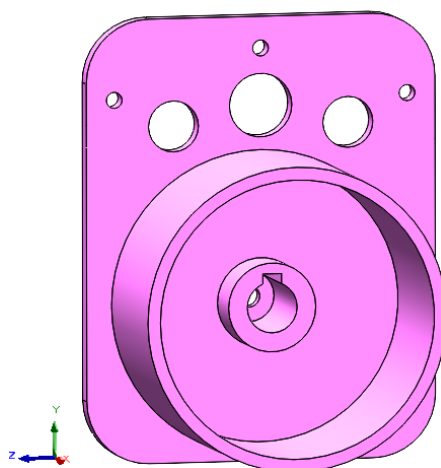


Figura 3.34 – Acoplador 1 da junta principal do robô (junta 3).

A este acoplador junta-se um semelhante e que esteja numa posição simétrica para se alinhar com o outro suporte da calha. Na Figura 3.35 surge o componente que estará aparafusado ao outro suporte da calha (para facilidade de compreensão na leitura do documento, este componente será designado por “acoplador 2”). Este componente é muito parecido ao acoplador 1, no entanto deixa de existir a necessidade de ter um escatel, passando apenas a ter uma zona tubular que deverá ser suportada da mesma maneira que o acoplador 1.

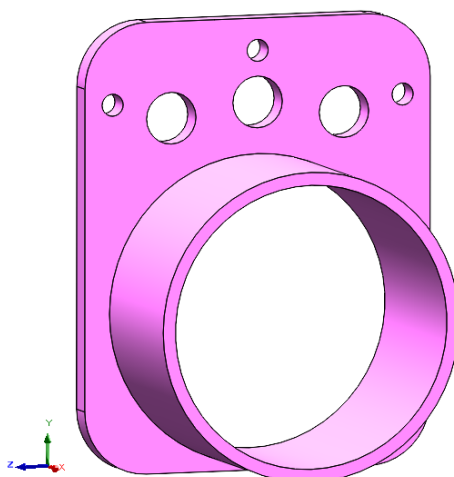


Figura 3.35 – Acoplador 2 da junta principal do robô (junta 3).

Estes acopladores deverão ser fabricados numa liga de alumínio, uma vez que suportarão maior peso devido à calha de alumínio extrudido e restantes juntas.

Os acopladores deverão estar suportados de forma adequada, evitando desalinhamentos no sistema. Para tal, optou-se pela criação de uma chumaceira, feita de material impresso (PLA ou ABS) onde serão colocados rolamentos compatíveis com o diâmetro exterior da zona tubular de ambos os acopladores. Em ambos os casos, este diâmetro é de 48 mm, pelo que os rolamentos a seleccionar deveriam ter um diâmetro interno com o mesmo valor.

Foi consultado o *website* da empresa SKF, fabricante de rolamentos, e procurou-se seleccionar rolamentos com um diâmetro interno de 48 mm e o menor diâmetro exterior possível para não tornar a junta demasiado grande. Os rolamentos seleccionados foram os rolamentos de rolos RNA 4902, com um diâmetro externo de 62 mm.

Com isto, procedeu-se à modelação da parte inferior da chumaceira (Figura 3.36). Nesta imagem é possível visualizar dois espaços para os rolamentos, sendo que cada um deles irá suportar um dos acopladores. Para além disto, foram realizadas remoções de material onde possível, inclusive remoções em arcos ogivais, uma vez que, no processo de fabrico através de impressão 3D, eliminar-se-á a necessidade de suportes.

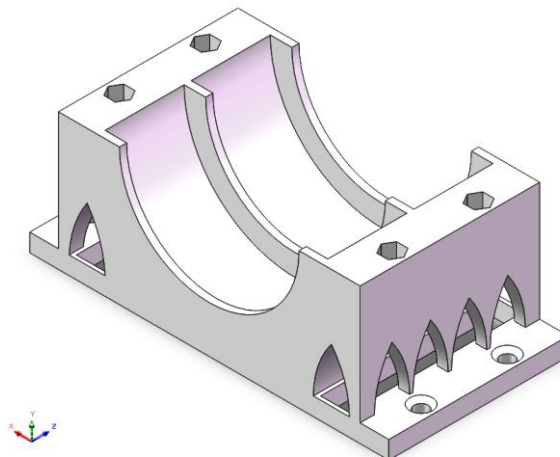


Figura 3.36 – Parte inferior da chumaceira de suporte dos acopladores 1 e 2 da junta 3.

Modelaram-se também duas capas iguais, para produzir em ABS, para envolver os rolamentos e aparafusar à parte inferior da chumaceira. A capa surge na Figura 3.37.

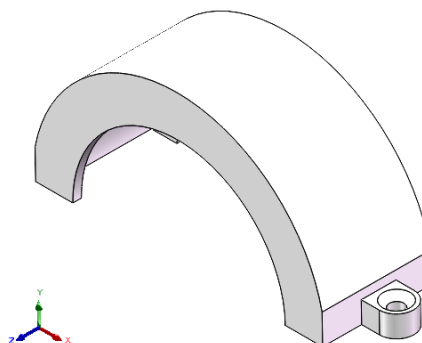


Figura 3.37 – Parte superior da chumaceira de suportes dos acopladores 1 e 2 da junta 3.

Com base na lista de componentes que as juntas deverão ter, um dos componentes ainda em falta é o travão. Consultando, uma vez mais, o *website* da empresa STEPPERONLINE, selecionou-se o único travão compatível com os motores NEMA 17. O componente em questão é o travão eletromagnético modelo SWB-01 (Figura 3.38).



Figura 3.38 – Travão eletromagnético modelo SWB-01 (STEPPERONLINE, n.d.).

O travão deverá estar acoplado a um veio, pelo que é necessário existir um componente que contenha um veio de saída para se conectar ao travão. Sendo assim, foi projetado um novo componente que fará a ligação entre o acoplador 1 e o travão. Este componente (daqui para a frente designado por “acoplador 3”) surge apresentado na Figura 3.39. Este componente tem as mesmas furações que o acoplador 1, pelo que vão estar ambos aparafusados ao suporte da calha e rodar de forma solidária. Também é possível verificar que foi modelado um veio de saída, e que dará entrada no travão selecionado. Este componente deverá ser produzido em liga de alumínio.

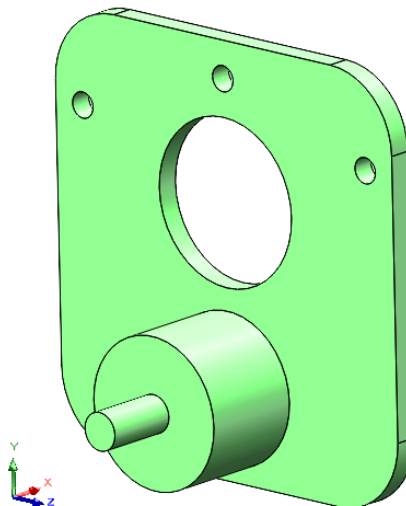


Figura 3.39 – Acoplador 3 da junta principal do robô (junta 3).

É também importante mostrar outros detalhes dos acopladores 1 e 3, e que também são importantes para a ligação entre ambos. Na Figura 3.40a) é apresentada uma zona cilíndrica onde é colocado um parafuso para fixar o veio de saída da CV (que passa no seu interior) e na Figura 3.40b) é apresentado um corte no componente, evitando assim conflitos entre ambos.

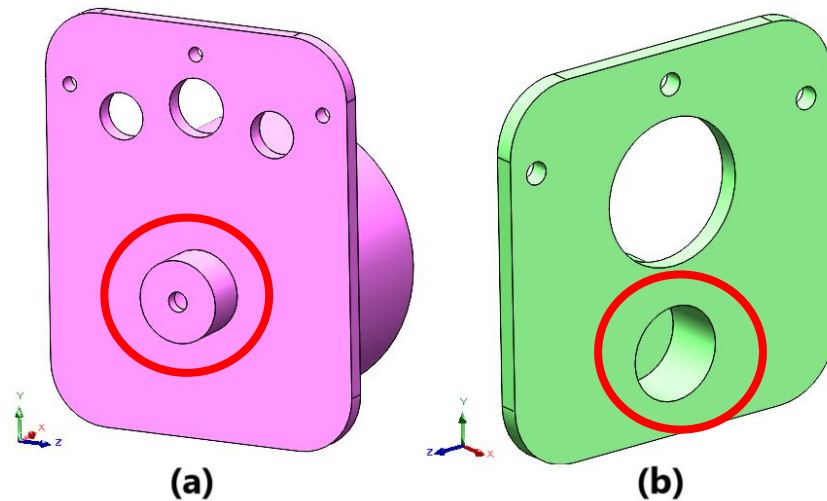


Figura 3.40 – a) Zona cilíndrica do acoplador 1, onde é colocado um parafuso para fixar o veio de saída da CV; b) corte do acoplador 3 para evitar conflitos entre os dois componentes.

Ainda no acoplador 3, existe uma zona de diâmetro maior junto ao veio de saída, que deverá ser suportada da mesma maneira que os acopladores 1 e 2, isto é, um rolamento e chumaceira. Tendo em conta que o diâmetro exterior da zona cilíndrica de saída do acoplador 3 é de 20 mm, foi selecionado um rolamento com este diâmetro interno. À semelhança do que foi feito para a chumaceira dos acopladores 1 e 2, procurou-se que o diâmetro externo do rolamento fosse o menor possível, evitando aumentar o tamanho da junta. Sendo assim, consultando, uma vez mais, o *website* da SKF, foi selecionado o rolamento de rolos HK 2010, que tem um diâmetro externo de 26 mm.

Com base neste valor de diâmetro externo, foi então projetada uma chumaceira com uma zona de encaixe para o rolamento com esta dimensão. Na Figura 3.41 é apresentada a parte inferior da chumaceira que suportará o acoplador 3. Tal como se percebe pela imagem, procurou-se diminuir ao máximo o peso do componente, que deverá ser impresso em ABS ou PLA. Também se verificam furações na face frontal, que serão responsáveis pela fixação e suporte do travão selecionado.

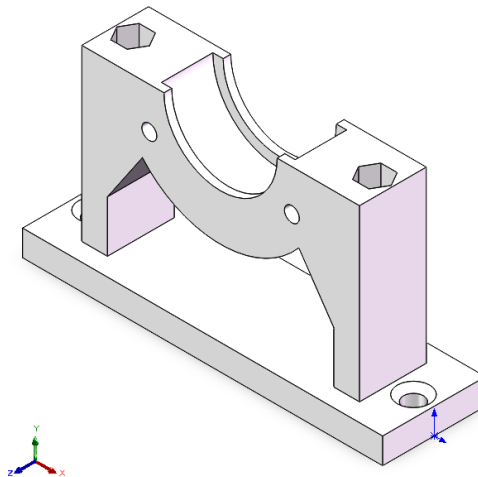


Figura 3.41 – Parte inferior da chumaceira de suporte do acoplador 3 da junta 3.

Para fixar o rolamento no lugar, e permitir uma montagem adequada, foi modelada uma capa para a chumaceira, a produzir em PLA ou ABS. Esta parte superior do componente surge apresentada na Figura 3.42.

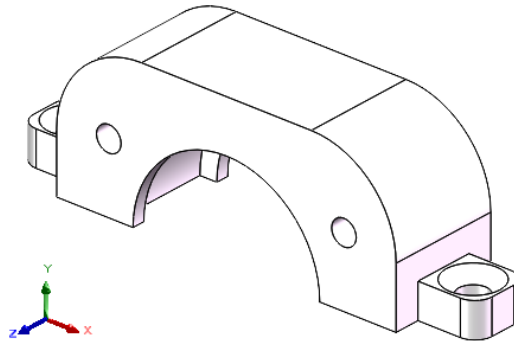


Figura 3.42 – Parte superior da chumaceira de suporte do acoplador 3 da junta 3.

Foi também projetada uma base capaz de fixar e alinhar todos os componentes, garantindo a sua estabilidade e evitando desalinhamentos. Os componentes a fixar são o suporte dos espaçadores, a parte inferior da chumaceira dos acopladores 1 e 2 e a parte inferior da chumaceira do acoplador 3. A base da junta surge apresentada na Figura 3.43. Na zona com menor largura mais à direita será onde vai encaixar o suporte dos espaçadores, seguido da chumaceira dos acopladores 1 e 2 à sua esquerda, e por fim a chumaceira do acoplador 3. As furações nos rebordos da peça servem para a colocação de ímanes para a fixação da capa da junta, apresentada mais à frente. Os furos em losango na zona central serão para aparafusar um encaixe para a calha do módulo anterior. Já o furo central de maior diâmetro servirá para a passagem de cabos. Este componente deverá ser produzido em ABS ou PLA.

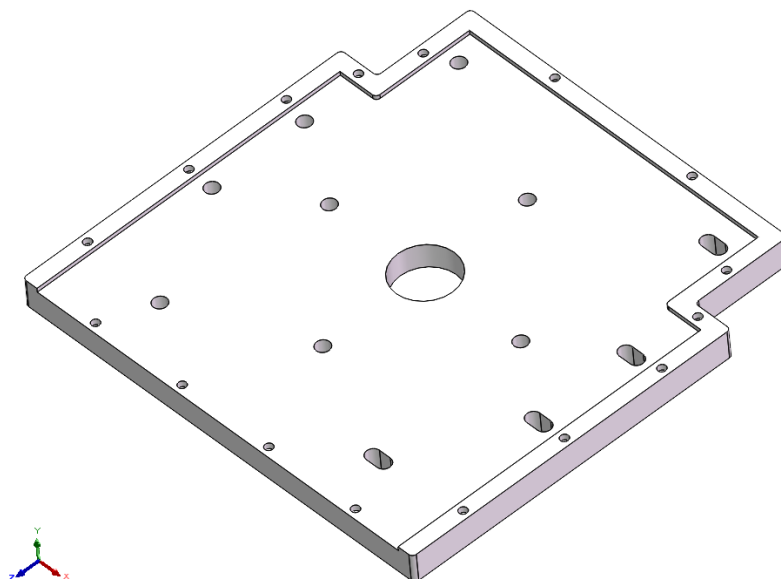


Figura 3.43 – Base da junta principal (junta 3).

O componente responsável por fazer a ligação entre a calha do módulo anterior e a base da junta 3 é apresentado na Figura 3.44.

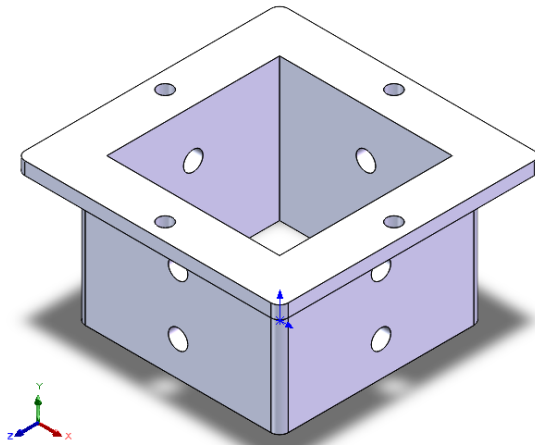


Figura 3.44 – Componente de ligação entre a calha do módulo anterior e a base da junta 3.

Por fim, foram adicionadas capas de proteção da junta, do motor e do travão, prevenindo danos nos componentes e impedindo a entrada de impurezas no sistema. A capa da junta é fixada à base por meio de ímanes, enquanto as capas do motor e do travão são igualmente acopladas à capa da junta pelo mesmo método. Esta solução foi escolhida para se economizar espaço (ocupando menos espaço comparativamente com o uso de parafusos e porcas), além de facilitar eventuais ações de manutenção das juntas. A configuração final da junta 3 surge apresentada na Figura 3.45.

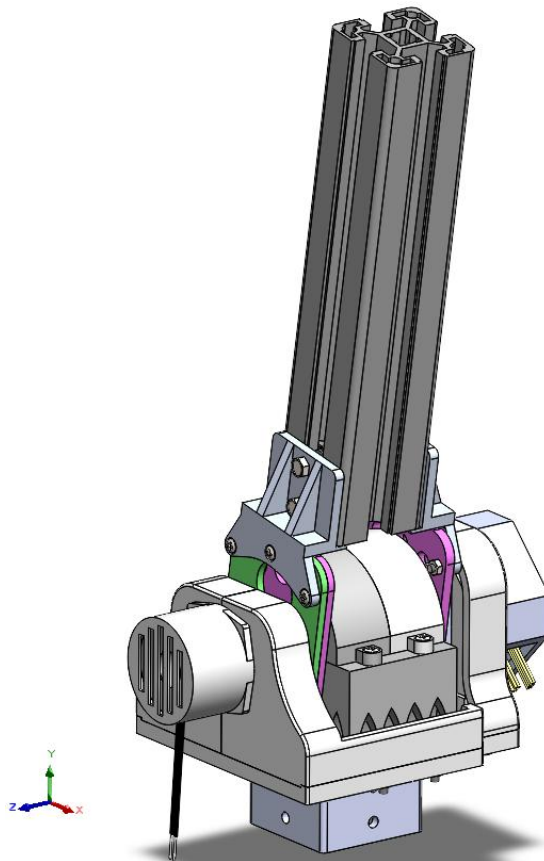


Figura 3.45 – Configuração final da junta 3.

Aos acopladores, suportes da calha e componente de ligação entre a calha anterior e a base da junta foi atribuída a liga de alumínio 1060 da base de dados do SOLIDWORKS. Os restantes componentes da junta, e que não são de compra (motor, CV, travão e elementos de ligação), foi atribuído o material ABS. As propriedades da liga de alumínio 1060 e do ABS surgem na Tabela 3.7 e Tabela 3.8, respetivamente.

Tabela 3.7 – Propriedades da liga de alumínio 1060.

| Propriedade | Valor |
|-------------------------|------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 69 GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,33 |
| Módulo de Corte | 27 GPa |
| Densidade | 2700 kg/m ³ |
| Resistência à tração | 68,9356 MPa |
| Tensão de Cedência | 27,5742 MPa |

Tabela 3.8 – Propriedades do ABS.

| Propriedade | Valor |
|-------------------------|------------------------|
| Módulo de Elasticidade | 2 GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,394 |
| Módulo de Corte | 318,9 MPa |
| Densidade | 1200 kg/m ³ |
| Resistência à tração | 30 MPa |

Sendo assim, o sistema ficou com uma massa total de 2,112 kg.

Por forma de verificação, foi efetuado um estudo utilizando o SOLIDWORKS *Motion*. Foram primeiramente removidos todos os parafusos e porcas e aplicado um motor de rotação no veio de saída da CV. O motor era do tipo segmentos, e foi aplicada uma rotação de 90° a realizar num intervalo de tempo de 4 segundos. Para além disto foi ativada a gravidade e também aplicada uma carga de 20 N colocada na ponta da calha (representativa da colocação de uma nova junta igual). Posto isto, foi executada a simulação e o gráfico do binário necessário do motor surge apresentado na Figura 3.46.

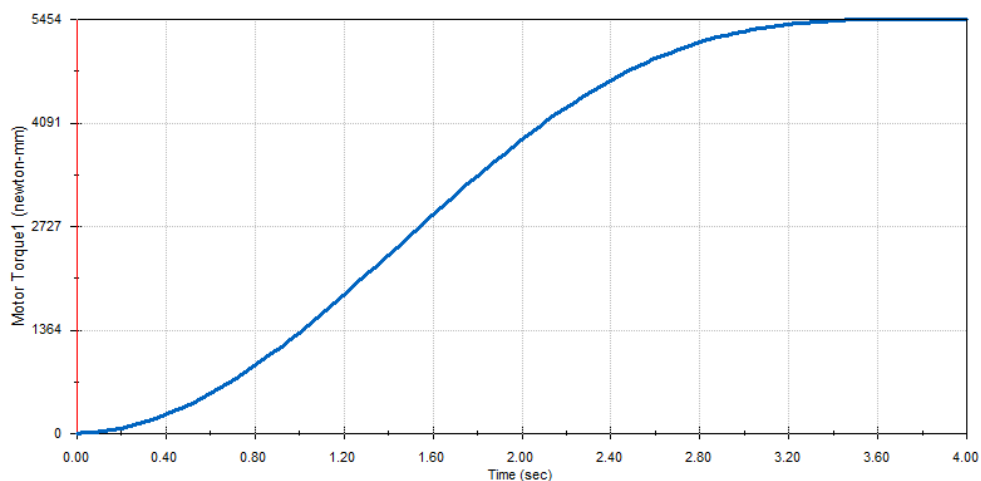


Figura 3.46 – Binário do motor da junta 3, o estudo realizado no SOLIDWORKS *Motion*.

O valor máximo indicado no gráfico é de 5,454 N·m, o que corresponde a um valor superior ao valor fornecido no estudo do Simulink/MATLAB. Sendo assim, por segurança do sistema, optou-se por se substituir a CV por uma outra com uma relação de transmissão de 100:1 (modelo MG17-G100). Esta nova CV permitirá que o veio de saída possa debitar até 11 N·m, aproximadamente. Quanto às dimensões desta nova caixa, são exatamente iguais à anterior, tendo apenas uma massa 100 g superior (para mais informações acerca da caixa de velocidades MG17-G100, consultar o anexo F).

3.3.2 Segunda iteração do modelo Simulink/MATLAB

Com o projeto da junta 3 concluído, torna-se possível a sua implementação no modelo Simulink/MATLAB. O procedimento adotado consistiu em adicionar as configurações desta junta aos módulos 23 e 34, correspondentes à junta 2 e respetiva calha, bem como à junta 3 e correspondente calha. Este ajuste visa permitir que o modelo Simulink/MATLAB forneça resultados mais próximos da estrutura final desejada.

Primeiramente foi medido o comprimento do conjunto calha mais junta, e identificada a posição do centro de massa. Colocando a calha numa posição totalmente vertical, o comprimento medido entre a ponta da calha e a base da junta foi de 292,5 mm. Já o centro de massa estava localizado a 65,9 mm da base da junta. Estes dois parâmetros, bem como a massa total foram adicionados ao código do Simulink.

Relativamente à matriz de inércia, à semelhança do que tinha sido feito para a extrusora, foi recolhida do SOLIDWORKS e colocada no ficheiro de texto que é depois importado para o código. Executando a simulação do modelo, obteve-se um novo gráfico do binário dos motores das juntas (Figura 3.47).

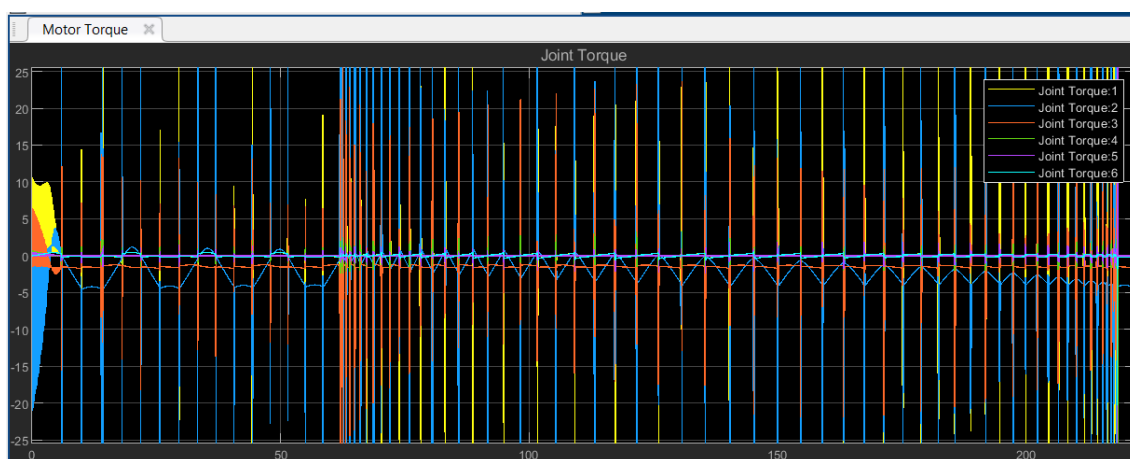


Figura 3.47 – Binário necessário dos motores das juntas após a segunda iteração do modelo Simulink/MATLAB.

Como é possível verificar, os valores máximos de binário para a junta 2 andam perto dos 5 N·m, enquanto os da junta 3 andam perto dos 3 N·m.

3.4 Projeto da junta que assenta na base giratória (junta 2)

3.4.1 Seleção do motor da junta 2

Com base nos valores de binário lidos anteriormente, conclui-se que o conjunto do motor mais CV que assenta na base giratória deverá ter, pelo menos, 5 N·m. Tendo em conta que esta junta não está a ser suportada por calhas, mas sim assente numa base, não existe a limitação de espaço e peso que existia para a junta 3. Também olhando aos valores de binário necessário, e como era de esperar, o motor da junta 2 deverá ser mais robusto e potente. Dado que será esta junta a mover a junta 3 e as três juntas do punho, era previsível que os valores de binário fossem superiores.

Sendo assim, recorreu-se, mais uma vez, aos fabricantes STEPPERONLINE para se selecionar um motor capaz de cumprir estes requisitos de funcionamento. O motor selecionado foi o motor *stepper* de anel fechado NEMA 17, modelo 17HS15-1504-ME1K (Figura 3.48). Este motor é maior e mais pesado que o da junta 2, tendo uma massa de 0,4 kg (para mais informações acerca deste motor, consultar o Anexo G).



Figura 3.48 – Motor NEMA 17, modelo 17HS15-1504-ME1K (STEPPERONLINE, n.d.).

Nos catálogos do fabricante estava disponível a curva de binário do motor (Figura 3.49).

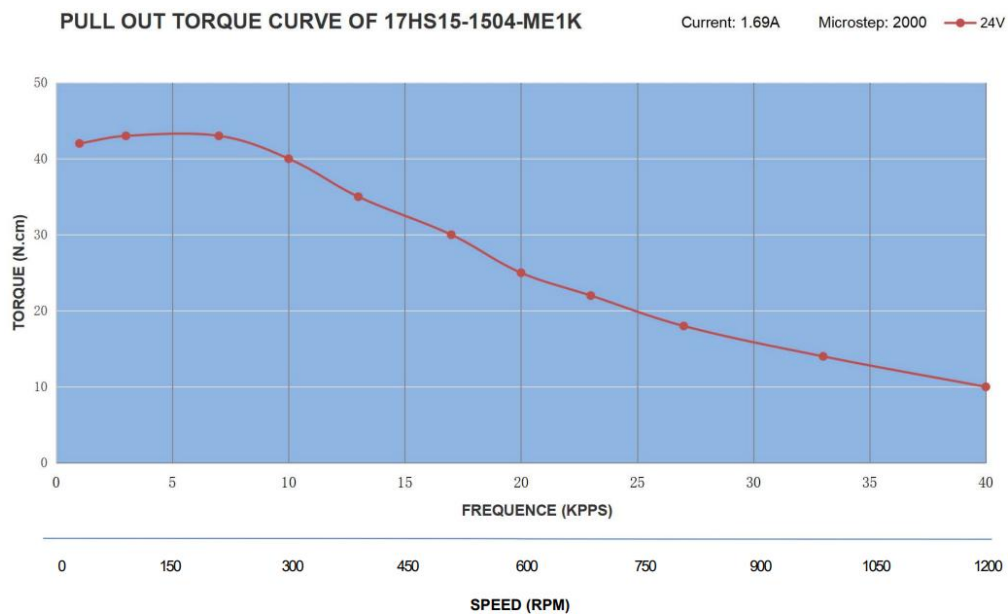


Figura 3.49 – Curva de binário do motor NEMA 17 modelo 17HS15-1504-ME1K (STEPPERONLINE, n.d.).

Convertendo os valores lidos em cada ponto do gráfico, foi possível construir a Tabela 3.9. Nesta tabela são apresentados os valores de binário (em N·m) e de potência (em W), em função da velocidade (em rpm).

Tabela 3.9 – Valores do binário (em N·m) e da potência (W) do motor NEMA 17 modelo 17HS15-1504-ME1K, em função da velocidade (em rpm).

| Ponto do gráfico | Velocidade (rpm) | Binário (N·m) | Potência (W) |
|------------------|------------------|---------------|--------------|
| Ponto 1 | 25 | 0,42 | 1,0996 |
| Ponto 2 | 80 | 0,43 | 3,6024 |
| Ponto 3 | 240 | 0,43 | 10,8071 |
| Ponto 4 | 300 | 0,40 | 12,5664 |
| Ponto 5 | 380 | 0,35 | 13,9277 |
| Ponto 6 | 570 | 0,30 | 17,9071 |
| Ponto 7 | 600 | 0,25 | 15,7080 |
| Ponto 8 | 680 | 0,22 | 15,6661 |
| Ponto 9 | 820 | 0,18 | 15,4566 |
| Ponto 10 | 970 | 0,14 | 14,2209 |
| Ponto 11 | 1200 | 0,10 | 12,5664 |

Olhando aos valores de binário, percebe-se que, para um regime de funcionamento em torno dos 300 a 500 rpm, os valores de binário máximo do motor selecionado andam em torno de 0,30 N·m. Para que se alcancem os 5 N·m indicados pelo programa do Simulink/MATLAB, bastaria adicionar uma caixa de velocidades com uma relação de transmissão de 20:1. No entanto, e à semelhança do que aconteceu para a junta 3, devido à futura colocação de mais componentes na estrutura (e por consequência mais peso), a tendência é que depois seja necessário um maior binário. Para além disso, no gráfico do binário necessário nas juntas após a segunda iteração, é possível ver picos iniciais, que embora provenham de erros da trajetória, podem ser considerados nesta fase do projeto. Sendo assim, optou-se pela mesma caixa de velocidades utilizada na junta 3, o modelo MG17-G100, com uma relação de transmissão de 100:1. Com este conjunto de motor e caixa de velocidades, a junta conseguirá debitar até 30 N·m. Para esta junta, e tal como aconteceu para a junta 3, existe a necessidade de colocação de espaçadores. Para este caso, a distância entre a ponta do veio de saída do motor e a sua face de encosto é de 24 mm (Figura 3.50a), enquanto a distância entre o fundo da zona de acoplamento e a face de encosto da caixa de velocidade é 10,8 mm (Figura 3.50b).

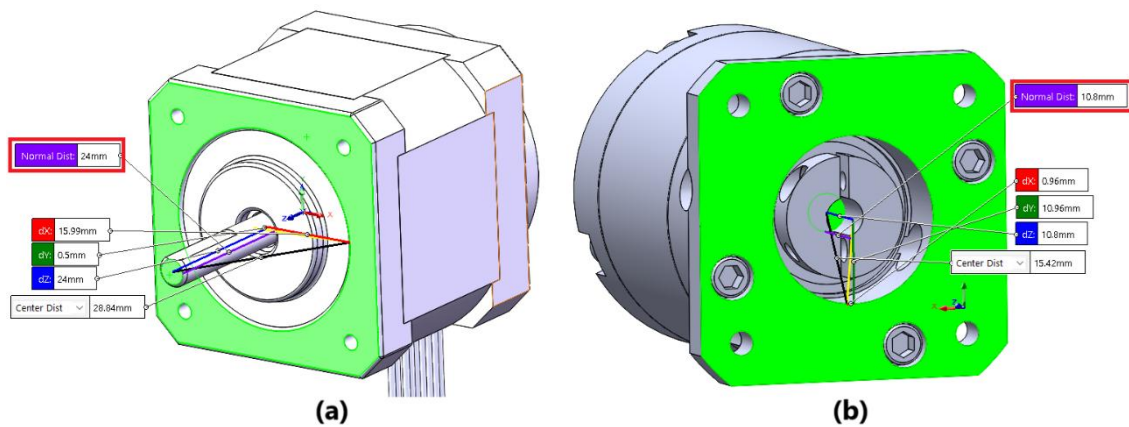


Figura 3.50 – a) Distância entre a ponta do veio de saída do motor 17HS15-1504-ME1K e a sua face de encosto; b) distância entre o fundo da zona de acoplamento e a face de encosto da caixa de velocidade.

Posto isto, foram colocados espaçadores, cada um com 6,6 mm de largura, perfazendo uma largura total de 13,2 mm, correspondente à distância que é necessária existir entre os dois componentes. Estes espaçadores serão em tudo iguais aos espaçadores da junta 3, no entanto a largura passa a ser superior. Com esta modificação, o suporte dos espaçadores também aumenta a largura entre as duas paredes internas.

Os restantes componentes mantêm-se inalterados, visto que continuam a ser compatíveis com os novos componentes, exceto a capa do motor e a capa da junta. A capa do motor passa a ter de ser maior, mas com um design muito semelhante à capa do motor da junta 3. Já a capa da junta foi adaptada, uma vez que estes componentes vão agora assentar diretamente na base giratória do robô.

A configuração final da junta 2 surge apresentada na Figura 3.51.

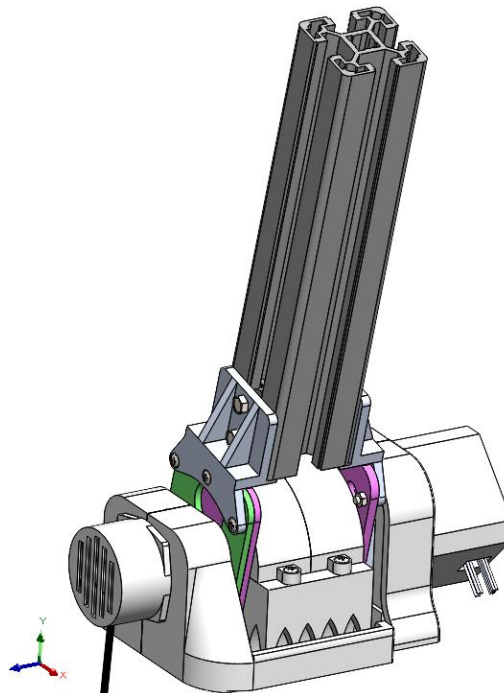


Figura 3.51 – Configuração final da junta 2.

O sistema ficou com uma massa total de 2,15 kg.

Foi ainda construído um modelo de teste composto pela junta 2 e por duas juntas iguais à junta 3, por forma a realizar uma simulação dinâmica no SOLIDWORKS.

O modelo de teste surge apresentado na Figura 3.52.

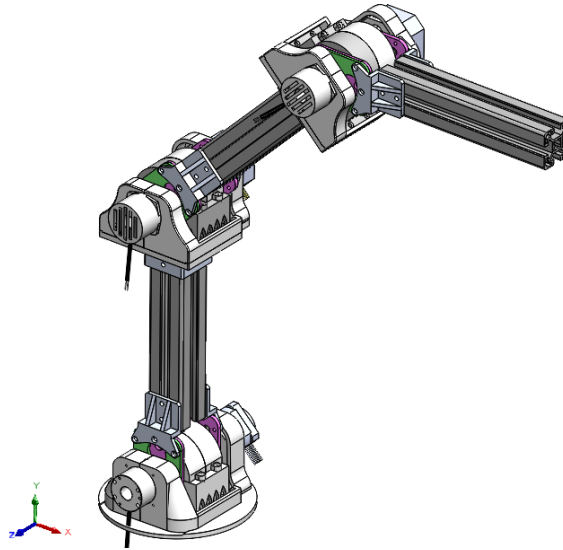


Figura 3.52 – Modelo de teste para se avaliar o binário da junta 2, no SOLIDWORKS *Motion*.

Foram testados dois cenários distintos: o primeiro para um movimento em que o braço da junta 2 recua, e o segundo para um movimento em que o mesmo braço avança. Foram aplicados motores de rotação nos veios de saída das caixas de velocidades das três juntas. No primeiro estudo, a calha inferior recuou $22,50^\circ$, a calha intermédia avançou 45° e a última avançou $22,50^\circ$, durante um intervalo de tempo de 4 segundos. Já no segundo estudo, a calha inferior avançou $22,50^\circ$, enquanto as outras duas calhas realizaram o mesmo movimento que no primeiro estudo.

Foi gerado o gráfico do binário necessário do motor colocado no veio de saída da CV da junta inferior. Os gráficos dos estudos 1 e 2 estão apresentados na Figura 3.53 e Figura 3.54, respetivamente.

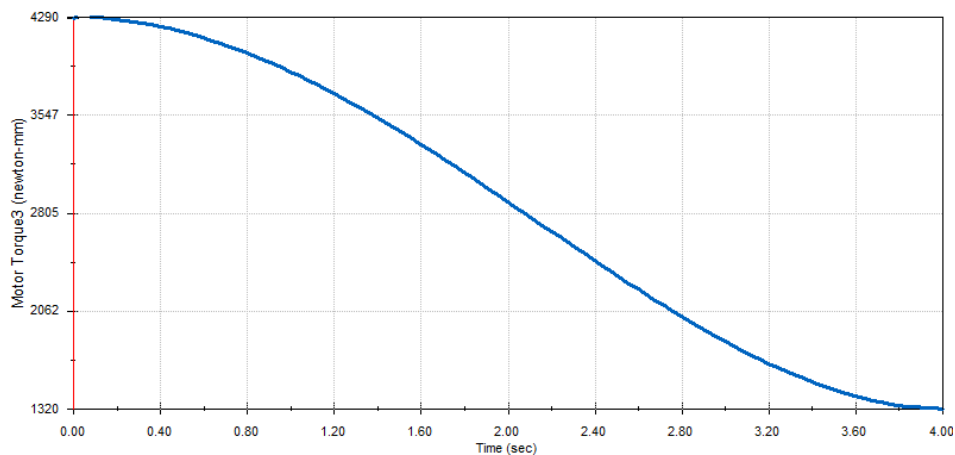


Figura 3.53 – Gráfico do binário do motor da junta 2, no estudo 1 realizado ao modelo de teste no SOLIDWORKS *Motion*.

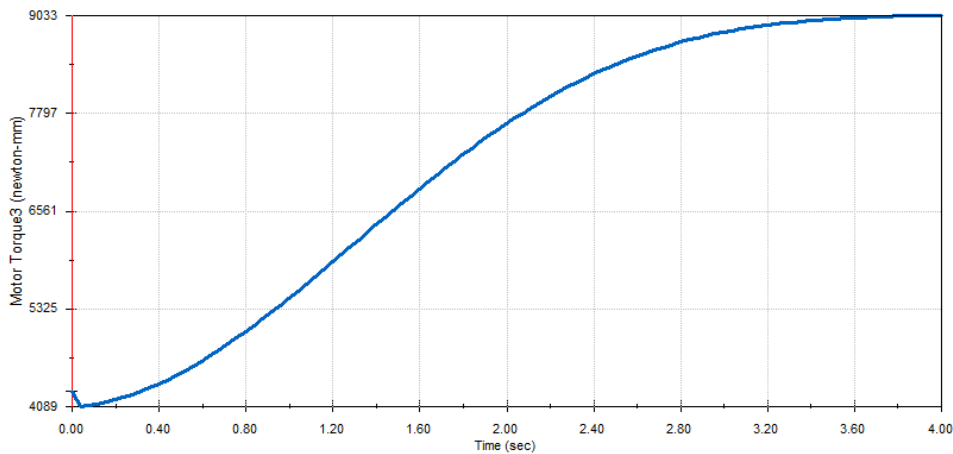


Figura 3.54 – Gráfico do binário do motor da junta 2, no estudo 2 realizado ao modelo de teste no SOLIDWORKS *Motion*.

Como é possível perceber pela análise das curvas geradas, os valores de binário máximo para o estudo 1 e 2 são, respetivamente, 4,29 N·m e 9 N·m.

Tendo em conta que foi adicionada uma junta extra no final do braço robótico (igual à junta 3) e que depois será substituída pelas juntas que compõem o punho (pelo que se espera um peso superior ao que se colocou nos estudos), é positivo que o conjunto do motor e CV colocados na junta 1 consiga fornecer um binário consideravelmente superior ao que o SOLIDWORKS indica ser necessário.

3.4.2 Terceira iteração do modelo Simulink/MATLAB

Anteriormente, e para se ter uma melhor ideia do valor de binário que o motor da junta 2 tinha de debitar, tinham sido aplicadas as mesmas configurações da junta 3 para o módulo da junta 2. Nesta nova iteração do modelo Simulink/MATLAB, foi realizada a substituição dos dados relativos ao módulo 23 (junta 2 e respetiva calha).

Primeiramente foi medido o comprimento do conjunto calha mais junta, e identificada a posição do centro de massa. Colocando a calha numa posição totalmente vertical, o comprimento medido entre a ponta da calha e a base da junta passou a ser 286,5 mm (valor inferior devido à remoção da base da junta). Já o centro de massa passou a estar localizado a 57,8 mm da base da junta. Estes dois parâmetros, bem como a massa total foram adicionados ao código do Simulink.

Relativamente à matriz de inércia, foi novamente recolhida do SOLIDWORKS e colocada no ficheiro de texto. Executando a simulação do modelo, obteve-se um novo gráfico do binário dos motores das juntas, que é, no entanto, muito semelhante ao gráfico obtido no fim da segunda iteração do modelo Simulink/MATLAB. Isto porque as diferenças entre as duas configurações são relativamente pequenas, pelo que os valores de binário nas juntas são praticamente iguais (Figura 3.55).

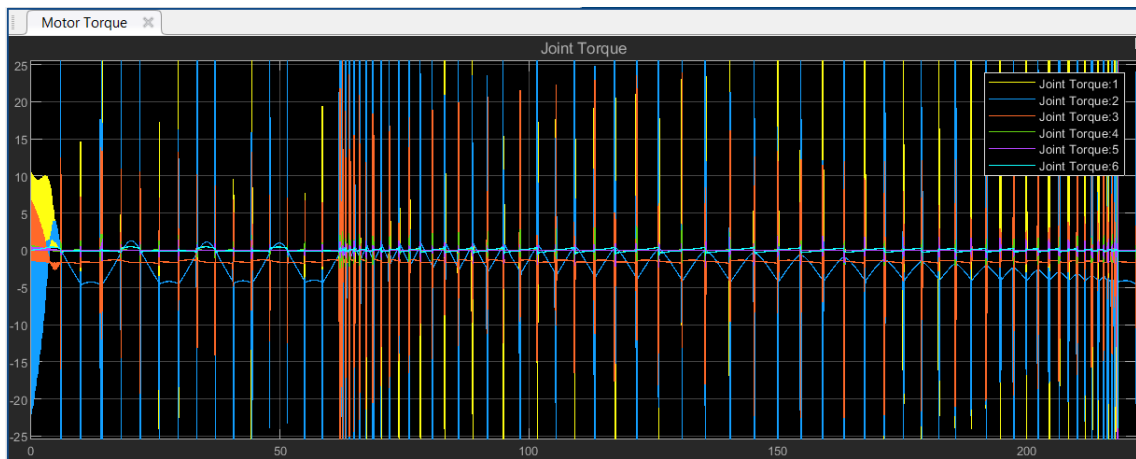


Figura 3.55 – Binário necessário dos motores das juntas após a terceira iteração do modelo Simulink/MATLAB.

O gráfico apresentado não gera novas informações relativamente às juntas 2 e 3, uma vez que os resultados obtidos permanecem praticamente inalterados face aos previamente apresentados. No entanto, é possível realizar uma avaliação detalhada da curva do binário da junta 1, correspondente à base giratória isolando apenas a sua curva (Figura 3.56). Através da análise a esta curva, torna-se possível proceder à seleção do motor e da caixa de velocidades mais adequados para a base giratória.

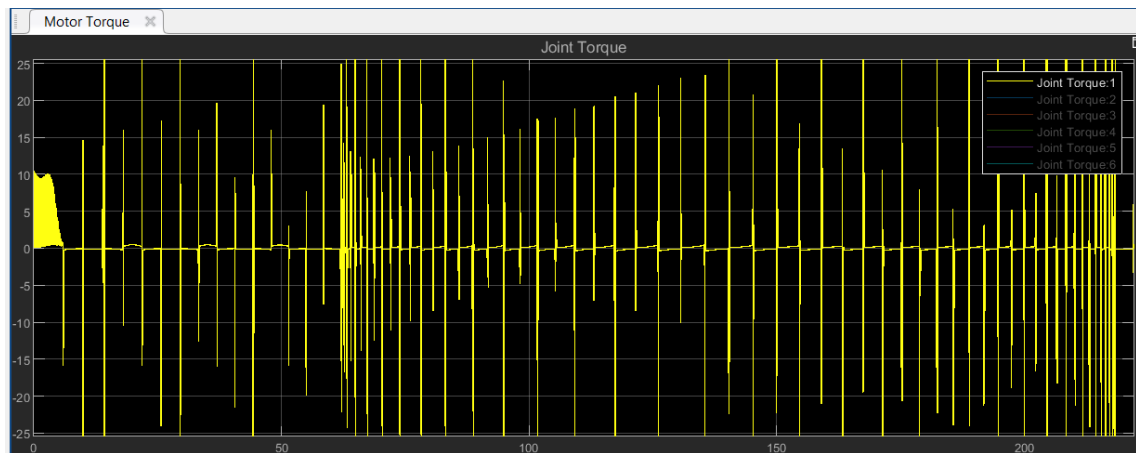


Figura 3.56 – Binário necessário do motor da junta 1 após a terceira iteração do modelo Simulink/MATLAB.

Analisando este gráfico, percebe-se que o valor do binário da junta 1 não passa de 1 N·m. Sendo assim, o conjunto do motor e CV deverão ser capazes de fornecer pelo menos 1 N·m ao sistema.

3.5 Projeto da base giratória (junta 1)

3.5.1 Seleção e projeto de componentes

Dando continuidade ao dimensionamento do sistema, verificou-se que o conjunto motor e caixa de velocidades da base giratória deveria fornecer pelo menos 1 N·m para garantir o funcionamento adequado do robô. Sendo assim, e para adicionar uma margem de segurança ao projeto, definiu-se que se iria projetar uma junta capaz de fornecer 2 N·m.

A análise das soluções utilizadas no mercado revelou que, frequentemente, o motor é posicionado com o veio de saída na vertical, transmitindo o movimento à plataforma da base, que também rodará em torno do eixo vertical. Para este projeto, adotou-se essa configuração.

Optou-se por utilizar o mesmo motor da junta 3, uma vez que é bastante compacto, e porque se pretendia evitar uma estrutura demasiado grande e alta. Sendo que o motor ficará com o veio de saída na vertical, é bastante vantajosa a utilização de um motor com estas características.

Relativamente à CV selecionada, uma vez que se tratam tipicamente de componentes maiores, e como o objetivo é colocá-la na vertical com o motor, escolheu-se um modelo menor, o que resultou numa relação de transmissão mais baixa. Foi selecionada a CV mais pequena dos fabricantes STEPPERONLINE, que possui uma relação de transmissão 5:1 (modelo MG17-G5). Na Figura 3.57 é apresentada uma imagem deste componente (para mais informações acerca desta caixa de velocidades, consultar o Anexo H). Entre o motor e a CV foram novamente adicionados espaçadores, para que fosse efetuada uma montagem adequada do sistema



Figura 3.57 – Caixa de velocidades planetária com relação de transmissão 5:1, modelo MG17-G5 (STEPPERONLINE, n.d.).

Para compensar e atingir a relação desejada, adicionou-se um sistema de engrenagens complementares feitas em ABS: uma engrenagem helicoidal colocada no veio de saída da CV (acoplada com recurso a uma chaveta) que aciona uma engrenagem de maior

dimensão com dentes na parte interna, uma abordagem comum neste tipo de aplicações.

A engrenagem helicoidal colocada no veio de saída da CV é mais pequena e possui 20 dentes (Figura 3.58a). Para se alcançar uma relação de transmissão total de 20:1, foi modelada uma engrenagem maior com um total de 80 dentes internos (Figura 3.58b).

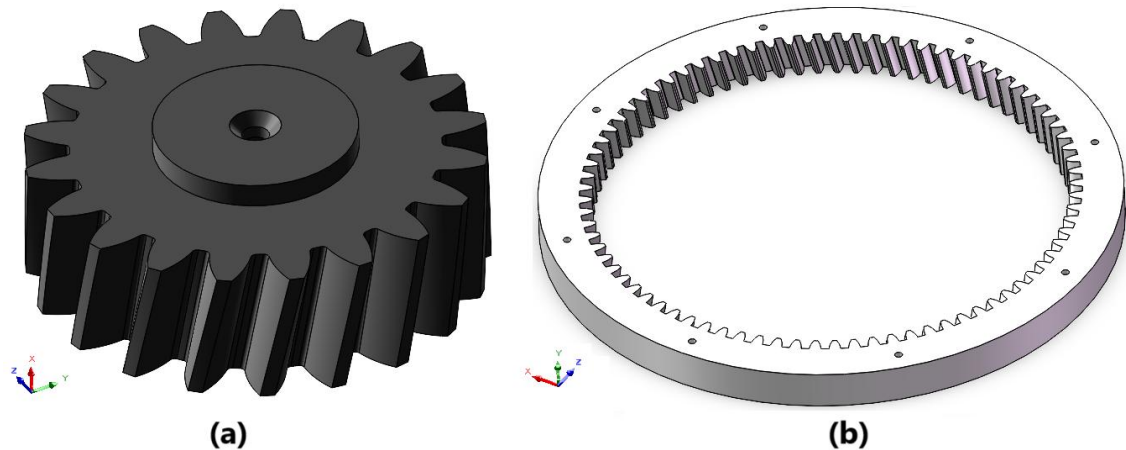


Figura 3.58 – Engrenagens utilizadas na base giratória.

Sendo assim, o conjunto de engrenagens produz uma relação de transmissão de 4:1 que, aliada à relação de transmissão de 5:1 da CV, converte o binário do motor de aproximadamente 0,1 N·m para 2 N·m na junta (alcançando a relação de transmissão total de 20:1). Esta configuração permitiu obter a transmissão necessária sem aumentar significativamente a altura da base.

O passo seguinte foi o projeto da plataforma onde assenta todo o braço robótico (Figura 3.59). Esta plataforma estará aparafusada à engrenagem helicoidal de dentes internos, rodando assim de forma solidária. A plataforma, a imprimir em PLA ou ABS, foi projetada para permitir uma fácil montagem dos componentes da junta 2, tendo, à semelhança das juntas 3, 4 e 5, um desnível com as dimensões dos componentes que deverão estar aparafusados à mesma.

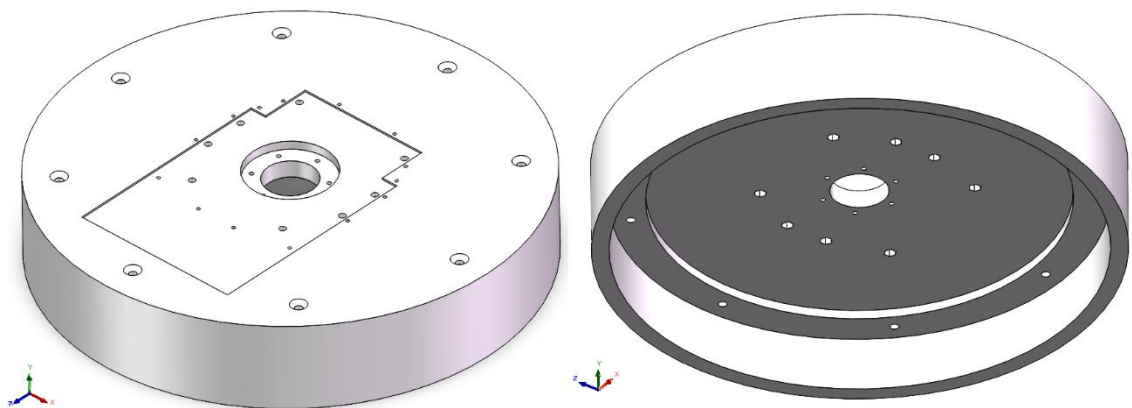


Figura 3.59 – Plataforma giratória da base.

No centro da plataforma foi incorporado um veio em aço com 20 mm de diâmetro (Figura 3.60), que está acoplado à plataforma com recurso a uma flange (Figura 3.61). Tanto o veio como a flange possuem um escotel para acoplar uma chave em aço, permitindo a transmissão do movimento da plataforma para o veio. A flange, a fabricar por impressão 3D em ABS ou PLA, tem também várias furações para poder ser aparafusada à plataforma.

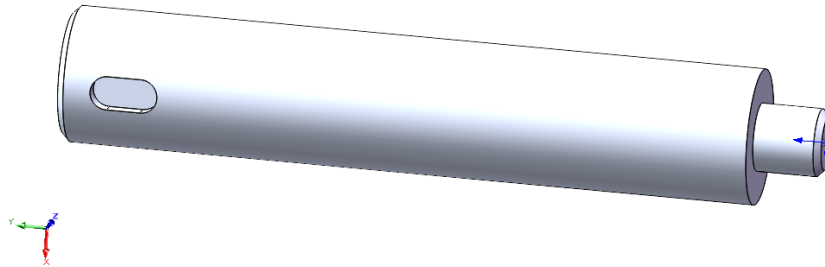


Figura 3.60 – Veio da base giratória.

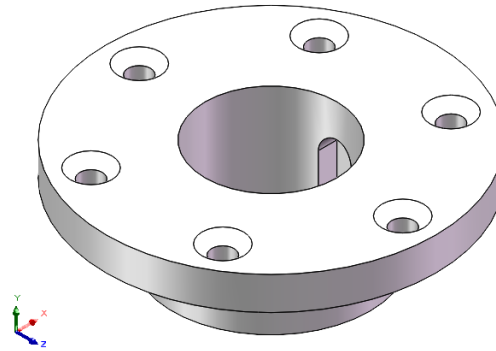


Figura 3.61 – Flange de ligação do veio à plataforma.

O veio é sustentado por dois rolamentos radiais para evitar desalinhamentos e por um rolamento axial na base, garantindo uma distribuição eficiente das cargas. O veio possui um diâmetro de 20 mm ao longo da maior parte do seu comprimento, reduzindo para 10 mm na extremidade. Como os rolamentos radiais serão montados na secção de 20 mm, foram seleccionados modelos com o menor diâmetro exterior possível e um diâmetro interno de 20 mm. Novamente consultando os catálogos da SKF, os rolamentos seleccionados foram os rolamentos de esferas 16004, com um diâmetro exterior de 42 mm. Já na parte inferior, onde o veio tem 10 mm de diâmetro, foi instalado um rolamento axial compatível que tivesse esse diâmetro interno. Seleccionou-se o rolamento axial de esferas 51200 com um diâmetro externo de 26 mm.

Sendo assim, projetou-se uma chumaceira em PLA ou ABS, para suportar e posicionar os três rolamentos (Figura 3.62). Esta chumaceira como deverá ser impressa, foi dividida em duas metades, que se unirão através de ligações aparafusadas a duas abas laterais. Para além disso, para ficar posicionada corretamente, deverá também ser aparafusada à superfície inferior da base giratória.

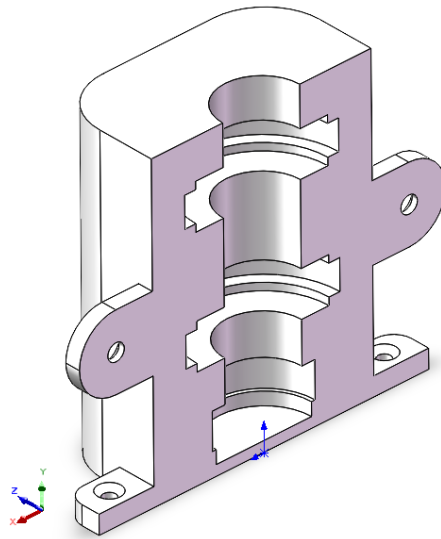


Figura 3.62 – Chumaceira da base giratória.

Por fim, foi modelada a base da base giratória. Este componente possui duas zonas desniveladas. A zona central será onde vão ser aparafusadas as duas partes da chumaceira, e a outra onde será encaixado o suporte do motor. À semelhança de outros componentes anteriormente mencionados, também este componente deverá ser impresso, ou em PLA ou em ABS.

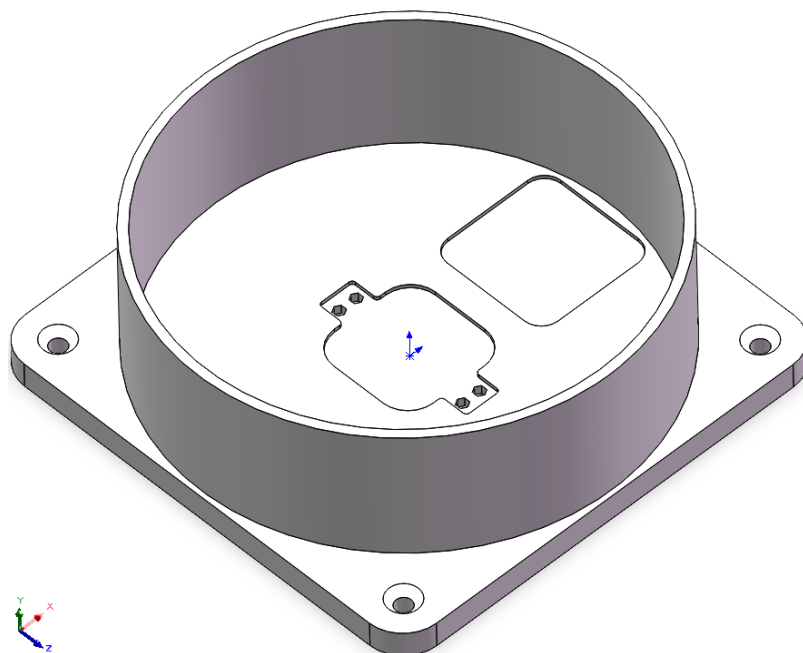


Figura 3.63 – Base da base giratória.

Na Figura 3.64 surge apresentada uma imagem da configuração final da base giratória com alguns componentes com transparência aplicada, para que se possa verificar a forma como o sistema está montado.

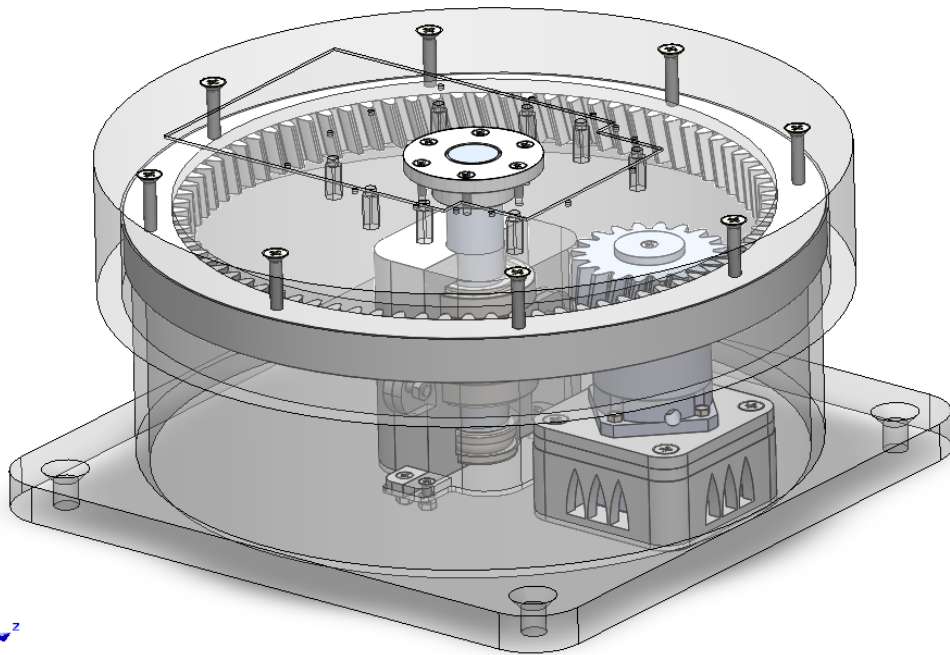


Figura 3.64 – Configuração final da base giratória com alguns componentes com transparência aplicada, para verificação da forma de montagem do sistema.

Na Figura 3.65 surge uma imagem da configuração final da base giratória, sem transparências.

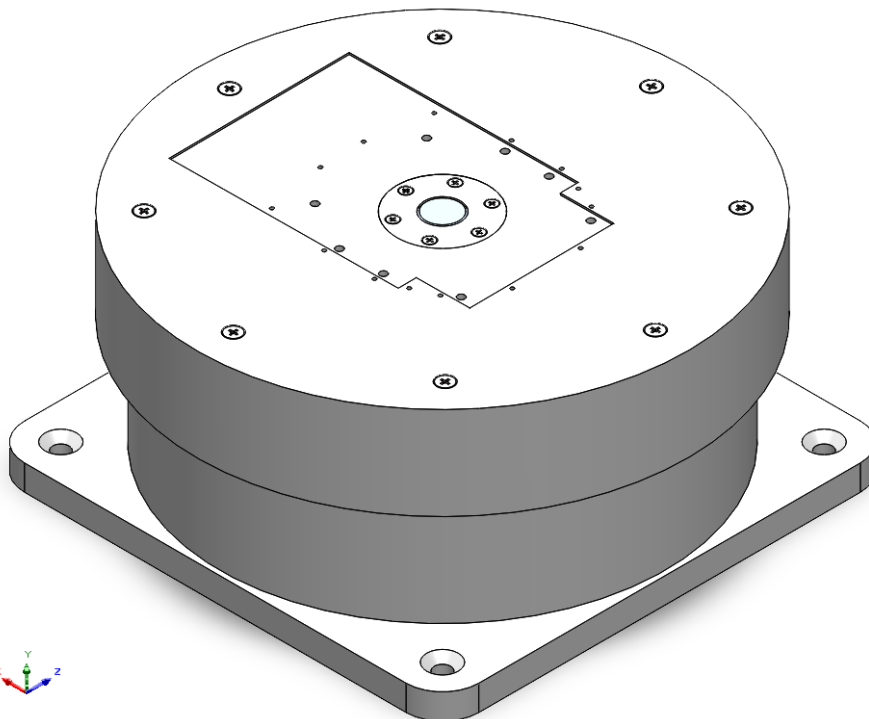


Figura 3.65 – Configuração final da base giratória.

3.6 Projeto do punho do robô

3.6.1 Seleção e projeto de componentes

O punho do robô foi projetado para fornecer os três últimos GdL do sistema, completando assim os seis GdL necessários para a movimentação completa do manipulador. Estes três graus de liberdade, tal como mencionado anteriormente, correspondem aos movimentos de inclinação, guinada e rolamento, garantindo a flexibilidade necessária para a manipulação precisa da extrusora. Para alcançar essa mobilidade, foi projetada uma junta específica para cada GdL, seguindo a ordem mencionada.

A primeira junta do punho, responsável pelo movimento de inclinação, segue o mesmo modelo da junta 3 do robô. Optou-se pelo mesmo motor, dada a sua leveza e por ser bastante compacto, mas foi utilizada uma caixa de velocidades com uma relação de transmissão de 20:1 – menor que a da junta 3 (100:1) – pois esta junta não irá suportar componentes estruturais, mas sim apenas as duas juntas seguintes.

Foi necessário adaptar os componentes para acomodar a nova CV, que possui dimensões inferiores à utilizada na junta 3. Além disso, nesta junta, deixou de se utilizar a calha estrutural, sendo a ligação à junta seguinte feita diretamente através de suportes em liga de alumínio aparafusados, otimizando o espaço e reduzindo a complexidade do sistema. Na Figura 3.66 é apresentada a junta de inclinação do punho.

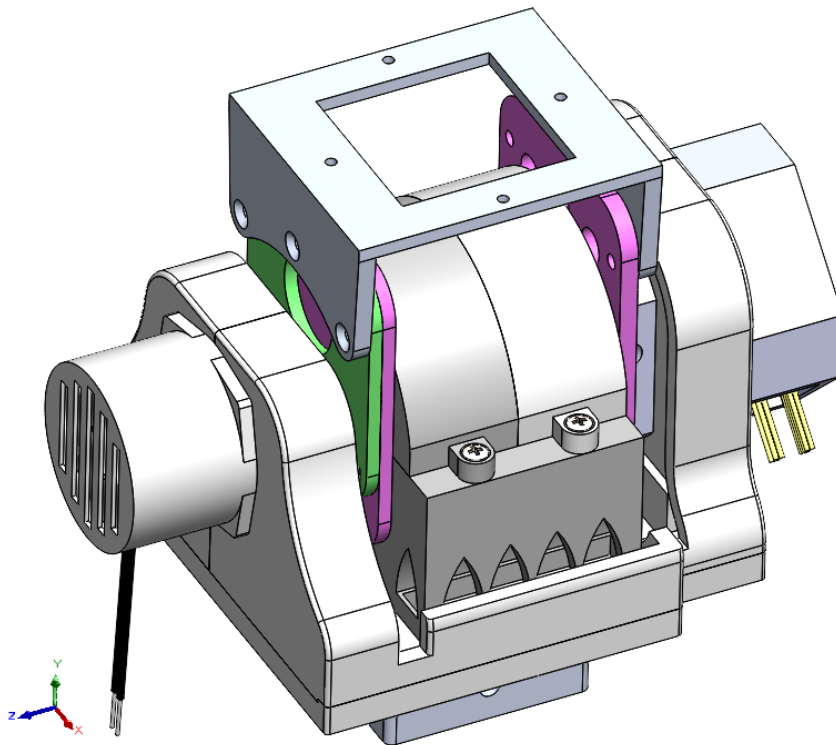


Figura 3.66 - Junta de inclinação do punho.

A segunda junta do punho é responsável pelo movimento de guinada, permitindo a rotação em torno do eixo y. Essa junta mantém os mesmos componentes da junta de inclinação, diferenciando-se apenas na sua orientação: enquanto a junta de inclinação roda em torno do eixo x, esta junta gira 90°, permitindo o movimento em torno do eixo y. Além disso, foram projetados suportes específicos para fixação da última junta. A terceira e última junta do punho controla o movimento de rolamento, sendo a responsável pela rotação da extrusora em torno do próprio eixo. O suporte da junta de guinada é fixado diretamente ao componente onde está montado o motor. Este motor está acoplado a uma caixa de velocidades, também 20:1, e no seu veio de saída é fixada uma placa de rolamento em liga de alumínio, onde será aparafusada a extrusora. Na Figura 3.67 é apresentada a configuração final do punho.

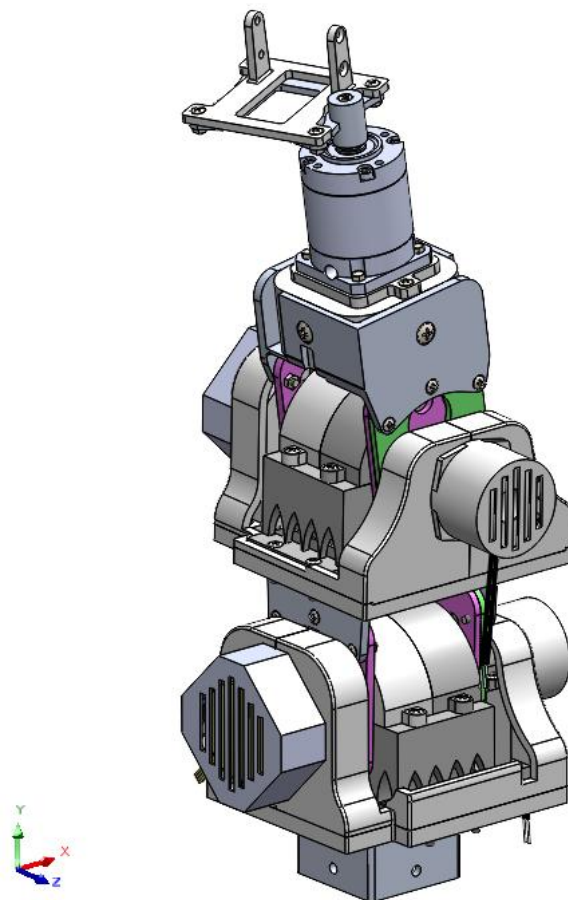


Figura 3.67 – Configuração final do punho.

Com esta configuração, o punho do robô garante a flexibilidade necessária para a impressão 3D, permitindo que a extrusora alcance diferentes orientações no espaço de forma precisa e eficiente.

3.7 Configuração final do robô

3.7.1 Modelo final

Após a apresentação detalhada de todos os componentes e subconjuntos que compõem o braço robótico, segue-se a representação do modelo final completo. A Figura 3.68 apresenta a configuração final do braço robótico, integrando todos os elementos desenvolvidos ao longo do projeto.

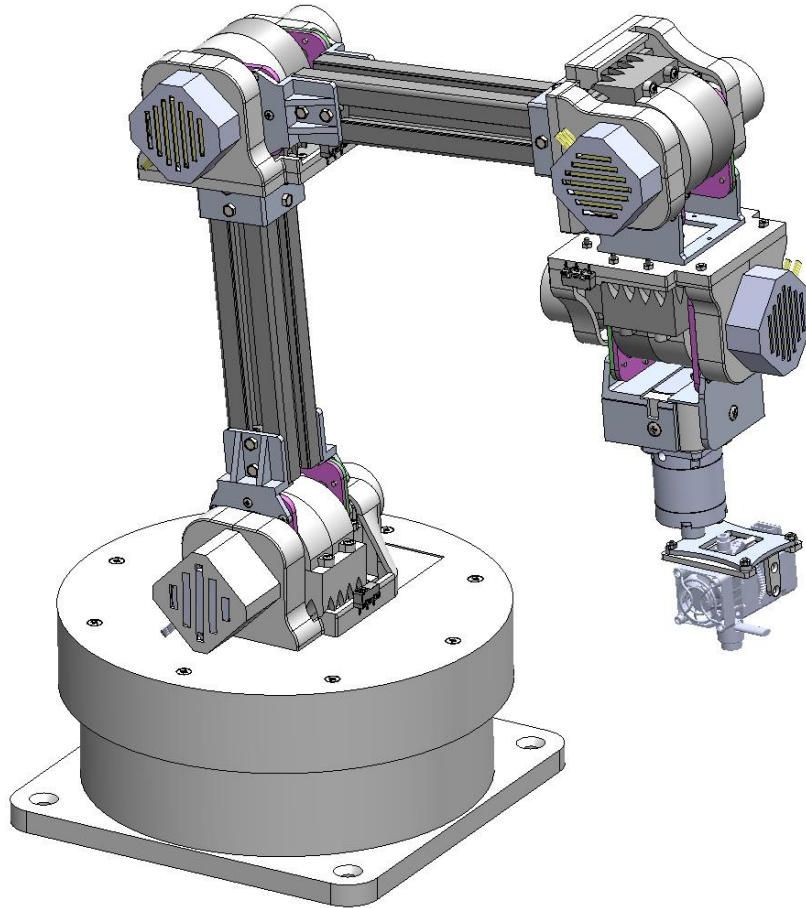


Figura 3.68 – Configuração final do braço robótico.

3.7.2 Esquema da cablagem e filamento

Para garantir o correto funcionamento do robô e da extrusora, é necessário definir uma solução eficiente para a passagem dos cabos elétricos e do filamento de impressão. A passagem dos cabos será feita majoritariamente pelo interior da estrutura do robô, minimizando interferências externas e protegendo-os de possíveis danos. Estes sairão pela base giratória, onde serão direcionados para a fonte de alimentação e sistemas de controlo. Relativamente ao filamento de impressão, este será guiado por um percurso externo ao longo do braço do robô, entrando diretamente na extrusora. O rolo de filamento estará fixo num suporte localizado junto ao robô, permitindo que a extrusora puxe e desenrole o material conforme necessário durante o processo de impressão. A Figura 3.69 apresenta um esquema ilustrativo desta solução.

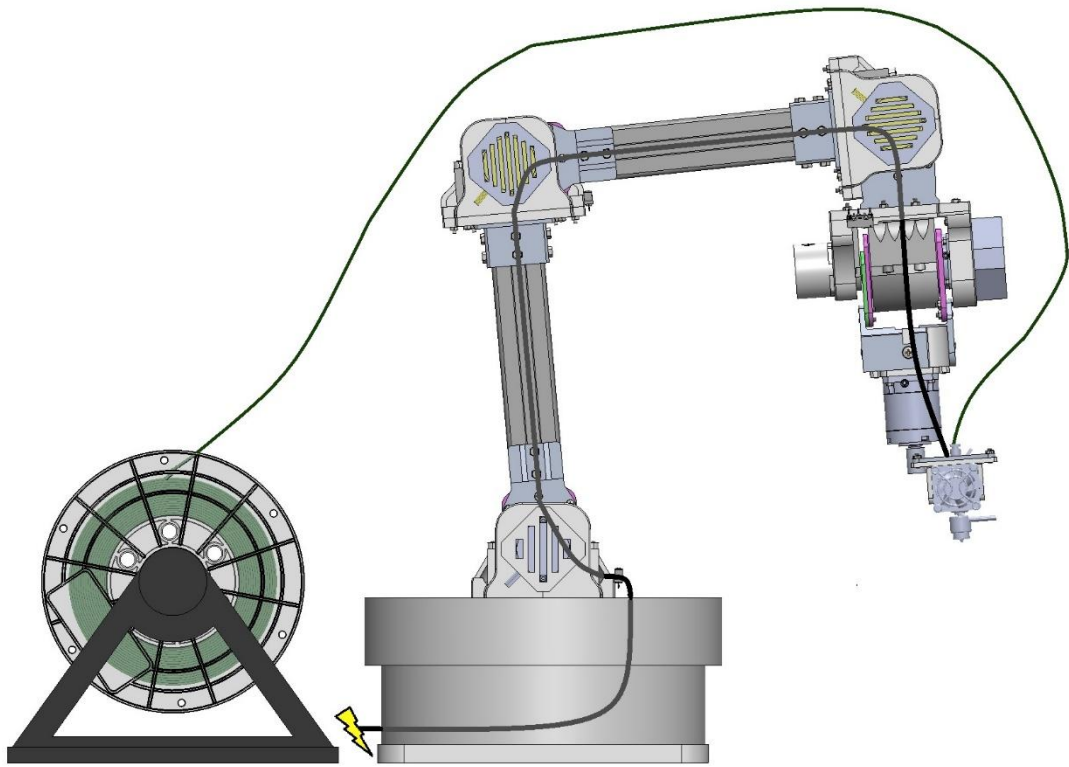


Figura 3.69 – Esquema da cablagem e da alimentação da extrusora.

4 Simulações de verificação

4.1 Importância da realização de simulações e requisitos a cumprir

A realização de simulações de verificação antes da construção física do robô permite validar o modelo desenvolvido, antecipando potenciais problemas de desempenho e falhas estruturais, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento. No contexto deste projeto, as simulações são fundamentais para verificar se os motores fornecem o binário necessário, avaliar a resistência mecânica das peças e validar a precisão do movimento da extrusora.

Além da importância das simulações, é essencial garantir que o modelo cumpre os requisitos do projeto. Neste caso, o robô foi concebido para imprimir dentro de um volume de 200x200x200 mm, com uma velocidade de impressão de 50 mm/s e uma precisão de $\pm 0,05$ mm.

Para assegurar o cumprimento destes requisitos, foram realizadas simulações utilizando o SOLIDWORKS, cujos resultados são apresentados no subcapítulo seguinte. Estas simulações permitiram verificar a capacidade do robô de operar dentro do volume de impressão definido, avaliar se os motores selecionados fornecem o binário necessário para o movimento e que a velocidade de impressão especificada pode ser alcançada, bem como analisar a precisão obtida.

4.2 Simulações de verificação realizadas

4.2.1 Validação do volume de impressão

Antes de se avaliarem os restantes requisitos do projeto, iniciou-se a verificação da viabilidade do volume de impressão definido. Através da movimentação do robô, verificou-se que este consegue operar com segurança dentro de um volume de impressão de 200x200x200 mm. Na Figura 4.1, são apresentadas as suas posições extremas dentro desse volume. As posições 1 e 2 (Figura 4.1a) e as posições 3 e 4 (Figura 4.1b) correspondem às posições limite na base do volume de impressão,

enquanto as posições 5 e 6 (Figura 4.1c) e as posições 7 e 8 (Figura 4.1d) são as posições extremas no topo desse mesmo volume.

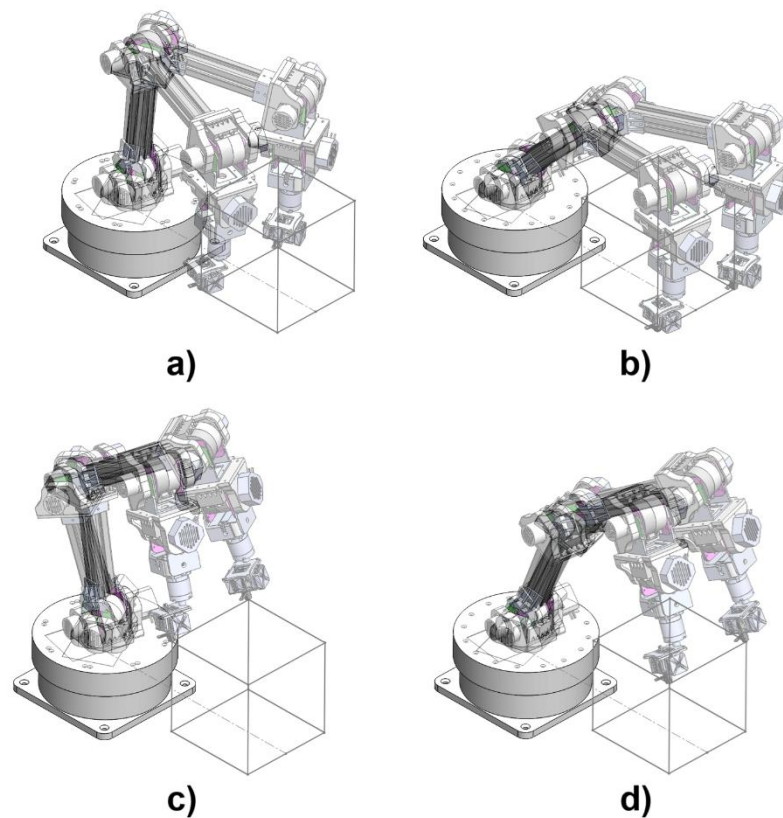


Figura 4.1 – Posições limite do volume de trabalho de 200x200x200 mm: a) Posições 1 e 2; b) Posições 3 e 4; c) Posições 5 e 6; d) Posições 7 e 8.

4.2.2 Estudos dinâmicos

Para avaliar o binário necessário nos motores do robô, foram realizados estudos dinâmicos considerando a sua movimentação ao longo de uma trajetória. Esta trajetória consistiu num retângulo de 200×100 mm traçado num plano horizontal, ao longo do qual a ponta da extrusora se deslocaria a uma velocidade de 50 mm/s (indo assim ao encontro dos requisitos do projeto).

O primeiro passo deste estudo foi a definição da trajetória. Para isso, foi desenhado um *sketch* com o formato retangular, e o robô foi posicionado sucessivamente nos quatro vértices do retângulo (Figura 4.2).

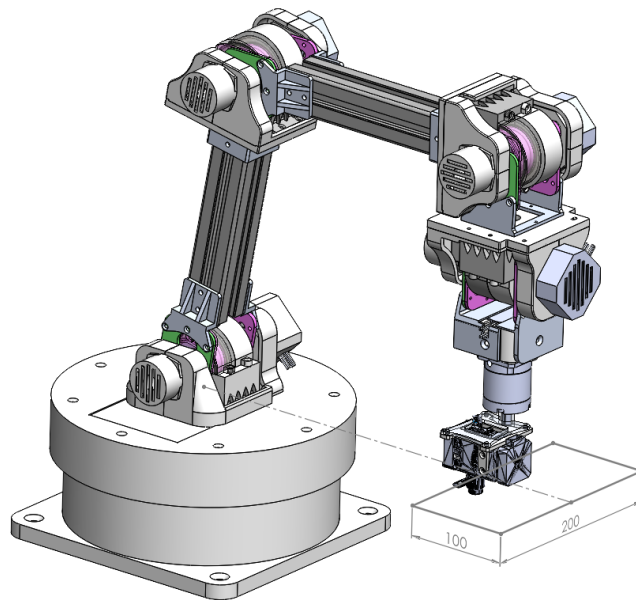


Figura 4.2 – Trajetória utilizada no teste dinâmico de verificação dos motores selecionados.

Em cada uma destas posições, mediram-se os ângulos de rotação correspondentes nos veios de saída das caixas de velocidade de cada junta. Com base nestes ângulos, foi criado um estudo no *SOLIDWORKS Motion*, onde foram aplicados motores rotativos nos veios, ajustando-se os tempos de transição entre cada posição de modo a garantir que a velocidade era a pretendida. A trajetória realizada pela ponta da extrusora nos estudos dinâmicos realizados surge apresentada a preto na Figura 4.3.

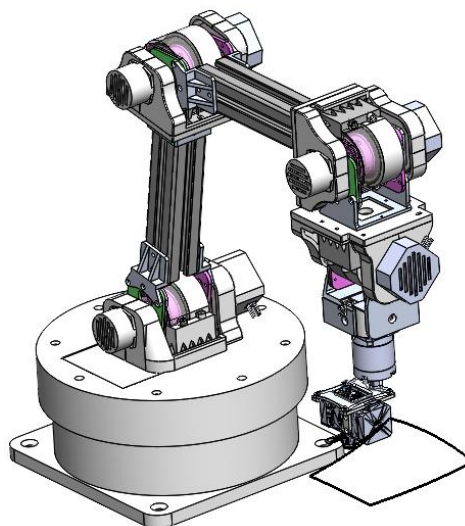


Figura 4.3 – Trajetória realizada nos estudos dinâmicos realizados.

Foram conduzidos dois estudos distintos, recorrendo a diferentes tipos de motores. No primeiro, utilizaram-se motores do tipo *Data Points*, que geram um movimento mais suave, evitando mudanças bruscas de direção, fazendo com que o robô, à medida que se aproxima de cada ponto da trajetória, reduza ligeiramente a velocidade e realize uma curva em vez de realizar uma mudança abrupta de direção. Os gráficos da evolução do

binário das juntas 1, 2 e 3 ao longo do tempo surgem apresentadas na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6, respetivamente.

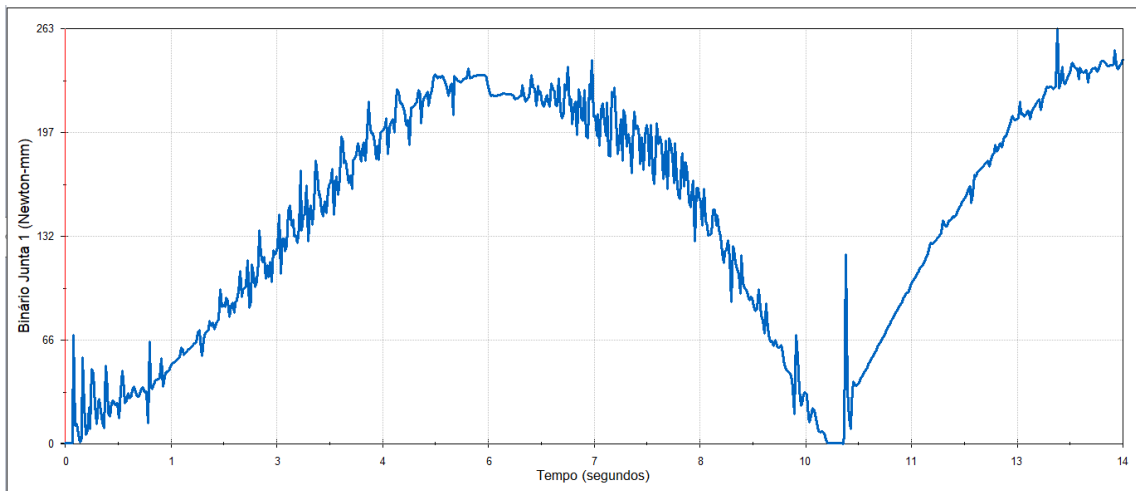


Figura 4.4 – Gráfico da variação do binário da junta 1, utilizando motores do tipo *Data Points*.

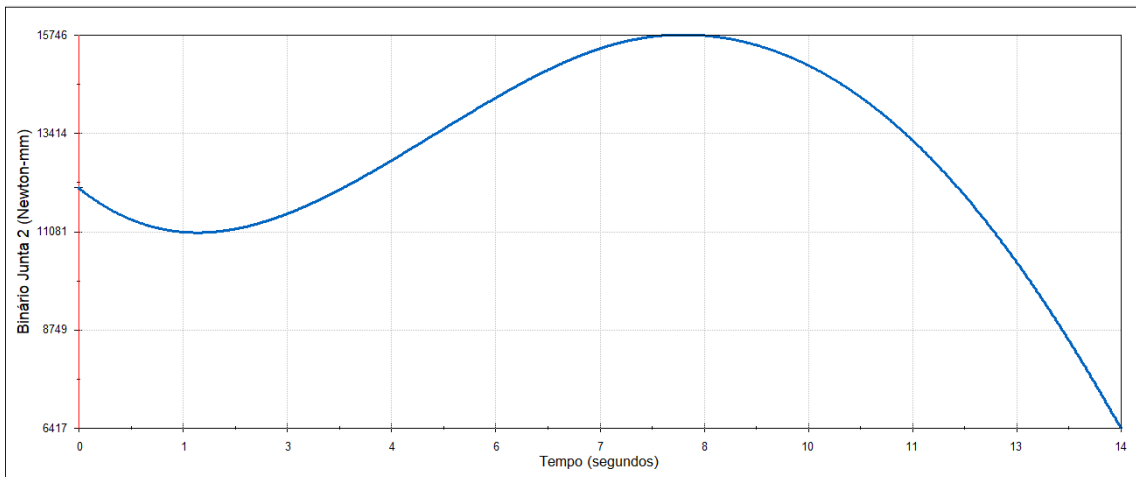


Figura 4.5 – Gráfico da variação do binário da junta 2, utilizando motores do tipo *Data Points*.

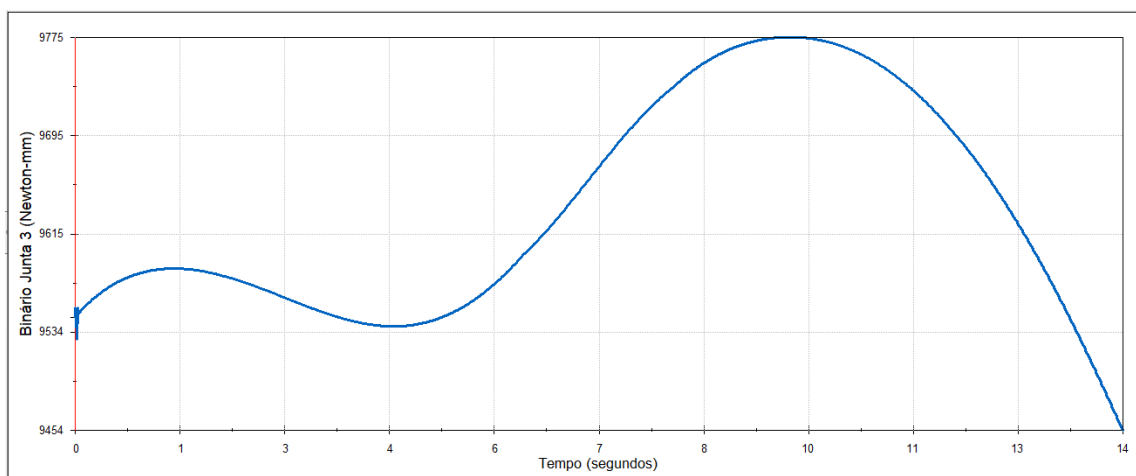


Figura 4.6 – Gráfico da variação do binário da junta 3, utilizando motores do tipo *Data Points*.

Os gráficos da evolução do binário das juntas que compõem o punho (juntas 4, 5 e 6) ao longo do tempo surgem na Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9.

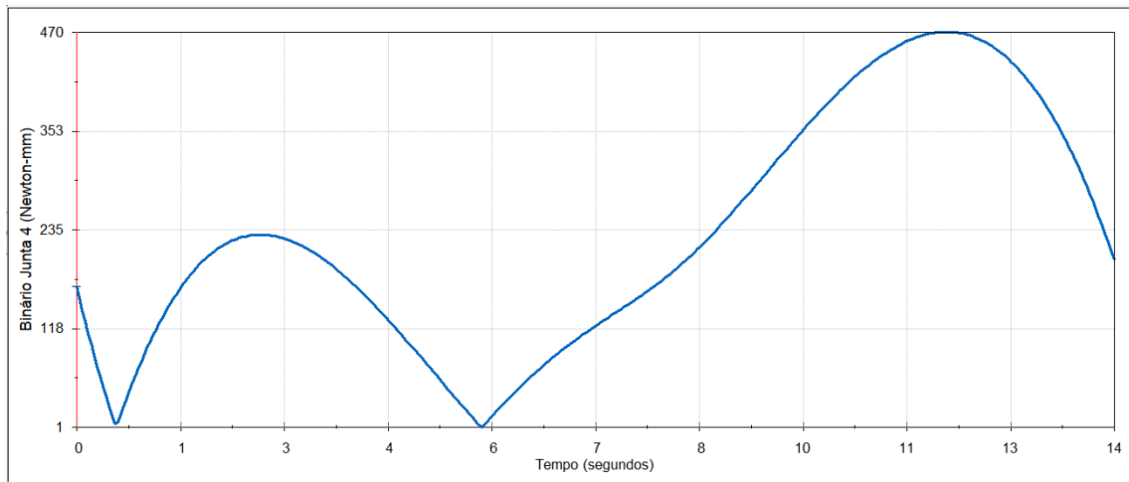


Figura 4.7 – Gráfico da variação do binário da junta 4, utilizando motores do tipo *Data Points*.

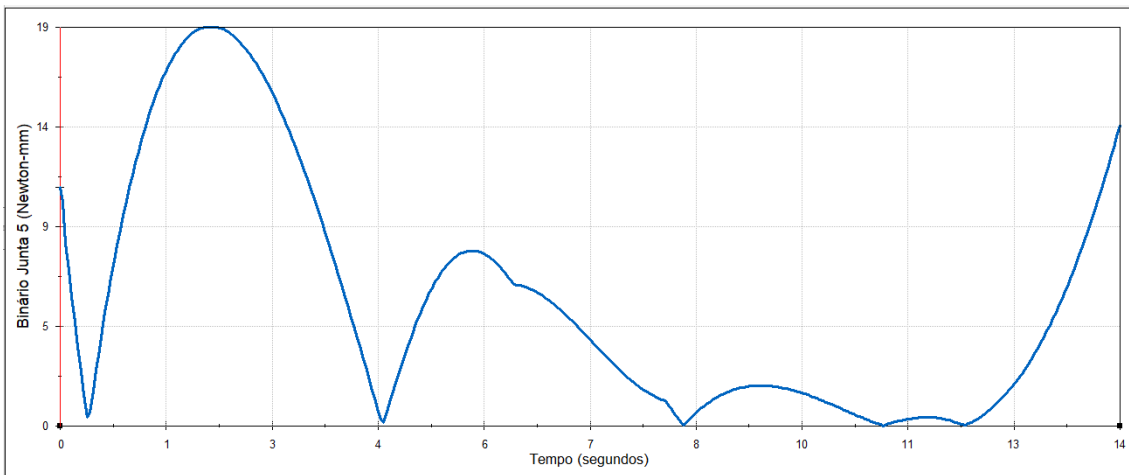


Figura 4.8 – Gráfico da variação do binário da junta 5, utilizando motores do tipo *Data Points*.

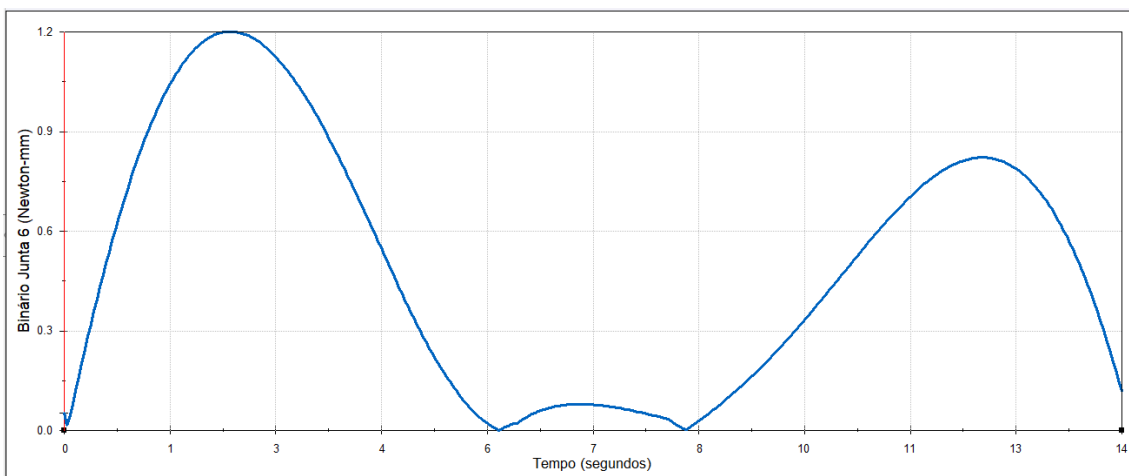


Figura 4.9 – Gráfico da variação do binário da junta 6, utilizando motores do tipo *Data Points*.

A partir da leitura dos gráficos, foram recolhidos os valores mais altos de binário para cada junta. Estes valores estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores do binário máximo (em N·mm) de cada junta, obtidos do estudo dinâmico utilizando motores do tipo *Data Points*.

| Junta | Binário máximo (N·mm) |
|---------|-----------------------|
| Junta 1 | 263 |
| Junta 2 | 15746 |
| Junta 3 | 9775 |
| Junta 4 | 470 |
| Junta 5 | 19 |
| Junta 6 | 1,2 |

No segundo estudo, usaram-se motores do tipo *Segments*, onde o movimento se aproxima mais da realidade de uma extrusora, garantindo que as mudanças de direção ocorrem de forma mais abrupta, tornando este cenário mais exigente em termos dinâmicos. Na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 surgem os gráficos da variação do binário das juntas 1, 2 e 3, respetivamente, ao longo do tempo.

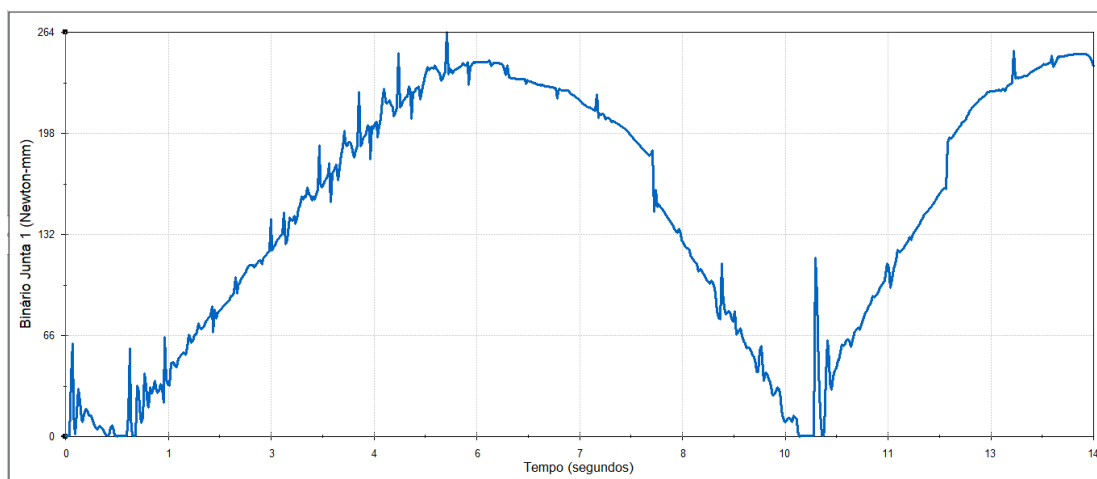


Figura 4.10 – Gráfico da variação do binário da junta 1, utilizando motores do tipo *Segments*.

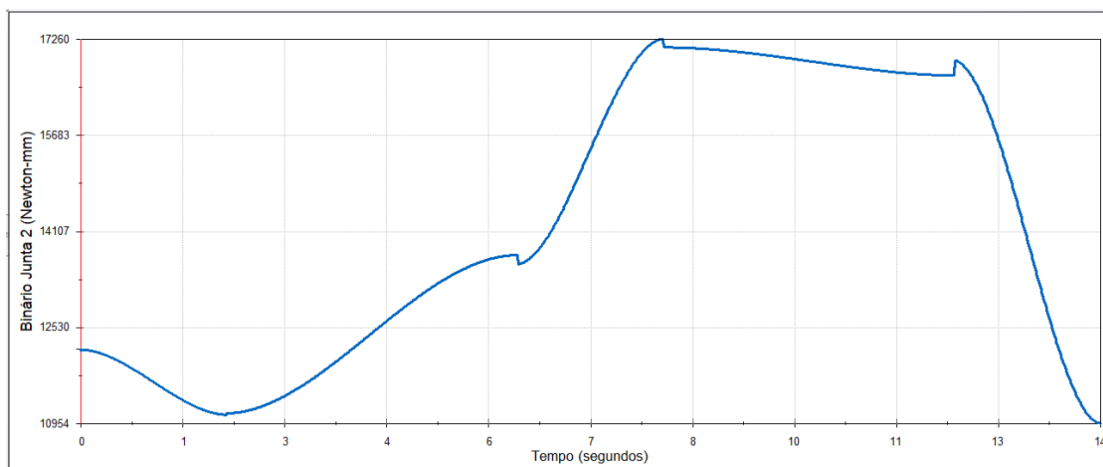


Figura 4.11 – Gráfico da variação do binário da junta 2, utilizando motores do tipo *Segments*.

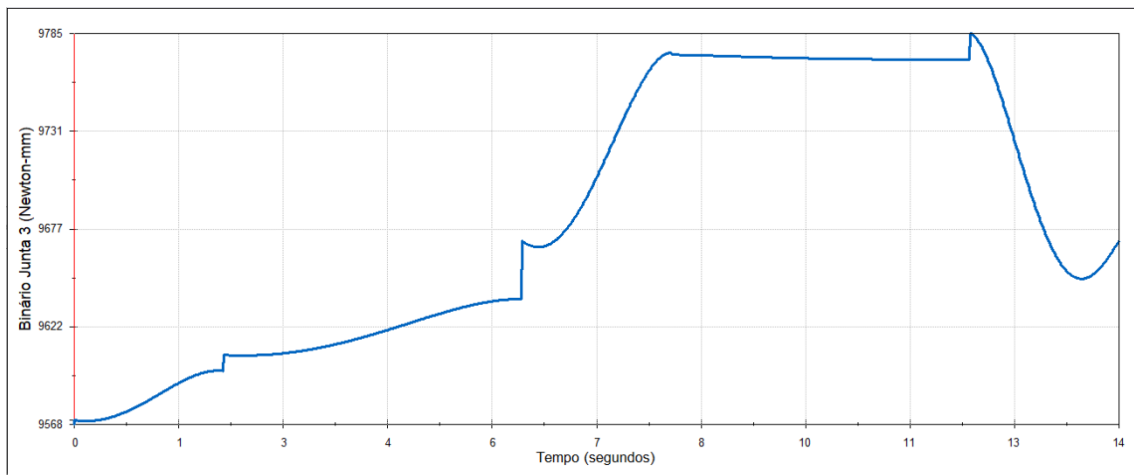


Figura 4.12 – Gráfico da variação do binário da junta 3, utilizando motores do tipo *Segments*.

Os gráficos da evolução do binário das juntas 4, 5 e 6 ao longo do tempo surgem na Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, respetivamente.

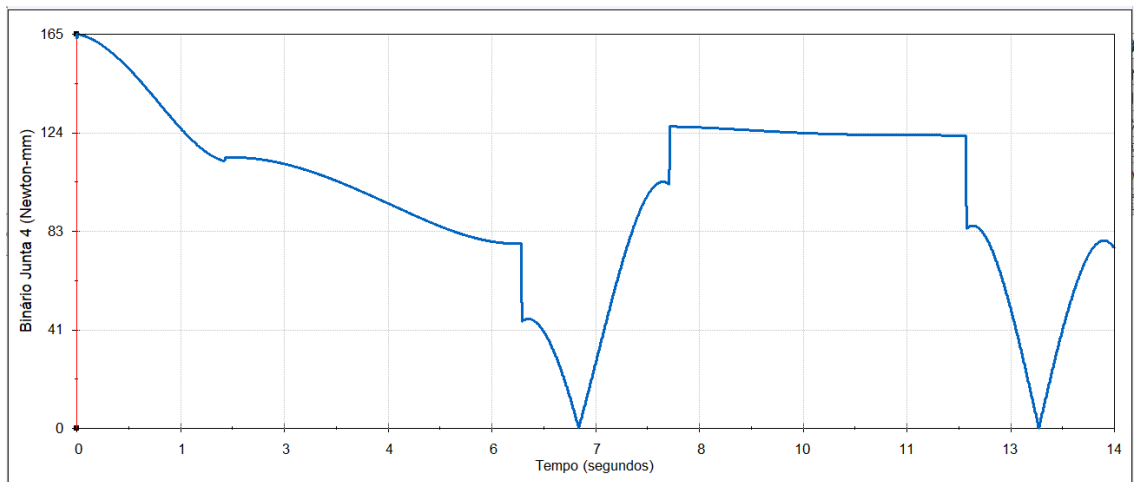


Figura 4.13 – Gráfico da variação do binário da junta 4, utilizando motores do tipo *Segments*.

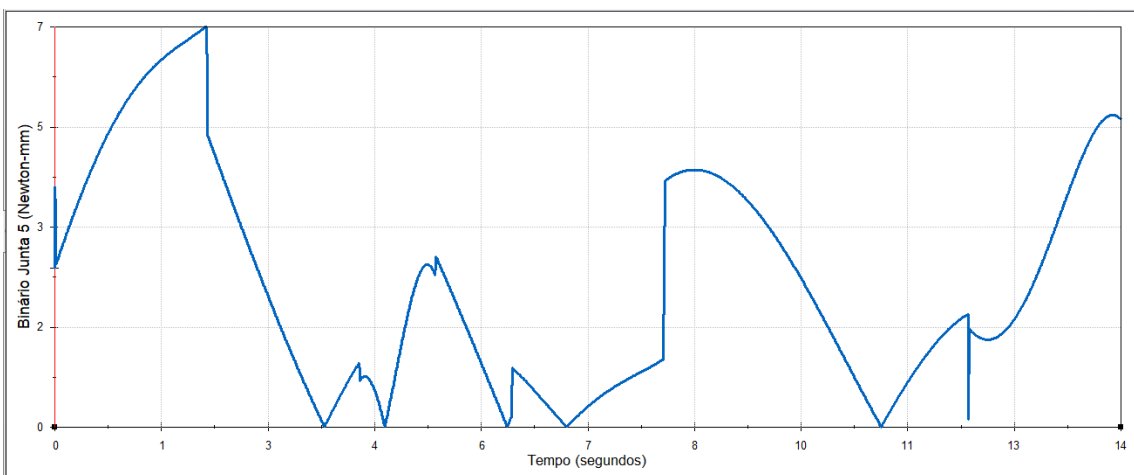


Figura 4.14 – Gráfico da variação do binário da junta 5, utilizando motores do tipo *Segments*.

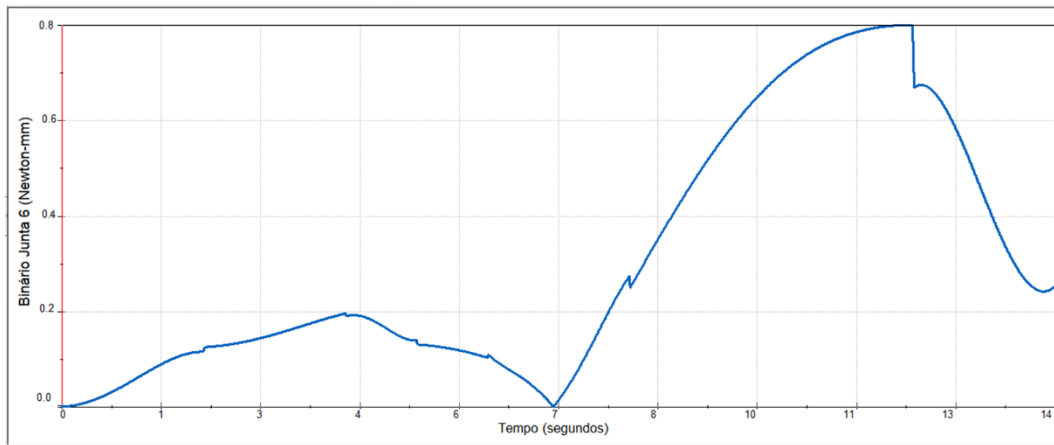


Figura 4.15 – Gráfico da variação do binário da junta 6, utilizando motores do tipo *Segments*.

A partir da leitura dos gráficos, foram recolhidos os valores mais altos de binário para cada junta. Estes valores estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores do binário máximo (em N·mm) de cada junta, obtidos do estudo dinâmico utilizando motores do tipo *Segments*.

| Junta | Binário máximo (N·mm) |
|---------|-----------------------|
| Junta 1 | 264 |
| Junta 2 | 17260 |
| Junta 3 | 9785 |
| Junta 4 | 165 |
| Junta 5 | 7 |
| Junta 6 | 0,8 |

Para além disto, foram realizados mais dois estudos dinâmicos para complementar as verificações ao modelo em movimento. Primeiramente realizou-se um estudo onde foi aumentada a velocidade de impressão para 200 mm/s (quatro vezes superior à velocidade definida nos requisitos de projeto), por forma a verificar se o robô seria capaz de operar a velocidades consideravelmente mais elevadas. Os gráficos da evolução do binário com o tempo das juntas 2 e 3 estão apresentados na Figura 4.16 e Figura 4.17.

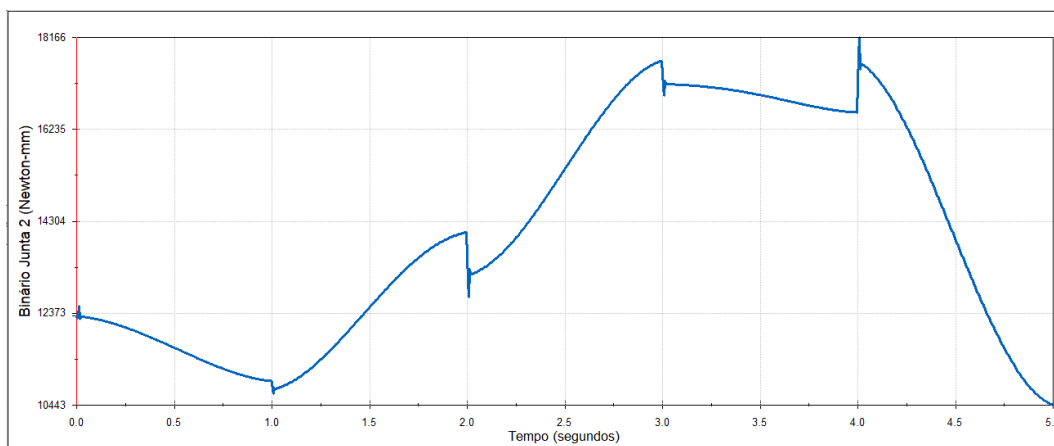


Figura 4.16 – Gráfico da variação do binário da junta 2, para uma velocidade de 200 mm/s.

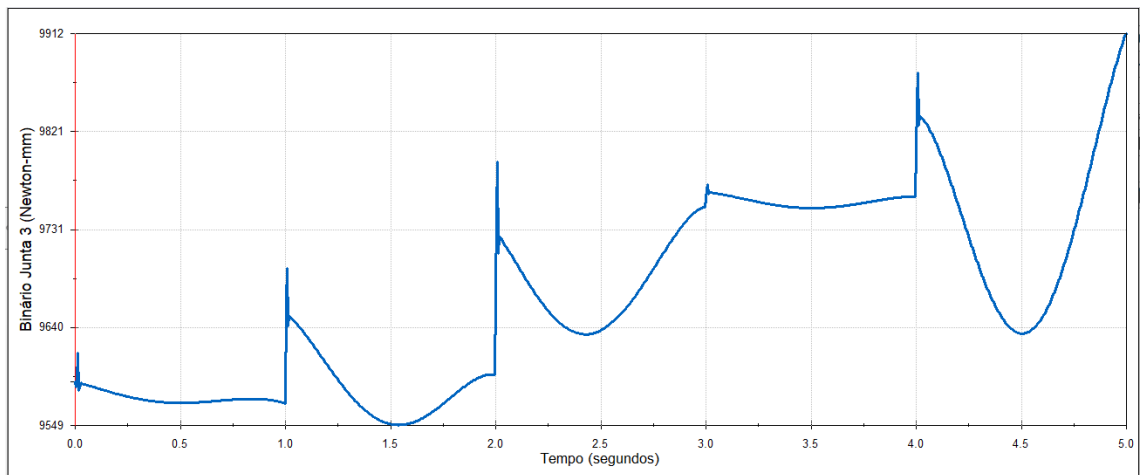


Figura 4.17 – Gráfico da variação do binário da junta 3, para uma velocidade de 200 mm/s.

Já o segundo estudo dinâmico complementar consistiu na movimentação do robô ao longo do plano zy, partindo da mesma posição inicial dos estudos anteriores. Durante o movimento, o robô deslocou-se até atingir uma configuração completamente horizontal (Figura 4.18) retornando posteriormente à posição inicial. Durante toda a trajetória, as juntas responsáveis pelo punho permaneceram orientadas na vertical. Esta corresponde à posição de funcionamento mais exigente, pelo que se considerou importante a sua análise.

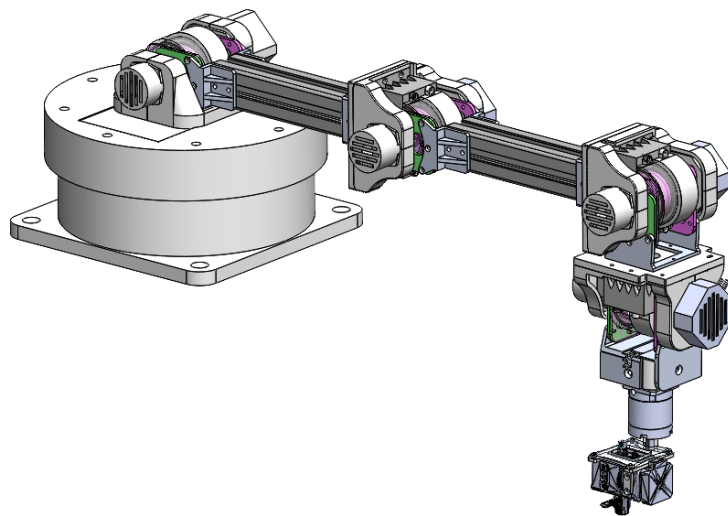


Figura 4.18 – Posição horizontal do robô.

Tendo em conta que o movimento das juntas que compõem o punho se mantém inalterado, bem como o movimento da junta 3 é em tudo semelhante aos estudos anteriores, foram apenas recolhidos os gráficos da evolução do binário com o tempo da junta 2 (Figura 4.19).

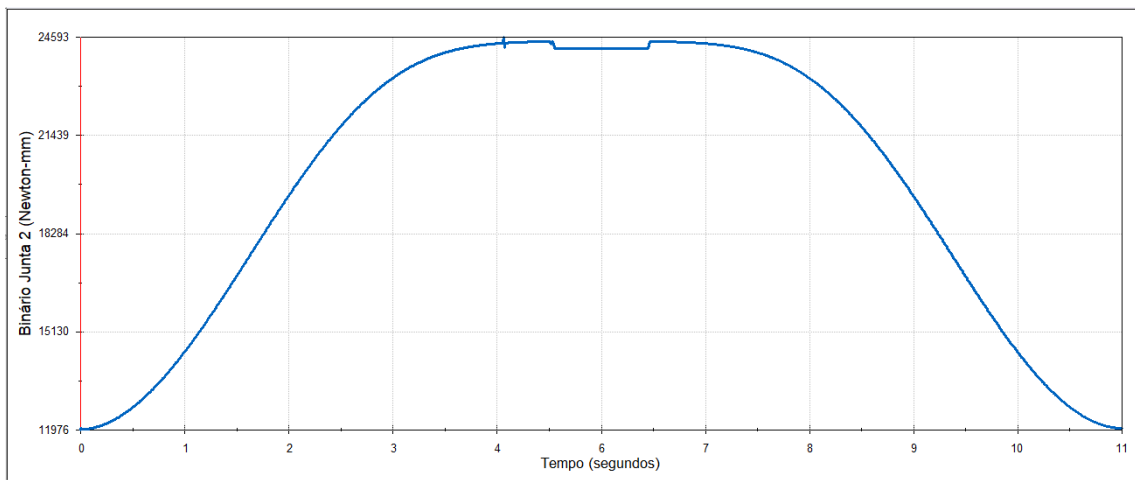


Figura 4.19 – Gráfico da variação do binário da junta 2, para um movimento em que o robô atinge uma posição totalmente horizontal.

Para este estudo, o valor de binário mais alto foi de 24,59 N·m.

4.2.3 Estudo estático

Por fim, após a realização dos estudos dinâmicos no *Motion*, procedeu-se à análise estrutural do robô através de um estudo estático no *SOLIDWORKS Simulation*, com o objetivo de avaliar a precisão do sistema. Para este estudo, o modelo do braço robótico foi simplificado por forma a evitar demasiado peso computacional. Removeram-se os parafusos, porcas, rolamentos e elementos não estruturais como as capas das juntas. Além destes, foi também removida a extrusora, os motores e os travões das juntas, por forma a evitar problemas na criação da malha. Foram também removidas as juntas do punho responsáveis pelo movimento de guinada e de rolamento. As caixas de velocidade, foram consideradas como sendo corpos rígidos, assumindo-se que não sofreriam deformação durante o funcionamento. Já as calhas, foram consideradas como elementos de viga. O modelo utilizado surge apresentado na Figura 4.20.

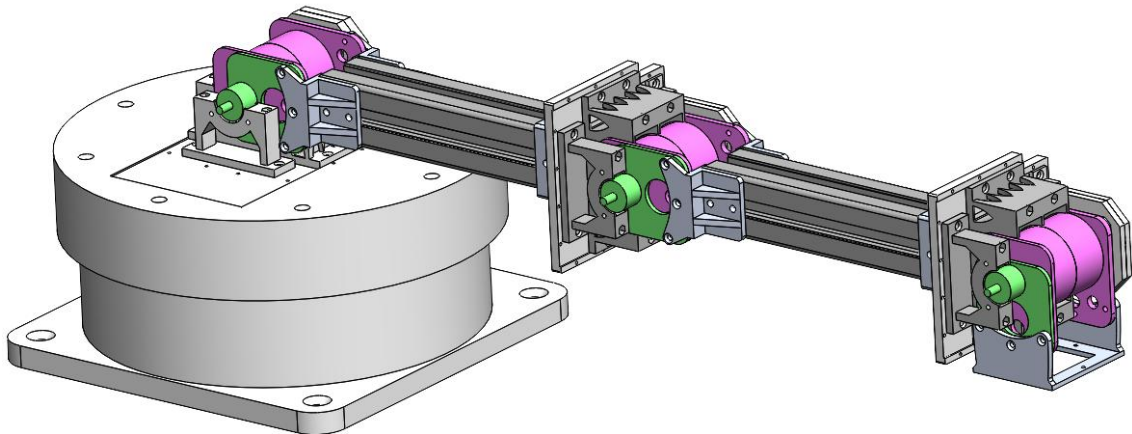


Figura 4.20 – Modelo utilizado para o estudo estático no *SOLIDWORKS Simulation*.

Relativamente a cargas externas aplicadas, os componentes removidos, como os motores, travões e extrusora, bem como os subconjuntos das juntas do punho de guinada e rolamento, foram substituídos por cargas equivalentes. No que toca aos constrangimentos aplicados, foram definidas as condições de “*Immovable*” na parte inferior e furos da base giratória, simulando o constrangimento de não translação quando a base fosse aparafusada no local onde o robô irá operar. Foram também adicionados constrangimentos do tipo “*Fixed Hinge*” aos componentes onde estavam colocados os rolamentos. Por fim, foi também aplicada a força da gravidade, para que fosse considerado o peso próprio do sistema neste estudo. Na Figura 4.21 surgem as cargas e os constrangimentos aplicados ao modelo.

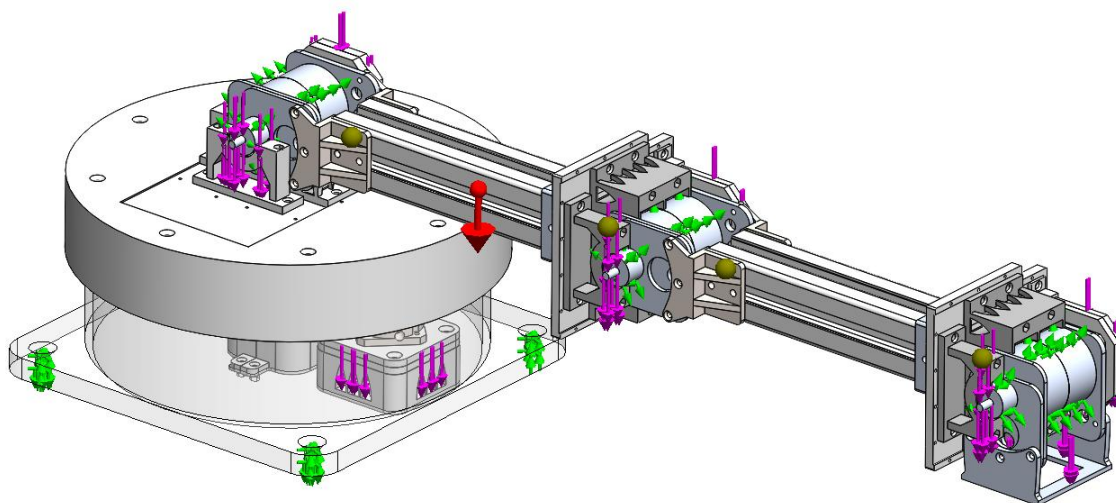


Figura 4.21 – Forças e constrangimentos aplicados ao modelo utilizado para o estudo estático no SOLIDWORKS *Simulation*.

A malha utilizada para este estudo está apresentada na Figura 4.22.

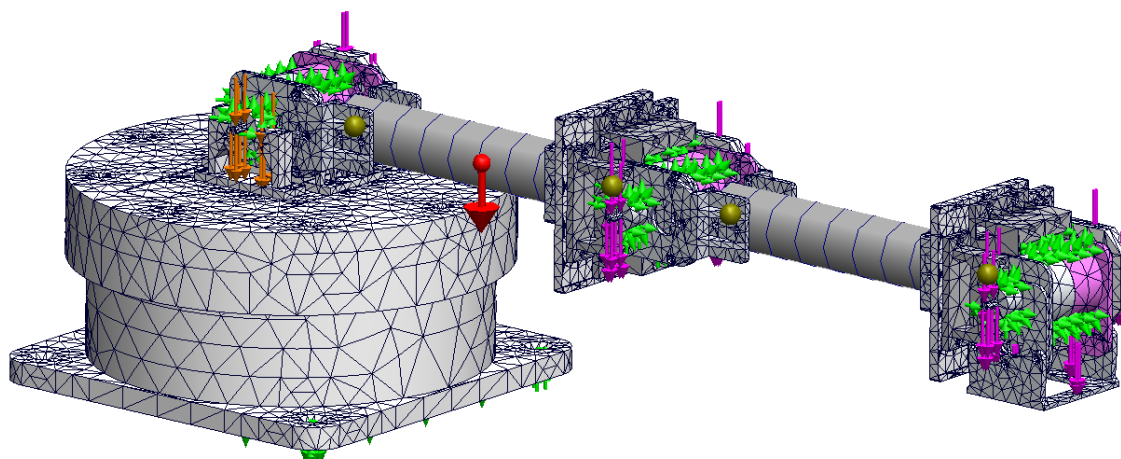


Figura 4.22 – Malha utilizada no estudo estático no SOLIDWORKS *Simulation*.

As características da malha foram recolhidas através dos detalhes fornecidos pelo SOLIDWORKS, e surgem apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características da malha utilizada para o estudo estático no SOLIDWORKS *Simulation*.

| Características | Configuração |
|------------------------------|-----------------------------|
| Tipo de malha | Malha mista |
| <i>Mesher</i> | <i>Curvature-based mesh</i> |
| Número de nós | 226848 |
| Número de elementos | 120178 |
| Tamanho máximo dos elementos | 31,1058 mm |
| Tamanho mínimo dos elementos | 6,2212 mm |
| Pontos Jacobianos | 16 |

Com estes parâmetros todos definidos, foi então possível correr a simulação. Os resultados a analisar por forma a verificar se a precisão definida nos pressupostos do projeto era cumprida foram os resultados da deformação ao longo do eixo vertical (neste caso, o eixo y do SOLIDWORKS). O diagrama com gradiente de cores surge apresentado na Figura 4.23.

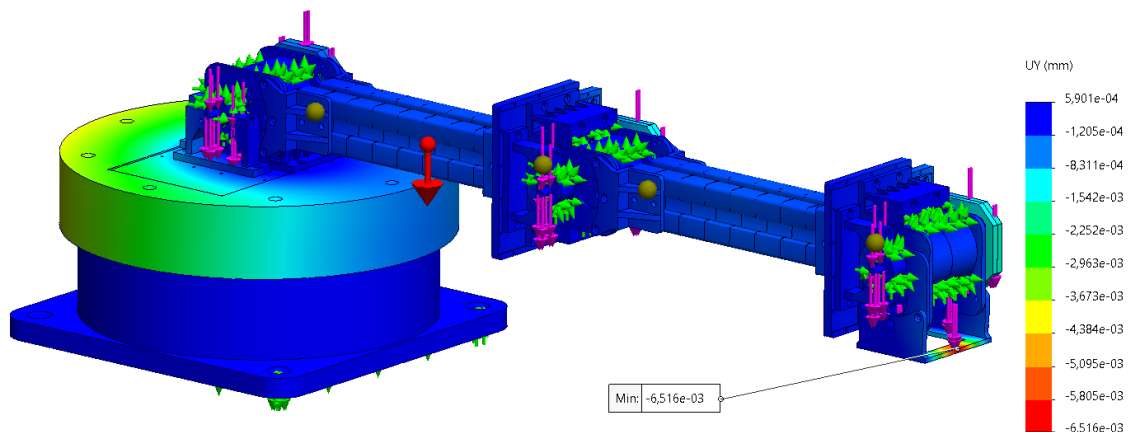


Figura 4.23 – Diagrama de cores da deformação vertical, obtido através do estudo estático no SOLIDWORKS *Simulation*.

Através da análise do gráfico, é possível verificar que o valor de deformação máxima (em absoluto) é de $6,5 \times 10^{-3}$ mm.

4.3 Análise dos resultados obtidos

4.3.1 Contextualização das análises realizadas

Após a realização das simulações e a obtenção dos respetivos resultados, procede-se agora à sua análise, comparando-os com os requisitos inicialmente estabelecidos para o projeto. Esta comparação permitirá verificar se o robô cumpre os objetivos definidos em termos de desempenho dinâmico, precisão e resistência estrutural. Inicialmente, serão analisados os resultados dos estudos dinâmicos, avaliando aspetos como o binário necessário nos motores e a capacidade de atingir a velocidade de impressão

estipulada. Por fim, será analisado o estudo estático, de forma a avaliar a rigidez da estrutura e a sua influência na precisão do sistema.

4.3.2 Análise dos resultados dos estudos dinâmicos

A análise dos resultados obtidos nos estudos dinâmicos permite verificar se os binários máximos registados em cada junta do robô estão dentro dos limites dos conjuntos de motor e CV projetados. Considerando a trajetória principal estudada, em que a extrusora se desloca a uma velocidade de 50 mm/s ao longo de um retângulo de 200×100 mm, observa-se que os valores máximos de binário medidos em cada junta se encontram abaixo das capacidades dos respetivos motores.

Os resultados obtidos foram muito semelhantes para os dois tipos de motores, sendo que para o caso 1 verificam-se curvas mais suaves, enquanto para o caso 2 é possível perceber a existência de mudanças mais bruscas no binário quando ocorre a mudança de direção.

No primeiro estudo, utilizando motores do tipo *Data Points*, a junta 1 registou um binário máximo de 0,263 N·m, um valor significativamente inferior ao limite de 2 N·m. A junta 2 solicitava um binário máximo de 15,746 N·m, consideravelmente inferior ao limite de 30 N·m. Já na junta 3, o binário máximo foi de 9,775 N·m, estando igualmente abaixo do seu limite de 11 N·m. As juntas 4, 5 e 6 apresentaram binários ainda mais reduzidos, com valores máximos respetivamente de 0,470 N·m, 0,019 N·m e 0,0012 N·m, bastante inferiores à capacidade máxima de 2 N·m. Os valores obtidos e respetivos valores limite surgem listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados obtidos no estudo dinâmico 1 e os valores limite definidos.

| Junta | Binário limite projetado (N·mm) | Binário máximo do estudo 1 (N·mm) |
|---------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Junta 1 | 2000 | 263 |
| Junta 2 | 30000 | 15746 |
| Junta 3 | 11000 | 9775 |
| Junta 4 | 2000 | 470 |
| Junta 5 | 2000 | 19 |
| Junta 6 | 2000 | 1,2 |

No segundo estudo, em que se utilizaram motores do tipo *Segments* para simular um movimento mais abrupto e exigente, os valores obtidos foram ligeiramente superiores, mas ainda dentro dos limites admissíveis. Comparativamente ao estudo 1, o binário máximo da junta 1 manteve-se praticamente constante, mantendo também uma margem de segurança considerável para o limite admitido. O binário máximo na junta 2 aumentou para 17,26 N·m e na junta 3 para 9,785 N·m. As juntas do punho mantiveram

valores baixos, com um binário máximo de 0,165 N·m na junta 4, 0,007 N·m na junta 5 e 0,0008 N·m na junta 6. Na Tabela 4.5 estão apresentados os valores limite e os valores obtidos no estudo.

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados obtidos no estudo dinâmico 2 e os valores limite definidos.

| Junta | Binário limite projetado (N·mm) | Binário máximo do estudo 2 (N·mm) |
|---------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Junta 1 | 2000 | 264 |
| Junta 2 | 30000 | 17260 |
| Junta 3 | 11000 | 9785 |
| Junta 4 | 2000 | 165 |
| Junta 5 | 2000 | 7 |
| Junta 6 | 2000 | 0,8 |

Os resultados indicam que, mesmo considerando um cenário mais exigente, todas as juntas operam com margens de segurança em relação ao binário máximo suportado pelos motores.

Na junta da base giratória, os gráficos revelam oscilações devido ao contacto entre os dentes das engrenagens. Os valores de binário registados são relativamente baixos, uma vez que a disposição vertical do motor e da caixa de velocidades elimina a existência de um braço que geraria um binário adicional durante o movimento. Assim, a junta 1 atua apenas contra a inércia do braço, sendo necessário superar essa inércia e os atritos resultantes do funcionamento das engrenagens.

Nas juntas do punho era expectável que os valores fossem consideravelmente inferiores, uma vez que a carga suportada é gradualmente inferior e a movimentação imposta por cada junta é também bastante reduzida. Estas juntas têm inclusive uma margem de segurança elevada, principalmente as juntas de guinada e rolamento, pelo que seria viável um redimensionamento utilizando caixas de velocidades menos potentes (e conseqüentemente menos dispendiosas e pesadas).

Relativamente aos valores obtidos para a junta 2, de acordo com a sua posição, era previsível que fosse a junta mais solicitada. É esta junta que ficará encarregue de suportar o braço robótico propriamente dito, e, portanto, a carga a suportar e movimentar é muito superior às restantes juntas. Comparando também os resultados obtidos para os estudos 1 e 2, apesar da mudança do tipo de motor utilizado, era expectável que os valores não fossem muito diferentes, uma vez que as diferenças na trajetória realizada são mínimas. Ainda assim, dado o perfil dos motores *Segments*, era previsível que os valores obtidos fossem ligeiramente superiores para o estudo 2. Além disso, o estudo complementar realizado para uma velocidade de 200 mm/s revelou um aumento do binário máximo para 24,59 N·m, ainda assim abaixo do seu limite de 30 N·m.

Quanto à junta 3, correspondente à junta do cotovelo e a primeira a ser projetada, concluiu-se que a decisão de utilizar uma caixa de velocidades superior à considerada necessária nos estudos iniciais foi uma boa decisão. Esta junta necessita de um binário a rondar os 9,8 N·m, valor este que anda bastante perto do limite dos 11 N·m. Olhando às restantes juntas, é esta a que trabalha com menor margem de segurança. Ainda assim, é importante mencionar que foi testada para uma trajetória relativamente desafiante e a operar a velocidades superiores às definidas nos pressupostos de projeto, demonstrando que a junta funciona dentro dos limites admissíveis em todas as condições testadas.

Outro aspeto a considerar nesta análise é a semelhança entre os valores apresentados no programa Simulink e os obtidos nos estudos do SOLIDWORKS. O binário máximo obtidos nos estudos dinâmicos 1 e 2 são da mesma ordem de grandeza dos valores correspondentes obtidos através do Simulink, o que reforça a fiabilidade dos resultados. Esta correspondência permite concluir que os binários solicitados pelas juntas são realistas e dentro do esperado.

Dessa forma, pode-se concluir que os requisitos de projeto foram cumpridos no que diz respeito ao binário necessário para movimentação do robô, garantindo que os motores selecionados são adequados para a aplicação pretendida, mesmo em condições mais exigentes.

4.3.3 Análise dos resultados do estudo estático

A análise dos resultados obtidos no estudo estático permite verificar se a deformação máxima registada no robô está dentro dos limites admissíveis para garantir a precisão definida nos pressupostos de projeto. O principal critério avaliado foi a deslocação vertical máxima da extremidade do braço robótico, uma vez que esta influencia diretamente a precisão do movimento da extrusora e, conseqüentemente, a qualidade das peças impressas.

Através da análise da deformação ao longo do eixo vertical (eixo y do SOLIDWORKS), verificou-se que a deslocação máxima registada foi de 0,006516 mm. Dado que para este estudo foram removidos os parafusos, porcas e rolamentos, é necessário considerar o impacto que estes elementos teriam no comportamento estrutural do modelo. Além disso, a influência da malha nos resultados também deve ser tida em conta, justificando a aplicação de uma margem de segurança. Considerando os efeitos destes dois aspetos, adotou-se um coeficiente de segurança de 2, o que eleva a deformação máxima estimada para, aproximadamente, 0,013 mm. Este valor é ainda assim inferior ao limite de 0,05 mm estabelecido nos pressupostos do projeto, garantindo que o sistema cumpre os requisitos de precisão necessários para a impressão 3D.

Através da análise da distribuição da deformação no diagrama de cores, conclui-se que as maiores deslocamentos ocorrem na extremidade do braço, como seria de esperar, dada a configuração do sistema e a forma como as cargas são aplicadas. No entanto, a magnitude da deformação observada demonstra que a estrutura possui a rigidez adequada, sem apresentar regiões críticas onde a flexão possa comprometer o desempenho.

O uso de vigas para representar as calhas revelou-se uma abordagem eficaz, permitindo a modelação do comportamento estrutural do robô sem comprometer a precisão dos resultados. Além disso, a consideração das caixas de velocidades como corpos rígidos assegurou que os cálculos não eram influenciados por possíveis deformações desses componentes, refletindo assim o impacto real da flexão apenas nos elementos estruturais.

Desta forma, pode-se concluir que o estudo estático confirma que a estrutura do robô é suficientemente rígida para suportar as cargas aplicadas sem comprometer a precisão da extrusora. A flexão máxima do robô está dentro dos limites admissíveis, mesmo tendo sido testado para a pior posição possível (ainda que, na realidade, não vá operar nesta configuração) e aplicado um coeficiente de segurança de 2. Estes resultados validam o dimensionamento do sistema, assegurando que o robô é capaz de operar com a precisão exigida pelo projeto.

5 Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento do projeto mecânico de um sistema de impressão 3D utilizando um braço robótico de 6 eixos. Pretendeu-se criar uma solução acessível e de pequenas dimensões que demonstre a viabilidade da integração entre o fabrico aditivo e a robótica, com possíveis aplicações no contexto educacional e experimental.

Com base nos pressupostos definidos, foi concebida a estrutura mecânica necessária para suportar o sistema de extrusão, garantindo a estabilidade e funcionalidade do conjunto. Além disso, foram considerados aspetos relacionados com a passagem de cabos, permitindo a futura integração de componentes eletrónicos sem comprometer a integridade estrutural do sistema.

A validação do projeto foi realizada através de comparação de resultados e simulações numéricas, tanto estáticas como dinâmicas, que permitiram aferir a viabilidade da solução desenvolvida.

Relativamente aos resultados provenientes dos estudos dinâmicos, verificou-se que o sistema é capaz de operar, não só nas condições definidas nos pressupostos de projeto, como em condições mais exigentes. No contexto da análise estática, concluiu-se que o modelo obtido é capaz de cumprir a precisão definida, mesmo tendo sido testado para a pior posição possível e na qual nunca irá operar.

Os resultados obtidos indicam que o projeto mecânico é adequado para o propósito definido, evidenciando que a utilização de um braço robótico para impressão 3D pode ser implementada de forma acessível. Além disso, a abordagem adotada permitiu compreender melhor os desafios inerentes a este tipo de integração, destacando a importância da robustez estrutural e do correto dimensionamento dos componentes do sistema.

5.2 Trabalho futuro

Após a conclusão deste projeto, existem diversas possibilidades de evolução e aperfeiçoamento que podem ser exploradas em trabalhos futuros, permitindo a otimização da solução proposta.

Uma das principais propostas para trabalho futuro seria o projeto do controlo do robô, envolvendo o desenvolvimento de controladores para os motores e caixas de velocidades, de forma a garantir a movimentação precisa do braço robótico. Além disso, a implementação de estratégias de controlo contribuiria para melhorar a estabilidade e repetibilidade do sistema, assegurando um desempenho fiável durante o processo de impressão. Aliado a isto, era igualmente interessante o desenvolvimento de um *Digital Twin*, utilizando, por exemplo, o Simulink ou o *Mecatronic Design Concept* do NX Siemens, para simular o funcionamento do robô, garantindo que este opera como pretendido, sem que seja necessária a produção do braço robótico para testes reais.

Outra vertente a considerar é o projeto da parte elétrica e eletrónica do robô, envolvendo a seleção e integração de componentes, como *drivers*, sensores e fontes de alimentação. Este desenvolvimento será essencial para a funcionalidade do sistema e para possibilitar a sua integração com o *software* de impressão.

A análise económica do projeto é outra sugestão relevante, uma vez que permitiria avaliar a viabilidade financeira da solução desenvolvida e compará-la com sistemas convencionais de impressão 3D.

Uma das propostas mais importantes para o futuro seria a produção e construção do robô, permitindo a validação experimental da solução projetada.

Considera-se também interessante o projeto de uma garra capaz de acoplar e desacoplar diferentes cabeças de extrusão, permitindo aumentar a versatilidade do sistema.

Outra sugestão seria a colocação do robô produzido numa mesa móvel, permitindo a impressão em vários eixos.

Referências bibliográficas

- AEC: Aluminum Extruders Council. (2024). *Aluminum Extrusion: Features and Benefits*.
<https://Aec.Org/Features-Benefits>.
- Ahangar, P., Cooke, M. E., Weber, M. H., & Rosenzweig, D. H. (2019). Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 8). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/app9081713>
- Ahuja, B., Karg, M., & Schmidt, M. (2015). Additive manufacturing in production: challenges and opportunities. *Laser 3D Manufacturing II*, 9353, 935304.
<https://doi.org/10.1117/12.2082521>
- Al Rashid, A., & Koç, M. (2023). Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste. In *Materials Today Sustainability* (Vol. 24). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100529>
- Alami, A. H., Ghani Olabi, A., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A. (2023). Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals. In *Ain Shams Engineering Journal* (Vol. 14, Issue 11). Ain Shams University.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>
- Alexander, A. E., Wake, N., Chepelev, L., Brantner, P., Ryan, J., & Wang, K. C. (2021). A guideline for 3D printing terminology in biomedical research utilizing ISO/ASTM standards. *3D Printing in Medicine*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s41205-021-00098-5>
- Ali, Z., Sheikh, M. F., Al Rashid, A., Arif, Z. U., Khalid, M. Y., Umer, R., & Koç, M. (2023). Design and development of a low-cost 5-DOF robotic arm for lightweight material handling and sorting applications: A case study for small manufacturing industries of Pakistan. *Results in Engineering*, 19.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101315>
- Al-khazarji, H. A. H., Abdulsada, M. A., & Abduljabbar, R. B. (2020). View of Robust Approach of Optimal Control for DC Motor in Robotic Arm System using Matlab

- Environment. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 10(6), 2231–2236. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.6.8923>
- Ananias, E. (2022). *Braço robótico colaborativo de baixo custo*. Universidade da Beira Interior.
- Aquino Monteiro, S., Scheid, C., Deon, M., & Merib, J. (2023). Fundamentals, recent applications, and perspectives of 3D printing in sample preparation approaches. In *Microchemical Journal* (Vol. 195). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109385>
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- AZO Robotics. (2023, February 10). *A Guide to Robot Joint Design*. <https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=237>.
- Baquero-Suárez, M., & Ramírez Heredia, R. (2013). Kinematics, Dynamics and Evaluation of Energy Consumption for ABB IRB-140 Serial Robots in the Tracking of a Path. *2nd International Congress on Mechatronics Engineering and Automation (CIIMA2013)*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3436.5448>
- Bárány, T., & Rónai, L. (2023). Design and Control of a 3D Printed Robotic Arm. *Acta Mechanica Slovaca*, 27(3), 12–17. <https://doi.org/10.21496/ams.2023.029>
- Barrasa, J. O., Ferrández-Montero, A., Ferrari, B., & Pastor, J. Y. (2021). Characterisation and modelling of pla filaments and evolution with time. *Polymers*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/polym13172899>
- Bartoš, M., Bulej, V., Bohušík, M., Stancek, J., Ivanov, V., & Macek, P. (2021). An overview of robot applications in automotive industry. *Transportation Research Procedia*, 55, 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.052>
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2021). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 1060–1067. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>
- Bhatt, P. M., Kabir, A. M., Peralta, M., Bruck, H. A., & Gupta, S. K. (2019). A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>
- Bhatt, P. M., Malhan, R. K., Shembekar, A. V., Yoon, Y. J., & Gupta, S. K. (2020). Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. In *Additive Manufacturing* (Vol. 31). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100933>
- BIQU Equipment. (n.d.). *BIQU H2 V2S REVO Extruder*. Retrieved December 12, 2024 from <https://biqu.equipment/>

- Bist, A., Dobriyal, R., Gwalwanshi, M., & Avikal, S. (2022). Influence of Layer Height and Print Speed on the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS. *AIP Conference Proceedings*, 2481. <https://doi.org/10.1063/5.0107304>
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., Leary, M., Berto, F., & du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials and Design*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V., & Pipes, R. B. (2018). Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. In *Additive Manufacturing* (Vol. 21, pp. 1–16). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>
- Chattopadhyay, S., Mahapatra, S. D., & Mandal, N. K. (2024). Advancements and challenges in additive manufacturing: a comprehensive review. In *Engineering Research Express* (Vol. 6, Issue 1). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad30b1>
- Chen, S., Gao, H., Zhang, Y., Wu, Q., Gao, Z., & Zhou, X. (2022). Review on residual stresses in metal additive manufacturing: formation mechanisms, parameter dependencies, prediction and control approaches. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2950–2974. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.054>
- Chotikunnan, R., Roongprasert, K., Chotikunnan, P., Imura, P., Sangworasil, M., & Srisiriwat, A. (2023). Robotic Arm Design and Control Using MATLAB/Simulink Article in. *International Journal of Membrane Science and Technology*, 10(3), 2448–2459. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i3.1974>
- Claire, S. (2022). What Are the Robotic Arm 3D Printing Solutions on the Market? In *3D Printing News: 3D Natives*. Retrieved June 25, 2025, from <https://www.3dnatives.com/en/robotic-arms-3d-printing-141020226/>
- Dadkhah, M., Tulliani, J. M., Saboori, A., & Iuliano, L. (2023). Additive manufacturing of ceramics: Advances, challenges, and outlook. In *Journal of the European Ceramic Society* (Vol. 43, Issue 15, pp. 6635–6664). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.033>
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- Dine, A., & Vosniakos, G. C. (2018). On the development of a robot-operated 3D-printer. *Procedia Manufacturing*, 17, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.004>
- Drugă, C., Șerban, I., Braun, B., & Tulică, A. (2021). Analysis of the Influence of the Layer Height on the Strength of 3D Printed Structures. In *11th International Conference on Information Science and Information Literacy* (pp. 177–181). Sciendo. <https://doi.org/10.2478/9788395815065-019>
- Formlabs. (n.d.). *Comparing FDM, SLS, and SLA 3D Printing*. Retrieved March 4, 2024, from <https://formlabs.com/eu/blog/comparing-fdm-sls-sla-3d-printing/>

- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*, *69*, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gardner, L. (2023). Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook. In *Structures* (Vol. 47, pp. 2178–2193). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.039>
- Gil, A. P. A. (2020). *Methodological contribution to generic trajectory generation for additive manufacturing with a robotic manipulator*. Faculdade de Ciência e Tecnologia: Universidade NOVA de Lisboa.
- Gul, J. Z., Sajid, M., Rehman, M. M., Siddiqui, G. U., Shah, I., Kim, K. H., Lee, J. W., & Choi, K. H. (2018). 3D printing for soft robotics—a review. In *Science and Technology of Advanced Materials* (Vol. 19, Issue 1, pp. 243–262). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1431862>
- Hu, L., Wang, Y., Shu, L., Cai, W., Lv, J., & Xu, K. (2023). Energy benchmark for evaluating the energy efficiency of selective laser melting processes. *Applied Thermal Engineering*, *221*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119870>
- Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. (2020). A review of stereolithography: Processes and systems. In *Processes* (Vol. 8, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/PR8091138>
- Hull, C. (1986). *U.S. Patent No. 4,575,330*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ian Gibson, David Rosen, & Brent Stucker. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing* (2nd ed.). Springer.
- Iftekar, S. F., Aabid, A., Amir, A., & Baig, M. (2023). Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym15112519>
- International Federation of Robotics. (2021). *Industrial Robots*. Retrieved from <https://ifr.org/Industrial-Robots>.
- International Organization for Standardization/American Society for Testing and Materials. (2021). *Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021)*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>.
- Jafferson, J. M., & Chatterjee, D. (2021). A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 1349–1365. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.485>
- Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykasli, H., Kaya, A., & Akay, O. (2022). Effect of Printing Speed on FDM 3D-Printed PLA Samples Produced Using Different Two Printers.

- International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 438–448. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1088805>
- Kanishka, K., & Acherjee, B. (2023). Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 107, pp. 574–619). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024>
- Kharat, V. J., Singh, P., Sharath Raju, G., Kumar Yadav, D., Satyanarayana.Gupta, M., Arun, V., Hussein Majeed, A., & Singh, N. (2023). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.033>
- Kumar Panda, S., Charan Rath, K., Mishra, S., & Khang, A. (2023). Revolutionizing product development: The growing importance of 3D printing technology. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.138>
- Lakkala, P., Munnangi, S. R., Bandari, S., & Repka, M. (2023). Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2023.100159>
- Lee, W., & Kuo, S. (2020). Simulation and Control of a Robotic Arm Using MATLAB, Simulink and TwinCAT. *2020 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ARIS50834.2020.9205777>
- Li, K., Huang, W., Guo, H., Liu, Y., Chen, S., Liu, H., & Gu, Q. (2023). Advancements in robotic arm-based 3D bioprinting for biomedical applications. *Life Medicine*, 2(6). <https://doi.org/10.1093/lifemedi/lnad046>
- Lidholm, C.-V., & Runnquist, V. (2021). *Accuracy and Repeatability of a Robotic Arm*. https://www.kth.se/polopoly_fs/1.1078075.1622113235!/gr22rapport2021-02.pdf
- Loganathan, A., & Ahmad, N. S. (2023). A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation. In *Engineering Science and Technology, an International Journal* (Vol. 40). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101343>
- Luu, Q. K., La, H. M., & Ho, V. A. (2021). A 3-Dimensional Printing System Using an Industrial Robotic Arm. *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2021*, 443–448. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF49454.2021.9382645>
- MachineDesign. (2016, December 1). *What's the Difference Between Industrial Robots?* Retrieved from <https://www.Machinedesign.Com/Markets/Robotics/Article/21835000/Whats-the-Difference-between-Industrial-Robots>.
- Madhavadas, V., Srivastava, D., Chadha, U., Aravind Raj, S., Sultan, M. T. H., Shahar, F. S., & Shah, A. U. M. (2022). A review on metal additive manufacturing for

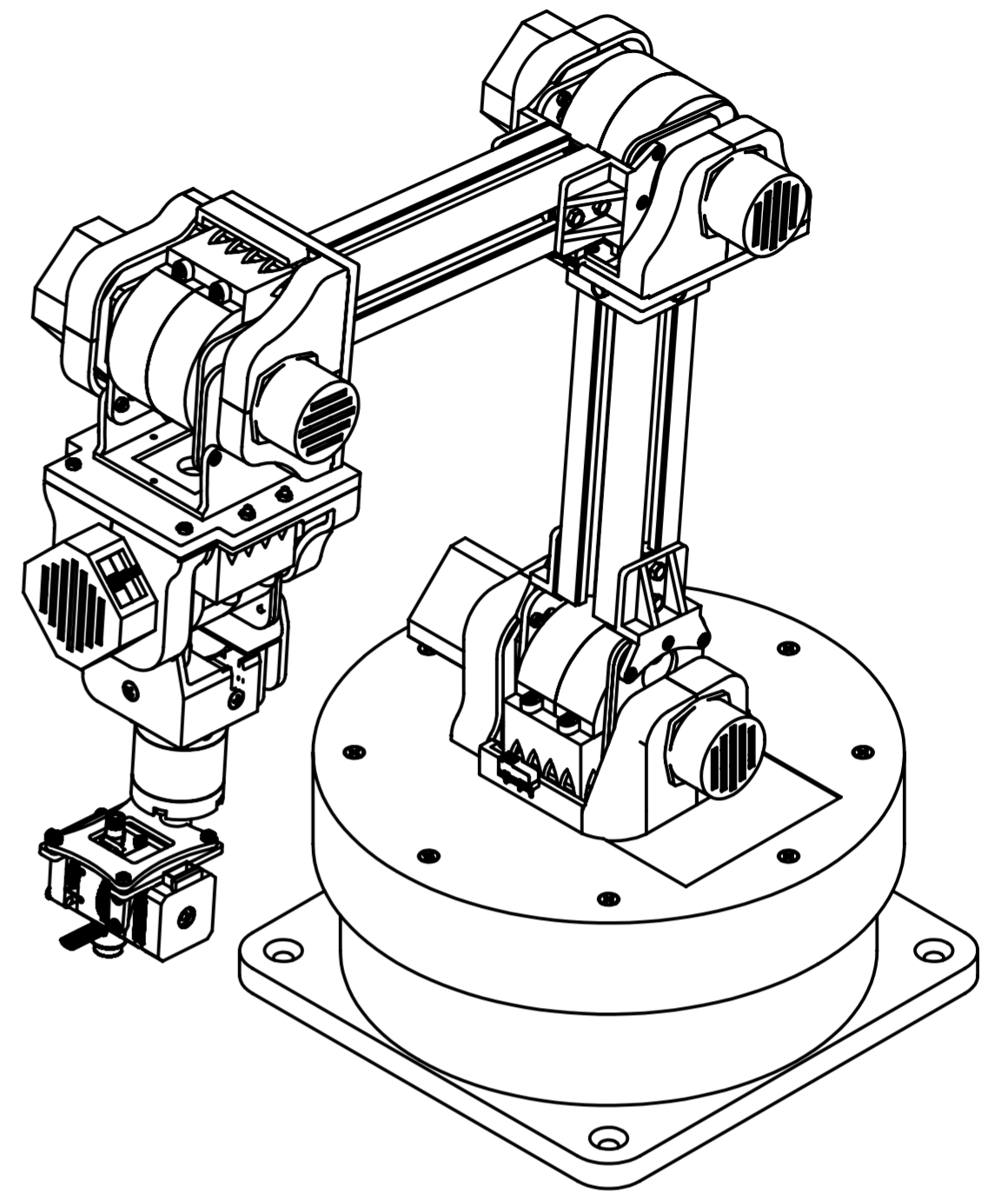
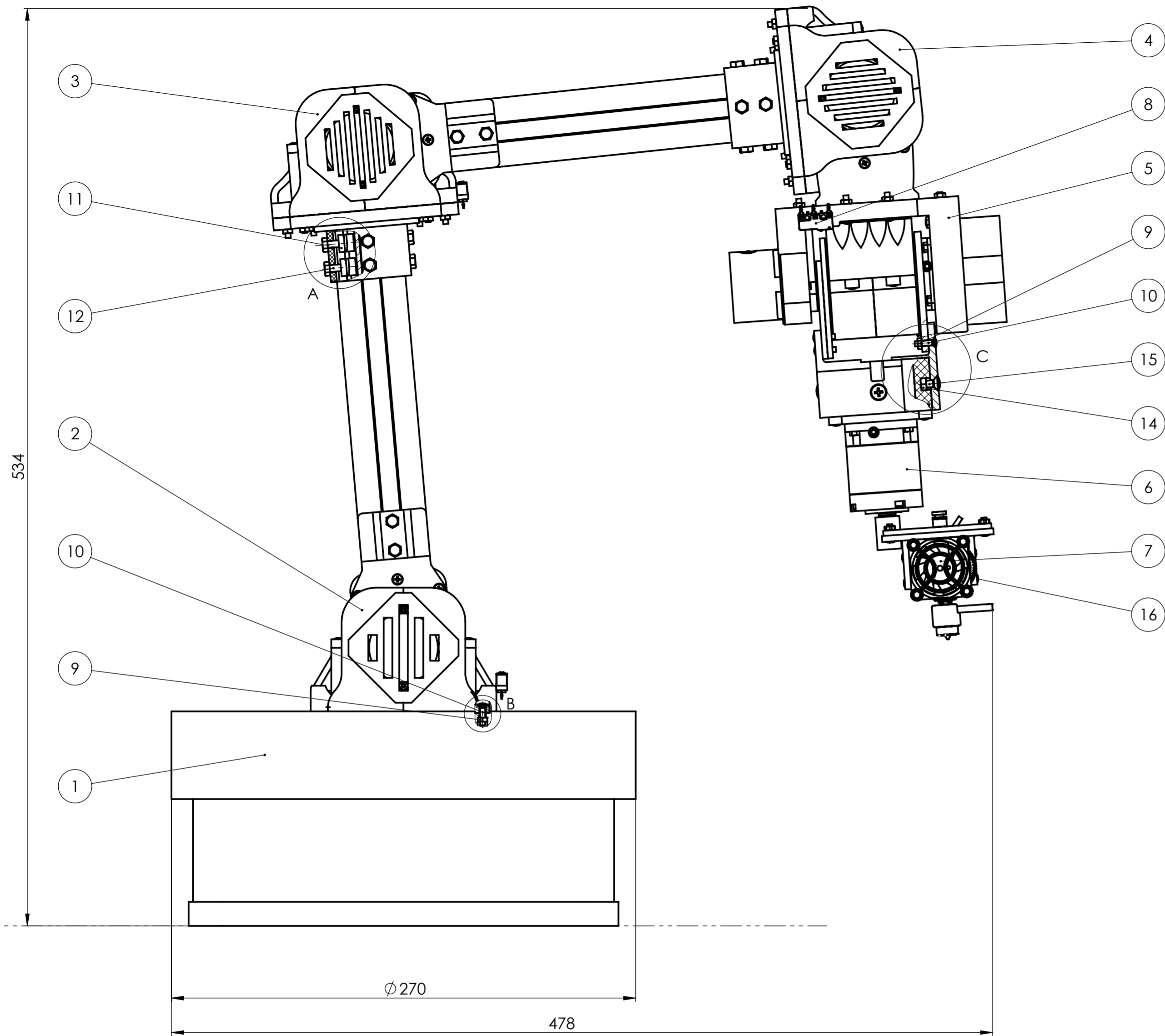
- intricately shaped aerospace components. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (Vol. 39, pp. 18–36). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>
- Pham, H. T., Lim, J. H., & Pham, Q.-C. (2016). Robotic 3D-Printing for building and construction . *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)*, 300–305.
- Pires, J. (2021). *Industrial Robot Based 3D printer*. Instituto Superior Técnico.
- Polonara, M., Romagnoli, A., Biancini, G., & Carbonari, L. (2024). Introduction of Collaborative Robotics in the Production of Automotive Parts: A Case Study. *Machines*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/machines12030196>
- Pratheesh Kumar, S., Elangovan, S., Mohanraj, R., & Ramakrishna, J. R. (2021). Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7907–7920. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.567>
- Praveena, B. A., Lokesh, N., Buradi, A., Santhosh, N., Praveena, B. L., & Vignesh, R. (2022). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1309–1313. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059>
- Rexroth: A Bosch Company. (n.d.). *Profiles and accessories*. Retrieved January 24, 2025, from https://store.boschrexroth.com/Assembly-Technology/Basic-mechanic-elements/Profiles-and-accessories?cclcl=en_GB
- Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. (2021). *polymers Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges*. <https://doi.org/10.3390/polym13>
- Shah, M., Ullah, A., Azher, K., Rehman, A. U., Juan, W., Aktürk, N., Tüfekci, C. S., & Salamci, M. U. (2023). Vat photopolymerization-based 3D printing of polymer nanocomposites: current trends and applications. In *RSC Advances* (Vol. 13, Issue 2, pp. 1456–1496). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2ra06522c>
- Sharan, R. V., & Onwubolu, G. C. (2013). Simulating the Arm Movements of a Stepper Motor Controlled Pick-and-Place Robot Using the Stepper Motor Model. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 60, 59–66. <https://doi.org/10.14257/ijast.2013.60.06>
- Sharma, K. L. S. (2017). Management of Industrial Processes. In *Overview of Industrial Process Automation* (pp. 321–357). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805354-6.00019-0>
- Simas, H., & Di Gregorio, R. (2021). Smooth transition for collision avoidance of redundant robots: An on-line polynomial approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102087>

- Singh, G., & Banga, V. K. (2022). Robots and its types for industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, *60*, 1779–1786. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.426>
- Sljivic, M., Pavlovic, A., Ilic, J., Stanojevic, M., & Todorovic, S. (2017). Comparing the accuracy of professional and consumer grade 3D printers in complex models production. *FME Transactions*, *45*(3), 348–353. <https://doi.org/10.5937/fmet1703348S>
- STEPPERONLINE. (n.d.). *Products*. <https://www.Omc-Stepperonline.Com/>.
- Tang, S., & Yu, Y. (2022). Research on Closed-loop Control of Step Motor Based on Magnetic Encoder. In *Highlights in Science, Engineering and Technology ICCIA* (Vol. 2022). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.54097/hset.v1i.486>
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. In *Materials Today* (Vol. 21, Issue 1, pp. 22–37). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Tuazon, B. J., Custodio, N. A. V, Basuel, R. B., Delos Reyes, L. A., & Dizon, J. R. C. (2022). 3D Printing Technology and Materials for Automotive Application: A Mini-Review. *Key Engineering Materials*, *913*, 3–16.
- Wang, X., Huang, L., Li, Y., Wang, Y., Lu, X., Wei, Z., Mo, Q., Zhang, S., Sheng, Y., Huang, C., Zhao, H., & Liu, Y. (2024). Research progress in polylactic acid processing for 3D printing. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 112, pp. 161–178). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.038>
- Wilson, M. (2015). Industrial Robots. In *Implementation of Robot Systems* (pp. 19–38). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404733-4.00002-3>
- Xiang, Y., Deng, X., Chen, Y., Liu, C., Xu, X., & Li, M. (2021). Trajectory Control and Simulation of 6-DOF Robotic System Based on Screw Theory. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2021-October. <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589141>
- Xu, Z., Song, T., Guo, S., Peng, J., Zeng, L., & Zhu, M. (2022). Robotics technologies aided for 3D printing in construction: a review. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 118, Issues 11–12, pp. 3559–3574). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08067-2>
- Yang, S., Mao, X., Ge, B., & Yang, S. (2016). The roadmap and challenges of robot programming languages. *2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2015*, 328–333. <https://doi.org/10.1109/SMC.2015.69>
- Yao, D., Zhao, Z., Wu, Z., Li, M., & Li, J. (2023). Characterization of PA12/HA composite scaffolds based on selective laser sintering. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *145*. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106000>

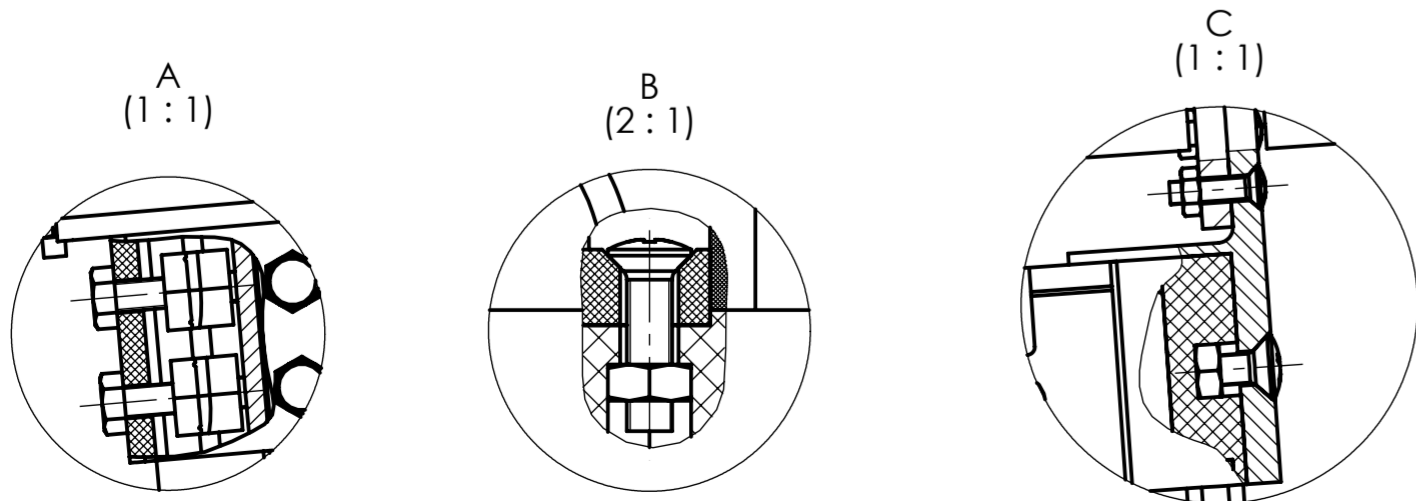
- Yaragatti, N., & Patnaik, A. (2020). A review on additive manufacturing of polymers composites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4150–4157. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.490>
- Zhang, P. (2010). Industrial control engineering. In *Advanced Industrial Control Technology* (pp. 41–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-7807-6.10002-6>
- Zhang, T., Peng, F., Yan, R., Tang, X., Deng, R., & Yuan, J. (2024). Quantification of uncertainty in robot pose errors and calibration of reliable compensation values. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102765>
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., Lee, J. H., & Zhang, J. (2018). Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. In *Journal of Materials Engineering and Performance* (Vol. 27, Issue 1). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>
- Zhao, N., Parthasarathy, M., Patil, S., Coates, D., Myers, K., Zhu, H., & Li, W. (2023). Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.008>

Apêndices

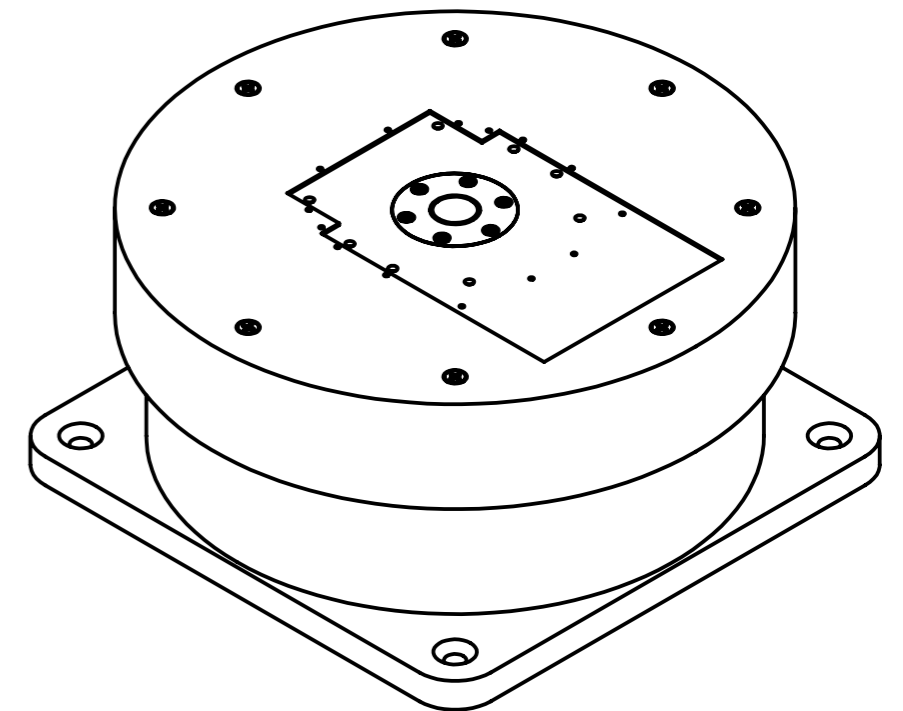
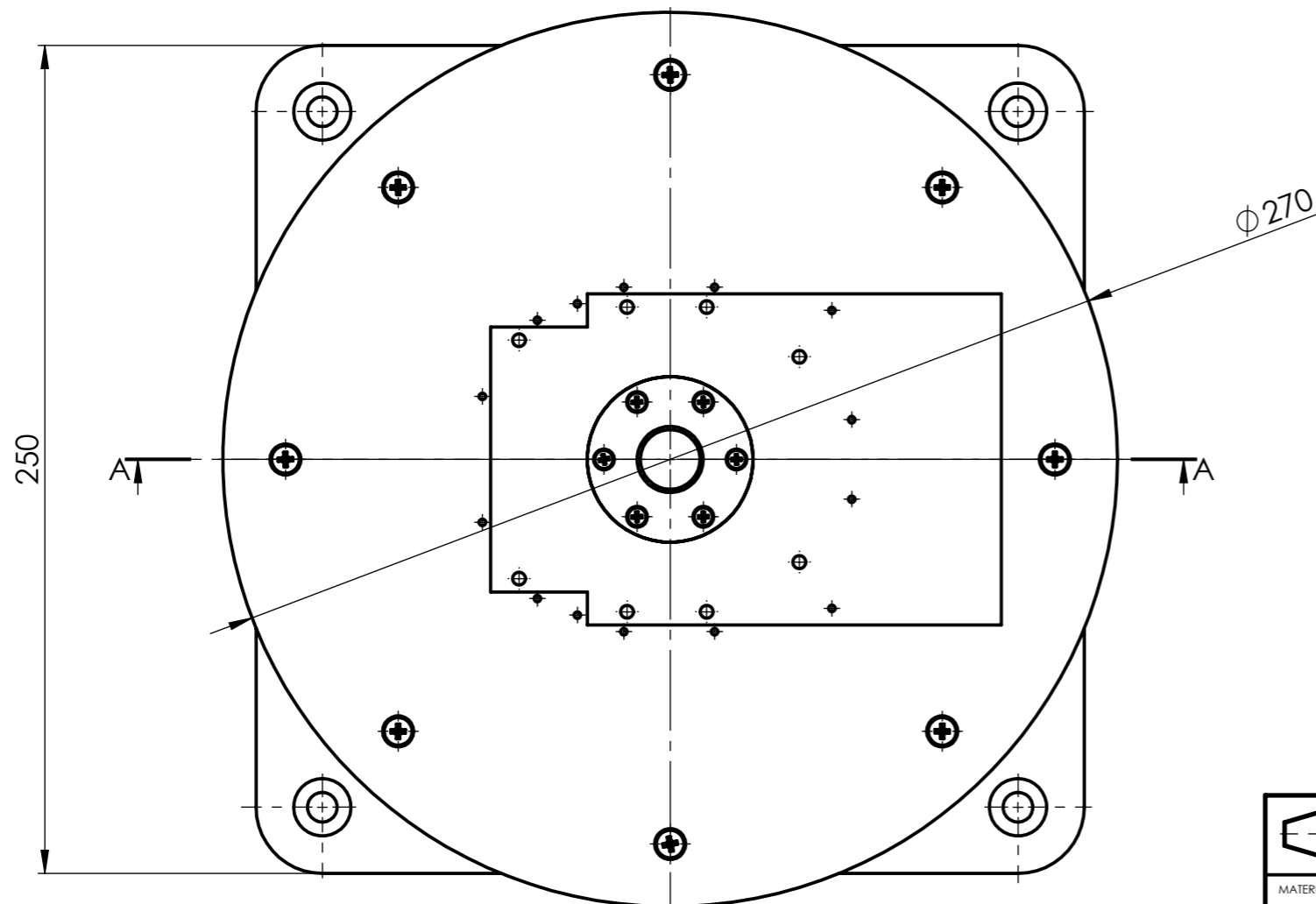
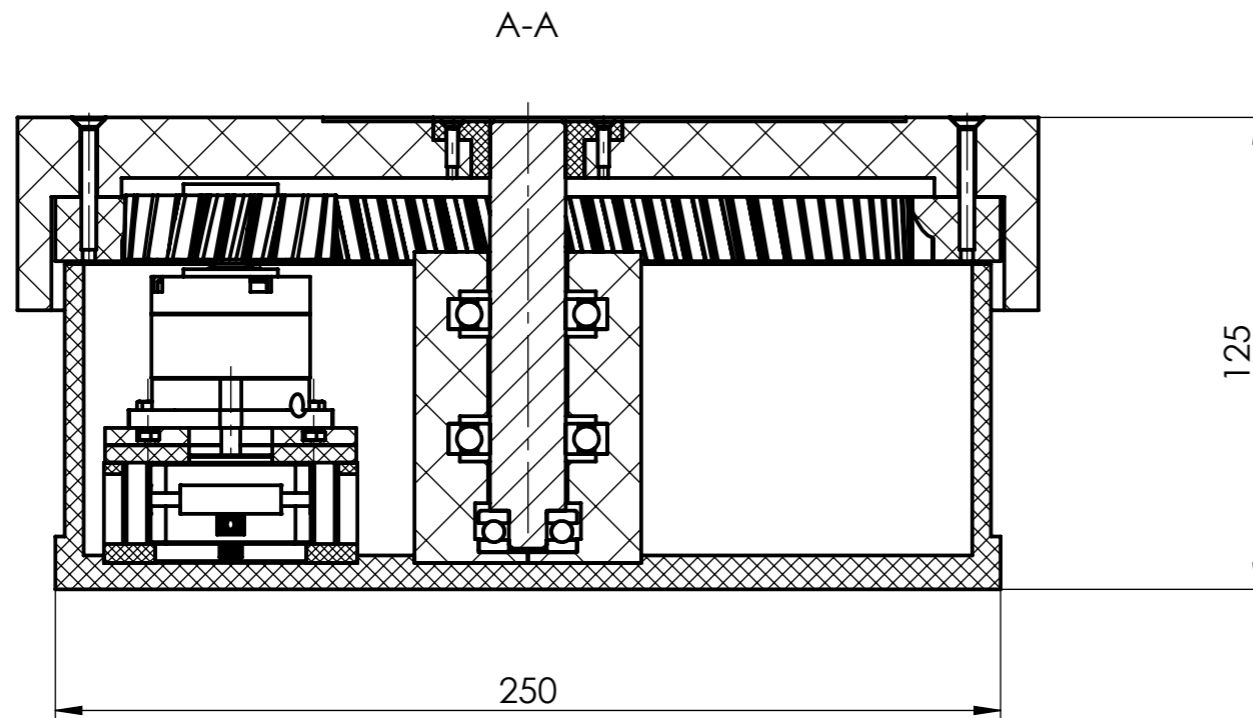
Desenhos Técnicos



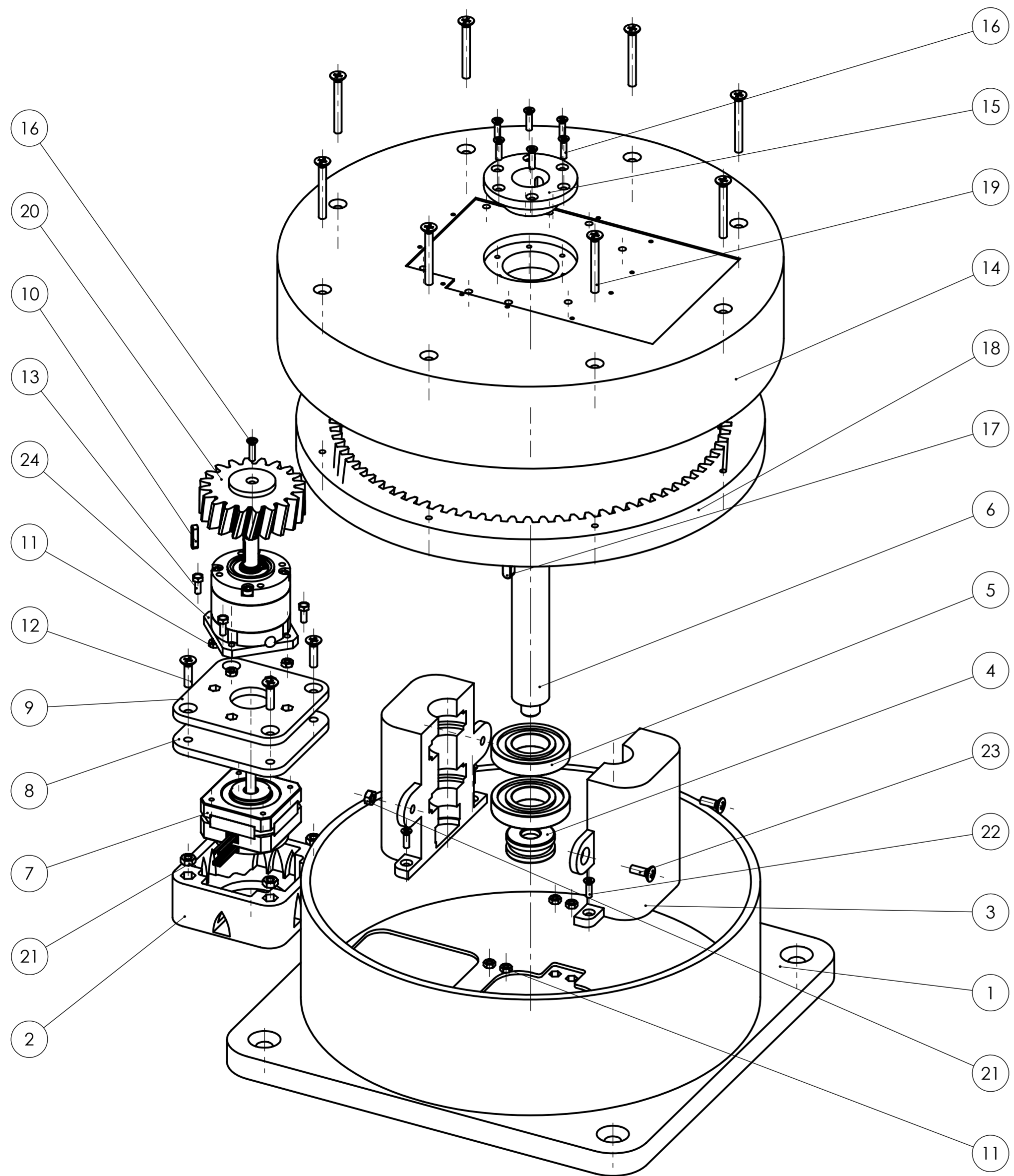
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [kg] | OBS. |
|----|--|--------|---------------|------------------|------------|----------------|
| 16 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 8 - Z | 4 | ISO 7047 | | | |
| 15 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M4 x 10 - Z | 4 | ISO 7047 | | | |
| 14 | Porca hexagonal M4 | 4 | ISO 4032 | | | |
| 13 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 4 | ISO 7047 | | | |
| 12 | Parafuso de cabeça hexagonal - M4 x 16 | 16 | ISO 4017 | | | |
| 11 | Porcas em T M4 | 16 | | Galvanized Steel | | Bosch Rexroth |
| 10 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 14 | ISO 7047 | | | |
| 9 | ISO - 4032 - M3 - D - C | 11 | ISO 4032 | | | |
| 8 | Sensor de limite | 3 | 7658K203 | | | McMASTER-CARR |
| 7 | Extrusora H2 V2S Revo | 1 | | | | BIQU Equipment |
| 6 | Junta de rolamento | 1 | BR.01.06 | | | |
| 5 | Junta de guinada | 1 | BR.01.05 | | | |
| 4 | Junta de inclinação | 1 | BR.01.04 | | | |
| 3 | Junta 3 | 1 | BR.01.03 | | | |
| 2 | Junta 2 | 1 | BR.01.02 | | | |
| 1 | Base Giratória | 1 | BR.01.01 | | | |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [kg] | OBS. |



| | | | | | | | |
|---|-----------|------------------------|------------|-------------|----------|----------------|--|
| | ESCALA: | 1:2 | NOME: | GM | DATA: | 22/04/2025 | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | DESENHOU: | | VERIFICOU: | | APROVOU: | | |
| MATERIAL: | | NOTAS: | | CONJUNTO: | | BRAÇO ROBÓTICO | |
| TOLERÂNCIA: TOLERÂNCIA ISO 8015 ISO 2768-mK | | ACABAMENTOS: ISO 21920 | | DESENHO Nº: | | A2 BR.01 | |
| | | | | FOHA: | | 1/1 | |
| | | | | MASSA [g]: | | - | |
| | | | | REVISÃO: | | - | |

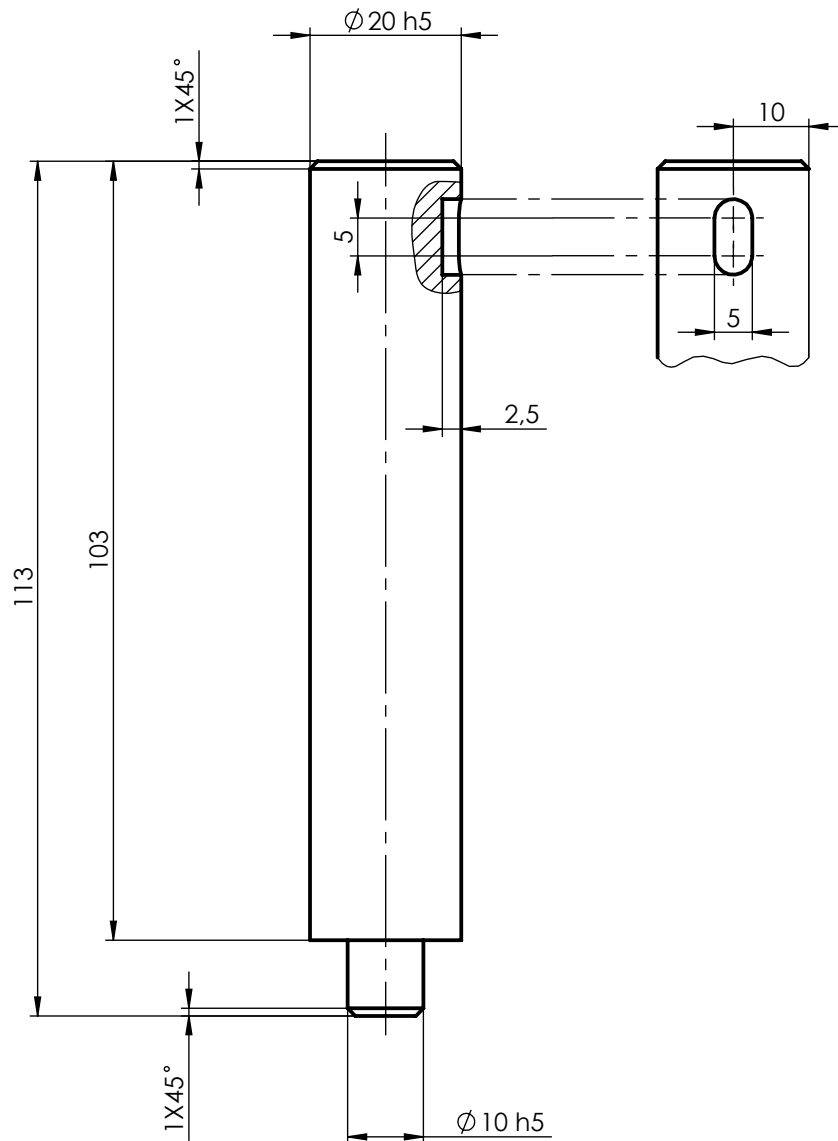


| | | | | | | | | |
|--|---------|-----------|------|--|--|-------------------------------------|------------|----------|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA | | | |
| | 1:2 | DESENHOU | GM | | 22/04/2025 | DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| MATERIAL: | | VERIFICOU | | | MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | |
| TOLERÂNCIA GERAL: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | APROVOU | | | CONJUNTO: BRACO ROBOTICO | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | NOTAS: | | | TÍTULO: BASE GIRATÓRIA | | | |
| | | | | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | | | A3 | BR.01.01 | 1/2 | - |

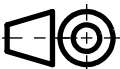



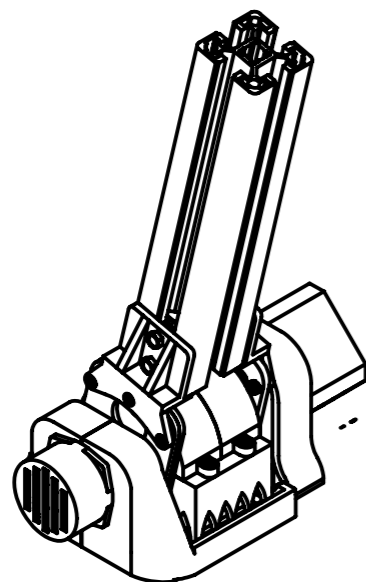
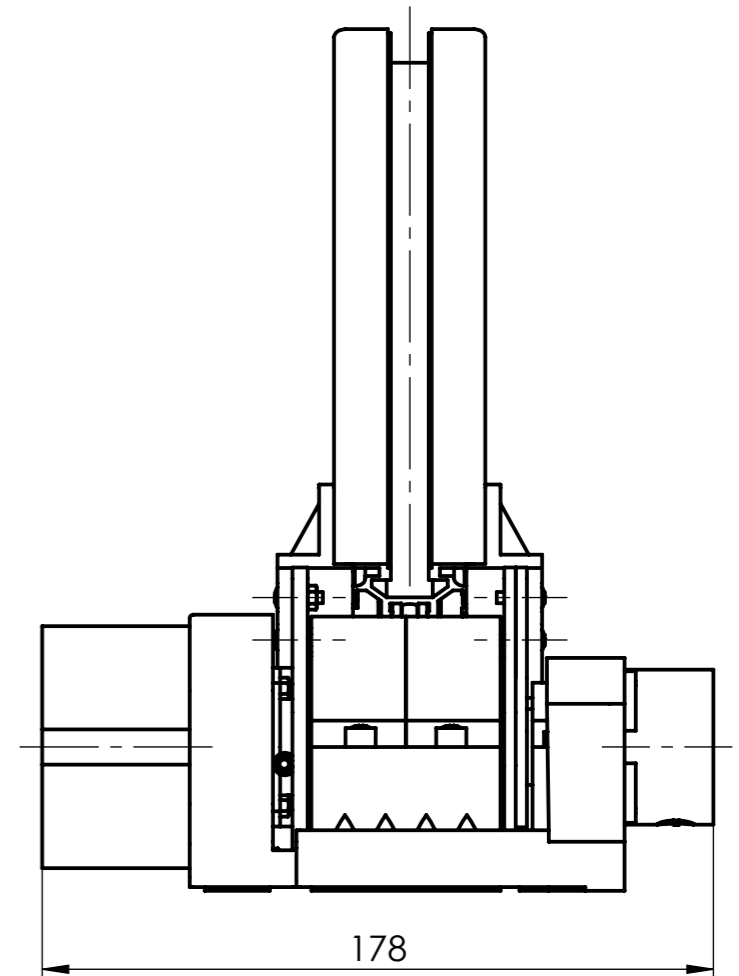
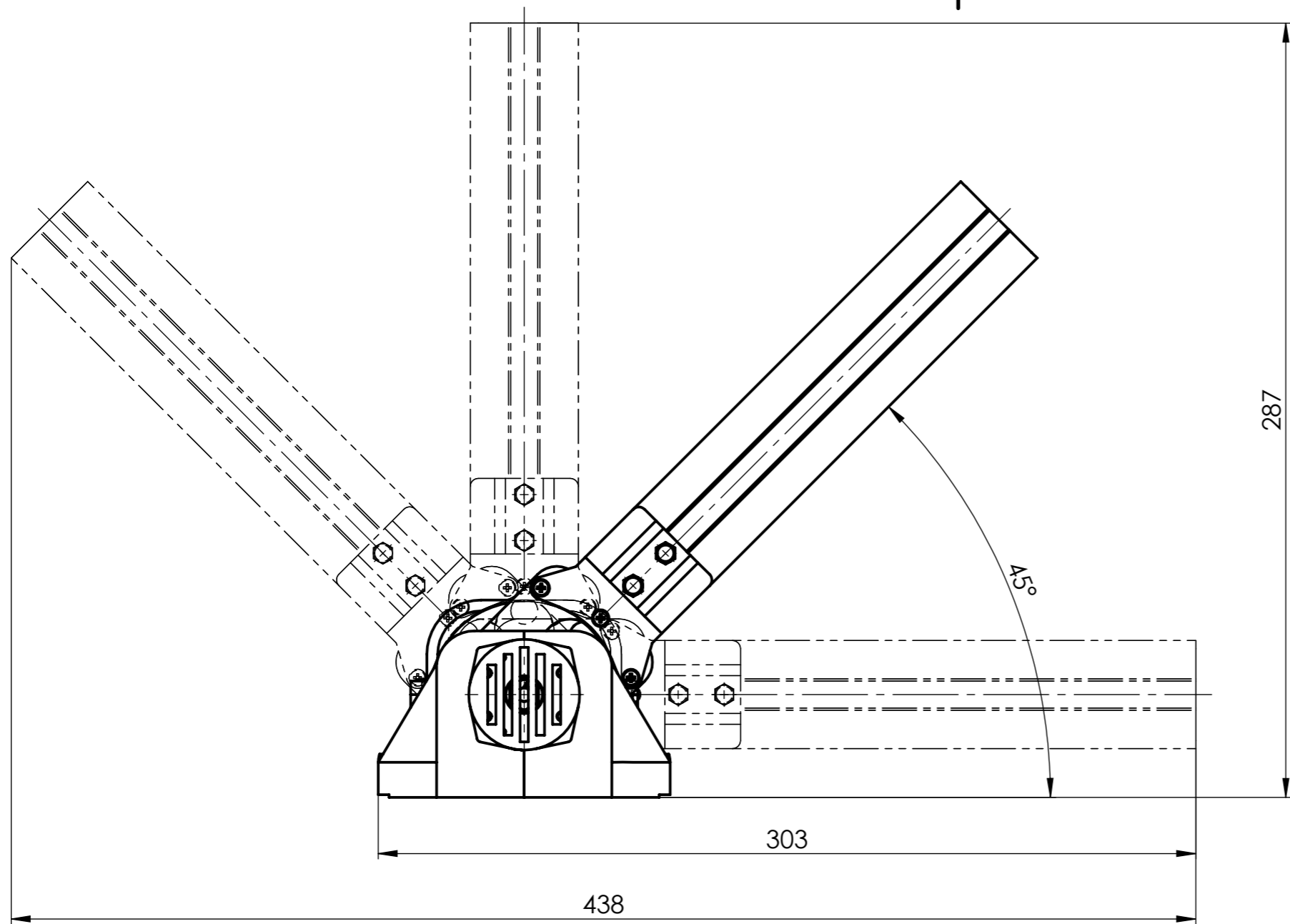
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |
|----|--|--------|---------------|------------|-----------|----------------|
| 24 | Caixa de velocidades MG17-G5 | 1 | | | 290.00 | STEPPER ONLINE |
| 23 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M4 x 12 - Z | 2 | ISO 7047 | | | |
| 22 | Parafuso de cabeça de embeber com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 4 | ISO 7046 | | | |
| 21 | Porca hexagonal M4 | 6 | ISO 4032 | | | |
| 20 | Engrenagem helicoidal com dentes externos | 1 | | ABS | 35.96 | |
| 19 | Parafuso de cabeça de embeber com oco cruciforme - M4 x 35 - Z | 8 | ISO 7046 | | | |
| 18 | Engrenagem helicoidal com dentes internos | 1 | | ABS | 253.09 | |
| 17 | Chaveta paralela A 5x5x10 - St | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 16 | Parafuso de cabeça de embeber com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 7 | ISO 7046 | | | |
| 15 | Flange do veio | 1 | | ABS | 11.93 | |
| 14 | Plataforma giratória | 1 | | ABS | 1228.25 | |
| 13 | Parafuso de cabeça hexagonal - M3 x 8 | 4 | ISO 4017 | | | |
| 12 | Parafuso de cabeça de embeber com oco cruciforme - M4 x 16 - Z | 4 | ISO 7046 | | | |
| 11 | Porca hexagonal M3 | 8 | ISO 4032 | | | |
| 10 | Chaveta paralela A 3x3x14 - St | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 9 | Espaçador da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 17.66 | |
| 8 | Espaçador do motor | 1 | | ABS | 18.24 | |
| 7 | Motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K | 1 | | | 260.00 | STEPPER ONLINE |
| 6 | Veio da base | 1 | BR.01.01.001 | 1060 Alloy | 89.08 | |
| 5 | Rolamento rígido de esferas SKF - 16004 - 12.SI.NC.12_68 | 2 | | | | SKF |
| 4 | Rolamento axial de esferas SKF - 51200 - 8.SI.NC.8_68 | 1 | | | | SKF |
| 3 | Chumaceira do veio | 2 | | ABS | 120.12 | |
| 2 | Suporte do motor | 1 | | ABS | 47.23 | |
| 1 | Estrutura da base | 1 | | ABS | 920.63 | |

| | | |
|---|------------------------------|--|
| ESCALA: 1:2 DESENHO: VERIFICOU APROVOU: | NOME: GM DATA: 16/04/2025 | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERÂNCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK ACABAMENTOS: ISO 21920 | NOTAS: | DESENHO Nº: A2 FOLHA: BR.01.01 MASSA [g]: 2/2 REVISÃO: - |

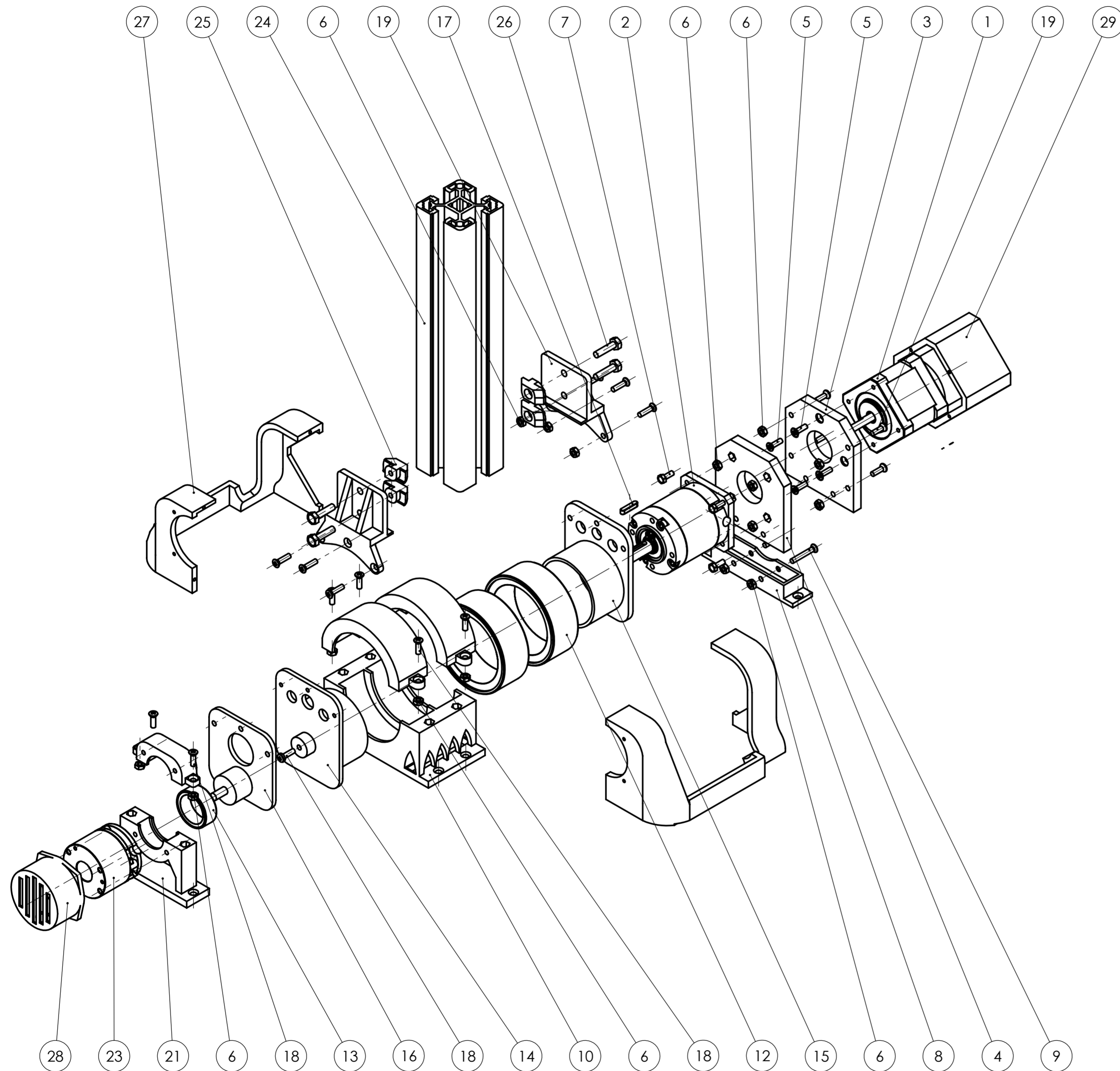


NOTA: Escatel normalizado segundo a norma
DIN 6885/1 com uma largura de 5 N9 mm

| | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|------|------------|---|
|  | ESCALA: 1:1 | DESENHOU | NOME | DATA |  ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | VERIFICOU | GM | 24/04/2025 | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | APROVOU | | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | NOTAS: | | | TÍTULO: VEIO DA BASE GIRATÓRIA |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | A4 | | | DESENHO N.º: BR.01.01.001 FOLHA: 1/1 MASSA [g]: 89.08 REVISÃO: - |

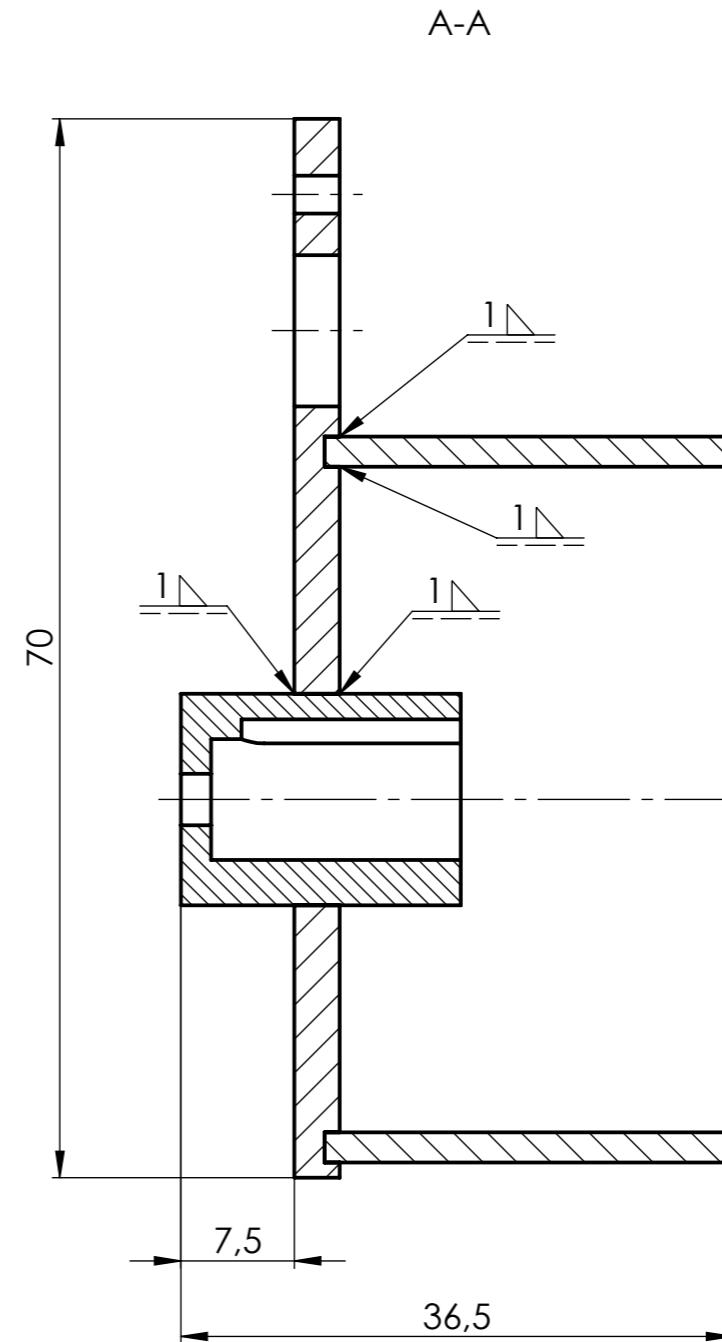
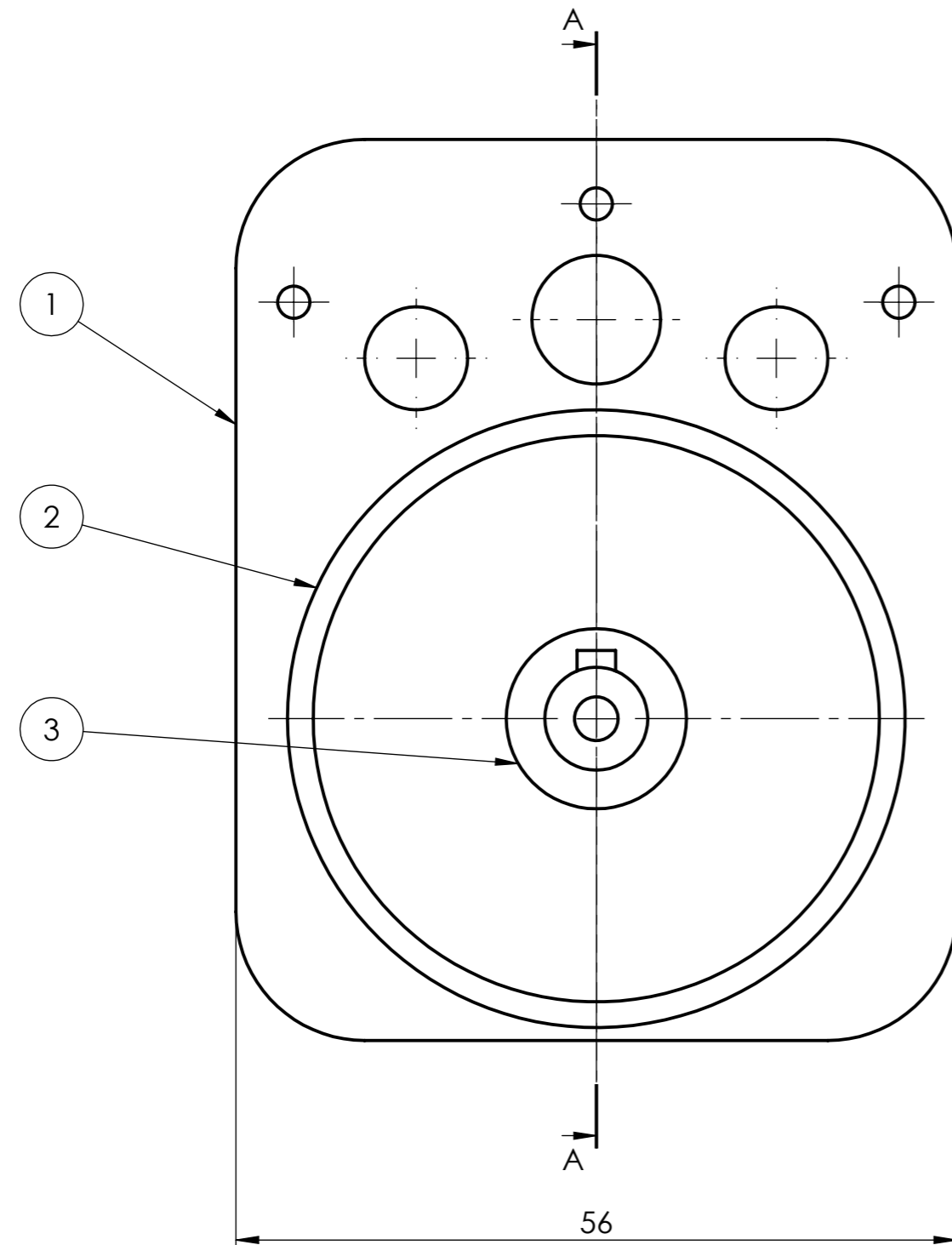


| | | | | | | | | | |
|--|---------|-----------|------|---------------------------|--|-------------|--------|------------|----------|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | | |
| | 1:2 | DESENHOU | GM | | 24/04/2025 | | | | |
| MATERIAL: | | VERIFICOU | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | | | | |
| TOLERÂNCIA GERAL: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | APROVOU | | TÍTULO: JUNTA 2 | | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | NOTAS: | | A3 | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | | BR.01.02 | | 1/2 | | | - |



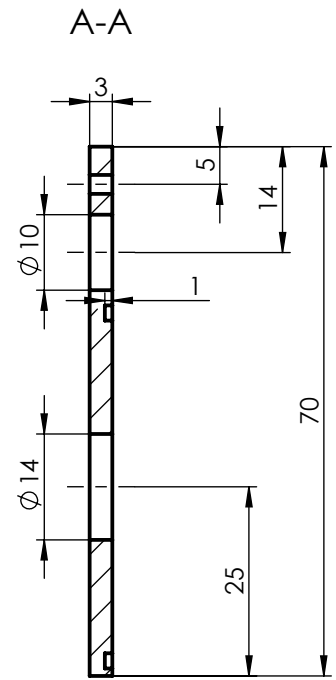
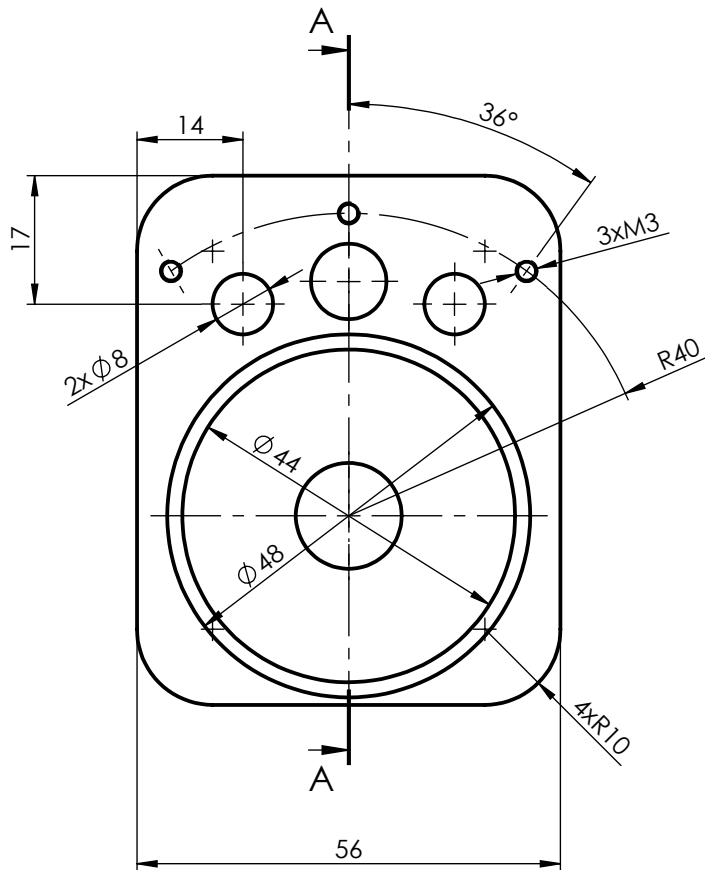
| 29 | Capa do motor | 1 | | ABS | 30.24 | |
|----|--|--------|---------------|------------------|-----------|----------------|
| 28 | Capa do travão | 1 | | ABS | 5.42 | |
| 27 | Capa da junta da base | 2 | | ABS | 29.10 | |
| 26 | Parafuso de cabeça hexagonal - M4 x 16 | 4 | ISO 4017 | | | |
| 25 | Porcas em T M4 | 4 | | Galvanized Steel | | Bosch Rexroth |
| 24 | Calha de alumínio extrudido perfil 40x40 mm e comprimento 200 mm | 1 | | EN-AW 6060 | 300.00 | Bosch Rexroth |
| 23 | Travão SWB-01 | 1 | | | 500.00 | STEPPER ONLINE |
| 22 | Parte superior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 5.27 | |
| 21 | Parte inferior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 18.03 | |
| 20 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 6 | ISO 7047 | | | |
| 19 | Suporte das calhas | 2 | BR.01.02.04 | 1060 Alloy | 31.39 | |
| 18 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 11 | ISO 7047 | | | |
| 17 | Chaveta paralela A 3x3x14 - St | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 16 | Acoplador 3 | 1 | BR.01.02.03 | 1060 Alloy | 30.19 | |
| 15 | Acoplador 2 | 1 | BR.01.02.02 | 1060 Alloy | 43.35 | |
| 14 | Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01 | 1060 Alloy | 53.77 | |
| 13 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - HK 2010 - 22.SI.NC.22 | 1 | | | | SKF |
| 12 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - RNA 4908 - 24.SI.NC.24 | 2 | | | | SKF |
| 11 | Parte superior da chumaceira da caixa de velocidades | 2 | | ABS | 11.11 | |
| 10 | Parte inferior da chumaceira da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 74.90 | |
| 9 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 20 - Z | 2 | ISO 7047 | | | |
| 8 | Base dos espaçadores | 1 | | ABS | 7.10 | |
| 7 | Parafuso de cabeça hexagonal - M3 x 8 | 4 | ISO 4017 | | | |
| 6 | Porca hexagonal M3 | 19 | ISO 4032 | | | |
| 5 | Parafuso de cabeça de embeber com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 4 | ISO 7046 | | | |
| 4 | Espaçador da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 20.91 | |
| 3 | Espaçador do motor | 1 | | ABS | 20.93 | |
| 2 | Caixa de velocidades MG17-G100 | 1 | | | 450.00 | STEPPER ONLINE |
| 1 | Motor NEMA 17 modelo 17HS15-1504-ME1K | 1 | | | 400.00 | STEPPER ONLINE |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

| | | | | | | | | |
|--|----------|------------------------|------------|--------------------------|----------|-----------------|--|--|
| | ESCALA: | 1:2 | NOME: | GM | DATA: | 16/04/2025 | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | DESENHO: | | VERIFICOU: | | APROVOU: | | | |
| MATERIAL: | | NOTAS: | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | TÍTULO: JUNTA 2 | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | ACABAMENTOS: ISO 21920 | | DESENHO Nº: | | FOIJA: | | REVISÃO: |
| | | | | A2 | | BR.01.02 | | 2/2 |
| | | | | | | | | - |

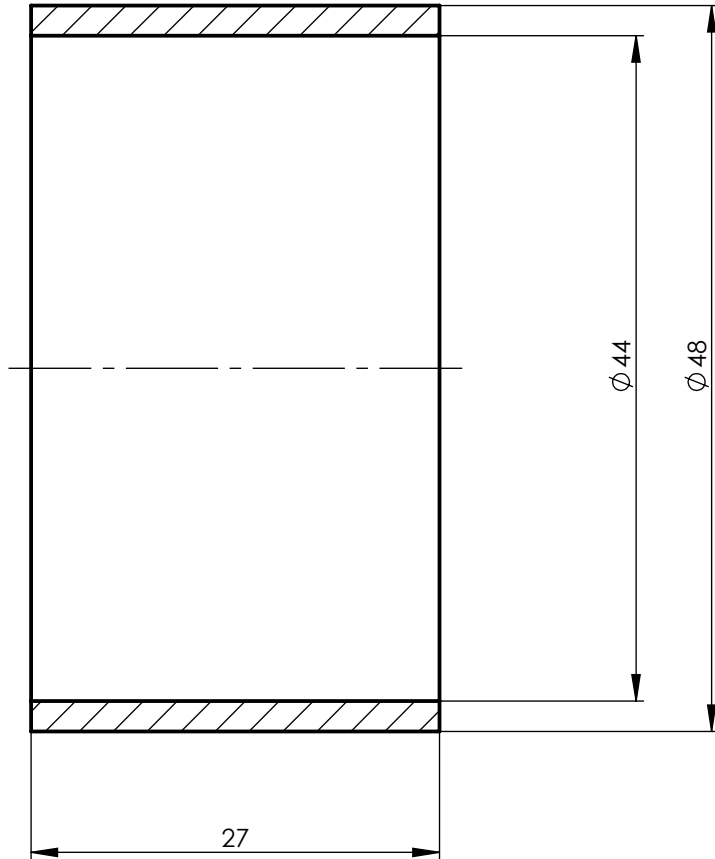


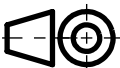

| 3 | Cilindro do escatel do Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01.003 | 1060 Alloy | 5.24 | |
|----|------------------------------------|--------|-----------------|------------|-----------|------|
| 2 | Tubo do Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01.002 | 1060 Alloy | 21.07 | |
| 1 | Placa do Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01.001 | 1060 Alloy | 27.46 | |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

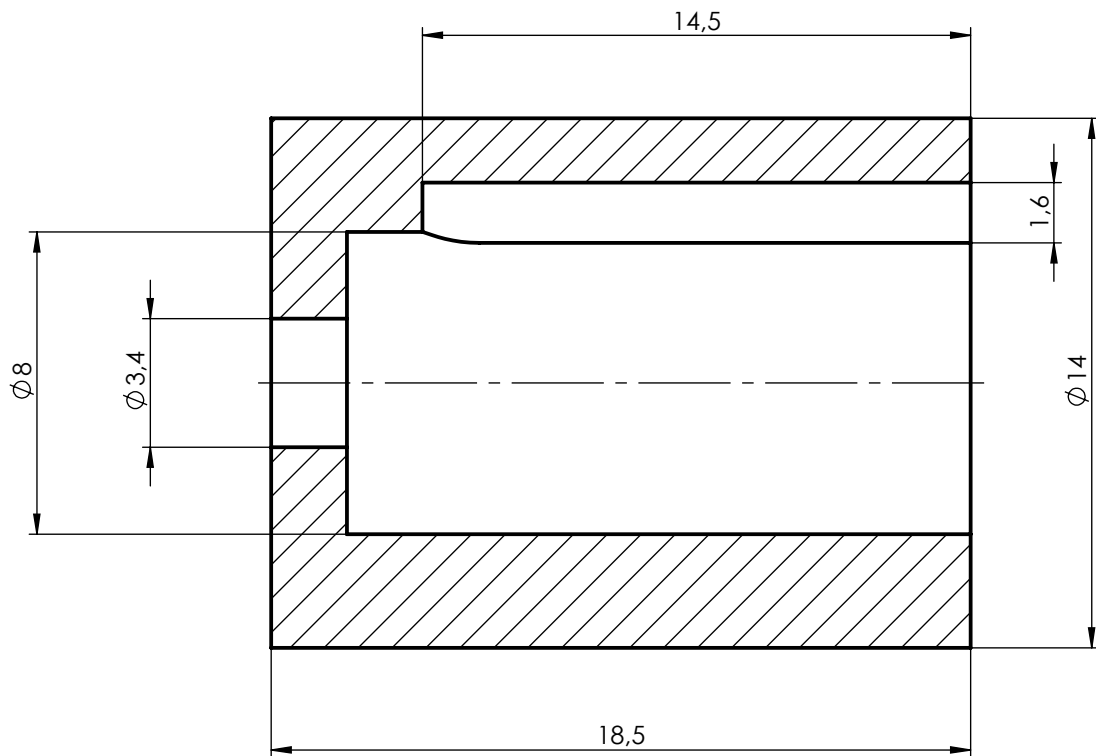
| | | | | | | |
|--|-----------|----------|-------------|---------------------|--|----------|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | |
| | 2:1 | DESENHOU | 15/04/2025 | | CONJUNTO: BRAÇO ROBÓTICO | |
| MATERIAL: | VERIFICOU | APROVOU | | TÍTULO: ACOPLADOR 1 | | |
| TOLERÂNCIA GERAL: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: | | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | A3 | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | BR.01.02.01 | 1/1 | | - |



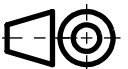

| | | | | |
|--|-----------------------|---------------------|--------------------|---|
| | ESCALA: 1:1 | NOME DESENHOU GM | DATA 15/04/2025 | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | VERIFICOU | APROVOU | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | NOTAS: | | TÍTULO: PLACA DO ACOPLADOR 1 |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | A4 | | DESENHO N.º BR.01.02.01.001 |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | FOLHA: 1/1 | | MASSA [g]: 27.46 |
| | | | | REVISÃO: - |

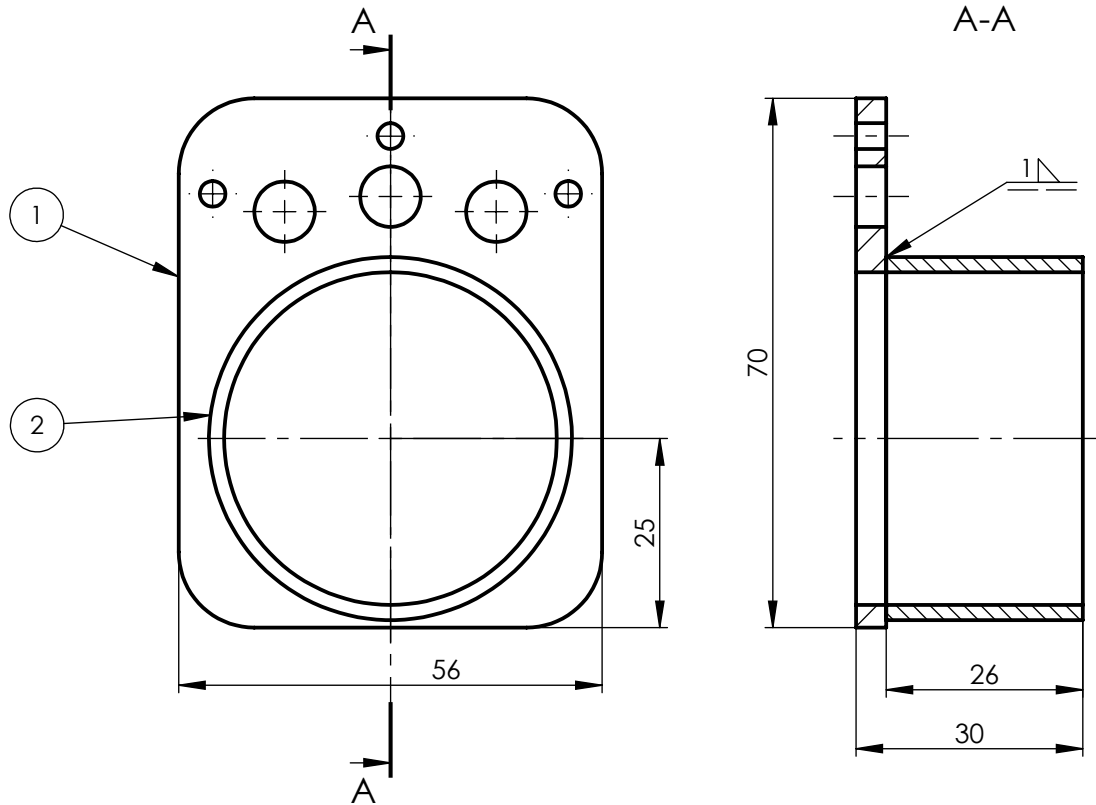


| | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|---|---------------------|---------------|
|  | ESCALA: 2:1 | NOME DESENHOU | DATA 15/04/2025 |  ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | | VERIFICOU APROVOU | GM | | | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | CONJUNTO: BRAÇO ROBÓTICO | | TÍTULO: TUBO DO ACOPLADOR 1 | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | NOTAS: | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | A4 | DESENHO N.º BR.01.02.01.002 | FOLHA: 1/1 | MASSA [g]: 21.07 | REVISÃO: - |



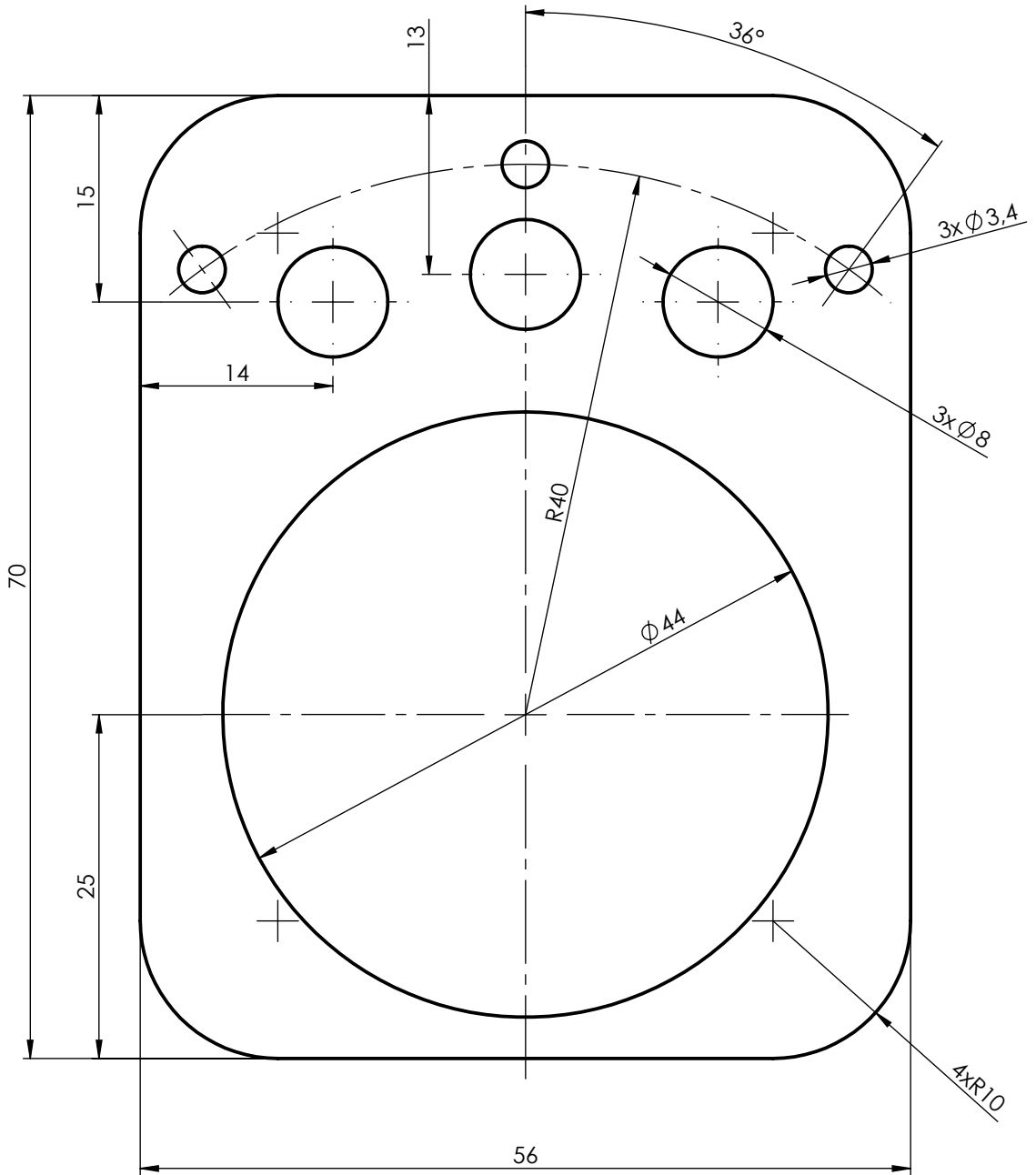
NOTA: Escatel normalizado segundo a norma
DIN 6885/1 com uma largura de 3 N9 mm

| | | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------------|--------------------|---|--|---------------|--------------------|---------------|
|  | ESCALA: 5:1 | NOME DESENHOU GM | DATA 15/04/2025 |  ISEL | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | |
| | | VERIFICOU APROVOU | NOTAS: | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO TÍTULO: CILINDRO DO ESCATEL DO ACOPLADOR 1 | | | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | | | DESENHO N.º A4 BR.01.02.01.003 | | FOLHA: 1/1 | MASSA [g]: 5.24 | REVISÃO: - |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | | | | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | | | | | |

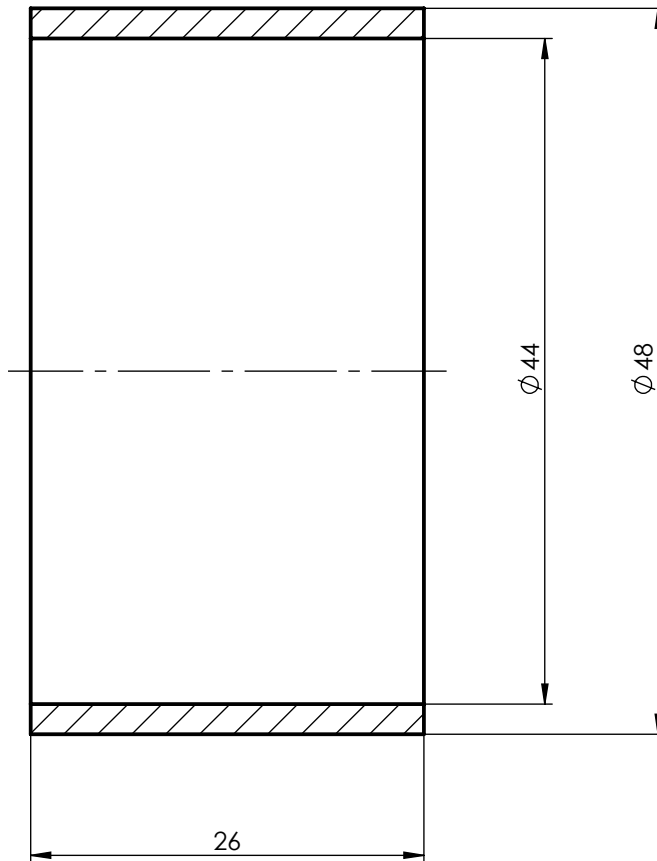


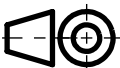

| 2 | Tubo do Acoplador 2 | 1 | BR.01.02.02.002 | 1060 Alloy | 20.29 | |
|----|----------------------|--------|-----------------|------------|-----------|------|
| 1 | Placa do Acoplador 2 | 1 | BR.01.02.02.001 | 1060 Alloy | 23.06 | |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

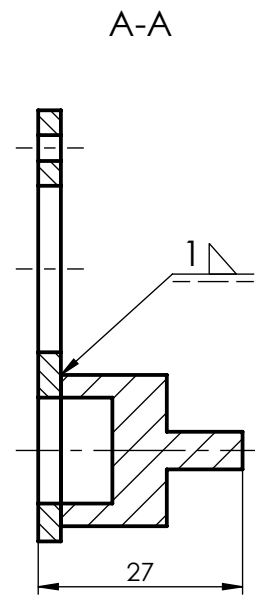
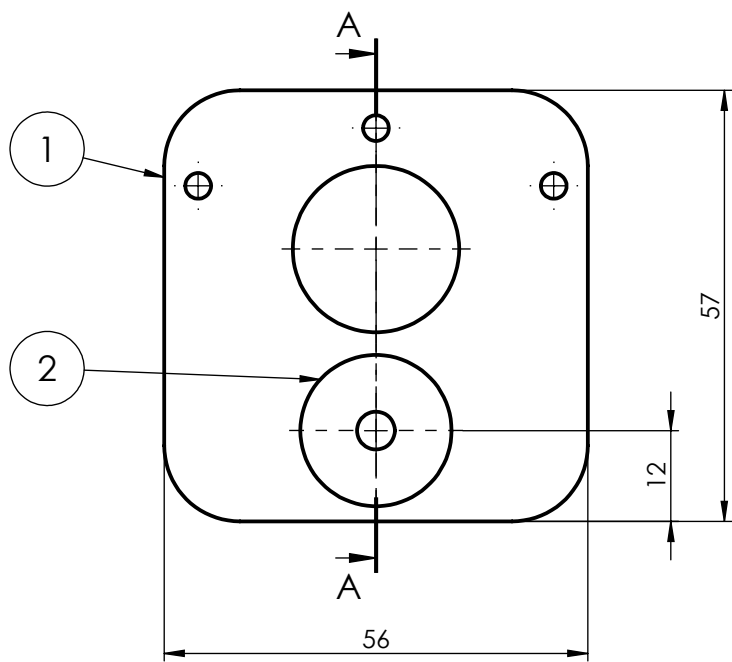
| | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|------------|----------|------------|---|-------------|--------|------------|----------|-----------------------|-----|--|---|
| | ESCALA: 1:1 | DESENHOU | NOME | DATA | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | | | | | | |
| | | VERIFICOU | GM | 15/04/2025 | | | | | | | | | |
| MATERIAL: | | APROVOU | | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | | | | | | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | NOTAS: | | | TÍTULO: ACOPLADOR 2 | | | | | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | | <table border="1"> <tr> <td>DESENHO N.º</td> <td>FOLHA:</td> <td>MASSA [g]:</td> <td>REVISÃO:</td> </tr> <tr> <td>A4 BR.01.02.02</td> <td>1/1</td> <td></td> <td>-</td> </tr> </table> | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: | A4 BR.01.02.02 | 1/1 | | - |
| DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: | | | | | | | | | | |
| A4 BR.01.02.02 | 1/1 | | - | | | | | | | | | | |



| | | | | |
|--|-----------------------|---|--------------------|---|
| | ESCALA: 2:1 | NOME GM | DATA 24/04/2025 | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | DESENHOU VERIFICOU | APROVOU | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | NOTAS: A placa tem uma espessura de 3mm. | | TÍTULO: PLACA DO ACOPLADOR 2 |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | A4 | | DESENHO N.º BR.01.02.02.001 |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | FOLHA: 1/1 | | MASSA [g]: 23.06 |
| | | | | REVISÃO: - |

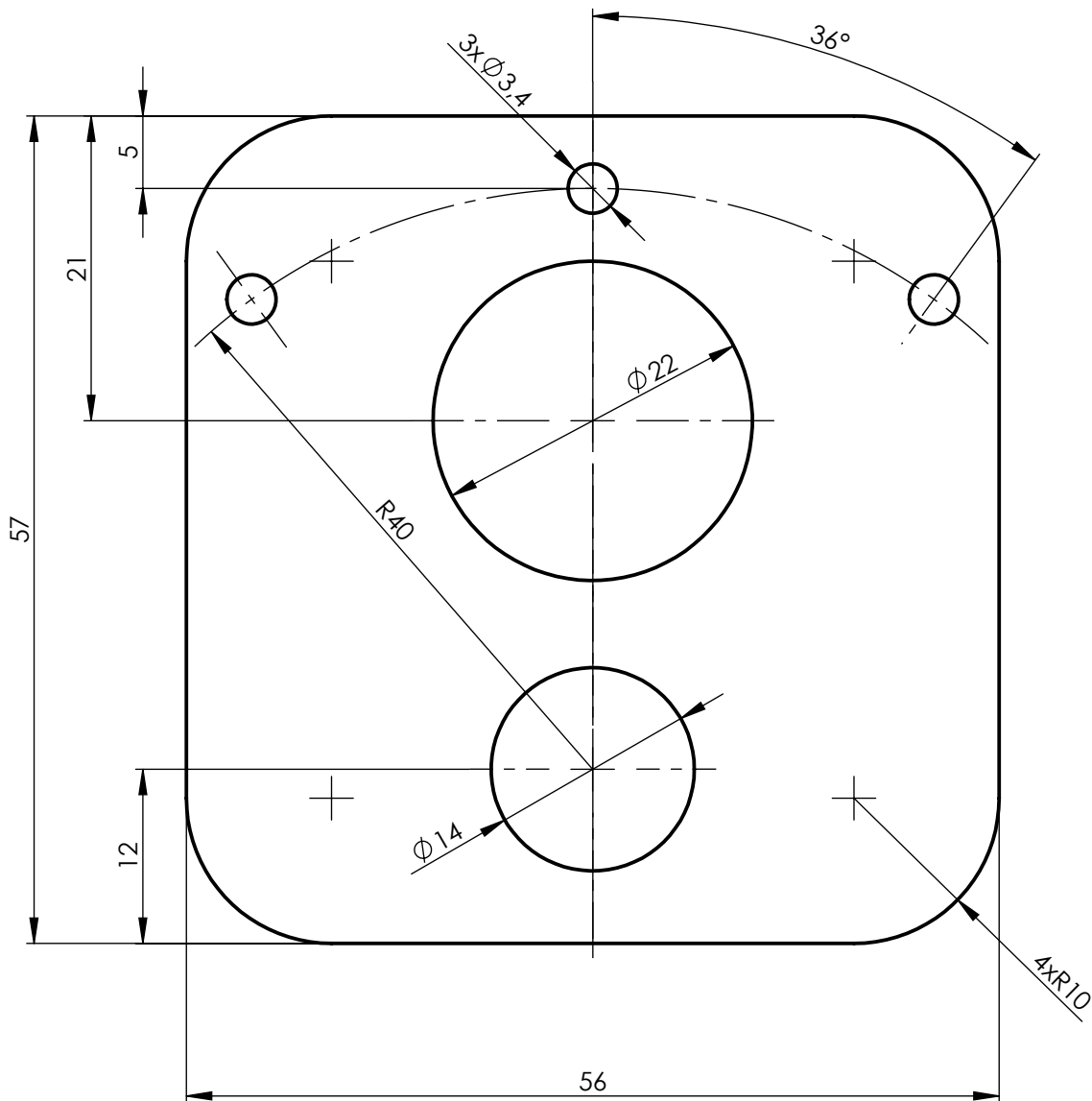


| | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|---|---------------------|---------------|
|  | ESCALA: 2:1 | NOME DESENHOU | DATA 15/04/2025 |  ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | | VERIFICOU APROVOU | GM | | | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | TÍTULO: TUBO DO ACOPLADOR 2 | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | NOTAS: | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | A4 | DESENHO N.º BR.01.02.02.002 | FOLHA: 1/1 | MASSA [g]: 20.29 | REVISÃO: - |

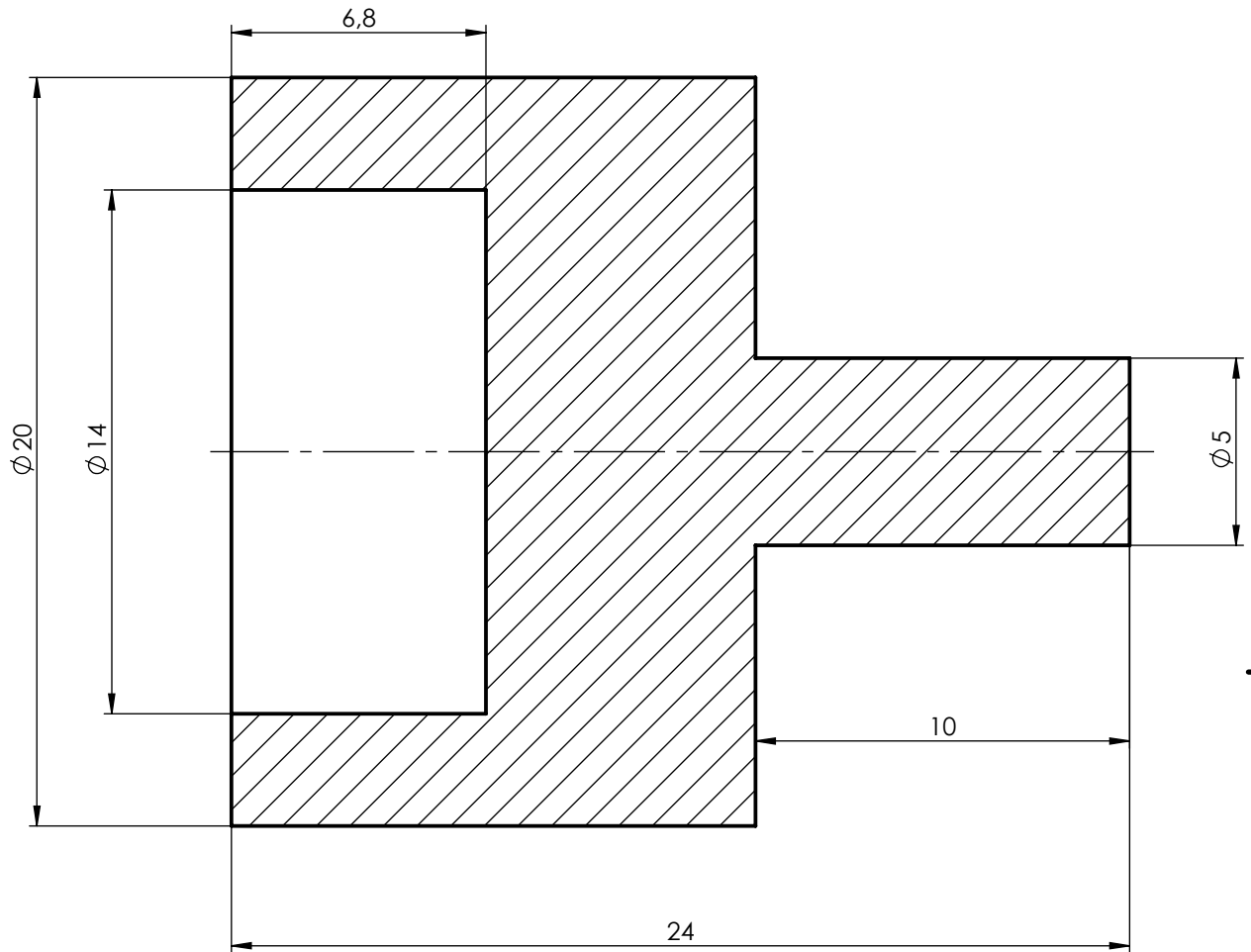


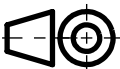

| 2 | Veio de saída do Acoplador 3 | 1 | BR.01.02.03.002 | 1060 Alloy | 9.58 | |
|----|------------------------------|--------|-----------------|------------|-----------|------|
| 1 | Placa do Acoplador 3 | 1 | BR.01.02.03.001 | 1060 Alloy | 20.61 | |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

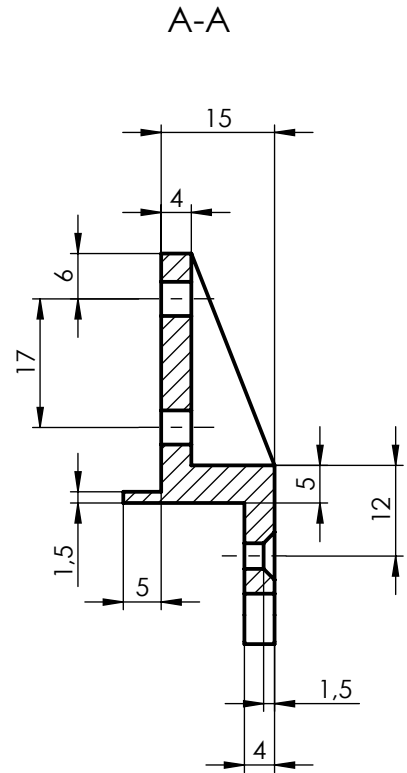
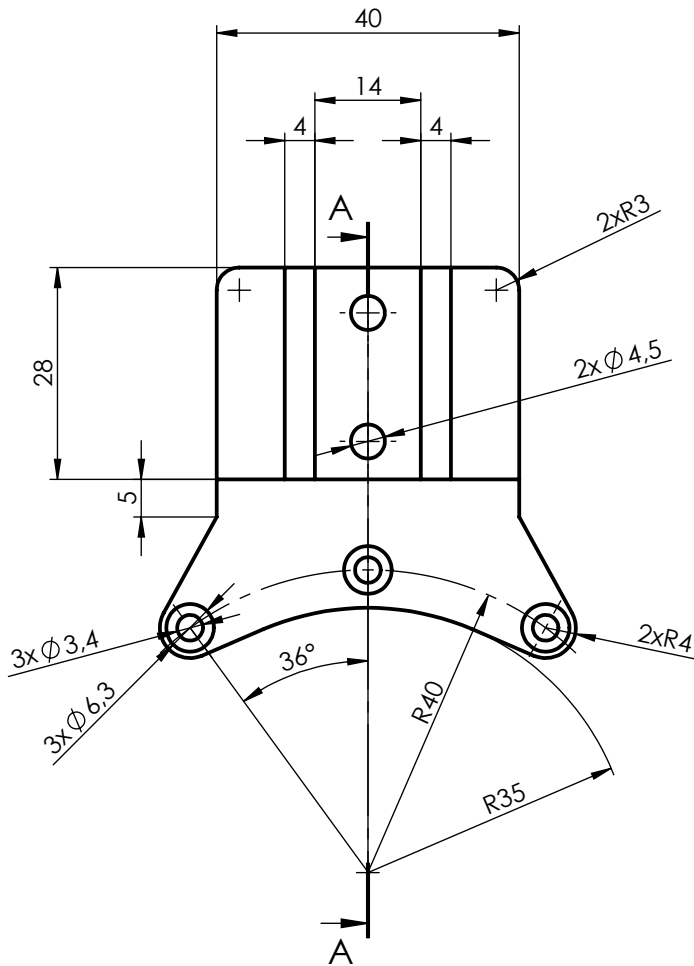
| | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------|-------------------------------|------------|---|----------|
| | ESCALA: 1:1 | DESENHOU | NOME | DATA | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | |
| | | VERIFICOU | GM | 15/04/2025 | | |
| MATERIAL: | APROVOU | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: | | TÍTULO: ACOPLADOR 3 | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | A4 | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | BR.01.02.03 | 1/1 | | - |



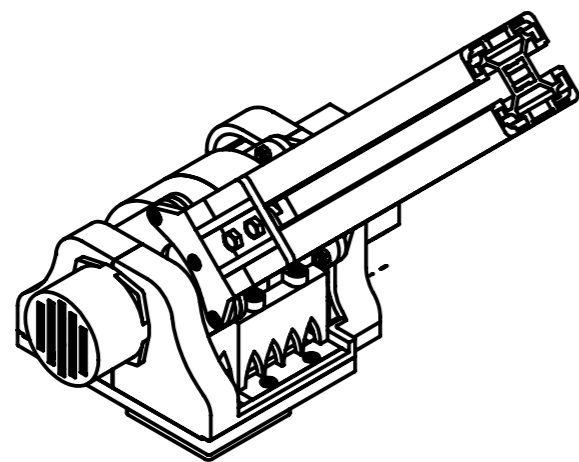
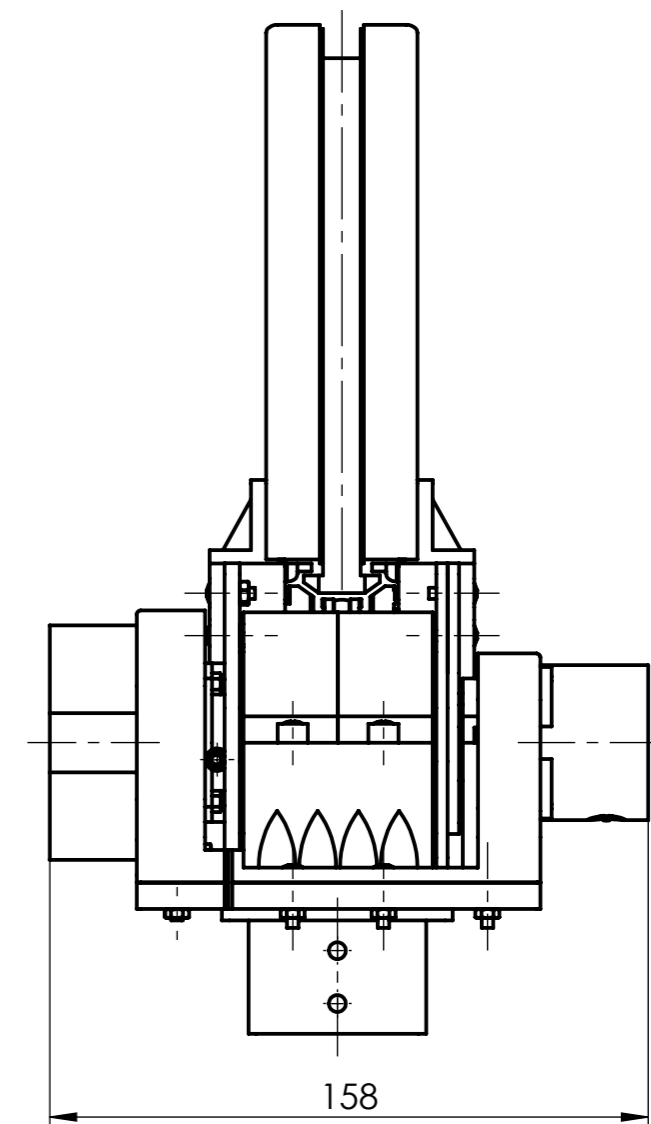
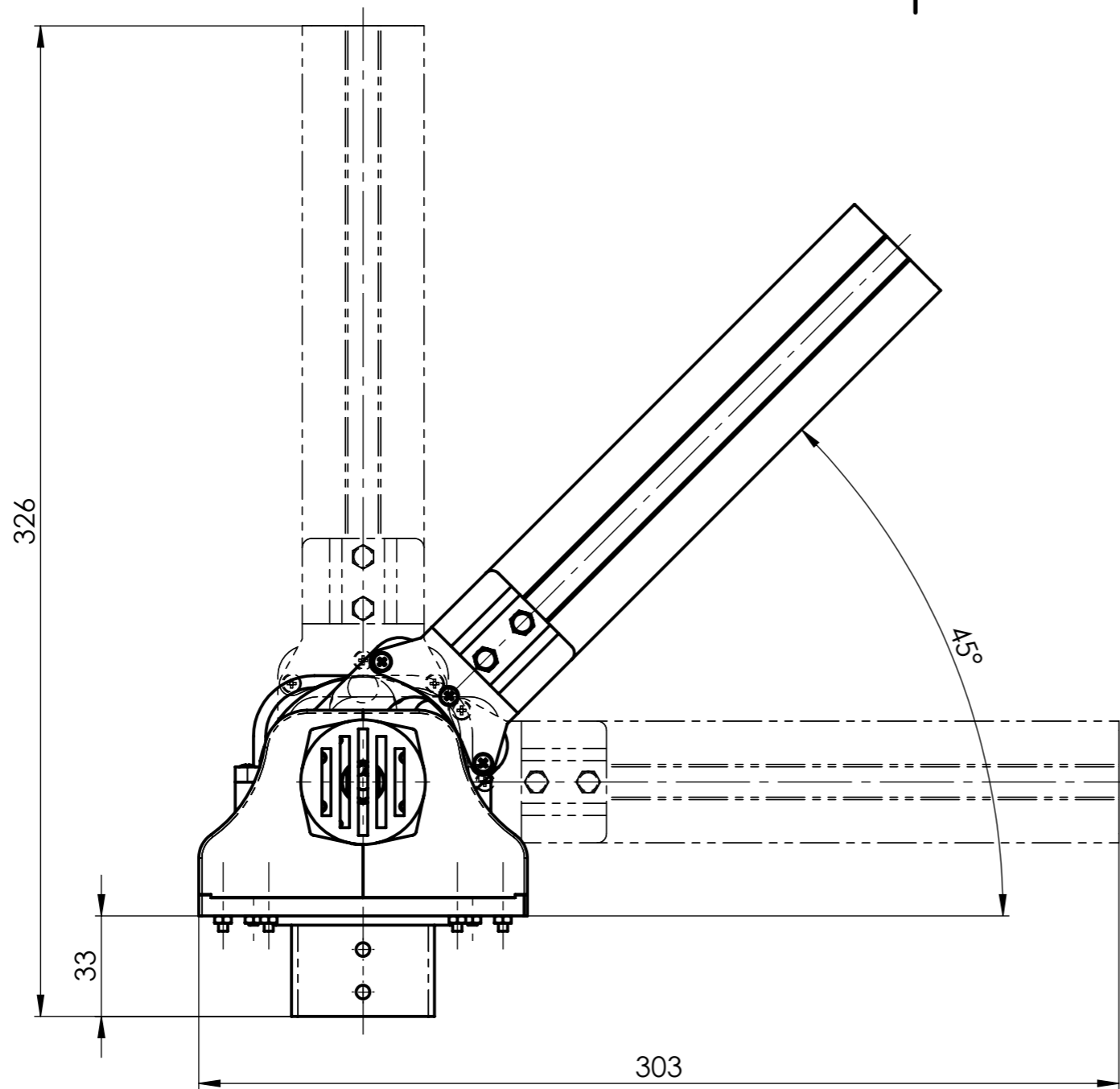
| | | | | | | |
|--|-----------------------|---|--------------------------------|---|---------------------|---------------|
| | ESCALA: 2:1 | NOME DESENHOU GM | DATA 15/04/2025 | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | | VERIFICOU | APROVOU | | | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | TÍTULO: PLACA DO ACOPLADOR 3 | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | NOTAS: A placa tem uma espessura de 3 mm | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | A4 | DESENHO N.º BR.01.02.03.001 | FOLHA: 1/1 | MASSA [g]: 20.61 | REVISÃO: - |



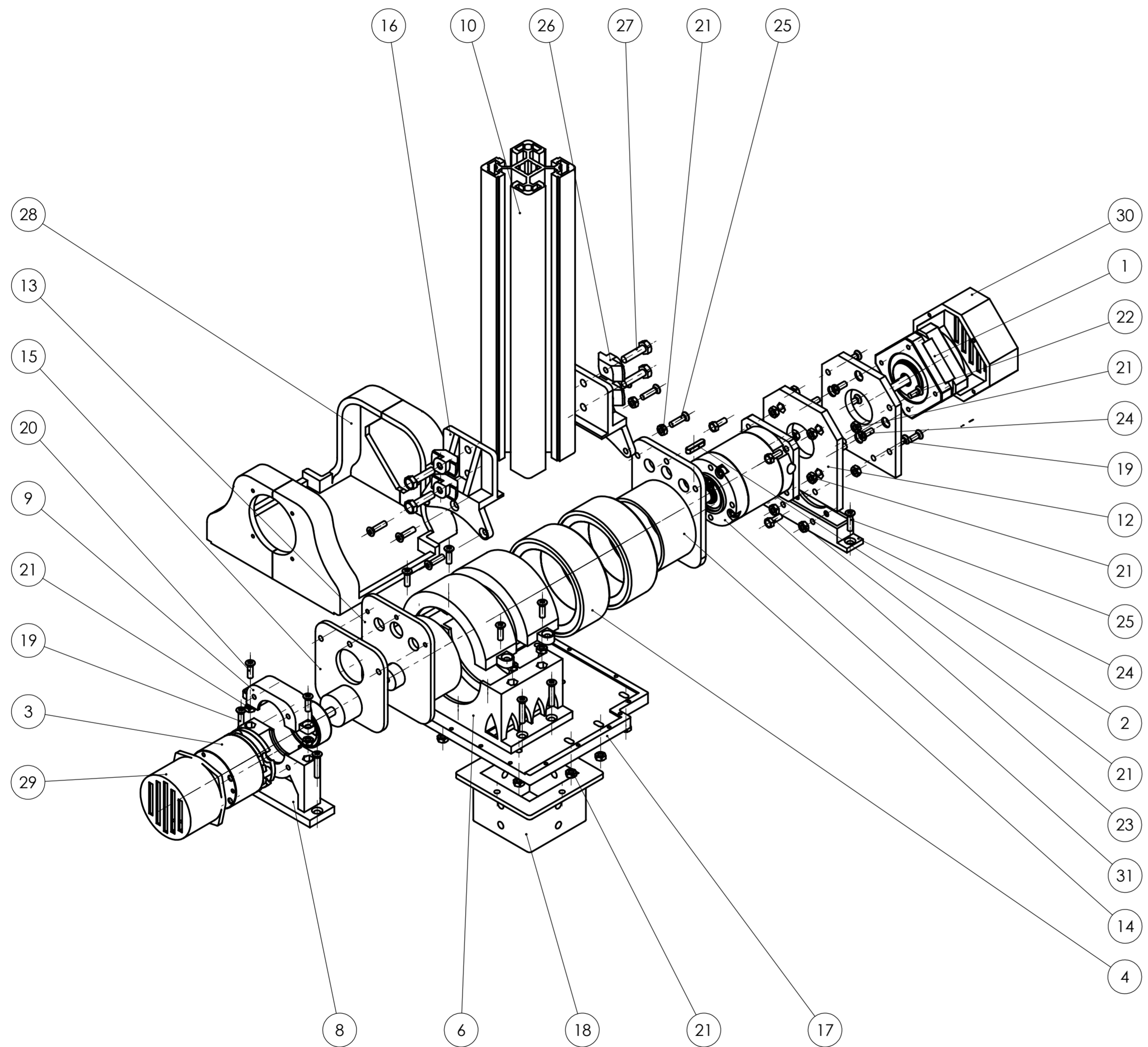
| | | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------------|--------------------|---|--|---------------|--------------------|---------------|
|  | ESCALA: 5:1 | NOME DESENHOU GM | DATA 15/04/2025 |  ISEL | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | |
| | | VERIFICOU APROVOU | NOTAS: | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO TÍTULO: VEIO DE SAÍDA DO ACOPLADOR 3 | | | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | | | DESENHO N.º A4 BR.01.02.03.002 | | FOLHA: 1/1 | MASSA [g]: 9.58 | REVISÃO: - |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | | | | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | | | | | |



| | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------------|--------------------|---|
| | ESCALA: 1:1 | NOME GM | DATA 15/04/2025 | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | DESENHOU VERIFICOU APROVOU | NOTAS: | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | | | DESENHO N.º A4 BR.01.02.04 |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | | | FOLHA: 1/1 |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | MASSA [g]: 31.36 |
| | | | | REVISÃO: - |

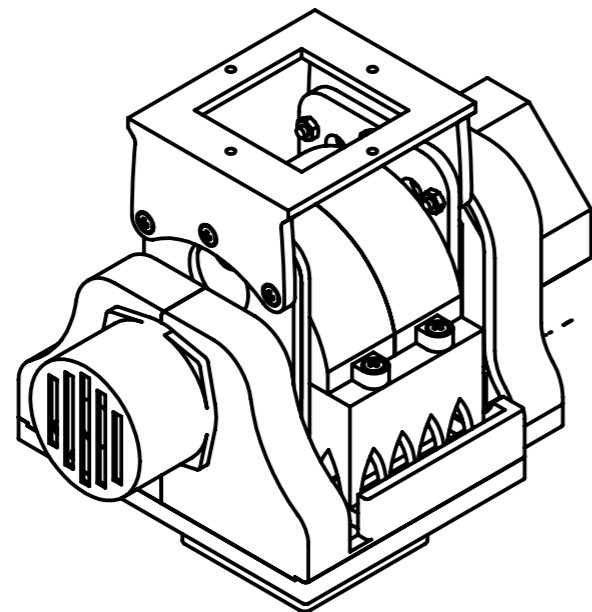
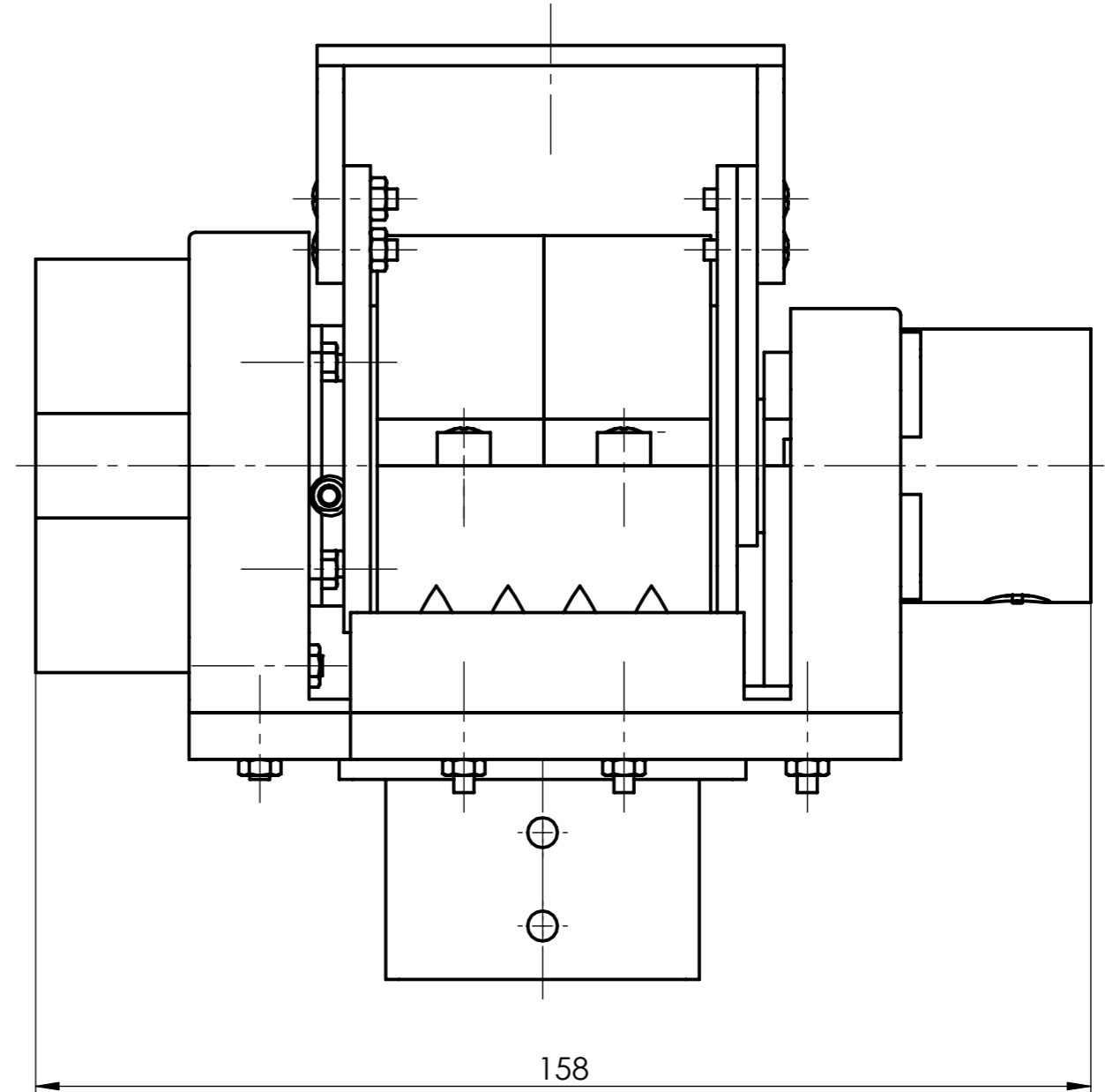
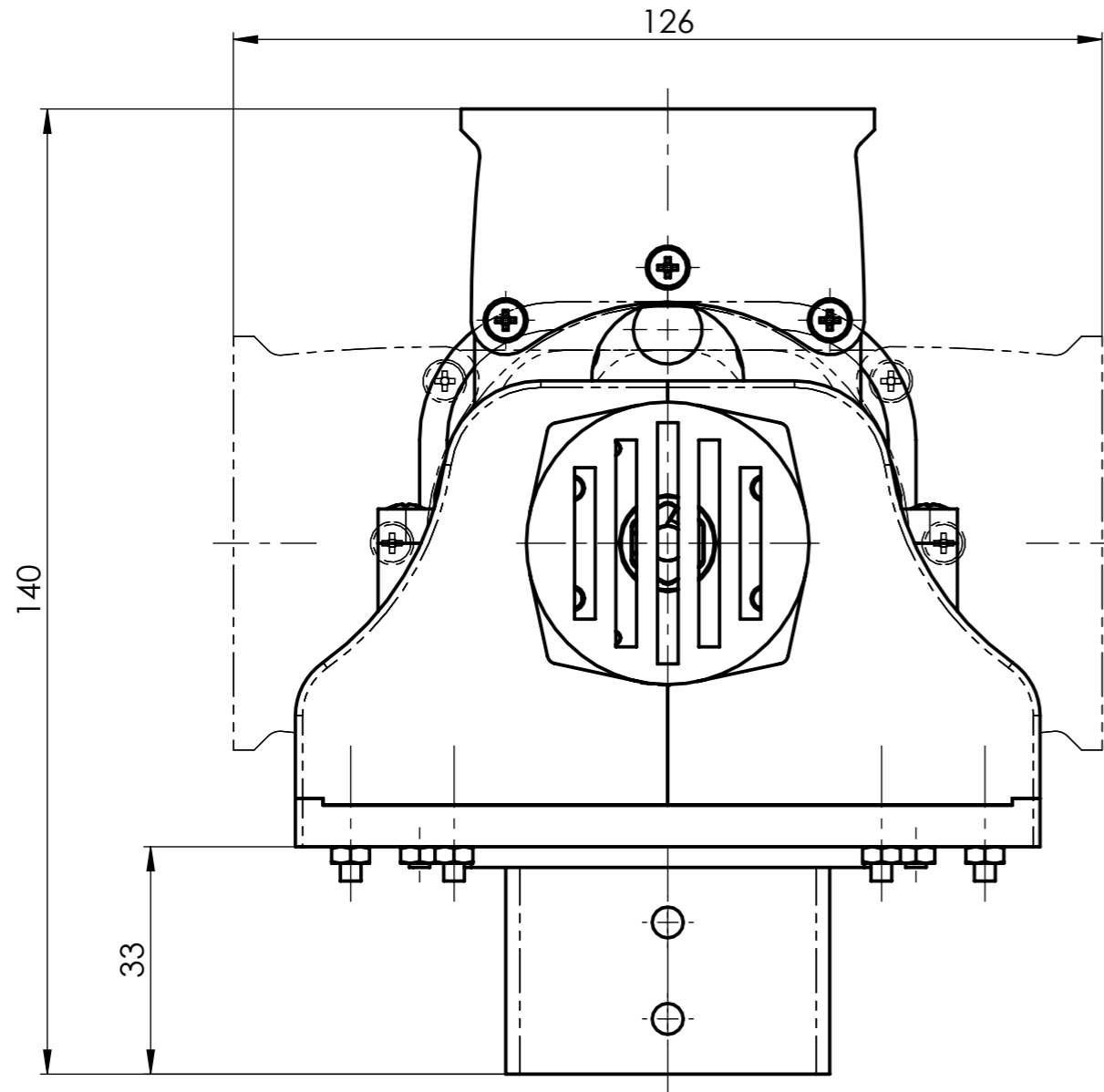


| | | | | | | | |
|--|---------|-----------|------|--|--|--------------------------|---|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | 1:2 | DESENHOU | GM | | 24/04/2025 | CONJUNTO: BRAÇO ROBÓTICO | |
| MATERIAL: | | VERIFICOU | | | TÍTULO: JUNTA 3 | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | APROVOU | | | DESENHO N.º A3 BR.01.03 | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | NOTAS: | | | | | |
| | | | | | 1/2 | | - |

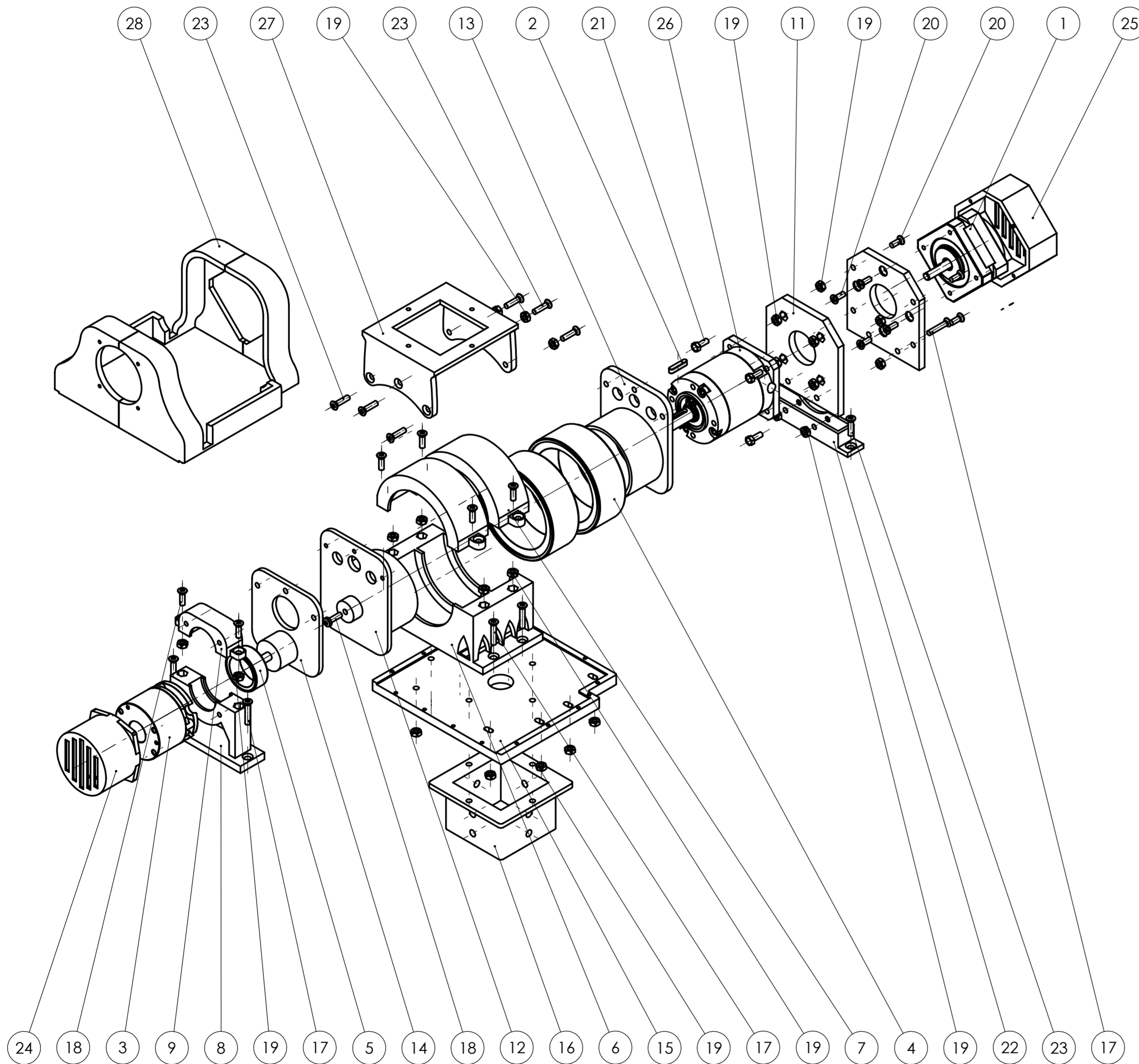


| | | | | | | |
|----|--|--------|---------------|------------------|-----------|----------------|
| 31 | Caixa de velocidades MG17-G100 | 1 | | | 450.00 | STEPPER ONLINE |
| 30 | Capa do motor | 1 | | ABS | 15.35 | |
| 29 | Capa do travão | 1 | | ABS | 6.37 | |
| 28 | Capa da junta | 2 | | ABS | 49.96 | |
| 27 | Parafuso de cabeça hexagonal - M4 x 16 | 4 | ISO 4017 | | | |
| 26 | Porcas em T M4 | 4 | | Galvanized Steel | | Bosch Rexroth |
| 25 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 24 | Base dos espaçadores | 1 | | ABS | 5.85 | |
| 23 | Parafuso de cabeça hexagonal - M3 x 8 | 8 | ISO 4017 | | | |
| 22 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 8 - Z | 4 | ISO 7047 | | | |
| 21 | Porca hexagonal M3 | 28 | ISO 4032 | | | |
| 20 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 6 | ISO 7047 | | | |
| 19 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 16 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 18 | Acoplamento da calha anterior | 1 | | ABS | 64.71 | |
| 17 | Base da junta | 1 | | ABS | 66.76 | |
| 16 | Suporte das calhas | 2 | BR.01.02.04 | 1060 Alloy | 31.39 | |
| 15 | Acoplador 3 | 1 | BR.01.02.03 | 1060 Alloy | 30.19 | |
| 14 | Acoplador 2 | 1 | BR.01.02.02 | 1060 Alloy | 43.35 | |
| 13 | Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01 | 1060 Alloy | 53.77 | |
| 12 | Espaçador da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 14.36 | |
| 11 | Espaçador do motor | 1 | | ABS | 14.53 | |
| 10 | Calha de alumínio extrudido perfil 40x40 mm e comprimento 200 mm | 1 | | EN-AW 6060 | 300.00 | Bosch Rexroth |
| 9 | Parte superior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 5.27 | |
| 8 | Parte inferior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 18.03 | |
| 7 | Parte superior da chumaceira da caixa de velocidades | 2 | | ABS | 11.11 | |
| 6 | Parte inferior da chumaceira da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 74.90 | |
| 5 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - HK 2010 - 22.SI.NC.22 | 1 | | | | SKF |
| 4 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - RNA 4908 - 24.SI.NC.24 | 2 | | | | SKF |
| 3 | Travão SWB-01 | 1 | | | 500.00 | STEPPER ONLINE |
| 2 | Chaveta paralela A 3x3x14 - S1 | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 1 | Motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K | 1 | | | 260.00 | STEPPER ONLINE |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

| | | | |
|--|-------------|---------------------------|--|
| | ESCALA: | 1:2 | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | DESENHOU: | GM | DATA: |
| MATERIAL: | APROVOU: | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | |
| TOLERÂNCIA: TOLERÂNCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: | TÍTULO: JUNTA 3 | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | DESENHO Nº: | BR.01.03 | FOLHA: 2/2 |
| | MASSA [g]: | | REVISÃO: - |

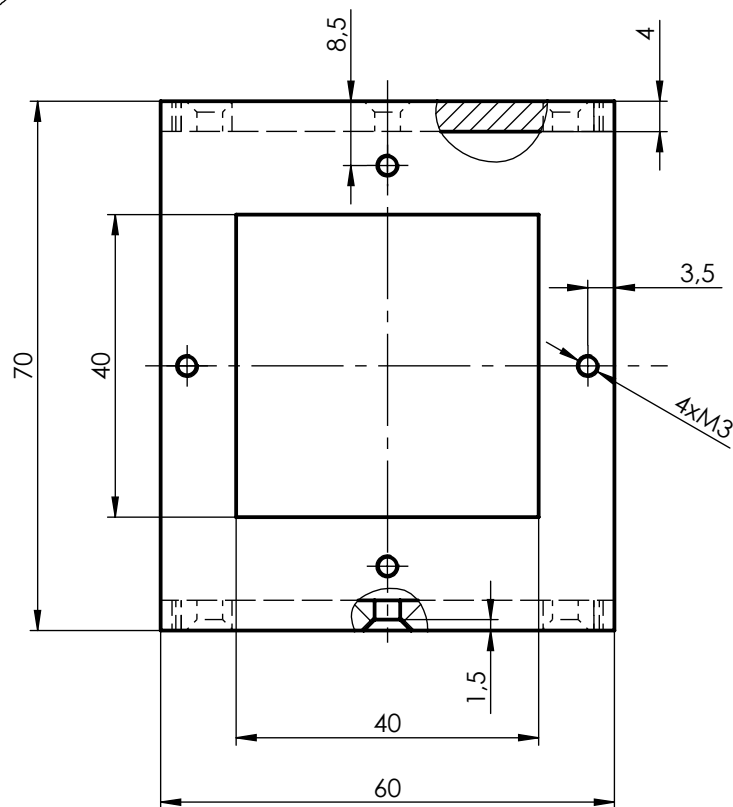
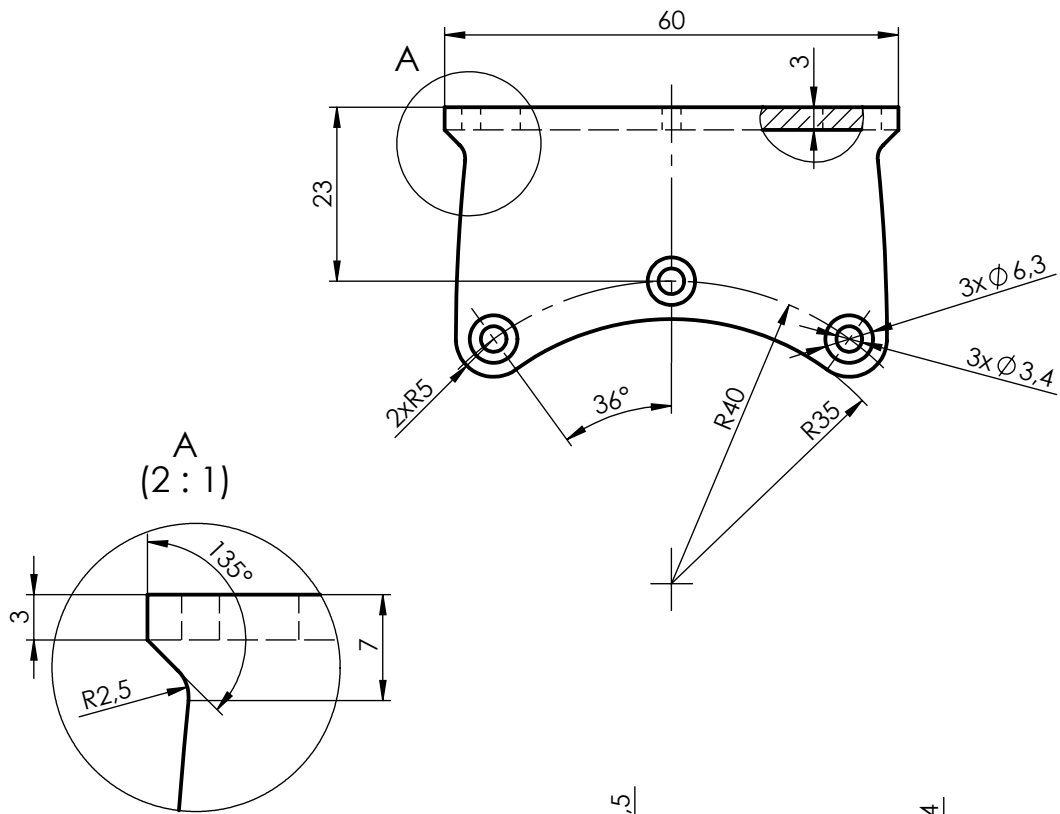


| | | | | | | | | |
|--|---------|-----------|------|--|--|--------------------------|------------|----------|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | |
| | 1:1 | DESENHOU | GM | | 24/04/2025 | CONJUNTO: BRAÇO ROBÓTICO | | |
| MATERIAL: | | VERIFICOU | | | TÍTULO: | | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | APROVOU | | | <h2 style="text-align: center;">JUNTA DE INCLINAÇÃO</h2> | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | NOTAS: | | | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | | | A3 BR.01.04 | 1/2 | | - |

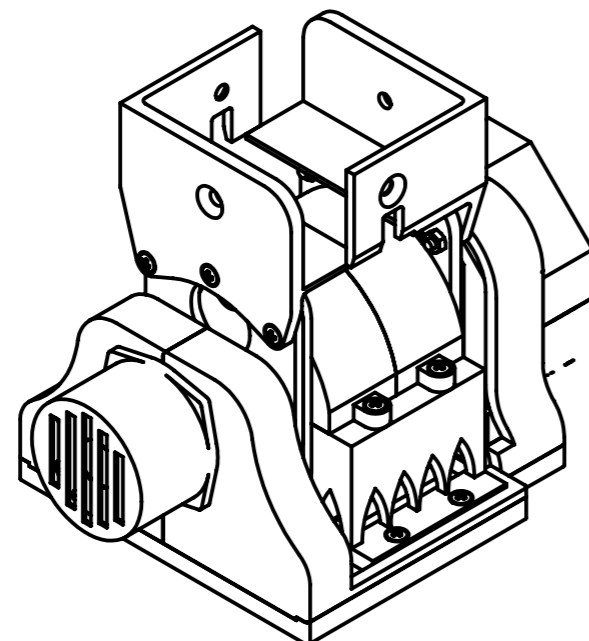
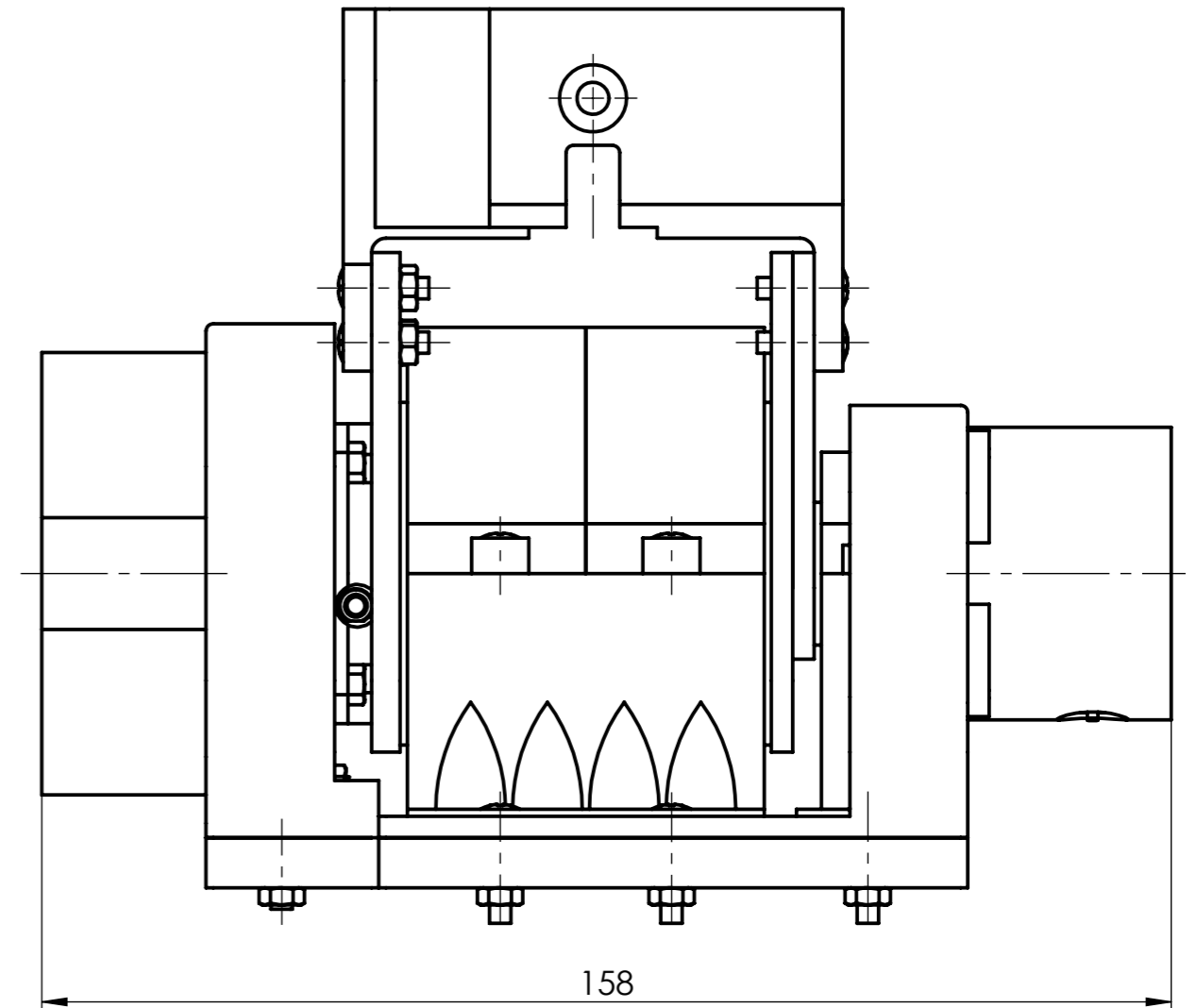
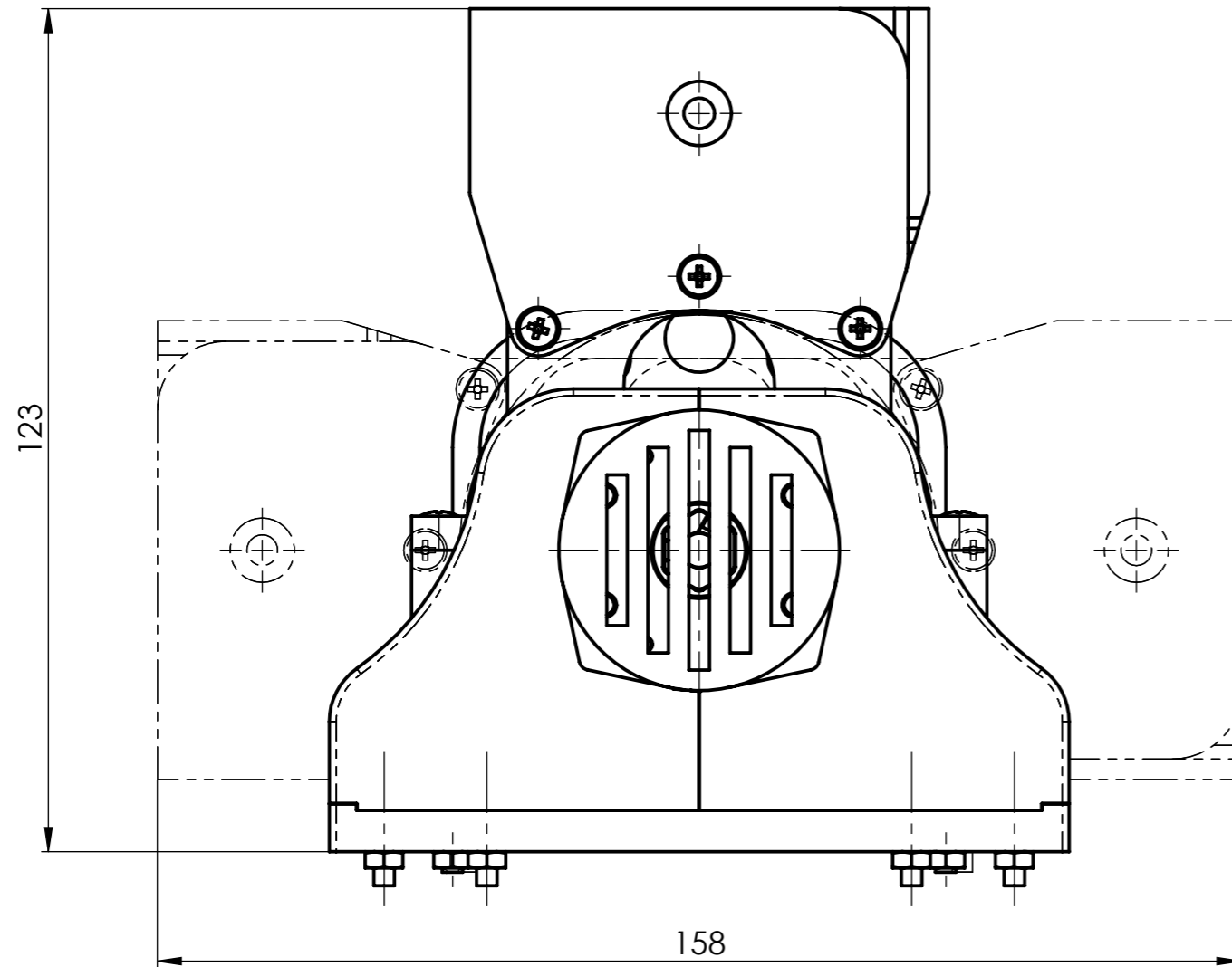


| | | | | | | |
|----|--|--------|---------------|------------|-----------|----------------|
| 28 | Capa da junta | 2 | | ABS | 54.97 | |
| 27 | Suporte da junta de guinada | 1 | BR.01.04.01 | 1060 Alloy | 54.65 | |
| 26 | Caixa de velocidades MG17-G20 | 1 | | | 320.00 | STEPPER ONLINE |
| 25 | Capa do motor | 1 | | ABS | 15.35 | |
| 24 | Capa do travão | 1 | | ABS | 6.37 | |
| 23 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 22 | Base dos espaçadores | 1 | | ABS | 5.85 | |
| 21 | Parafuso de cabeça hexagonal - M3 x 8 | 4 | ISO 4017 | | | |
| 20 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 8 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 19 | Porca hexagonal M3 | 27 | ISO 4032 | | | |
| 18 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 7 | ISO 7047 | | | |
| 17 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 16 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 16 | Acoplamento da calha anterior | 1 | | ABS | 64.71 | |
| 15 | Base da junta | 1 | | ABS | 66.76 | |
| 14 | Acoplador 3 | 1 | BR.01.02.03 | 1060 Alloy | 30.19 | |
| 13 | Acoplador 2 | 1 | BR.01.02.02 | 1060 Alloy | 43.35 | |
| 12 | Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01 | 1060 Alloy | 53.77 | |
| 11 | Espaçador da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 14.36 | |
| 10 | Espaçador do motor | 1 | | ABS | 14.53 | |
| 9 | Parte superior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 5.27 | |
| 8 | Parte inferior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 18.03 | |
| 7 | Parte superior da chumaceira da caixa de velocidades | 2 | | ABS | 11.11 | |
| 6 | Parte inferior da chumaceira da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 74.90 | |
| 5 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - HK 2010 - 22,SI,NC,22 | 1 | | | | SKF |
| 4 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - RNA 4908 - 24,SI,NC,24 | 2 | | | | SKF |
| 3 | Travão SWB-01 | 1 | | | 500.00 | STEPPER ONLINE |
| 2 | Chaveta paralela A 3x3x14 - S1 | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 1 | Motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K | 1 | | | 260.00 | STEPPER ONLINE |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

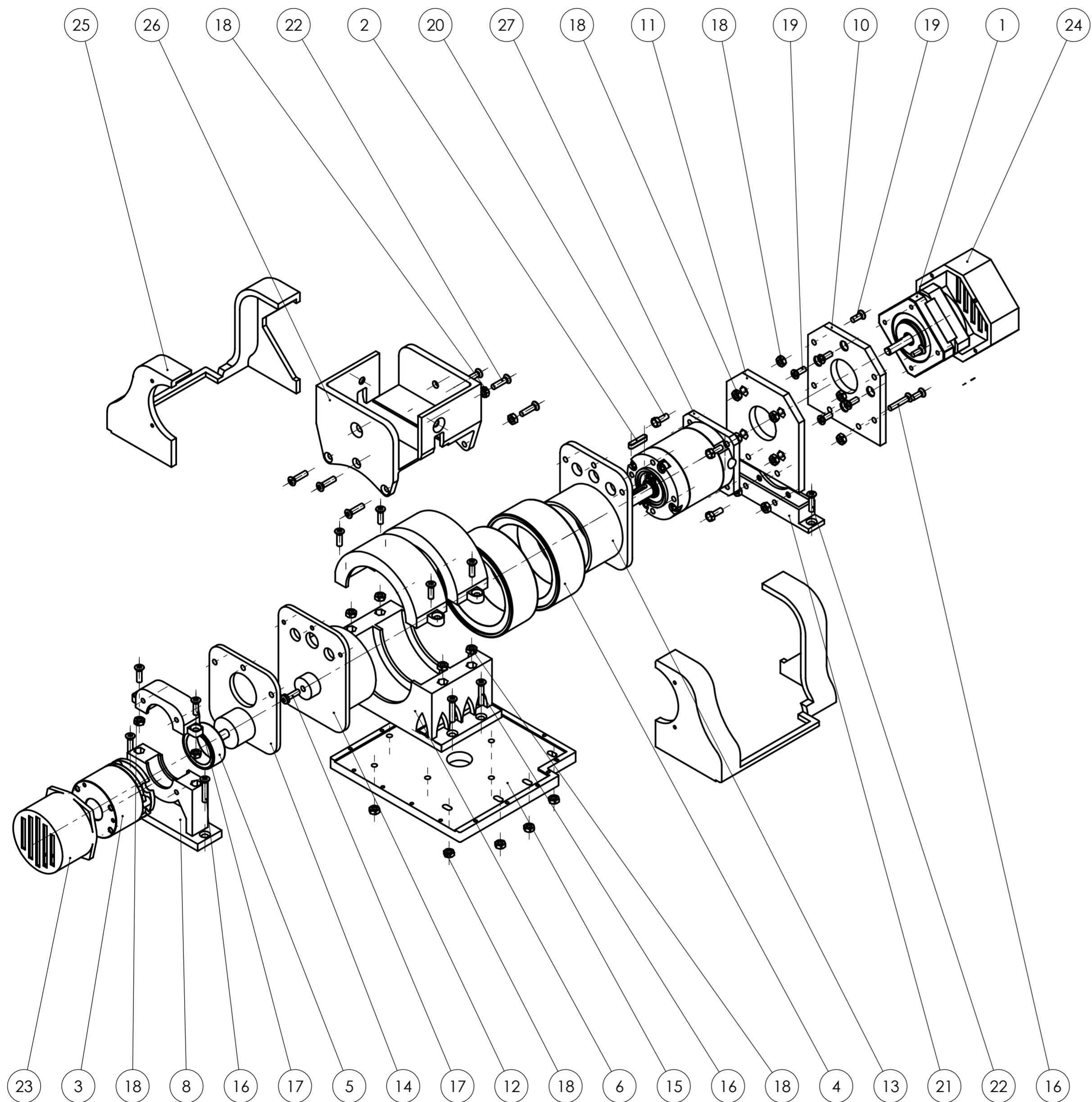
| | | | | | | |
|--|----------|---|------------|------------|----------|------------|
| | ESCALA: | 1:2 | NOME: | GM | DATA: | 16/04/2025 |
| | DESENHO: | | VERIFICOU: | | | |
| MATERIAL: | | APROVOU: | | | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERÂNCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO TÍTULO: JUNTA DE INCLINAÇÃO | | | | |
| | | DESENHO Nº | FOJHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: | |
| | | A2 | BR.01.04 | 2/2 | - | |



| | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------------|---|
| | ESCALA: 1:1 | NOME GM | DATA 15/04/2025 | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | DESENHOU VERIFICOU | APROVOU | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | NOTAS: | | DESENHO N.º A4 BR.01.04.01 |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | | | FOLHA: 1/1 |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | MASSA [g]: 54.65 |
| | | | | REVISÃO: - |

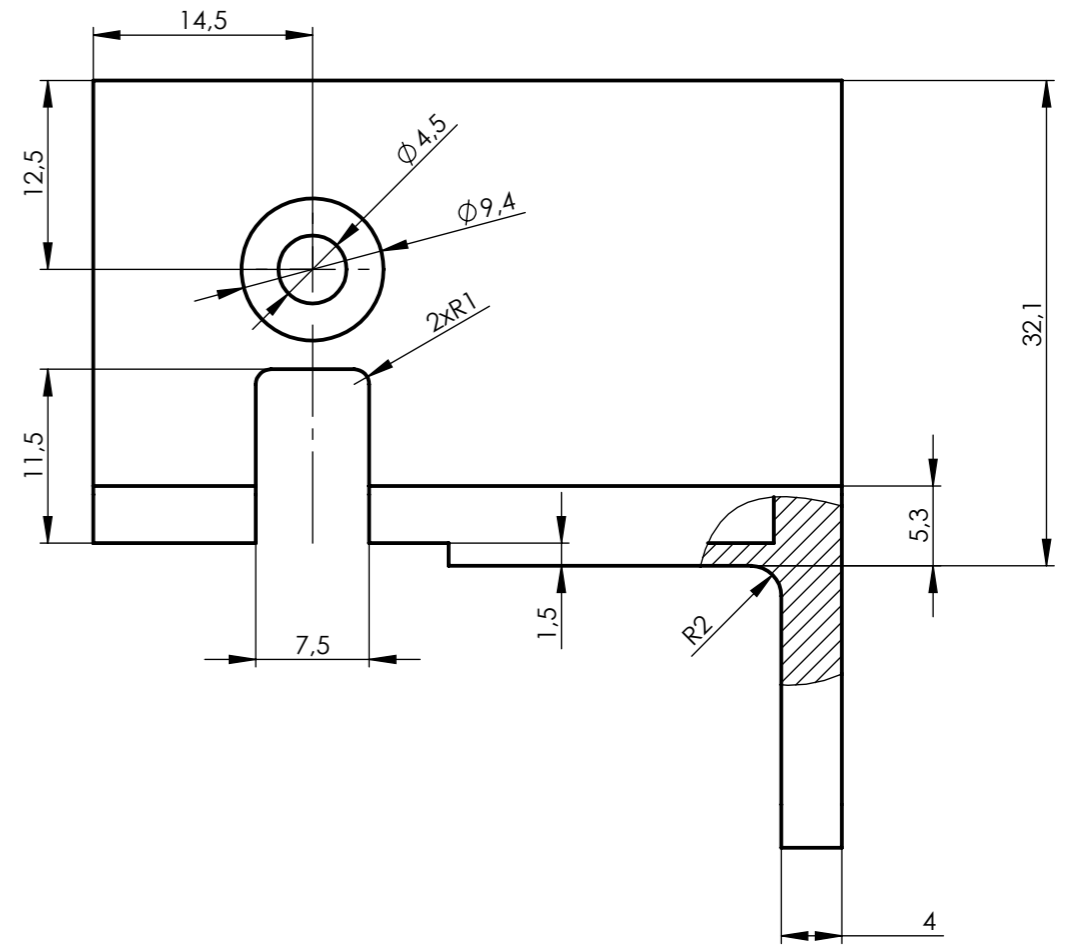
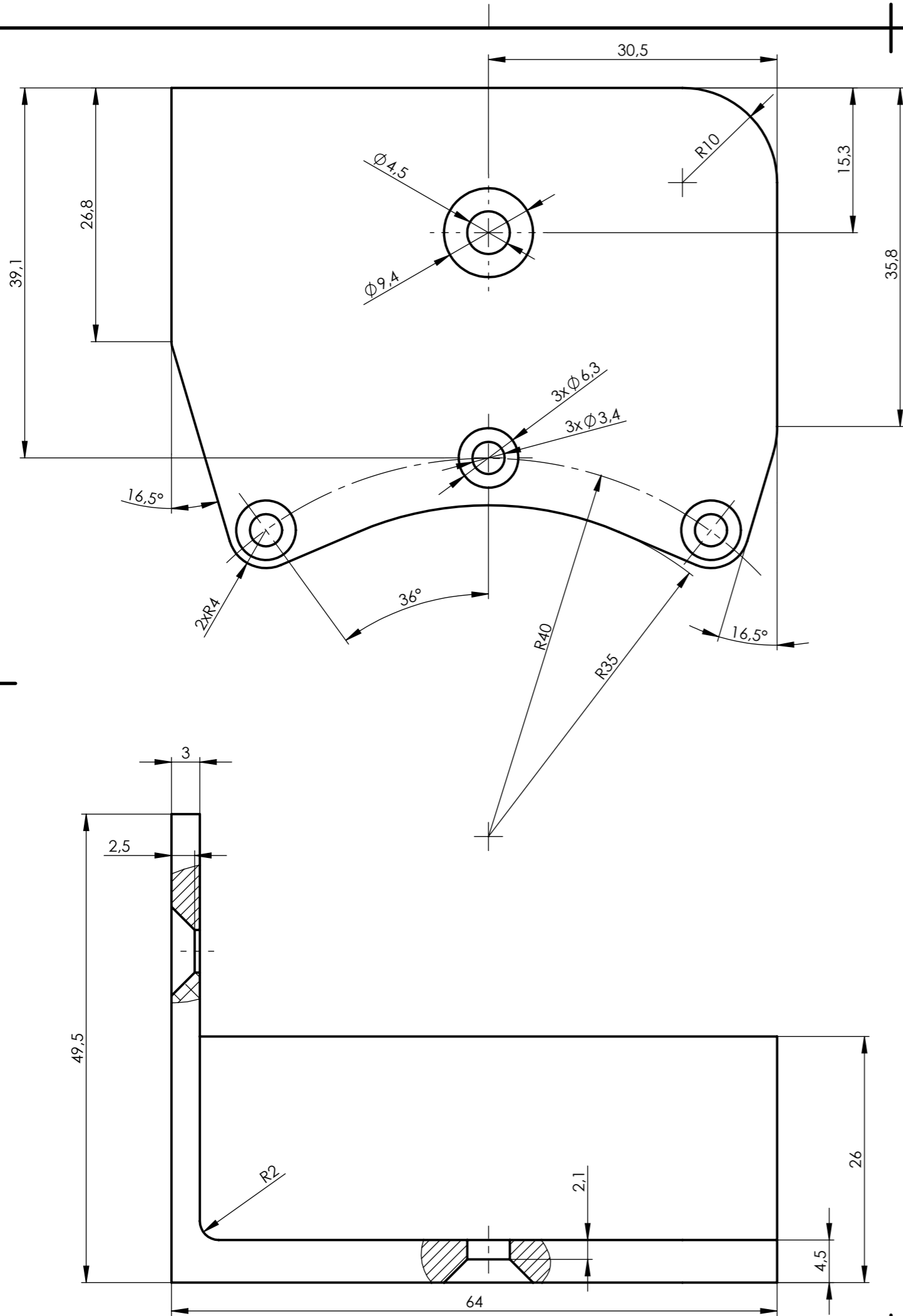


| | | | | | | | | |
|--|---------|-----------|------|--|--|--------------------------|------------|----------|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | |
| | 1:1 | DESENHOU | GM | | 24/04/2025 | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | |
| MATERIAL: | | VERIFICOU | | | TÍTULO: JUNTA DE GUINADA | | | |
| TOLERÂNCIA GERAL: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | APROVOU | | | | | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | NOTAS: | | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | | | A3 BR.01.05 | 1/2 | | - |

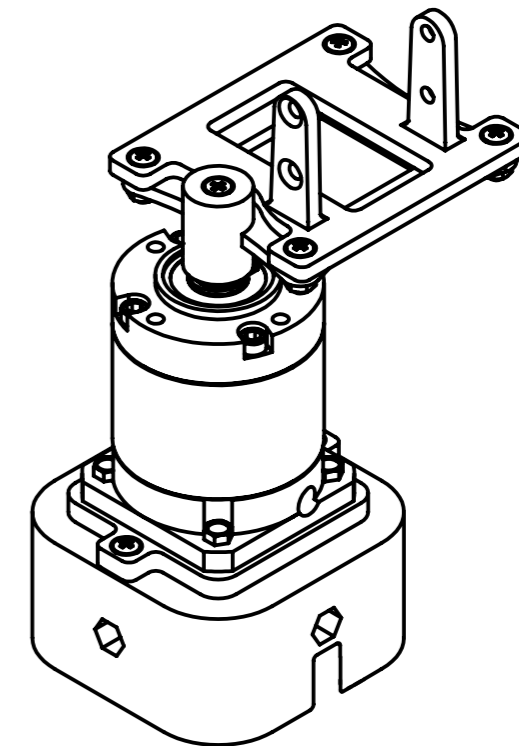
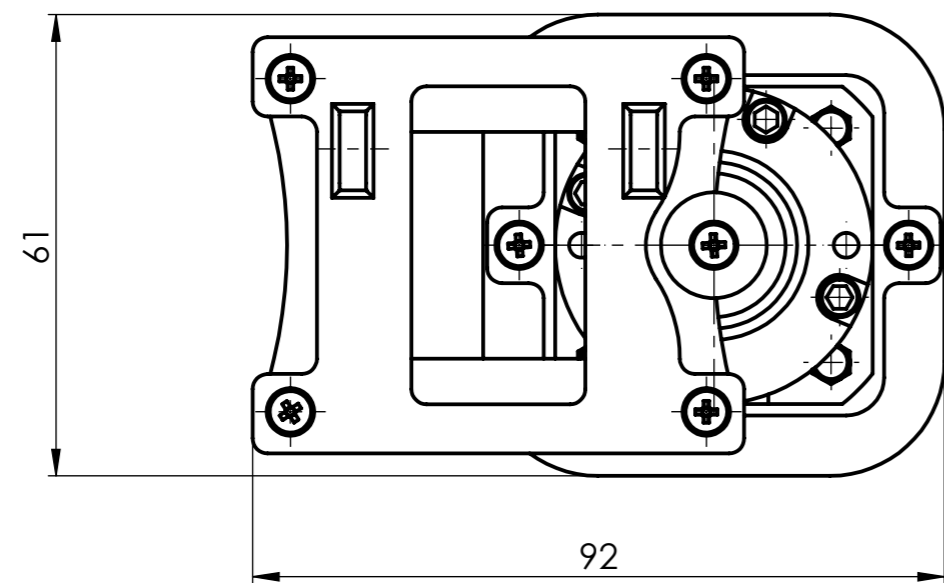
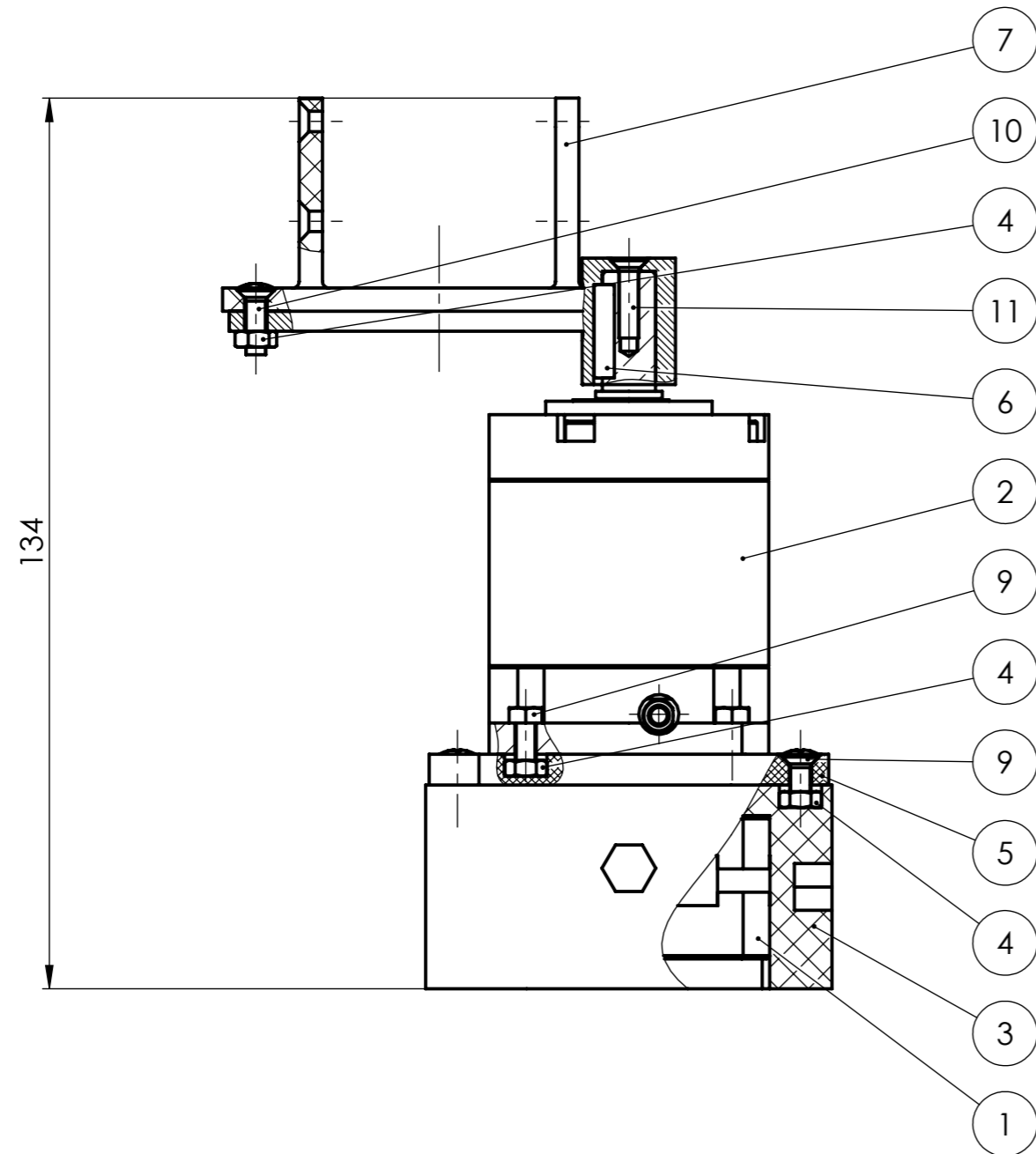


| | | | | | | |
|----|--|--------|---------------|------------|-----------|----------------|
| 27 | Caixa de velocidades MG17-G20 | 1 | | | 320.00 | STEPPER ONLINE |
| 26 | Suporte da junta de rolamento | 2 | BR.01.05.01 | 1060 Alloy | 49.20 | |
| 25 | Capa da junta | 2 | | ABS | 24.42 | |
| 24 | Capa do motor | 1 | | ABS | 15.35 | |
| 23 | Capa do travão | 1 | | ABS | 6.37 | |
| 22 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 21 | Base dos espaçadores | 1 | | ABS | 5.85 | |
| 20 | Parafuso de cabeça hexagonal - M3 x 8 | 4 | ISO 4017 | | | |
| 19 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 8 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 18 | Porca hexagonal M3 | 27 | ISO 4032 | | | |
| 17 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 7 | ISO 7047 | | | |
| 16 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 16 - Z | 8 | ISO 7047 | | | |
| 15 | Base da junta | 1 | | ABS | 66.76 | |
| 14 | Acoplador 3 | 1 | BR.01.02.03 | 1060 Alloy | 30.19 | |
| 13 | Acoplador 2 | 1 | BR.01.02.02 | 1060 Alloy | 43.35 | |
| 12 | Acoplador 1 | 1 | BR.01.02.01 | 1060 Alloy | 53.77 | |
| 11 | Espaçador da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 14.36 | |
| 10 | Espaçador do motor | 1 | | ABS | 14.53 | |
| 9 | Parte superior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 5.27 | |
| 8 | Parte inferior da chumaceira do travão | 1 | | ABS | 18.03 | |
| 7 | Parte superior da chumaceira da caixa de velocidades | 2 | | ABS | 11.11 | |
| 6 | Parte inferior da chumaceira da caixa de velocidades | 1 | | ABS | 74.90 | |
| 5 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - HK 2010 - 22.SI,NC,22 | 1 | | | | SKF |
| 4 | Rolamento de rolos de agulhas SKF - RNA 4908 - 24.SI,NC,24 | 2 | | | | SKF |
| 3 | Travão SWB-01 | 1 | | | 500.00 | STEPPER ONLINE |
| 2 | Chaveta paralela A 3x3x14 - S1 | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 1 | Motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K | 1 | | | 260.00 | STEPPER ONLINE |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

| | | | | | | |
|--|-----------|--------------------------|--|--|------------|----------|
| | ESCALA: | 1:2 | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | DESENHOU: | GM | | DATA: | 16/04/2025 | |
| MATERIAL: | APROVOU: | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | TÍTULO: JUNTA DE GUINADA | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERÂNCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: | DESENHO Nº | | FOJHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | A2 | | BR.01.05 | 2/2 | - |

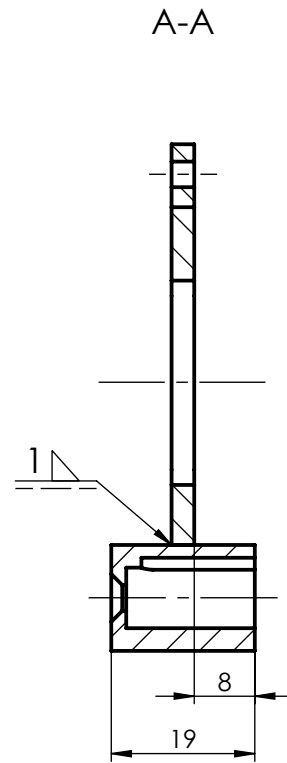
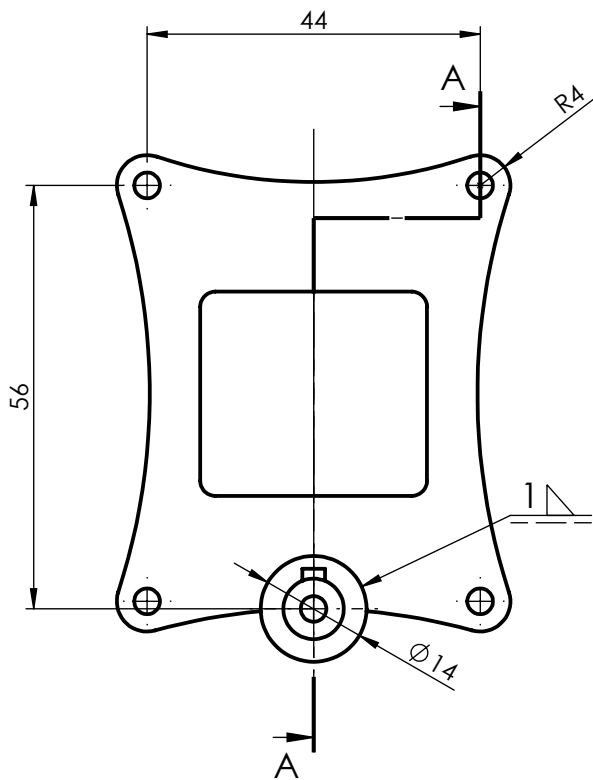


| | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------|----------|------|--------------------------------|--|--------------------------|------------|----------|--|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | | |
| | 2:1 | DESENHOU | GM | | 15/04/2025 | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | | |
| | MATERIAL: | | | | TÍTULO: | | | | |
| 1060 Alloy | | | | SUPOORTE DA JUNTA DE ROLAMENTO | | | | | |
| TOLERÂNCIA GERAL: | | | | NOTAS: | A3 | | | | |
| TOLERANCIAMENTO ISO 8015 | | | | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: | |
| ISO 2768-mK | | | | | BR.01.05.01 | 1/1 | 49.20 | - | |
| ACABAMENTOS: | | | | ISO 21920 | | | | | |



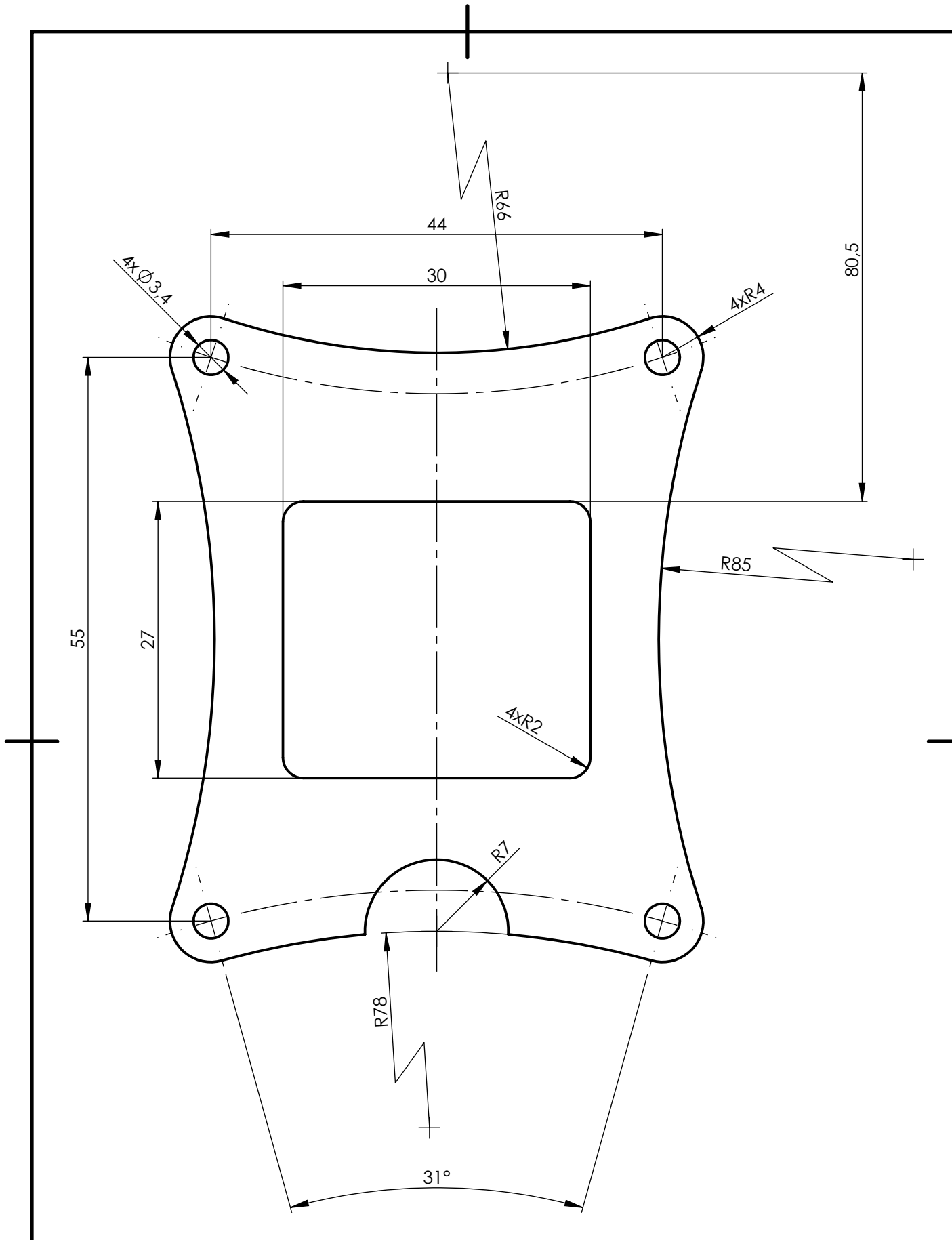
| | | | | | | |
|----|--|--------|---------------|------------|------------|----------------|
| 11 | Parafuso de cabeça de embeber com oco cruciforme - M3 x 12 - Z | 1 | ISO 7046 | | | |
| 10 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 10 - Z | 4 | ISO 7047 | | | |
| 9 | Parafuso de cabeça de embeber boleada com oco cruciforme - M3 x 8 - Z | 10 | ISO 7047 | | | |
| 8 | Acoplamento do suporte da extrusora | 1 | BR.01.06.01 | 1060 Alloy | 20.26 | |
| 7 | Suporte da extrusora | 1 | | ABS | 8.58 | |
| 6 | Chaveta paralela A 3x3x14 - St | 1 | DIN 6885/1 | | | |
| 5 | Espaçador | 1 | | ABS | 7.69 | |
| 4 | Porca hexagonal M3 | 10 | ISO 4032 | | | |
| 3 | Suporte do motor | 1 | | ABS | 58.71 | |
| 2 | Caixa de velocidades MG17-G20 | 1 | | | 320.00 | STEPPER ONLINE |
| 1 | Motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K | 1 | | | 260.00 | STEPPER ONLINE |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [kg] | OBS. |

| | | | | | | |
|--|-------------|----------|--------|-------------------------------|--|--|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | |
| | 1:1 | DESENHOU | GM | | 24/04/2025 | |
| MATERIAL: | VERIFICOU | APROVOU | | CONJUNTO: | BRAÇO ROBOTICO | |
| TOLERÂNCIA GERAL: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: | | | TÍTULO: JUNTA DE ROLAMENTO | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | DESENHO N.º | | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: | |
| | A3 BR.01.06 | | 1/1 | | - | |

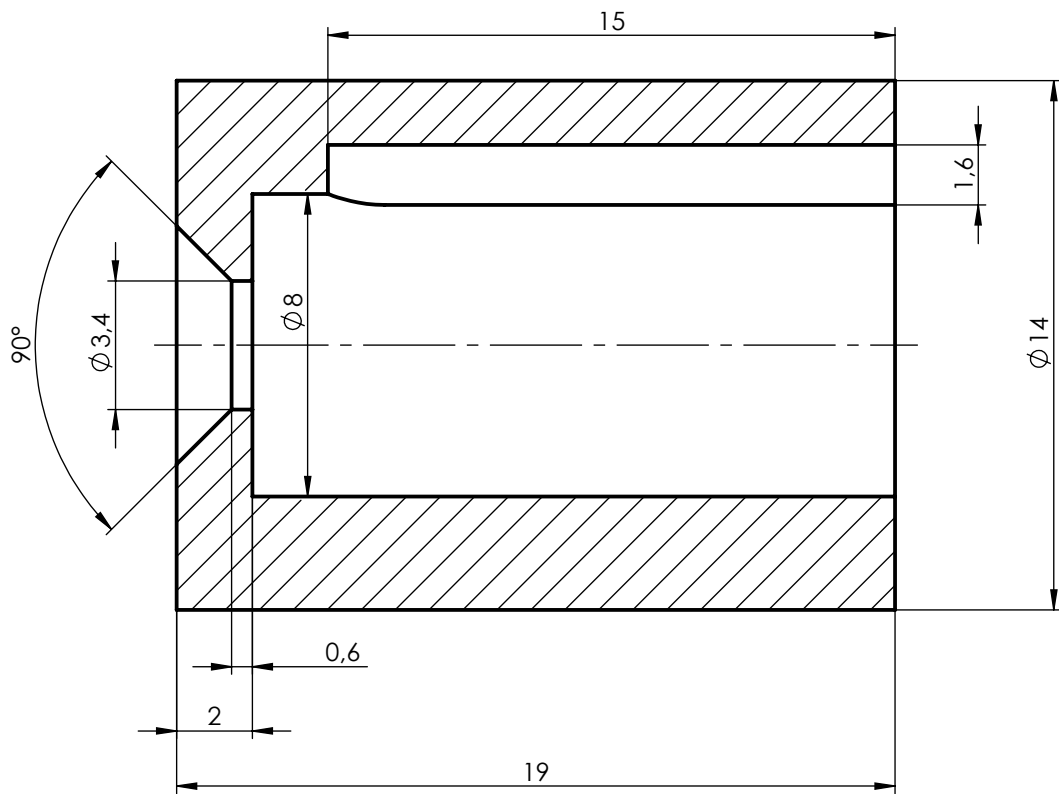


| 2 | Cilindro com escatel do acoplamento da extrusora | 1 | BR.01.06.01.002 | 1060 Alloy | 5.34 | |
|----|--|--------|-----------------|------------|-----------|------|
| 1 | Placa de acoplamento do suporte da extrusora | 1 | BR.01.06.01.001 | 1060 Alloy | 14.92 | |
| Nº | DESIGNAÇÃO | QUANT. | NORMA DES. Nº | MATERIAL | MASSA [g] | OBS. |

| | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------|------|-------------|---|------------|----------|
| | ESCALA: 1:1 | DESENHOU | NOME | DATA | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | | VERIFICOU | GM | 15/04/2025 | | | |
| MATERIAL: | | APROVOU | | | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | NOTAS: | | | TÍTULO: ACOPLAMENTO DO SUPORTE DA EXTRUSORA | | |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | A4 | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| | | | | BR.01.06.01 | 1/1 | | - |



| | | | | | | | | |
|--|---|-----------|------|-----------|--|--------------------------|------------|----------|
| | ESCALA: | NOME | DATA | | INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA | | | |
| | 2:1 | DESENHOU | GM | | 15/04/2025 | CONJUNTO: BRAÇO ROBOTICO | | |
| MATERIAL: | | VERIFICOU | | | TÍTULO: PLACA DE ACOPLAMENTO DO SUPORTE DA EXTRUSORA | | | |
| 1060 Alloy | | APROVOU | | | DESENHO N.º | FOLHA: | MASSA [g]: | REVISÃO: |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | NOTAS: A placa tem uma espessura de 3 mm | | | A4 | BR.01.06.01.001 | 1/1 | 14.92 | - |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | | | | | |



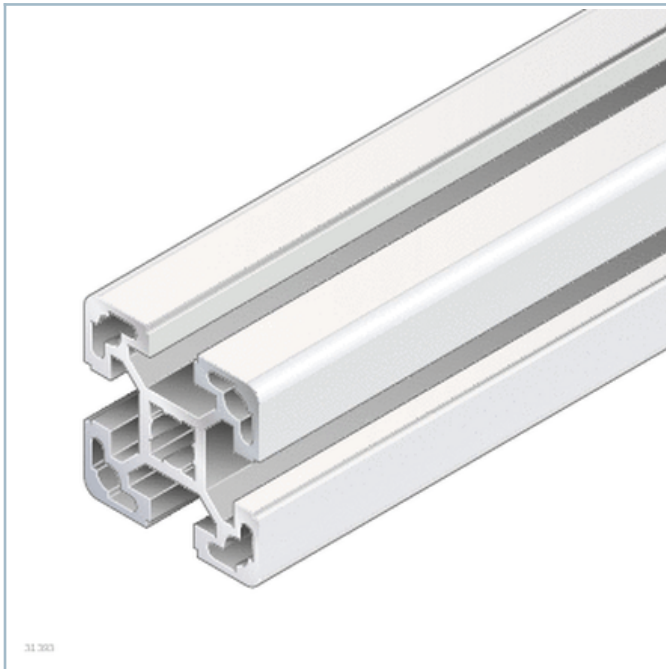
NOTA: Escatel normalizado segundo a norma
DIN 6885/1 com uma largura de 3 N9 mm

| | | | | |
|--|-----------------------|----------------------|--------------------|---|
| | ESCALA: 5:1 | NOME DESENHOU GM | DATA 15/04/2025 | ISEL INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA |
| | | VERIFICOU APROVOU | NOTAS: | |
| MATERIAL: 1060 Alloy | | | | DESENHO N.º A4 BR.01.06.01.002 |
| TOLERÂNCIA: TOLERANCIAMENTO ISO 8015 ISO 2768-mK | | | | FOLHA: 1/1 |
| ACABAMENTOS: ISO 21920 | | | | MASSA [g]: 5.34 |
| | | | | REVISÃO: - |

Anexos

Anexo A: Catálogo das calhas utilizadas

Strut profile 40x40L



Product description

[Quick & Easy profile finishes](#)

[Introduction to strut profiles](#)

Technical data

[Quick & Easy profile finishes](#)

Dimensions

Strut profile 40x40L

40x40L

A = 5,6 cm²

I_x = 9,1 cm⁴

I_y = 9,1 cm⁴

W_x = 4,5 cm³

W_y = 4,5 cm³

I_t = 1,3 cm⁴

W_t = 0,74 cm³

m = 1,5 kg/m

19199

Ordering codes

The following caps with holes are needed:



40x40 signal gray (1 item)





40x40 black (1 item)

The following cover caps are needed:

40x40 signal gray (1 item)

40x40 black (1 item)

| | L |  |  | ESD | No. |
|------------------------------------|--------------|--|---|-----|------------|
| | mm | | | | |
| Strut profile 40x40L | 50 ... 6070 | | 1 | | 3842993120 |
| Strut profile 40x40L M12/- | 60 ... 6000 | | 1 | | 3842993121 |
| Strut profile 40x40L M12/M12 | 110 ... 6000 | | 1 | | 3842993122 |
| Strut profile 40x40L M12/D17 | 90 ... 6000 | | 1 | | 3842993123 |
| Strut profile 40x40L D17/- | 60 ... 6000 | | 1 | | 3842993124 |
| Strut profile 40x40L D17/D17 | 80 ... 6000 | | 1 | | 3842993125 |
| Strut profile 40x40L D17/D17V | 80 ... 6000 | | 1 | | 3842993126 |
| Strut profile 40x40L D9,8/D9,8 | 80 ... 6000 | | 1 | | 3842993129 |
| Strut profile 40x40L, 20xL=6070mm | 6070 | 20 | | | 3842529339 |
| Strut profile 40x40L Q&E, L50-6000 | 50 ... 6070 | | | | 3842993724 |
| Cover cap 40x40, signal gray | | | 100 | | 3842548746 |

| | L |  |  | ESD | No. |
|--|------|---|--|---|------------|
| | mm | | | | |
| Cover cap 40x40, black | | | 20 |  | 3842548747 |
| Cover cap with hole 40x40, signal gray | | | 20 | | 3842548782 |
| Cover cap with hole 40x40, black | | | 20 |  | 3842548783 |
| Strut profile 40x40L | 6070 | | 1 | | 3842529340 |

Quick & Easy profile finishes

| | |
|--|-------------------------------------|
| Standard profile finishes (note minimum length) ¹⁾ | M12 / D9,8 / D17 / DB17 / F1 (A) |
| Customized profile finishes ($L_{\max} = 5400$ mm) ²⁾ | DI / DIS / MT / MTS / MI / MIS / DG |

1) For the specified slots

2) $DG_{\max} = 45^\circ$; $L_{\min1} / L_{\min2} = 370 / 440$ mm

Technical data for strut profiles

| | | |
|-----------------|--|---|
| EN AW – Al MgSi | | Material designation according to DIN EN 573 for Rexroth strut profiles |
|-----------------|--|---|

| | | |
|--------------|--|---|
| EN AW – 6060 | | Material number according to DIN EN 573 |
|--------------|--|---|

| | | |
|-------|-------------------------|---|
| R_m | = 245 N/mm ² | Minimum tensile strength (in direction of pressure) |
|-------|-------------------------|---|

| | | |
|------------|-------------------------|--|
| $R_{p0,2}$ | = 195 N/mm ² | 0.2% proof stress (in direction of pressure) |
|------------|-------------------------|--|

| | | |
|----------|-------|---------------------------------|
| A_5 | = 10% | Ductile yield A_5 or A_{10} |
| A_{10} | = 8 % | |

| | | |
|---|---------------------------|-------------------------|
| E | = 70000 N/mm ² | Modulus of elasticity E |
|---|---------------------------|-------------------------|

| | | |
|-------|--|------------------|
| 75 HB | | Brinell hardness |
|-------|--|------------------|

| | | |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| $\alpha_{(-50...+20\text{ °C})}$ | = 21.8 x 10 ⁻⁶ 1/K | Longitudinal expansion coefficient |
| $\alpha_{(+20...100\text{ °C})}$ | = 23.4 x 10 ⁻⁶ 1/K | |

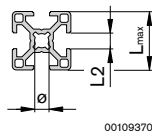
μ = 0.34 Poisson's ratio

E6/EV1 - 12 μm - 300 HV Anodizing process – layer thickness – layer hardness

| L_{max} | 11-20 | 22.5-30 | 40 | 45-60 |
|------------------|------------|-----------|--------|-----------|
| t | ± 0.15 | ± 0.2 | $+0.6$ | ± 0.3 |

Permitted dimensional tolerance t (mm) for profiles from different deliveries

| L_{max} | 80 | 90 | 120 | 160 |
|------------------|--------|-----------|--------|--------|
| t | $+0.8$ | ± 0.4 | $+1.0$ | $+1.6$ |



00109370

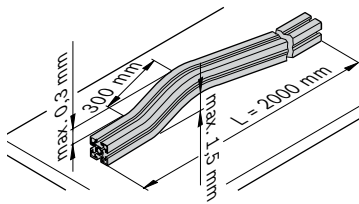
| L_{max} | 180 | 270 | 360 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| t | ± 0.6 | ± 1.0 | ± 1.5 |

| L2 | 6 | 8 | 10 |
|-----|--------|--------|--------|
| t | $+0.3$ | $+0.3$ | $+0.4$ |

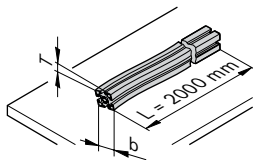
| \emptyset | 5.5 | 7.3 | 10 | 15 |
|-------------|------------------|------------------|------------|------------|
| t | -0.1 $+0.2$ | -0.1 $+0.2$ | ± 0.15 | ± 0.15 |

Deviation limits and form tolerances according to DIN EN 12020-2

Rexroth profiles generally fall well within the generally applicable tolerances specified in the standard. They are specifically defined for the individual products.



Longitudinal straightness tolerance of profile

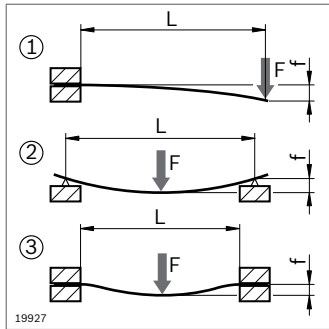


00126465

Longitudinal torsional tolerance of profile

| b (mm) | T (mm) |
|-------------|-------------|
| ≤ 100 | 1.2 |
| 100 ... 150 | 1.5 |
| 150 ... 200 | 1.8 |
| 200 ... 350 | 2.5 |

Profile deflection



$$f_{\textcircled{1}} = \frac{F \times L^3}{3 E \times I \times 10^4}$$

Profile deflection due to force F for static load cases ①②③

$$f_{\textcircled{2}} = \frac{F \times L^3}{48 E \times I \times 10^4}$$

$$f_{\textcircled{3}} = \frac{F \times L^3}{192 E \times I \times 10^4}$$

$$f_{\textcircled{1}} = \frac{m' \times g \times L^4}{8 E \times I \times 10^4}$$

Profile deflection due to the profile's own weight

$$f_{\textcircled{2}} = \frac{5 \times m' \times g \times L^4}{384 E \times I \times 10^4}$$

$$f_{\textcircled{3}} = \frac{m' \times g \times L^4}{384 E \times I \times 10^4}$$

$$\sigma_{\textcircled{1}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{W \times 10^3}$$

Control of max. occurring bending stress $\sigma_{b \max}$

$$\sigma_{\textcircled{2}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{4 W \times 10^3}$$

$$\sigma_{\textcircled{3}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{8 W \times 10^3}$$

$$\sigma_{b \max} < \sigma_{b \text{perm}}!$$

$S_{F \text{req}}$: Safety value required to avoid deformation (flow)

$$\sigma_{b \text{perm}} = \frac{R_{p0,2}}{S_{F \text{erf}}}$$

$\sigma_{b \text{perm}}$: Max. permissible bending stress

f (mm)

W (cm³)

F (N)

E = 70000 N/mm²

L (mm)

m' (kg/mm); m' = m/1000; m (p. 2-4 ... 2-7)

I (cm⁴)

g = 9.81 m/s² ≈ 10 m/s²

Anexo B: Propriedades da liga de alumínio EN AW 6060

The alloy EN AW-6060 is a widely used extrusion alloy, suitable for applications where no special strength properties are required. Parts can be produced with a very good surface quality, suitable for many coating operations. Typical application fields are furniture, finishing materials, windows and doors, carbody finishing, façade construction, lighting columns and flagpoles, architecture, and food industry.

Chemical composition according to EN573-3 (weight %, remainder Al)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | remarks | others | |
|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------|----------------------|-----------------------|
| 0.30 – 0.60 | 0.10 – 0.30 | max. 0.10 | max. 0.10 | 0.35 – 0.60 | max. 0.05 | max. 0.15 | max. 0.10 | | each max. 0.05 | total max. 0.15 |

Mechanical properties according to EN755-2

| Temper* | Wall thickness e*** | Yield stress Rp _{0.2} [MPa] | Tensile strength Rm [MPa] | Elongation | | Hardness** HB |
|---------|------------------------|---|------------------------------|------------|-----------------------|------------------|
| | | | | A [%] | A _{50mm} [%] | |
| T4 | e ≤ 25 | 60 | 120 | 16 | 14 | 45 |
| T5 | e ≤ 5 | 120 | 160 | 8 | 6 | 55 |
| | 5 < e ≤ 25 | 100 | 140 | 8 | 6 | 50 |
| T6 | e ≤ 5 | 150 | 190 | 8 | 6 | 65 |
| | 5 < e ≤ 25 | 140 | 170 | 8 | 6 | 60 |
| T66 | e ≤ 5 | 160 | 215 | 8 | 6 | 70 |
| | 5 < e ≤ 25 | 150 | 195 | 8 | 6 | 65 |

* Temper designation according to EN515: T4-Naturally aged to a stable condition, T5-cooled from an elevated temperature forming operation and artificially aged, T6-Solution heat treated, quenched and artificially aged, T66-cooled from an elevated temperature forming operation and artificially aged to a condition with higher mechanical properties through special control of manufacturing processes. T6 and T66 properties can be achieved by press quenching)

** Hardness values are for indication only

*** For different wall thicknesses within one profile, the lowest specified properties shall be considered as valid for the whole profile cross section

Physical properties (approximate values, 20 °C)

| Density [kg/m ³] | Melting range [°C] | Electrical conductivity [MS/m] | Thermal conductivity [W/m.K] | Co-efficient of thermal expansion 10 ⁻⁶ /K (20-100 °C) | Modulus of elasticity [GPa] |
|------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------|---|-----------------------------|
| 2700 | 585 – 650 | 28 – 34 | 200 – 220 | 23.4 | ~ 70 |

Weldability*

Gas: 3 TIG: 2 MIG: 2

Typical filler materials (EN ISO 18273): AlMg5Cr(A) or AlSi5, and AlMg3 when the product has to be anodised. Due to the heat input during welding the mechanical properties will be reduced by approximately 50% (ref. EN1999 -1).

Machining characteristics*

T4 temper: 3 T5 and T6 temper: 2

Coating properties*

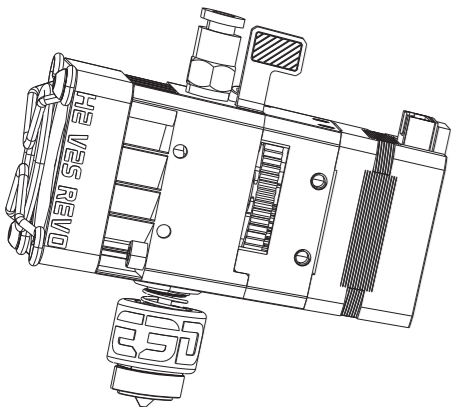
Hard/protective anodising: 1 Decorative/bright/colour anodising: 1

Corrosion resistance*

General: 1 Marine: 2

Values are copies from the material data sheets of Aluminium Verlag and ÖNORM EN755-2. Ranking from 1 (very good) to 6 (unsuitable).

Anexo C: Catálogo da extrusora *BIQU H2 V2S Revo*



H2 V2S REVO User Manual

Basic Parameters

- Extrusion Method: Dual Gear Extrusion
- Maximum Printing Temperature: 300°C
- Weight: 198g (including the fan.)
- Maximum Extrusion Force: 7.5kg (depending on the filament.)
- Extrusion (based on the existing): 1800mm³/min (depending on the filament.)
- E step: 932/mm at 16 microstep (Further calibration is recommended.)
- Rotation distance: 3.433
- Recommended Motor Current: 800mA
- Gear Ratio: 7:1
- Drive Gear Circumference: 24.5mm
- Filament Diameter and Tolerance: 1.75 ± 0.05mm
- HeaterCore Power: 40W
- Voltage: 24V
- Thermistor Type: Semitec 104NT-4-R025H42G(NTC100K)

Note: Not compatible with standard NEMA14 motor.

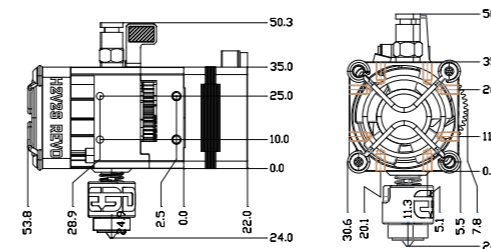
Main Features of RapidChange Revo

- Ready for Revo. Change nozzles at room temperature using just your fingers. No complex tools, no hot tightening. Revo Nozzles are a factory sealed nozzle and heatbreak in one, so they're easy to fit and can't leak material when in use.
- New hotness. A Revo HeaterCore heats up in seconds. It's much safer too - unlike other solutions on the market, a positive temperature coefficient (PTC) means the Revo HeaterCore can not melt at extreme temperatures: power reduces as it gets hotter, so hazards are reduced in the event of a thermal runaway.



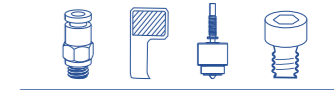
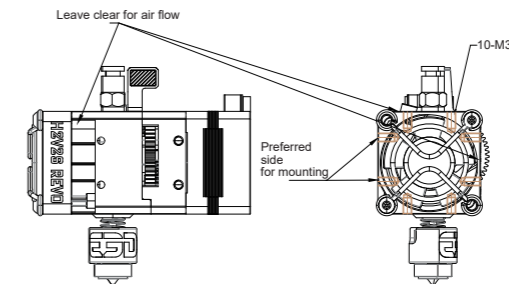
Product Dimensions

- XYZ Dimensions(including the fan): 75.8 x 38.4 x 74.2mm
- Thread of Heat Break: M4
- Nozzle Diameter: Φ0.4mm



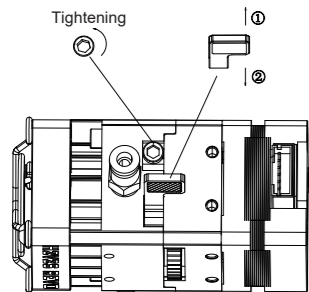
More Guidance

- It is recommended to install the fan toward the left; if toward the right, pay attention to the gear and air vent. There are 10pcs M3 screw holes on the extruder for fixing.
- The M3X8 screws provided are suitable for mounting plates with a thickness of 3~5mm.



About Filament Tension and Filament Release

- Drive gear tension is adjustable to accommodate different material filament, turn the Tensioner Screw counterclockwise to increase pressure, clockwise to decrease pressure(when the screw stops turning, Do not force it or you will damage the extruder.)
- To release the filament, pull the lever towards the position of ② in the picture below.



Maximum Operating Temperature

- Fan: 50°C
- Motor: 130°C
- Heater Break and Nozzle: 300°C(upgradable to 500°C with high temperature of Revo Nozzle and HeaterCore)
- Bearing: 100°C

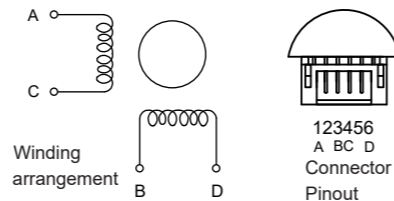
*Note: it is the maximum working temperature of a single part, not of the whole system.

Fan Specifications

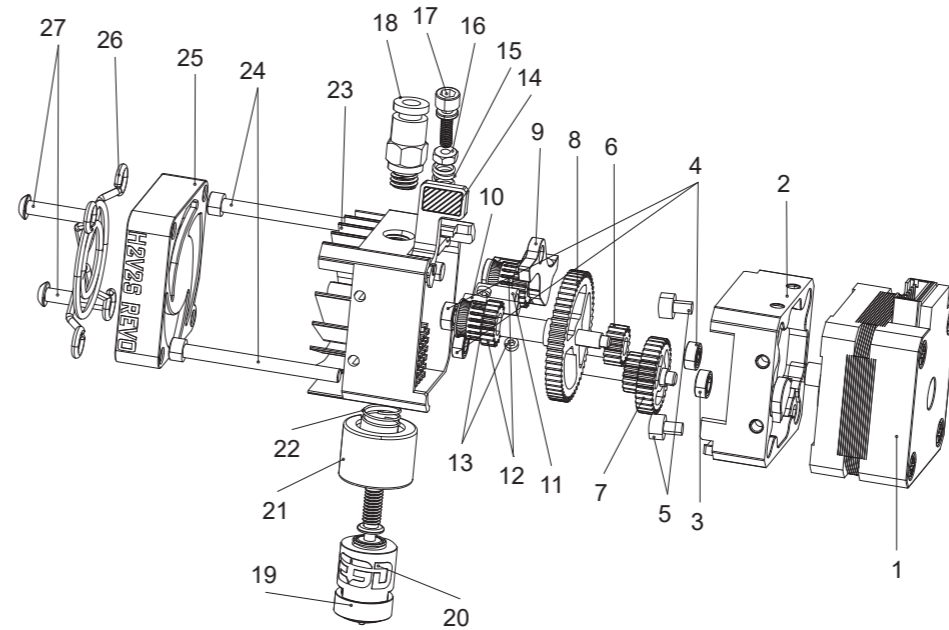
| Item | Specifications |
|----------------|----------------|
| Size | 35 x 35 x 10mm |
| Cable | 1000mm |
| Voltage | 24V |
| Speed | 6000±10% |
| Terminal Model | Dupont 2.54 |

Motor Specifications

| Item | Specifications |
|------------------------------|--------------------|
| Rated Voltage | DC 3.45V |
| Rated Current | DC 1.5A/phase |
| Phase | 2 |
| Winding DC Resistance (25°C) | 2.3X (1±10%)Ω |
| Winding Inductance | 2.0X (1±20%) mH |
| Holding Torque | ≥110mN·m |
| Positioning Torque | 7mN·mREF |
| Insulation Resistance | ≥100MΩ (DC 500V) |
| Insulation Level | Class B |
| Moment of Inertia | 8g·cm ³ |



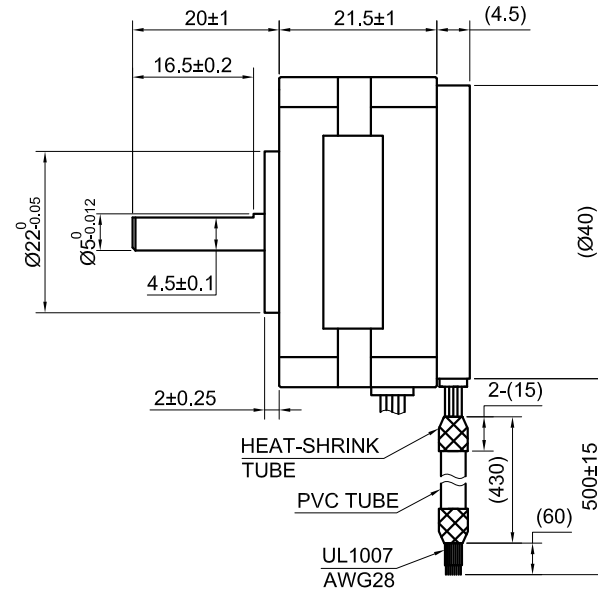
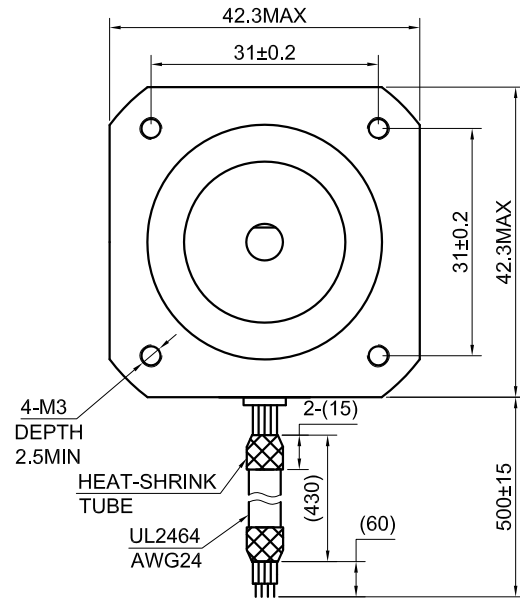
Product Overview



- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1. Motor | 15. Spring |
| 2. Gearbox | 16. M2.5 Nut |
| 3. 682XZZ Bearing | 17. Tensioner Screw |
| 4. 673XZZ Bearing | 18. Bowden Tube Connector |
| 5. M3x4 Socket Head Screw | 19. Revo Nozzle |
| 6. Pinion Gear | 20. HeaterCore |
| 7. Spur Gear | 21. Silicone Sock |
| 8. Output Gear | 22. Revo Spring |
| 9. Gear Carrier | 23. Heat Sink |
| 10. Pin | 24. M3x35 Socket Head Screw |
| 11. Roller Bearing | 25. 3510 Fan |
| 12. Idler Gear | 26. Fan Shroud |
| 13. Set Screw | 27. M3x14 Button Head Screw |
| 14. Filament Release Lever | |

Anexo D: Catálogo do motor NEMA 17 modelo 17HS08-1004-ME1K

END COVER COLOR : BLACK



| SPECIFICATION | CONNECTION | BIPOLAR |
|-----------------------------------|------------|------------|
| AMPS/PHASE | | 1.00 |
| RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C | | 3.70±10% |
| INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz | | 4.50±20% |
| HOLDING TORQUE(Nm)[lb-in] | | 0.16[1.42] |
| STEP ANGLE(°) | | 1.80 |
| STEP ACCURACY(NON-ACCUM) | | ±5.00% |
| ROTOR INERTIA(g-cm ²) | | 22.00 |
| WEIGHT(Kg)[lb] | | — |

TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)
 AMBIENT TEMPERATURE -10°C~50°C[14°F~122°F]
 INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)
 INSULATION CLASS B 130°C[266°F]
 DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)
 AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION)

| TYPE OF CONNECTION (EXTERN) | | MOTOR | |
|-----------------------------|---------|-------|---------|
| PIN NO | BIPOLAR | LEADS | WINDING |
| 1 | A+ — | RED | A+ |
| 2 | A- — | BLK | A- |
| 3 | B+ — | YEL | B+ |
| 4 | B- — | BLU | B- |

FULL STEP 2 PHASE-Ex ,
WHEN FACING MOUNTING END (X)

| STEP | A+ | B+ | A- | B- | | |
|------|----|----|----|----|---|-----|
| 1 | + | + | - | - | ↓ | CW |
| 2 | - | + | + | - | | |
| 3 | - | - | + | + | ↑ | CCW |
| 4 | + | - | - | + | | |

ENCODER CONNECTION:1000PPR(4000CPR)

| LEAD COLOR | RED | BLK | BRN | ORG | BLU | GRN | YEL | WHT |
|-------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| DESCRIPTION | VCC | EGND | EA+ | EA- | EB+ | EB- | EZ+ | EZ- |

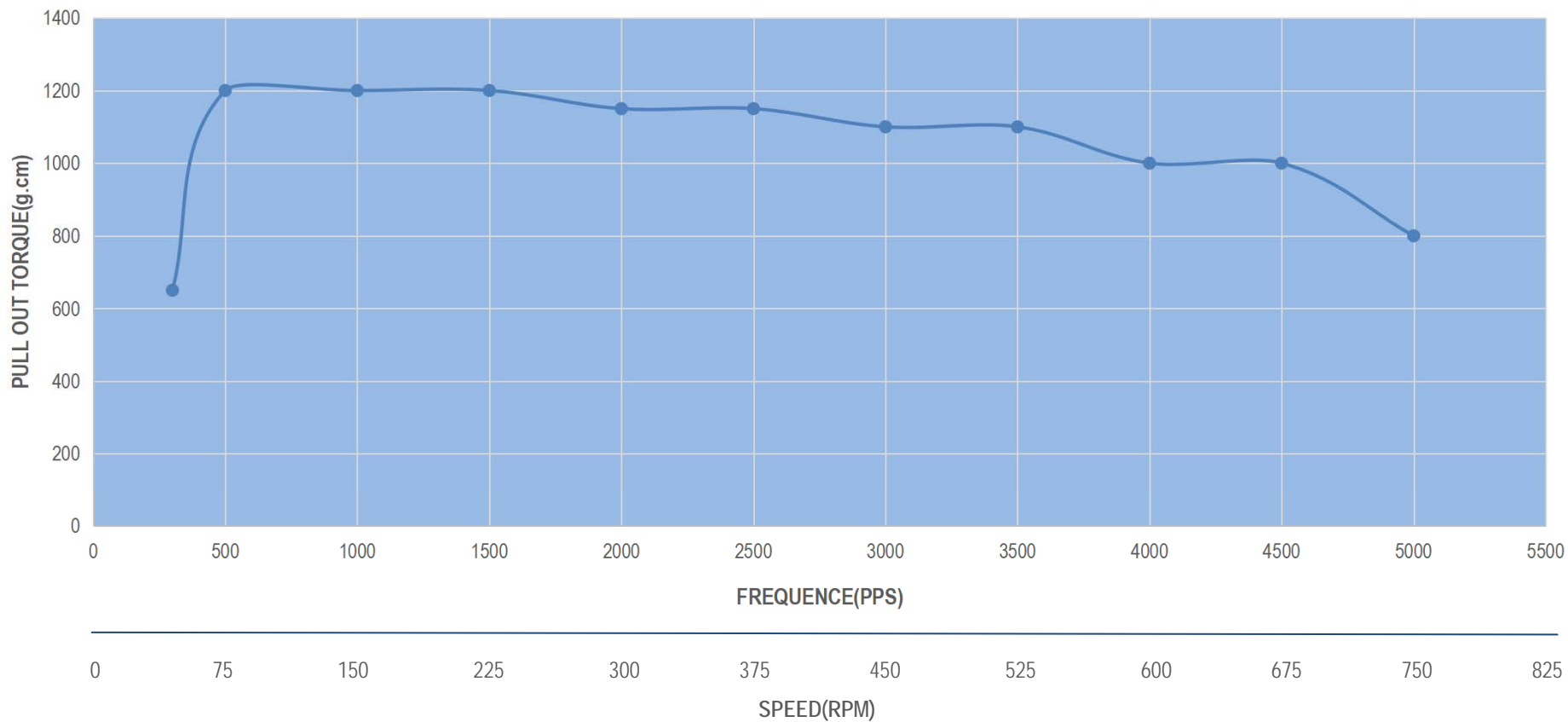


| | | |
|-------|-----------|------------|
| APVD | | 11.26.2021 |
| CHKD | | |
| 1:1 | DRN | |
| SCALE | SIGNATURE | DATE |

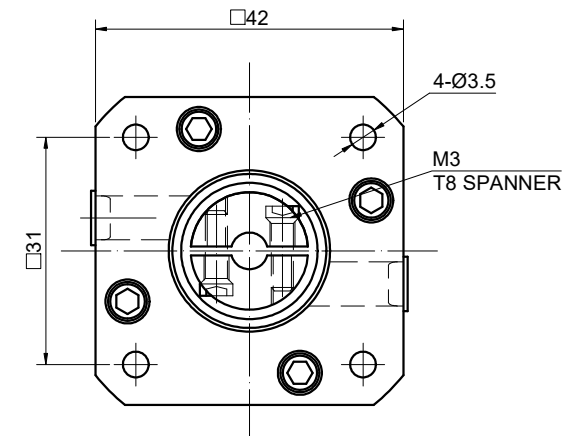
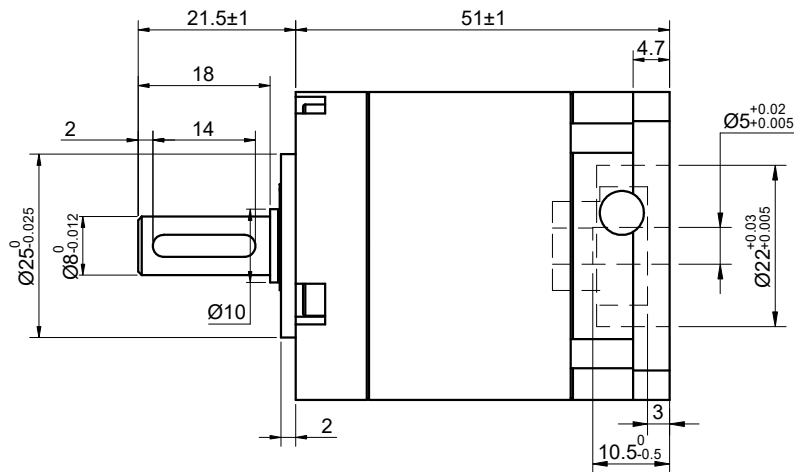
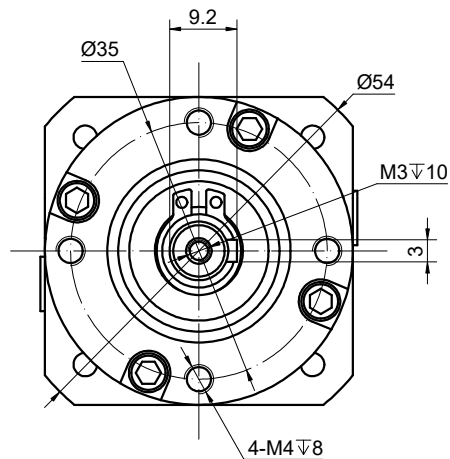
STEPPER MOTOR
17HS08-1004-ME1K

PULL OUT TORQUE CURVE OF 17HS08-1004-ME1K

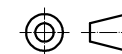
1.0A/P 24V HALF STEP
CONSTANT CURRENT DRIVER



Anexo E: Catálogo da caixa de velocidades MG17-G50



| SPECIFICATION | CONNECTION | VALUE |
|--|------------|-------------------------|
| GEAR RATIO | | 50 |
| EFFICIENCY | | 80.00% |
| BACKLASH@NO-LOAD(arcmin) | | <=45 |
| MAX.PERMISSIBLE TORQUE(Nm)[lb-in] | | 10.00[88.51] |
| SHAFT MAXIMUM AXIAL LOAD(N) | | 100 |
| SHAFT MAXIMUM RADIAL LOAD(N) | | 300 |
| GEARBOX MATCHING MOTOR'S INPUT SHAFT LENGTH (mm) | | 6.5-10.5 |
| RATED INPUT SPEED(RPM) | | 1000 |
| MAX. INPUT SPEED(RPM) | | 2000 |
| NOISE(dB) | | <=55 |
| WATERPROOF RATING | | IP54 |
| WORKING TEMPERATURE | | -20°C~150°C[-4°F~302°F] |



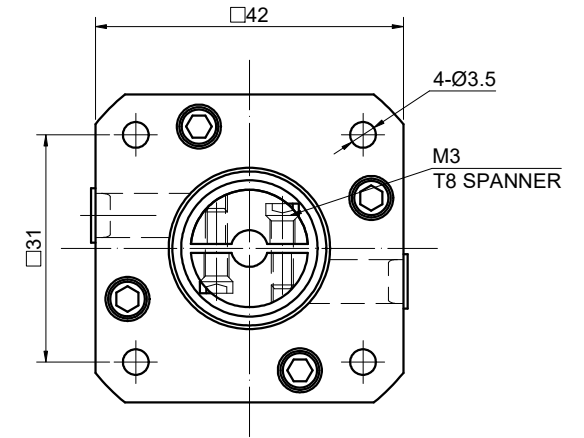
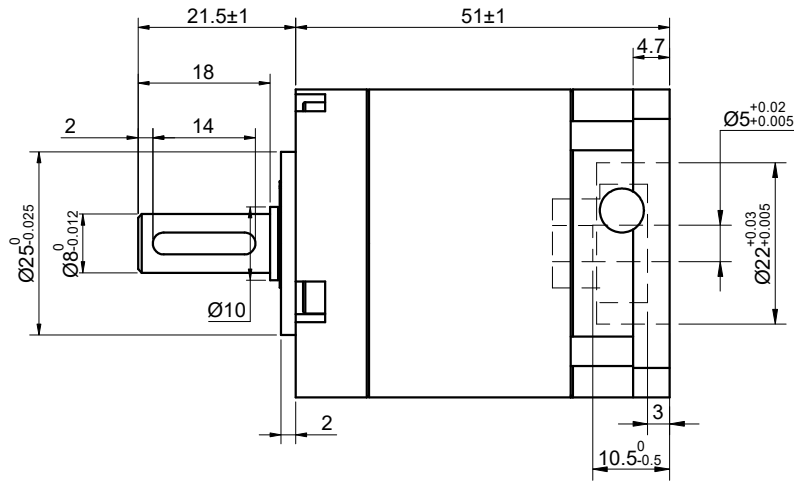
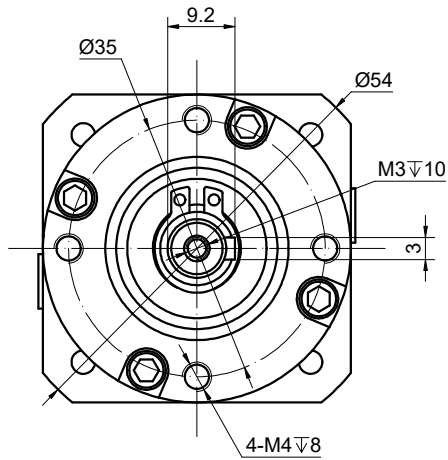
STEPPERONLINE®

| | | | |
|-------|-----------|------|----------|
| | APVD | LDJ | 1.5.2024 |
| | CHKD | | |
| 1:1 | DRN | YSX | 1.5.2024 |
| SCALE | SIGNATURE | DATE | |

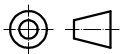
PLANETARY GEARBOX

MG17-G50

Anexo F: Catálogo da caixa de velocidades MG17-G100



| SPECIFICATION | CONNECTION | VALUE |
|--|------------|-------------------------|
| GEAR RATIO | | 100 |
| EFFICIENCY | | 80.00% |
| BACKLASH@NO-LOAD(arcmin) | | <=45 |
| MAX.PERMISSIBLE TORQUE(Nm)[lb-in] | | 5.00[44.25] |
| SHAFT MAXIMUM AXIAL LOAD(N) | | 100 |
| SHAFT MAXIMUM RADIAL LOAD(N) | | 300 |
| GEARBOX MATCHING MOTOR'S INPUT SHAFT LENGTH (mm) | | 6.5-10.5 |
| RATED INPUT SPEED(RPM) | | 1000 |
| MAX. INPUT SPEED(RPM) | | 2000 |
| NOISE(dB) | | <=55 |
| WATERPROOF RATING | | IP54 |
| WORKING TEMPERATURE | | -20°C~150°C[-4°F~302°F] |



STEPPERONLINE®

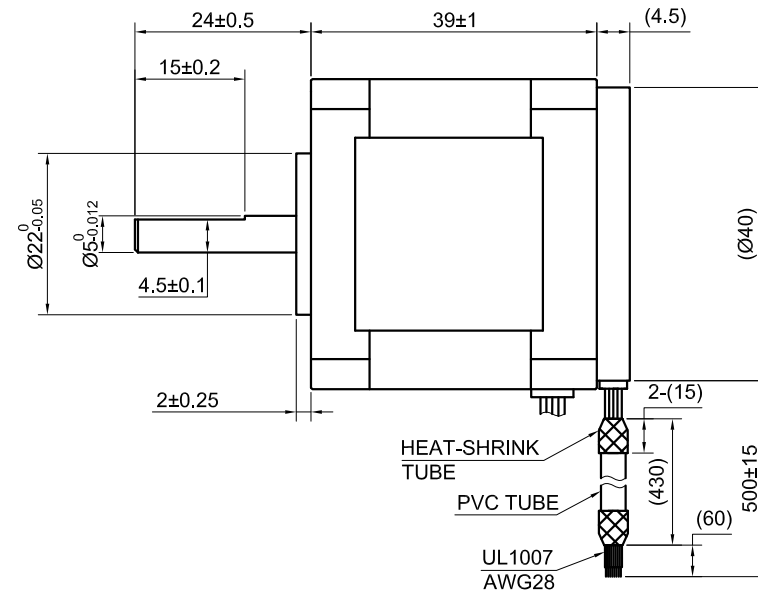
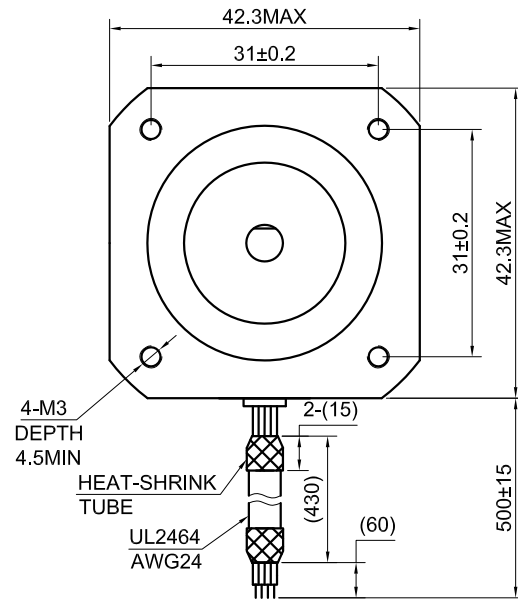
| | | | |
|-------|-----------|------|----------|
| | APVD | LDJ | 1.5.2024 |
| | CHKD | | |
| 1:1 | DRN | YSX | 1.5.2024 |
| SCALE | SIGNATURE | DATE | |

PLANETARY GEARBOX

MG17-G100

Anexo G: Catálogo do motor NEMA 17 modelo 17HS15-1504-ME1K

END COVER COLOR : BLACK



| SPECIFICATION | CONNECTION | BIPOLAR |
|--|------------|------------|
| AMPS/PHASE | | 1.50 |
| RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C | | 2.30±10% |
| INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz | | 4.40±20% |
| HOLDING TORQUE(Nm)[lb-in] | | 0.45[3.98] |
| STEP ANGLE(°) | | 1.80 |
| STEP ACCURACY(NON-ACCUM) | | ±5.00% |
| ROTOR INERTIA(g-cm ²) | | 54.00 |
| WEIGHT(Kg)[lb] | | — |
| TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED) | | |
| AMBIENT TEMPERATURE -10°C~50°C[14°F~122°F] | | |
| INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY) | | |
| INSULATION CLASS B 130°C[266°F] | | |
| DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE) | | |
| AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION) | | |

| TYPE OF CONNECTION (EXTERN) | | MOTOR | |
|-----------------------------|---------|-------|---------|
| PIN NO | BIPOLAR | LEADS | WINDING |
| 1 | A+ — | RED | A+ |
| 2 | A- — | BLK | A- |
| 3 | B+ — | YEL | B+ |
| 4 | B- — | BLU | B- |

FULL STEP 2 PHASE-Ex. ,
WHEN FACING MOUNTING END (X)

| STEP | A+ | B+ | A- | B- | | CW |
|------|----|----|----|----|--------|--------|
| 1 | + | + | - | - | ↓ ↑ | ↑ ↓ |
| 2 | - | + | + | - | | |
| 3 | - | - | + | + | | |
| 4 | + | - | - | + | | |

| ENCODER CONNECTION:1000PPR(4000CPR) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| LEAD COLOR | RED | BLK | BRN | ORG | BLU | GRN | YEL | WHT |
| DESCRIPTION | VCC | EGND | EA+ | EA- | EB+ | EB- | EZ+ | EZ- |



| | | |
|-------|-----------|------------|
| APVD | | 11.26.2021 |
| CHKD | | |
| 1:1 | DRN | |
| SCALE | SIGNATURE | DATE |

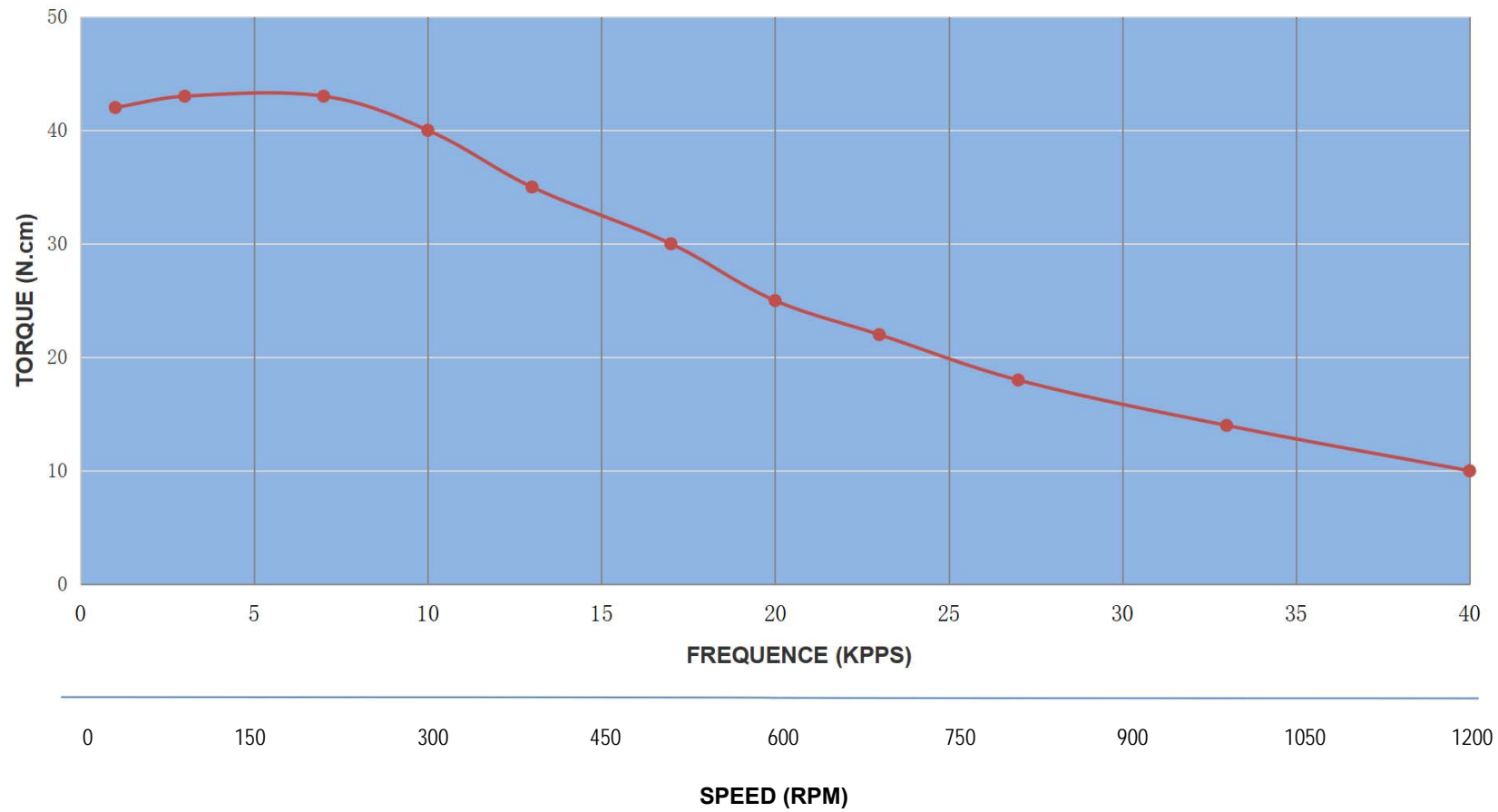
STEPPER MOTOR
17HS15-1504-ME1K

PULL OUT TORQUE CURVE OF 17HS15-1504-ME1K

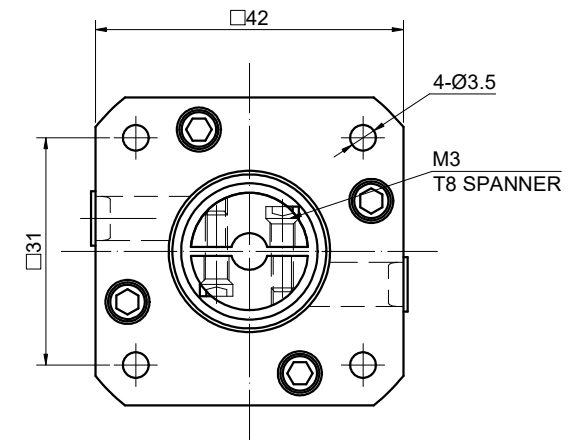
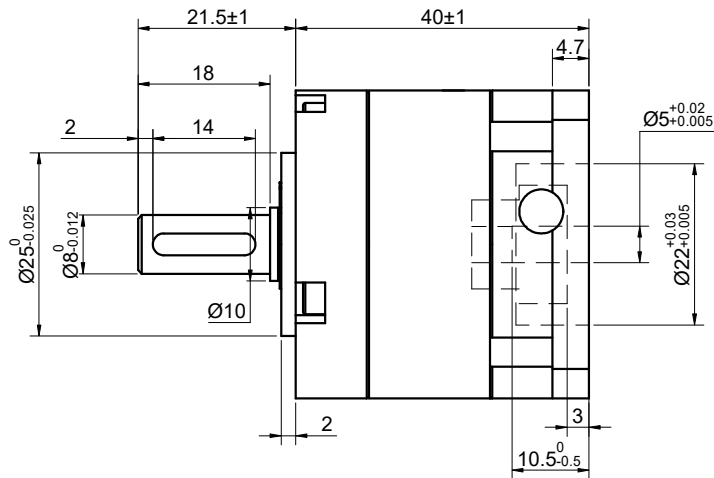
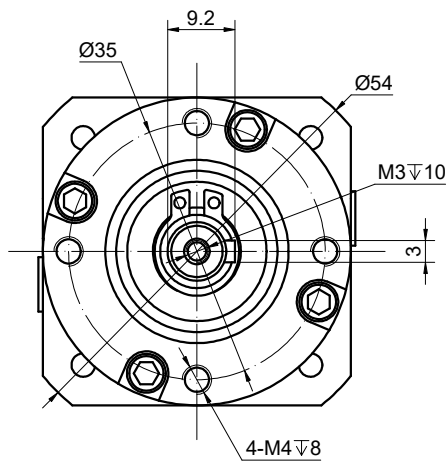
Current: 1.69A

Microstep: 2000

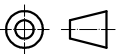
—●— 24V



Anexo H: Catálogo da caixa de velocidade MG17-G5



| SPECIFICATION | CONNECTION | VALUE |
|--|------------|-------------------------|
| GEAR RATIO | | 5 |
| EFFICIENCY | | 90.00% |
| BACKLASH@NO-LOAD(arcmin) | | <=30 |
| MAX.PERMISSIBLE TORQUE(Nm)[lb-in] | | 9.00[79.66] |
| SHAFT MAXIMUM AXIAL LOAD(N) | | 100 |
| SHAFT MAXIMUM RADIAL LOAD(N) | | 300 |
| GEARBOX MATCHING MOTOR'S INPUT SHAFT LENGTH (mm) | | 6.5-10.5 |
| RATED INPUT SPEED(RPM) | | 1000 |
| MAX. INPUT SPEED(RPM) | | 2000 |
| NOISE(dB) | | <=55 |
| WATERPROOF RATING | | IP54 |
| WORKING TEMPERATURE | | -20°C~150°C[-4°F~302°F] |



STEPPERONLINE®

| | | | |
|-------|-----------|------|----------|
| | APVD | LDJ | 1.5.2024 |
| | CHKD | | |
| 1:1 | DRN | YSX | 1.5.2024 |
| SCALE | SIGNATURE | DATE | |

PLANETARY GEARBOX

MG17-G5