



# *Monografia de Graduação*

## **Instrumentação e Controle de Manipulador flexível destinado à Indústria de Petróleo e Gás**

**Stephanie Gomes de Moraes**

**Natal, Julho de 2022**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

# INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE MANIPULADOR FLEXÍVEL DESTINADO À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

STEPHANIE GOMES DE MORAIS

Monografia de Graduação apresentada ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo 44.1 (PRH ANP – 44.1) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte como documento de conclusão do projeto de pesquisa, orientado pelo Prof. Dr. Adilson José de Oliveira.

NATAL - RN

2022

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado garra e sabedoria para realizar este trabalho.

Aos meus pais que sempre me incentivaram e se dedicaram para que eu tivesse a melhor educação possível.

Aos meus amigos Lidiane e Uellen por todo companheirismo e suporte em todos os momentos, que não se limitam ao universo acadêmico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adilson e a Profa. Dra. Kelly, minha coorientadora, por me acompanharem pontualmente, dando todo apoio necessário para a elaboração deste trabalho.

A todos os técnicos e funcionários do Laboratório de Manufatura.

Agradeço pelo apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP.

Morais, Stephanie Gomes. **Instrumentação e controle de manipulador flexível destinado à indústria de petróleo e gás**. 2022. 79 p. Graduação. PRH-44 - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

## Resumo

O processo de automação na indústria do petróleo e gás permite um aumento da taxa de produção e a realização de atividades com maior nível de segurança, principalmente em condições de operação críticas para os seres humanos. O setor de exploração de petróleo e gás tem utilizado manipuladores robóticos em locais de difícil acesso (como grandes profundidades ou com atmosfera contaminada), e eles são normalmente associados a veículos submarinos ou terrestres operado remotamente. Em um primeiro trabalho desta linha de pesquisa, foi construído um projeto de um manipulador de um elo flexível, com um grau de liberdade. A meta foi aumentar o número de graus de liberdade do manipulador de forma que ele possa realizar mais atividades. Assim, esse estudo deu continuidade ao trabalho realizado, com o aumento dos graus de liberdade do manipulador flexível e a redução de folgas mecânicas no sistema de movimentação para permitir uma maior exatidão de posicionamento. As atividades foram concentradas na compra de materiais e na criação de códigos de controle para os motores DC, os quais permitiram dois movimentos no manipulador: radial e axial. Os códigos escritos possibilitam o controle considerando a resposta do encoder de cada motor, de forma que a posição possa ser corrigida caso exista uma diferença na posição em função da flexibilidade dos elos.

Palavras-chave: Manipulador robótico. 2 graus de liberdade. Automação.

## Abstract

The automation process in the oil and gas industry allows an increase in the production rate and the performance of activities with a higher level of safety, especially in critical operating conditions for human beings. The oil and gas exploration industry has used robotic manipulators in hard-to-reach places (such as at great depths or with a contaminated atmosphere), and they are typically associated with remotely operated underwater or land vehicles. In the first work in this line of research, a design of a flexible link manipulator with one degree of freedom was built. The goal was to increase the manipulator's number of degrees of freedom so that it can perform more activities. Thus, this fit study gave fit to the work performed, was increasing the degrees of freedom of the flexible manipulator and reducing mechanical clearances in the handling system to allow for greater positioning accuracy. The activities were focused on purchasing materials and creating control codes for DC motors, which allow two movements in the manipulator: radial and axial. The written codes allow control considering the response of the encoder of each motor so that the position can be corrected if there is a difference in position due to the flexibility of the links.

Keywords: Robotic manipulator. 2 degrees of freedom. Automation.

## Lista de ilustrações

Figura 1. Modelo de manipulador flexível com dois graus de liberdade.....	12
Figura 2. Manipulador robótico com sete graus de liberdade. ....	13
Figura 3. Manipulador com dois graus de liberdade com juntas viscoelásticas variáveis. ....	15
Figura 4. Evolução das versões no manipulador robótico desenvolvido e modelo final proposto..	17
Figura 5. Diagrama de blocos do modo motor DC .....	20
Figura 6. Painel frontal do modo Servo motor.....	20
Figura 7. Painel frontal do modo motor DC.....	21
Figura 8. Diagrama de blocos controle por malha aberta .....	22
Figura 9. Diagrama de blocos do controle por malha fechada .....	22
Figura 10. Manipulador robótico com dois elos utilizado no controle FOPID e PID .....	25
Figura 11. Indicadores de rastreamento de trajetória.....	26
Figura 12. Variações de carga útil para a massa no caso 3 .....	27
Figura 13. Variações do IAE nos dois elos para controladores 2-DOF FOPID, 2-DOF PID e PID .....	28
Figura 14. Estrutura de um controle inteligente. ....	31
Figura 15. Projeto mecânico com um grau de liberdade.....	33
Figura 16. Microcontrolador MyRIO 1900 .....	35
Figura 17. Modelo de manipulador com dois graus de liberdade em corte.....	38
Figura 18. Modelo de manipulador de dois graus de liberdade em perspectiva .....	39
Figura 19. Cremalheira, engrenagem e bucha.....	40
Figura 20. Montagem do Sistema de transferência .....	41

Figura 21. Componentes mecânicos.....	42
Figura 22. Sistema de funcionamento interno.....	43
Figura 23. Interface do Usuário do programa de controle .....	45
Figura 24. Diagrama de bloco do código de controle do motor DC com <i>encoder</i> integrado .....	47
Figura 25. Desempenho do motor 1.....	48
Figura 26. Desempenho do motor 2.....	49
Figura 27. Componentes manufaturados.....	52

## **Lista de tabelas**

Tabela 1. Parâmetros do controlador PID.....	48
Tabela 2. Operações e ferramentas utilizadas para cada peça.....	50
Tabela 3. Análise dimensional das peças.....	53

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.1. MANIPULADORES ROBÓTICOS.....	11
2.2. TÉCNICAS DE CONTROLE .....	18
2.2.1. Labview para o controle de motor DC .....	18
2.2.2. Controle por malha aberta e controle por malha fechada .....	21
2.2.3. Controle não linear .....	22
2.2.4. Controle PID.....	23
2.2.5. Controle por modos deslizantes.....	28
2.2.6. Controle de Linearização por realimentação.....	30
2.2.7. Controle inteligente .....	30
3. METODOLOGIA .....	32
3.1. PROJETO CONCEITUAL E MECÂNICO DETALHADO.....	32
3.2. HARDWARE E SOFTWARE .....	34
3.3. AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE .....	34
3.4. MANUFATURA E ANÁLISE DIMENSIONAL .....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
4.1. PROJETO CONCEITUAL E MECÂNICO DETALHADO .....	38
4.2. CRIAÇÃO DO PROGRAMA DE CONTROLE .....	44
4.3. VALIDAÇÃO DO PROGRAMA DE CONTROLE.....	47
4.4. MANUFATURA E ANÁLISE DIMENSIONAL .....	49
5. CONCLUSÕES .....	54
REFERÊNCIAS .....	55

## 1. Introdução

A automação de processos na indústria do petróleo e gás permite um aumento da taxa de produção e a realização de atividades com maior nível de segurança, principalmente em condições de operação críticas para os seres humanos. Deslocamento de peças para montagem ou armazenamento, movimentação precisa e correta de ferramentas, separação de itens em linhas de produção são típicas demandas para os manipuladores robóticos. Os manipuladores robóticos podem ser definidos como os dispositivos mecânicos controlados por software que realizam tarefas pré-definidas e específicas para diversos processos. Neste sentido, os manipuladores robóticos devem utilizar transdutores para auxiliar a orientação e a movimentação de seus componentes mecânicos com o objetivo de aumentar a velocidade e a exatidão do processo (LOPES, 2002).

Existem dois grupos de manipuladores robóticos: os rígidos e os flexíveis. Os manipuladores rígidos são amplamente conhecidos em ambientes industriais e têm como principais características a alta capacidade de carga, a baixa velocidade operacional e o elevado consumo energético. Uma alternativa para aumentar a velocidade de manipulação e a redução da potência demandada são os manipuladores flexíveis, os quais são caracterizados pela existência de deformações elásticas durante os movimentos operacionais. Os manipuladores flexíveis possuem menos massa associada à sua estrutura, devido a uma baixa relação entre a seção transversal e o comprimento do braço manipulador. Contudo, o desafio é o controle de posição do sistema, pois as deformações necessitam ser consideradas para o posicionamento. Neste caso, a instrumentação do dispositivo com transdutores de deformação, posição e aceleração é fundamental (TAKANO *et al.*, 2016; MOLTER, 2008).

Uma característica importante na aplicação robótica se refere aos graus de liberdade do sistema mecânico (FILIPPO FILHO, 2014). Os graus de liberdade determinam o número de variáveis de movimentos do manipulador para atingir a posição desejada. Diante disso, Azhdari *et al.* (1991) desenvolveram um manipulador flexível com dois graus de liberdade que possui juntas prismáticas e rotativas. Com o auxílio de simulações, os autores analisaram as interações entre os elos rígidos e flexíveis, concluindo que o movimento do elo flexível tem influência significativa no elo rígido. Além disso, o estudo mostrou que o uso de materiais compósitos para o projeto estrutural permite uma maior velocidade, posicionamento mais preciso e uma menor exigência do torque. Em

complemento, Meng *et al.* (2018) apresentaram um estudo de vibrações em um manipulador com sete graus de liberdade. Os resultados evidenciam como os módulos de elasticidade e de rigidez interferem na redução das vibrações. Além disso, os autores também descrevem como a aceleração interfere no planejamento de trajetória.

Porto (2019) desenvolveu um projeto de um manipulador com um elo flexível e um grau de liberdade, baseado em sinais de aceleração, com o objetivo geral de verificar a viabilidade do controle não-linear para a estabilização do sistema durante a movimentação de cargas. O projeto foi realizado no Laboratório de Manufatura (LABMAN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Os testes funcionais evidenciaram o correto funcionamento do sistema de controle do braço flexível. O aumento do número de graus de liberdade deste manipulador é fundamental para permitir uma aplicação em demandas de movimentação de componentes e estruturas na área de petróleo e gás.

Portanto, o objetivo geral deste estudo foi continuar o desenvolvimento do projeto de Porto (2019), com o aumento dos graus de liberdade do manipulador flexível, além de uma redução das folgas mecânicas no sistema de movimentação para permitir uma maior exatidão de posicionamento. Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- a) novo projeto do sistema de transmissão de movimento do motor para o braço flexível;
- b) compra e manufatura de componentes mecânicos e eletrônicos para a atualização do manipulador;
- c) desenvolvimento de novos códigos para controle do manipulador flexível.

## 2. Revisão Bibliográfica

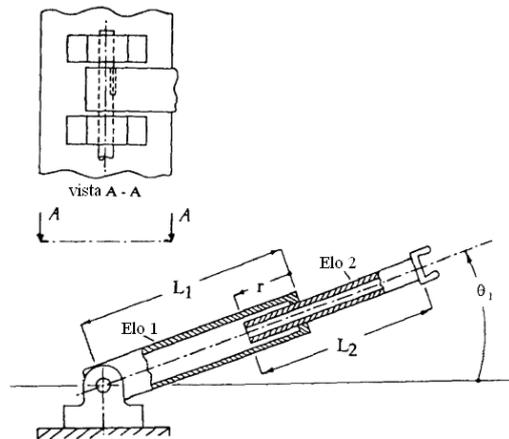
A presente revisão bibliográfica é dividida em dois tópicos: a) Manipuladores robóticos; b) Técnicas de Controle. O primeiro visa analisar trabalhos sobre manipuladores com dois ou mais graus de liberdade, expondo os modelos, analisando o desempenho com relação à velocidade, torque e à estabilidade do sistema. Já o segundo aborda a diferença e a necessidade da utilização de hardware e software para o controle, apresenta aplicações de sistemas de controle em motores utilizando o LabView 2017, a diferença entre controle malha aberta e malha fechada, o conceito do controle por modos deslizantes, controle PID, controle de linearização por realimentação e controle inteligente.

### 2.1. Manipuladores Robóticos

Um manipulador robótico, segundo Siciliano *et al.* (2010), consiste em um braço capaz de movimentar objetos em razão da sua estrutura mecânica, na qual uma sequência de elos, também chamados de corpos rígidos, está conectada por meio de juntas, que são as articulações. Os graus de liberdade do manipulador são adequados de acordo com sua funcionalidade. Para Filippo Filho (2014), cada grau de liberdade está relacionado com o número de variáveis de posição do manipulador.

Diante disso, Azhdari *et al.* (1991) propuseram um estudo de um manipulador flexível com dois graus de liberdade que possui juntas prismáticas e rotativas em conjunto com o uso de materiais de baixa densidade, mas que possuam uma rigidez suficiente para evitar grandes deformações. O braço do manipulador utilizado no projeto possui os dois elos flexíveis, como mostrado na Figura 1, mas a região de interseção entre os dois elos é rígida. A junta que liga a base e o primeiro elo é uma junta de rotação; por outro lado, a junta que une os dois elos é uma junta prismática.

Figura 1. Modelo de manipulador flexível com dois graus de liberdade



Fonte: adaptado de Azhdari *et al.* (1991).

Inicialmente, os autores realizaram uma simulação com o objetivo de analisar o efeito do movimento flexível sobre o movimento rígido do corpo de elos flexíveis, construídos com uma liga de alumínio ou de grafite/epóxi. Para a realização dessa análise foram usados três casos: (a) ambos os elos eram rígidos, (b) um rígido e um flexível, e (c) ambos flexíveis. De acordo com os resultados, o movimento do elo flexível tem maior impacto na velocidade angular do que na velocidade linear no elo rígido. Para analisar as deflexões na ponta do manipulador, foram inseridos dados de torque e força na entrada dos modelos rígido-flexível e flexível-flexível. Com os resultados, os autores evidenciaram que o modelo rígido-flexível apresentou maior frequência e amplitude de vibrações quando comparado ao modelo em que ambos os elos são flexíveis. O modelo rígido-flexível apresentou um intervalo de amplitude de deflexão aproximadamente entre 1 e -1 mm após 0,30 s; já o flexível-flexível mostrou um intervalo de amplitude de deflexão aproximadamente entre 0,2 e -0,2 mm, após o mesmo tempo. Esses resultados evidenciaram que um manipulador flexível possui uma energia armazenada que é imprevisível diante dos modelos dinâmicos. Para demonstrar o efeito da inércia de rotação e a deformação por cisalhamento foram feitas comparações com o modelo de viga de Timoshenko e o modelo de viga de Euler-Bernoulli. Durante os primeiros 0,05 s, a frequência no modelo de Timoshenko dobrou quando comparada a de Euler-Bernoulli. O resultado mostrou que o efeito da inércia de rotação e a deformação por cisalhamento afetou a frequência das oscilações dos elos flexíveis.

Com relação à aplicação de materiais, ao analisar o grafite, a liga de alumínio e os materiais compósitos, percebeu-se que o grafite apresenta menor densidade, permite uma maior velocidade



módulo de elasticidade igual a  $E = 0,7$  GPa; e na terceira, apresentou módulo de elasticidade igual a  $E = 7$  GPa. Considerando os elos rígidos, o manipulador se moveu ao longo da trajetória sem vibrações significativas, porém diante da utilização de elos flexíveis com diferentes módulos de elasticidade, identificou-se que, como esperado, quanto maior o módulo de elasticidade, menor a vibração na extremidade do manipulador.

Ao analisar a dissipação de energia das vibrações através do amortecimento da estrutura dos dispositivos utilizou o elo com maior módulo de elasticidade ( $E = 7$  GPa) e fatores de amortecimentos iguais a 0,2 e 3 %. Com os resultados, verificou-se que as vibrações, na ponta do manipulador, continuaram praticamente as mesmas. Dessa forma, constata-se que para uma maior eficácia de amortecimento seria necessário um fator maior.

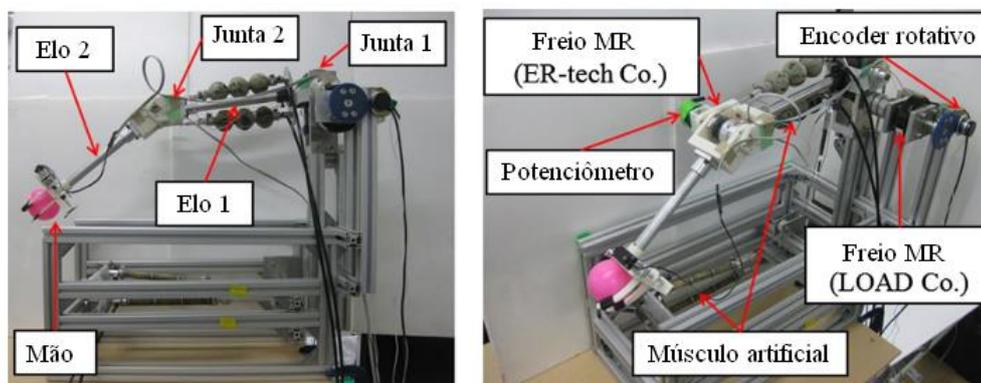
Em outra análise realizada, os autores utilizaram dois tipos de manipuladores: um com uma junta flexível e um elo rígido, e outro manipulador com uma junta e elo flexíveis. Para o caso do elo rígido foram utilizados 10 materiais que se diferenciavam nos valores de rigidez (1000, 2000, ..., 10000 Nm/rad). Os resultados mostraram que a amplitude das vibrações foi reduzida diante do aumento da rigidez. Já para o elo flexível a vibração necessariamente diminui com o aumento da rigidez da junta. Em alguns casos, obteve-se uma maior amplitude de vibração quando a rigidez aumentava. Sendo assim, mesmo que o mais comum seja a vibração provocada por uma junta flexível reduzir, pode também ocorrer dessa vibração gerar uma maior amplitude diante do elo flexível.

Ao estudar como a aceleração interfere na vibração do manipulador flexível, foram realizadas simulações com movimentos rápidos, com tempo total de 50 s; e lentos, com tempo total de 90 s. Os resultados mostraram que quanto menor a aceleração melhor é o planejamento da trajetória do manipulador flexível. O último experimento analisou como a variação da espessura da parede dos elos interfere nas vibrações da extremidade do manipulador, utilizando valores de 2, 3, 4 e 5 mm. Com os resultados observou-se que para as espessuras de 5, 4 ou 3 mm no primeiro elo, quanto menor a espessura do segundo, maior será a frequência da vibração. Porém, para a espessura de 2 mm no primeiro, a vibração é menor quando o segundo elo tem espessura de 3 mm ao ser comparada com as espessuras de 5 ou 4 mm. Além disso, percebeu-se que quanto maior a espessura, maior é a frequência da vibração. Meng *et al.* (2018) apresentaram uma avaliação de como o módulo de elasticidade é fundamental para a escolha do material que deve ser utilizado em um manipulador flexível. Contudo, na análise para os dois tipos de manipuladores, com juntas

flexíveis que eram diferenciados pelos elos, um flexível e um rígido, poderia ter sido acrescentado também uma análise de uma junta rígida com um elo flexível.

Nagayama *et al.* (2016), ao utilizarem o controle do movimento para um manipulador, propuseram um estudo sobre a geração e controle de forças instantâneas com o uso de equipamentos elásticos e viscosos (viscoelásticos) de um manipulador robótico com dois graus de liberdade. A Figura 3 mostra o modelo usado para a pesquisa, no qual um dos elos simboliza "músculos" artificiais. Esses músculos, que são compostos por tubos de borracha de látex natural e folhas de fibra de carbono, controlam de forma independente a posição do braço e a rigidez das juntas. Eles estão dispostos de maneira oposta, porém sob o mesmo eixo e possuem freios de fluido magnetoreológico (MR). Esse fluido possui viscosidade aparente variável, controlada pela tensão elétrica aplicada. Os freios MR atuam como amortecedores diante das diferentes forças de atrito e podem ser usados no controle do torque, de acordo com a velocidade angular das articulações, e assim, as amplitudes de vibrações no braço são reduzidas. Além disso, os freios permitem a liberação de energia armazenada atuando na força instantânea. A extremidade do manipulador possui uma "mão robótica" que é operada por um servomotor controlado por rádio. Foi utilizado também, um microcontrolador Arduino Uno, no qual foram inseridas funções pré-programadas de ângulos que são enviados para o servomotor quando a mão deve agarrar ( $140^\circ$ ) uma esfera utilizada para os testes e para liberá-la ( $180^\circ$ ).

Figura 3. Manipulador com dois graus de liberdade com juntas viscoelásticas variáveis.



Fonte: adaptado de Nagayama *et al.* (2016).

Para verificar o comportamento estático e dinâmico do manipulador, foram encontradas equações de movimento, e em seguida foram realizados experimentos que avaliaram as

características dos dois casos. O músculo artificial é considerado como uma mola de rigidez variável, que variou de 0,08; 0,10 e 0,12 Nm/grau, e o freio de MR é descrito como um amortecedor de viscosidade variável. As juntas apresentaram posições estacionárias de 30° e 60° e a carga da mão do manipulador foi de 8,33 N. Para as características estáticas, observou-se que o torque da junta se comportou como uma função linear de acordo com o ângulo de deslocamento dos elos em relação à posição de equilíbrio, assim, a junta apresenta uma rigidez invariável no modelo. Quando foram analisadas as características dinâmicas, o comportamento foi inesperado, e a desconsideração do atrito nos modelos é a provável causa. Diante disso, foi visto que o efeito do atrito pode ser menor quanto maior a rigidez das juntas.

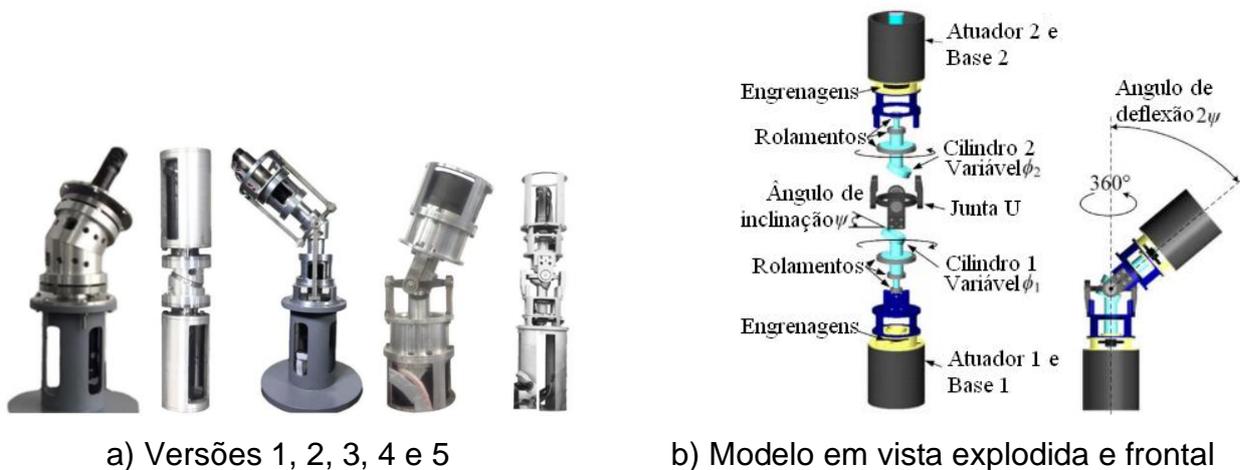
Para validar a utilidade do método instantâneo de geração de força, Nagayama *et al.* (2016) utilizaram uma esfera (bola de borracha de 20 g) a qual é arremessada, e foram analisados três momentos (3 fases): a) o primeiro (fase 1) é quando ocorre a liberação da primeira junta; b) o segundo (fase 2) quando ocorre a liberação da segunda junta; e c) o último (fase 3) quando a mão do manipulador é liberada. A cada fase, os ângulos formados pelas juntas, diante da posição de equilíbrio, se alteram. Na primeira parte desse experimento ocorreu uma variação da rigidez das juntas, a segunda parte do experimento a viscosidade foi variada, e a terceira, o fator de variação é o tempo de liberação da junta 2. Assim, analisou-se que o comportamento dos ângulos das articulações e as distâncias do arremesso estão ligados aos parâmetros de rigidez, viscosidade e tempo de liberação da segunda articulação. Esses parâmetros podem ser obtidos utilizando um método de otimização, confirmando a utilidade do método aplicado.

Os autores também descreveram o uso do método de otimização por enxame de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO). Esse método consiste em calcular soluções para obter os melhores parâmetros, como ângulo e tempo, e consequentemente, obter um melhor resultado na operação de arremesso. Os resultados não foram conclusivos e ainda havia a necessidade de se aprimorar o método PSO para esta aplicação.

Uma comparação entre os dois últimos estudos mencionados verifica-se que Meng *et al.* (2018) mostraram a estratégia ao realizar testes nas duas juntas para entender como a viscosidade e a rigidez se comportam diante da operação. Apesar disso, os autores não mencionaram como a aceleração e a velocidade são afetadas diante dessas simulações. Por outro lado, esta abordagem foi realizada no estudo de Huang *et al.* (2018) ao introduzirem um modelo de manipulador com sete graus de liberdade composto por juntas com dois graus de liberdade. Ainda, o estudo de Huang *et*

*al.* (2018) menciona que o modelo de junta proposta passou por quatro versões, conforme ilustrado na figura 4, até atingir ao modelo que atende à necessidade da estrutura mecânica para suportar altos valores de deflexão e torção de acordo com a Figura 5.

Figura 4. Evolução das versões no manipulador robótico desenvolvido e modelo final proposto



Fonte: adaptado de Huang *et al.* (2018).

De acordo com os autores, simulações foram realizadas para verificar a eficácia do modelo de junta proposto. A segunda versão da junta foi utilizada no software de simulação ADAMS para analisar impacto que os planos inclinados causam ao realizar movimento. Com isso, os planos inclinados  $\psi$  variaram de 10 a 25° com intervalos de 5°. Os resultados mostraram que quando o ângulo  $\psi$  é 10° a velocidade angular de saída em  $t = 0,5$  s é de aproximadamente 125 graus/s; já para o ângulo de 15° o valor dessa velocidade aumenta para aproximadamente 200 graus/s. Analogamente para os ângulos de 20° e 25°, suas velocidades também aumentam. O mesmo resultado ocorre quando se verifica a aceleração angular de saída, o torque de entrada e a potência, seus valores tendem a aumentar quando se aumenta o ângulo.

Para analisar o desempenho e a capacidade de movimento do modelo de junta, Huang *et al.* (2018) realizaram uma comparação com uma junta comum. Para ter uma maior confiabilidade, o modelo comum é derivado do modelo proposto, apresentando mesmo momento de inércia e centro de rotação. Além disso, como utilizou-se ângulo de 25° para os planos inclinados, o qual apresentou uma maior velocidade angular e aceleração angular de saída, torque de entrada e potência. Com os resultados, ambas apresentaram a mesma capacidade de saída (aceleração angular e velocidade

angular), porém o modelo proposto pode economizar dois terços do torque e metade da potência. Além disso, esse experimento também evidenciou que a junta proposta possui maior capacidade de carga útil e densidade de potência, sendo capaz de ser utilizado em ambientes espaciais.

A última análise realizada no estudo de Huang *et al.* (2018) foi o rastreamento de trajetória utilizando um sistema de captura de movimento 3D. Com uso de atuadores e controladores, a junta foi projetada para percorrer uma curva senoidal, círculos e linhas retas. Apesar de apresentarem falhas pontuais, as simulações e os resultados foram coincidentes. Algumas dessas falhas foram ocasionadas por erros ou folgas especificadas na etapa de projeto e outras foram causadas pelo ângulo de deflexão escolhido. Um ponto importante é que a pesquisa realizada por Huang *et al.* (2018) poderia ter abordado como os diferentes tipos de materiais utilizados na fabricação das juntas, as quais poderiam interferir no desempenho do manipulador, semelhante ao que foi feito por Meng *et al.* (2018).

## 2.2. Técnicas de controle

De acordo com Ogata (2011), no âmbito da engenharia o controle automático é um componente essencial que está presente em veículos espaciais, sistemas robóticos e processos de manufatura, e quaisquer atividades industriais que atuem no controle de temperatura, umidade, pressão, viscosidade, dentre outros. Segundo Franklin *et al.* (2013), para alcançar um controle eficaz é necessário: um sistema estável; o sinal de comando da entrada deve ser rastreado pela saída; e as entradas de distúrbios não devem afetar os sinais de saída do sistema.

Um sistema de controle é definido como um conjunto de componentes físicos, conectados ou associados para gerenciar seu comportamento ou de outros dispositivos. O hardware é nomeado como dispositivos físicos que compõem o sistema computacional, exemplificado a placa-mãe, monitores e teclado. Os hardwares são classificados diante da sua função, podendo ser hardware de entrada ou de saída. O de entrada recebe informações dadas pelo usuário, e o de saída mostra informações já processadas para o usuário. O software refere-se às instruções programadas que permitem o funcionamento adequado do hardware, de acordo com a necessidade dos usuários. A união das instruções a serem executadas é chamada de programa (DISTEFANO III *et al.*, 2013; CUNHA *et al.*, 2017).

### 2.2.1. Labview para o controle de motor DC

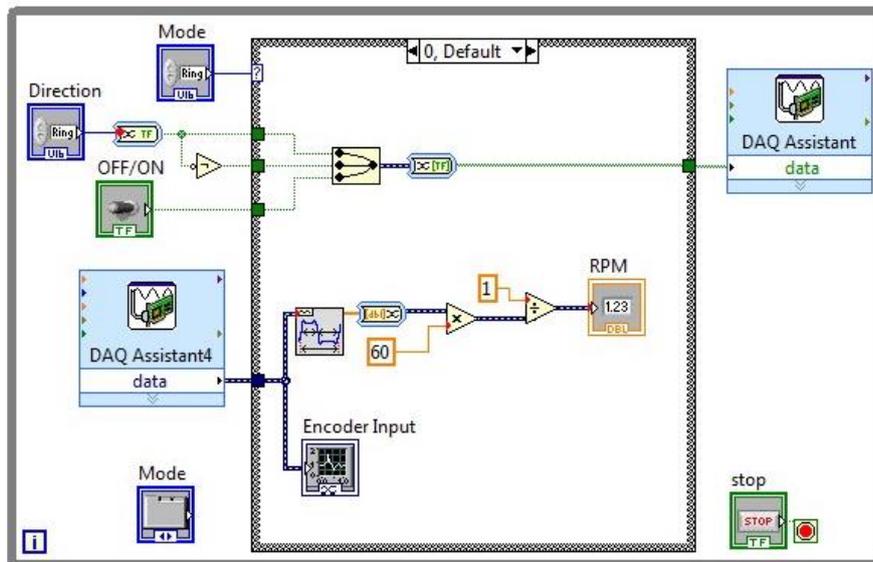
O software LabView, para Kehtarnava e Kim (2011), é um ambiente de programação gráfica originário da empresa National Instruments (NI). A interface do programa é mostrada com o auxílio de um painel frontal e o código gráfico é apresentado no formato de diagrama de blocos. A associação do Labview com dispositivos de hardware da empresa NI promove uma integração de sistema mais simples, a fim de minimizar o tempo, e evitar possíveis incompatibilidades entre dispositivos de hardware e software diferentes (National Instruments, 2020).

Considerando o controle de um motor DC, foco desta pesquisa, é necessário de um sistema de aquisição de dados (DAQ), responsável por converter os sinais de entrada e saída para o processamento. A utilização de *encoders*, que são dispositivos destinados a medição do ângulo de rotação de um dispositivo, permite o controle do movimento de rotação de um motor DC. Esse controle pode ser tanto da direção da rotação (sentidos horário e anti-horário), como no ângulo de rotação do motor, permitindo configurá-lo para parar em uma posição desejada (BOLTON,2003; TAN *et al.*,2020).

Para controlar um motor DC, Tan *et al.* (2020) utilizaram como controlador principal e processador o módulo DAQ USB-6008, junto a uma ponte H para o subcontrole, e um codificador de efeito Hall como sensor. A ponte H permite definir o sentido de rotação do eixo do motor, e os sensores de efeito Hall foram afastados 90° do eixo traseiro do motor e suas saídas de onda quadrada estavam fora de fase com o mesmo ângulo, e cada revolução do eixo do motor gera o sensor emite 3600 pulsos. Para o controle, foram utilizados dois sistemas, um modo foi denominado motor DC e o outro de servo motor. No modo motor DC, mostrado na figura 5, o usuário escolhe a direção da rotação no botão “Direction”, na qual são enviadas saídas digitais para a ponte H com o suporte do módulo DAQ. Além disso, são enviadas saídas digitais para iniciar e parar o motor no botão “OFF/ON”. O “DAQ Assistant4” e o “DAQ Assistant” são as informações a partir do motor e informações enviadas ao motor, respectivamente. O cálculo existente nesse modo permite o deslocamento angular do motor até atingir um ângulo escolhido com a contagem de pulsos. Além disso, no painel frontal desse modo é possível que o usuário consiga ver as formas de onda da saída do decodificador para programar o LabView e a velocidade rotacional em rotações por minuto (RPM).

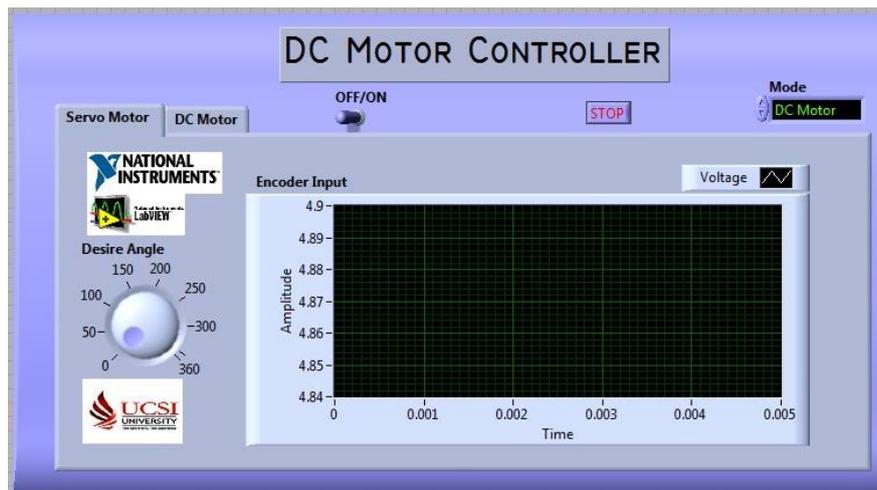
O diagrama de blocos do modo motor DC e o painel frontal nos dois modos desse sistema são mostrados nas Figuras 5, 6 e 7.

Figura 5. Diagrama de blocos do modo motor DC



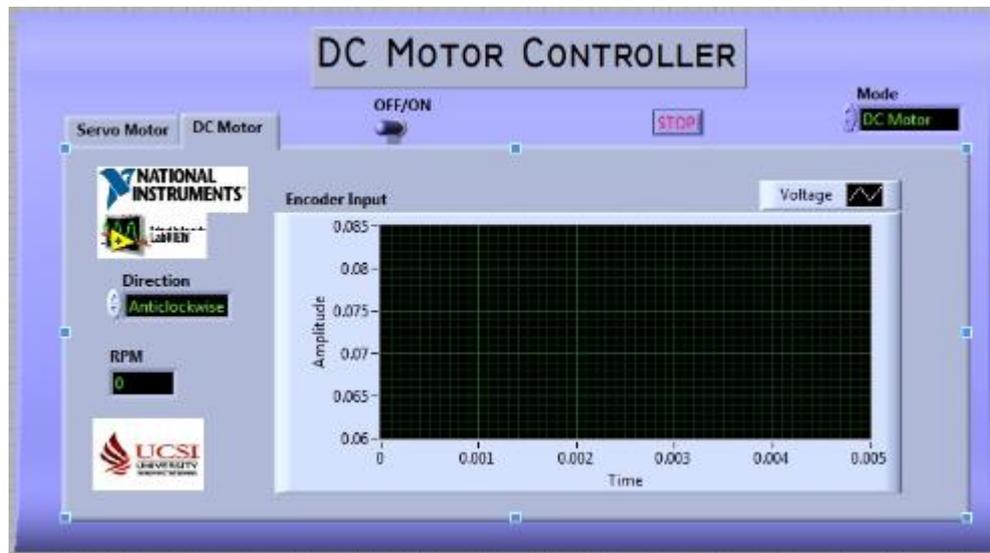
Fonte: Tan *et al.* (2020).

Figura 6. Painel frontal do modo Servo motor



Fonte: Tan *et al.* (2020).

Figura 7. Painel frontal do modo motor DC



Fonte: Tan *et al.* (2020).

### 2.2.2. Controle por malha aberta e controle por malha fechada

Os sistemas de controle são classificados em: controle por malha aberta e controle por malha fechada. No controle por malha aberta o sinal de saída do controle não exerce função no controle do sistema, assim, a saída não é comparada com a o sinal referência. Para esse tipo de controle é necessária uma calibração prévia, para se obter o resultado desejado do sistema. De forma oposta, no controle por malha fechada o sinal de saída interfere na função de controle. Nesse tipo de sistema, o sinal de erro, caracterizado pela diferença entre os sinais de entrada e saída, realimenta o controlador de forma que a referência representa o valor de saída do sistema. Dessa forma, sensores e/ou transdutores são utilizados para a medição dos estados de saída do sistema. As Figuras 8 e 9 representam, respectivamente, o controle por malha aberta e por malha fechada. (DISTEFANO III *et al.*, 2013; FRANKLIN *et al.*, 2013).

Figura 8. Diagrama de blocos controle por malha aberta

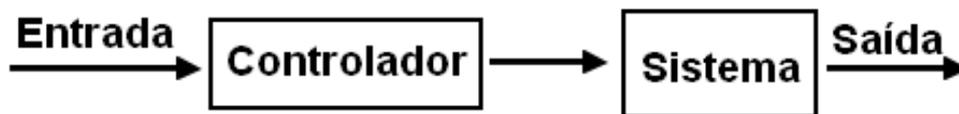
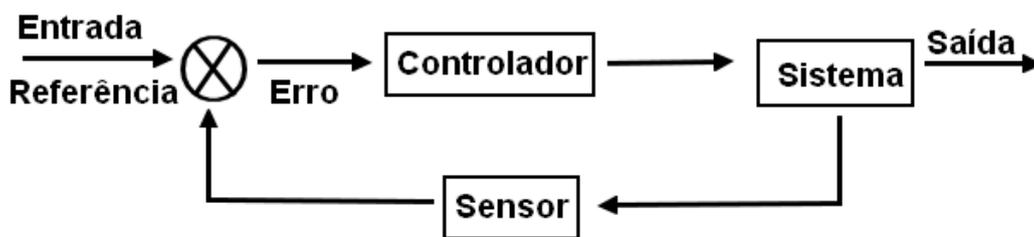


Figura 9. Diagrama de blocos do controle por malha fechada



Fonte: Adaptado de Bolton (2015).

O uso do controle por malha fechada se torna conveniente quando ocorrem distúrbios externos e variações internas nos parâmetros do sistema. Além disso, quando a estabilidade é um fator importante, os sinais de erro são utilizados para a correção do sinal de saída. Sistemas por malha aberta, apesar de serem de fácil implementação, são utilizados quando não há problemas de estabilidade e quando se conhece os sinais de entrada. (OGATA, 1998).

### 2.2.3. Controle não linear

Todos os sistemas físicos reais são não lineares, uma vez que o comportamento linear é restrito para apenas uma pequena faixa de operação, apresentando um desempenho instável por não apresentar compensações diante das não linearidades e das incertezas do modelo para operações de grande alcance. Os sistemas não lineares são descritos como sistemas sob malha fechada, os quais o controlador impõe a dinâmica do sistema. Esses sistemas, se comparado aos sistemas lineares, são mais vantajosos por dispor de uma margem de operação maior do

controlador, por contemplar as incertezas dos modelos, apresentar as não linearidades e por desenvolverem um desempenho ajustável (FRANKLIN *et al.*, 2013; AZEVEDO, 2016; SLOTINE e LI, 1991).

Os sistemas não lineares apresentam uma faixa de operação de grande alcance, se comparado aos controles lineares, por compensar as não linearidades, o que permite um controle mais estável. Essas não linearidades estão associadas, por exemplo, às forças dinâmicas do sistema, como Coriolis e forças centrípetas, as quais não são consideradas em um controle linear de um robô. Nesse caso, os manipuladores não lineares apresentam uma maior faixa de velocidade de operação com o aumento da precisão (SLOTINE e LI, 1991).

É necessário destacar que muitas não linearidades presentes nos sistemas de controle não possuem uma aproximação linear, como o atrito de Coulomb, saturação, zonas mortas, folga e histerese. Além disso, as incertezas dos parâmetros do modelo consideradas nos sistemas não lineares justificam alguns dos problemas nos controladores lineares (SLOTINE e LI, 1991).

#### 2.2.4. Controle PID

O controle PID é um algoritmo de controle bastante comum na área industrial, apresentando um bom desempenho no ambiente de controle de processos. Essa técnica de controle utiliza as ações proporcional, integral e derivativa, visando minimizar o sinal de erro, sendo o erro a diferença entre os sinais de referência e saída do sistema. (OGATA, 1998).

A variável proporcional ( $K_p$ ), presente no controle PID, visa a correção do erro proporcionalmente ao sinal de controle. Apesar da presença do ganho proporcional promover um aumento na velocidade de resposta do sistema, um aumento muito grande nesse parâmetro promove uma oscilação na variável do processo. Dessa forma, a integral do erro em relação ao tempo promove uma resposta ao sistema de forma que a minimizar de forma significativa o erro. A partir disso, a introdução da parcela derivativa tem a proposta de reduzir a velocidade das variações da variável controlada, evitando assim uma mudança repentina na resposta do sistema. A equação matemática expressa para o controle PID é dada pela Eq. (1):

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

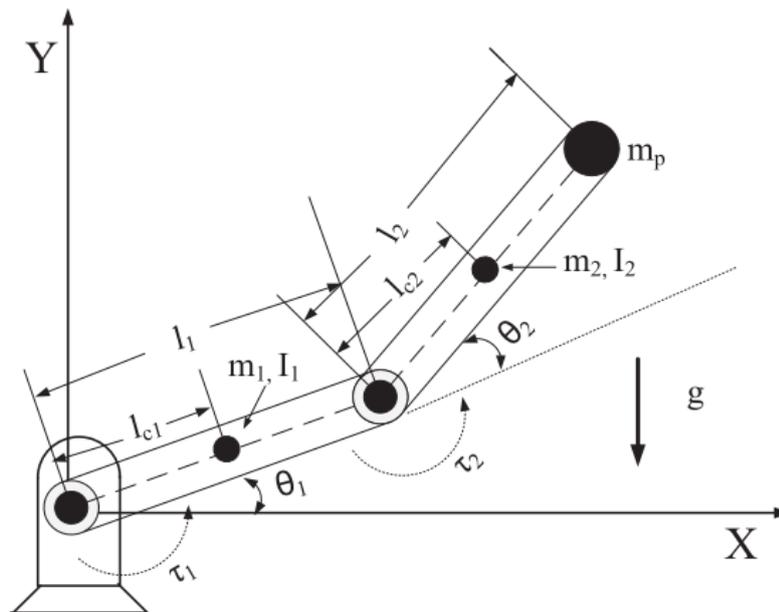
Onde  $t$  é o instante do estado a ser processado,  $u(t)$  é o sinal de saída do sistema no instante  $t$ ,  $T_i$  é o tempo integral,  $T_d$  é o tempo derivativo e  $e(t)$  é o sinal de erro na entrada do controlador no

instante  $t$ . Existem diferentes métodos para determinar os parâmetros do controlador ( $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ ) tendo como exemplo o mais simples como o método de tentativa e erro, ou alguns métodos matemáticos, como o método de Ziegler Nichols. (OGATA, 1998; ASTORM e HAGGLUND, 2006).

Esse tipo de controle foi utilizado por Sharma *et al.* (2015) ao comparar os controladores PID, FOPID (controlador PID de ordem fracionária). O controle FOPID é um controlador PID modificado e apresenta vantagem por apresentar a possibilidade de escolher o parâmetro do controlador. Mesmo assim, os dois tipos de controle não têm a possibilidade de controlar o rastreamento de trajetória ao mesmo tempo em que procura reduzir as vibrações, por serem controladores com apenas um grau de liberdade. Diante disso, controladores com dois graus de liberdade apresentam a vantagem de permitir o controle de dois parâmetros. Contudo, a escolha dos parâmetros é fundamental para o controle eficaz. Os autores tinham como objetivo estudar o controle FOPID com dois graus de liberdade para um manipulador robótico rígido de dois elos. A pesquisa também mostrou um controle simultâneo para rastreamento de trajetória e perturbações externas.

O manipulador robótico utilizado por Sharma *et al.* (2015) apresenta dois elos e possui uma carga útil na ponta, como mostrado na Figura 10. A sua massa tem valor de 0,5 kg e é representada na figura por  $m_p$ . Os índices 1 e 2 representam o primeiro e o segundo elo, respectivamente. O comprimento de cada elo é representado por "l", "l<sub>c</sub>" representa a distância da junta até o centro de gravidade de cada elo, "m" representa a massa de cada elo, "I" é o centro de inércia, "θ" é a posição e "τ" é o torque.

Figura 10. Manipulador robótico com dois elos utilizado no controle FOPID e PID

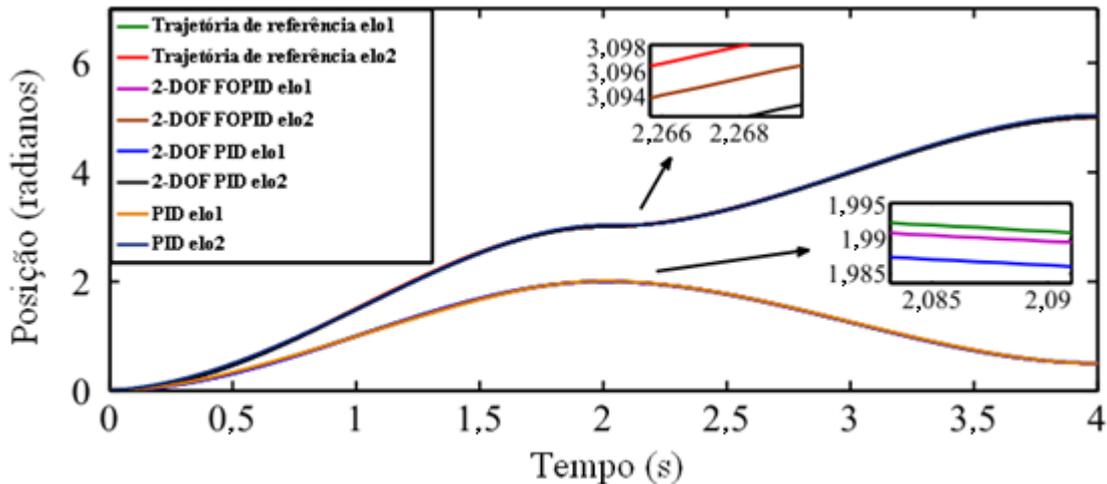


Fonte: Sharma *et al.* (2015).

De acordo com Sharma *et al.* (2015), o controle FOPID de 2 graus de liberdade trata de duas funções de transferência com um ciclo fechado, o qual permite, ao mesmo tempo, rastrear a trajetória e rejeitar as perturbações. As ações de controle são dadas de acordo com a diferença entre o sinal desejado e a saída real. O controle utilizou a técnica de otimização estática chamada CSA, em que o algoritmo busca pelas melhores soluções. Diante disso, o erro entre a trajetória real e a de referência é minimizado. Cada elo do manipulador possui um controlador, onde existem oito parâmetros que podem ser alterados para um melhor controle.

Foram realizadas simulações numéricas, com o auxílio do software MATLAB, em que as constantes de torque foram limitadas a  $[-20,20]$  N.m, e a faixa de frequência foi de  $[10^{-5},100]$  rad/s. Foi escolhida uma trajetória polinomial cúbica e os resultados obtidos foram comparados com o controlador PID de um grau de liberdade e de dois graus de liberdade. Analisando os resultados, com o IAE (Integral do erro absoluto) verificou-se que os controladores FOPID com dois graus de liberdade (2-DOF FOPID) tem um desempenho melhor do que o controlador de dois graus de liberdade PID (2-DOF PID) e o controlador de um grau de liberdade PID. Os indicadores de rastreamento de trajetória são mostrados na Figura 11.

Figura 11. Indicadores de rastreamento de trajetória

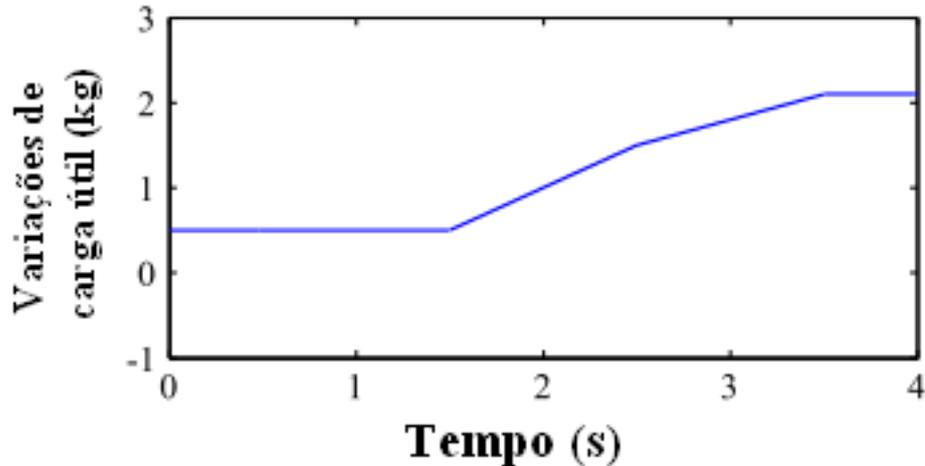


Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2015).

A relação entre o torque e a corrente ( $\tau = ki$ ) onde  $\tau$  é o torque,  $i$  é a corrente e  $k$  é o fator de transmissão que relaciona a corrente com o torque, mostra que o sinal de controle é baseado de acordo com o torque no trabalho que se comporta conforme a dinâmica do manipulador robótico. A dinâmica do atuador no trabalho realizado por Sharma *et al.* (2015) não está presente no manipulador robótico. Porém, se a dinâmica for incluída, a complexidade do sistema aumenta e, conseqüentemente, surgem novos desafios com relação às incertezas e às perturbações externas.

A análise da eficácia do controlador proposto é feita através das incertezas do modelo aplicado no manipulador robótico. Ao ser realizada a análise, verificou-se que o controlador 2-DOF FOPID apresenta um melhor funcionamento do que o 2-DOF PID e o PID. Já para a análise da robustez dos controladores para as diferentes cargas úteis, os controladores 2-DOF FOPID se mostraram mais robustos diante dos outros dois modelos comparados. As variações se baseiam na variação linear da massa  $m_p$  em uma taxa de 0,125 kg. No primeiro caso, o aumento foi até 1 kg no período de 4 s, no segundo caso houve uma redução até a massa ser nula no mesmo período de tempo e no terceiro caso foi customizado, feito de acordo com a Figura 12.

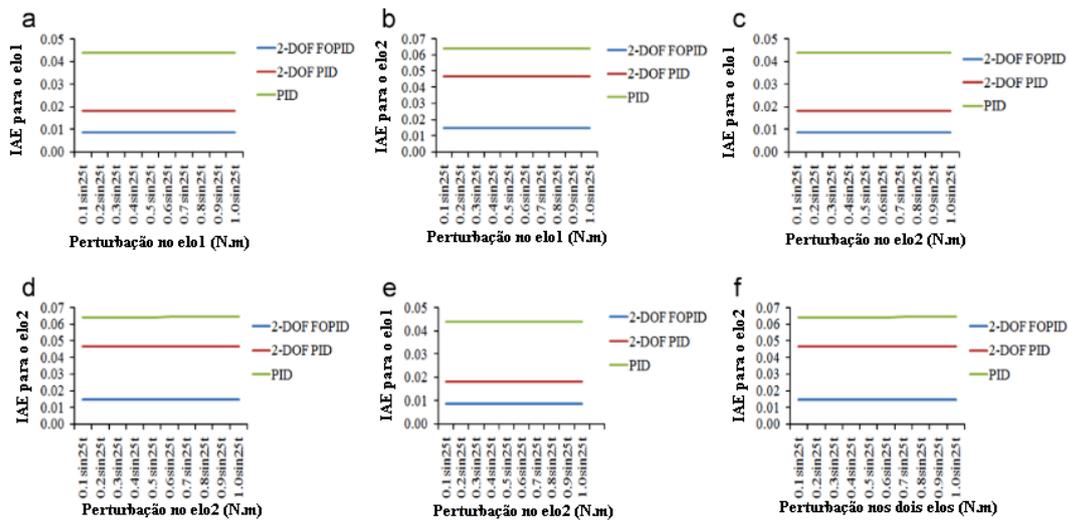
Figura 12. Variações de carga útil para a massa no caso 3



Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2015).

No teste para rejeição de perturbações externas e suspensão de ruídos aleatórios, o controlador 2-DOF FOPID permaneceu com o IAE menores ao ser comparado com os outros dois modelos, obtendo um desempenho melhor no teste. A Figura 13 mostra as variações de IEA gerados nos dois controladores. Os resultados permitiram evidenciar a rejeição de perturbações externas. Nessa análise foi aplicado uma perturbação senoidal nos dois elos. Para ver os efeitos da suspensão de ruídos aleatórios, foi adicionado um ruído de amplitude máxima  $\pm 0,1$  radianos. Diante disso o controle para o rastreamento de trajetória se torna mais eficaz e robusto no controlador 2-DOF FOPID se comparado ao 2-DOF PID e PID.

Figura 13. Variações do IAE nos dois elos para controladores 2-DOF FOPID, 2-DOF PID e PID



Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2015).

### 2.2.5. Controle por modos deslizantes

O controle por modos deslizantes (*Sliding Mode Control - SMC*) é uma técnica de controle não linear robusta e aplicada com eficiência em robôs manipuladores, veículos submarinos, motores elétricos de alto desempenho e motores automotivos. A metodologia desse controle visa reduzir problemas de ordem “ $n$ ” para sistemas de primeira ordem equivalentes, com as incertezas dos seus parâmetros. Esse tipo de controle é uma alternativa para se obter uma estabilidade em sistemas que apresentam parâmetros incertos (SLOTINE e LI, 1991; DE OLIVEIRA, 2006).

O modelo de controle propõe uma trajetória nomeada modo deslizante, que tem a finalidade de permanecer constante, em determinadas condições, diante das incertezas do sistema. A lei de controle define que todas trajetórias do sistema convirjam para a superfície de deslizamento até obter o estado desejado. Dessa forma, quando a trajetória atinge a superfície deslizante, o sistema não sofre alterações diante das perturbações externas, o que define a sua robustez (BESSA, 2005). De acordo com Bessa (2005), para obter a lei de controle de um sistema de modos deslizantes é necessário inicialmente considerar uma superfície deslizante  $S(t)$ , definida pela equação  $s(x, t) = 0$ , a qual sua função  $s: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  satisfaz:

$$s(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (2)$$

onde  $\tilde{x} = x - x_d$ , sendo  $\tilde{x}$  correspondente ao erro de rastreamento,  $x$  a variável de estado,  $x_d$  a variável desejada,  $\lambda$  uma constante positiva e  $n$  a ordem da equação. A equação da superfície também pode ser reescrita da forma:

$$s(x, t) = \Lambda^T \tilde{x} \quad (3)$$

sendo  $\Lambda = [\lambda^{n-1}, c_{n-1}\lambda^{n-2}, \dots, c_2\lambda, c_1]^T$  e  $c_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$  representam os coeficientes do polinômio de Hurwitz  $\lambda^{n-1} + c_{n-1}\lambda^{n-2} + \dots + c_2\lambda + c_1$ . Dessa forma, podemos derivar a equação em relação ao tempo, que pode ser escrita:

$$\dot{s}(x, t) = \Lambda^T \dot{\tilde{x}} = \tilde{x}^{(n)} + \Lambda^T_u \tilde{x} \quad (4)$$

de forma que  $\Lambda_u = [0, \lambda^{n-1}, c_{n-1}\lambda^{n-2}, \dots, c_2\lambda]^T$  (BESSA, 2005).

Considerando que um sistema não linear de ordem  $n$  pode ser representado pela equação:

$$x^{(n)} = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (5)$$

sendo  $g$  o ganho e  $f$  uma função desconhecida, porém pode ser representada por:

$$|\hat{f}(x, t) - f(x, t)| \leq F(x, t)$$

sabendo que  $\hat{f}(x, t)$  é o valor estimado e  $F(x, t)$  é o erro máximo de modelagem. Considerando que as condições iniciais ideais são  $x(0) = x_d(0)$  a lei de controle é então definida:

$$u = g^{-1}(-f + x_d^{(n)} - \Lambda^T_u \tilde{x}) \quad (6)$$

Para condições reais  $x(0) \neq x_d(0)$  a lei de controle é determinada:

$$u = g^{-1}(-f + x_d^{(n)} - \Lambda^T_u \tilde{x} - K \operatorname{sgn}(s)) \quad (7)$$

Onde  $K$  é um coeficiente de ganho que satisfaz a condição de deslizamento e  $\operatorname{sgn}$  é uma função sinal definida:

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} -1 & \text{se } s < 0 \\ 0 & \text{se } s = 0 \\ 1 & \text{se } s > 0 \end{cases} \quad (8)$$

As oscilações da alta frequência e a amplitude são problemas causados pela lei de controle, sendo nomeado *chattering*. Para evitar esse efeito, deve suavizar a função sinal usada na lei de controle de maneira que é definida uma camada limite próxima à superfície de deslizamento. O procedimento ocorre ao substituir a função sinal  $\operatorname{sgn}(s)$  por uma função de saturação  $\operatorname{sat}(s)$  que pode ser definida como:

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & \text{se } |s| \geq 1 \\ s & \text{se } |s| < 1 \end{cases} \quad (9)$$

### 2.2.6. Controle de Linearização por realimentação

A técnica de linearização por realimentação (*Feedback Linearization - FBL*) é um controle que já esteve presente em robôs industriais, equipamentos biomédicos e em controle de aeronaves. Sua aplicação resolve problemas relacionados à estabilidade e rastreamento, sistemas que possuem uma entrada e múltiplas saídas, e projetos não lineares (SLOTINE e LI, 1991).

A proposta é transformar um controle não linear em um controle parcial ou totalmente linear equivalente. Dessa forma, ao simplificar a dinâmica do sistema, as técnicas de controle linear podem ser utilizadas no projeto. De maneira geral, as não linearidades são descartadas do sistema de forma que o sistema em malha fechada se comporta de maneira linear (SLOTINE e LI, 1991; OLIVEIRA, 2016).

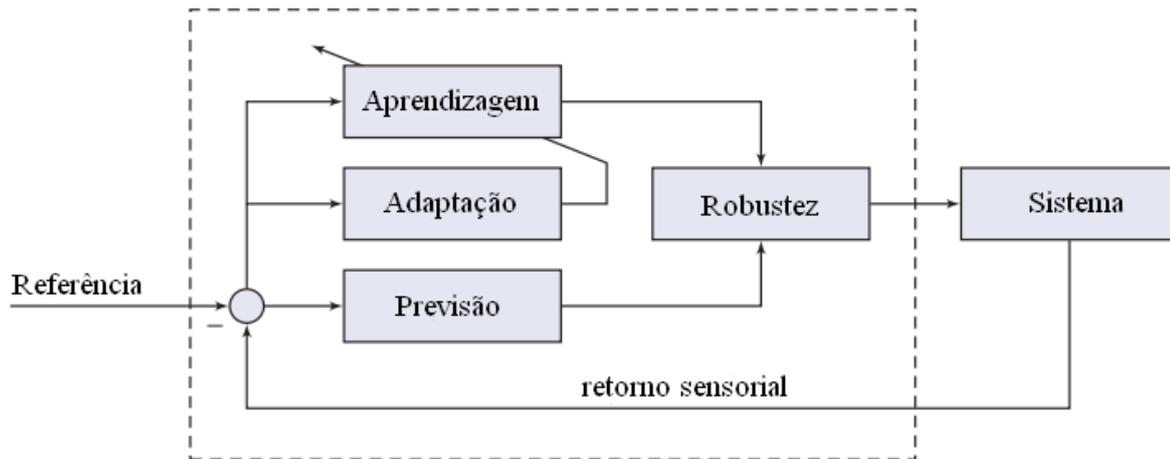
Para sistemas que são possíveis determinar os parâmetros, o controle FBL é aplicado, porém em sistemas que não conhece os parâmetros o modelo FBL não é aconselhado. A razão para isso é que no primeiro sistema as linearidades conhecidas podem ser descartadas ao contrário do que ocorre no segundo, no qual variações das incertezas não podem ser totalmente eliminadas (OLIVEIRA, 2016).

### 2.2.7. Controle inteligente

Um controle é dito inteligente quando apresenta as quatro características: Previsão, adaptação, aprendizagem e robustez. As informações disponíveis permitem o controlador antecipar ações e adaptar seu sistema a mudanças externas. Dessa forma, as reações do sistema diante das interações com o ambiente aumentam a habilidade de precisão. Além disso, as operações realizadas pelo controle devem ser seguras diante das oscilações externas, garantindo a robustez (BESSA *et al.*, 2018).

A previsão é responsável pelo conhecimento disponível no projeto; oposto a isso a aprendizagem compõe o conhecimento após a interação entre o sistema; e o ambiente, assim, a adaptação altera o grupo de aprendizagem diante das mudanças necessárias. Dessa forma, o bloco da robustez determina os sinais que serão enviados para o sistema. A Figura 14 mostra o diagrama de blocos de uma estrutura de controle inteligente (BESSA *et al.*, 2018).

Figura 14. Estrutura de um controle inteligente.



Fonte: Adaptado de Bessa *et al.* (2018).

### 3. Metodologia

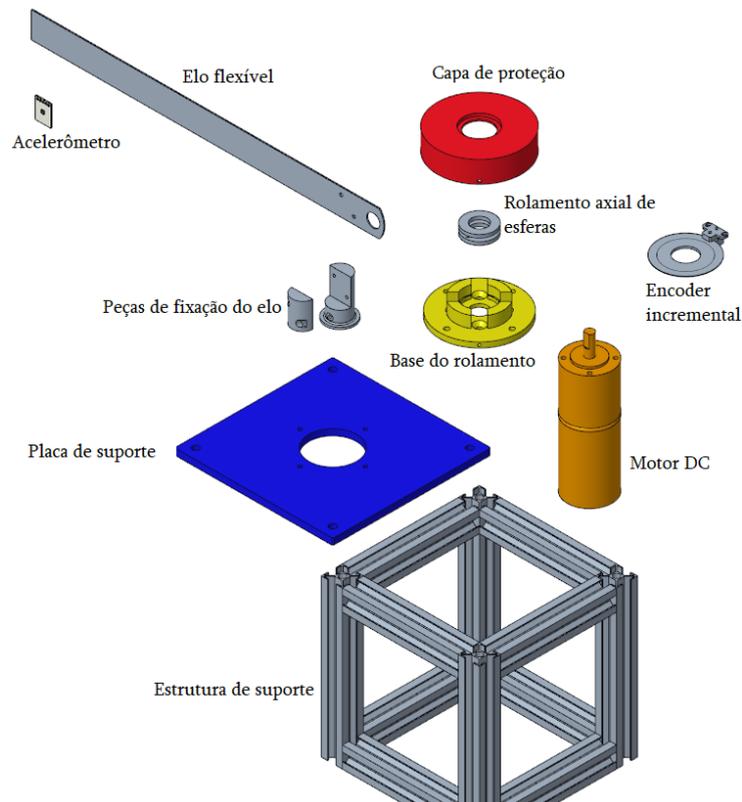
Esse capítulo aborda as etapas necessárias para a concepção, construção e aplicação de um manipulador flexível de dois graus de liberdade. Dessa forma, a divisão dos subitens de foi organizada da seguinte forma: 3.1. Projeto Conceitual e Mecânico Detalhado; 3.2. *Hardware e Software*; 3.3. Aquisição de dados e controle.

#### 3.1. Projeto Conceitual e Mecânico Detalhado

Como foi informado anteriormente, é importante reiterar que a primeira versão desse projeto foi desenvolvida por Porto (2019), o qual tinha o objetivo a construção de um manipulador flexível com um grau de liberdade. A estrutura do dispositivo foi concebida de uma liga metálica de baixa densidade. O mesmo material também foi utilizado no componente mecânico de fixação do elo, na base de rolamento e na capa de proteção (liga de alumínio AL6161-T6). Também foi utilizado um motor de corrente contínua, um rolamento axial de esferas para a transmissão da rotação com baixo coeficiente de atrito. Dessa forma, o movimento rotativo do motor produz a rotação do elo flexível. Além disso, o *encoder* e acelerômetro acoplados ao sistema foram utilizados para a obtenção de dados relativos ao deslocamento. Contudo, segundo o autor, por existir uma folga entre o eixo do motor e o sistema de transmissão, os testes funcionais apresentaram oscilações, mesmo diante de uma melhora na qualidade do rastreamento de trajetória.

Nesse sentido, considerando o projeto de Porto (2019), um dos propósitos desse trabalho foi a redução de folgas mecânicas no sistema de movimentação para permitir uma maior exatidão de posicionamento. Além disso, visto que apenas o deslocamento angular define o manipulador com apenas um grau de liberdade desenvolvido por Porto (2019), outro objetivo deste trabalho apresentado foi a introdução de um novo grau de liberdade. Esse grau de liberdade teve como finalidade acrescentar a translação vertical desse sistema mecânico e, conseqüentemente, aumentar o volume de trabalho. A figura 15 mostra o estado inicial do projeto do manipulador robótico a ser atualizado neste projeto.

Figura 15. Projeto mecânico com um grau de liberdade



Fonte: Porto (2019).

Para a concepção do projeto foram definidos alguns requisitos básicos para implementar um novo grau de liberdade para o sistema:

- Um curso de aproximadamente 70 mm
- Possibilidade de inversão de sentido
- Um atuador com toque 0,05 Nm
- Um incremento mínimo de deslocamento de curso de 0,3 mm

Dessa forma, a primeira fase deste projeto envolveu encontrar as soluções teóricas para incrementar o número de graus de liberdade, denominada de projeto conceitual, e a realização do projeto mecânico e as especificações técnicas dos acionadores, denominado projeto detalhado. As atividades desta fase do projeto foram suportadas pelo software de CAx Creo Parametric 4.0 (versão acadêmica), disponível no Laboratório de Manufatura (LabMan) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Também foi realizada a especificação dos transdutores para o

sistema de aquisição de dados e controle (extensômetros e acelerômetros). Esta etapa inclui a análise dos equipamentos disponíveis no mercado para as atividades de acionamento do manipulador flexível e transdutores para análises de posição e velocidade.

### 3.2. Hardware e Software

A utilização de um sistema de aquisição, processamento de dados e controle é a base para análise dos sinais (aceleração e deformação) emitidos pelos transdutores durante o funcionamento do manipulador mecânico flexível. Dessa forma, equipamentos de hardware e software são fundamentais para o funcionamento correto do sistema, assim, são necessários alguns transdutores, fontes de energia, atuadores, sistema de aquisição e outros dispositivos eletrônicos. Visto isso, os componentes reaproveitados do projeto de Porto (2019) são listados a seguir:

- Motor DC J-Lotor 42GP-775 com 150W e redução 13:1;
- Driver Reland Sun AQMH3615NS v2.00;
- Encoder Broadcom Limited HEDS-9730;
- Fita circular para “encoder” com resolução de 0.075°;
- Acelerômetro GY-61 chip DXL335;
- Fonte HP PA-1650-32HB de 65 W.

Outros dispositivos foram necessários para o sistema, sendo definido que foram comprados os seguintes componentes:

- Motor DC 6V com encoder 300 RPM;
- Driver Motor ponte-H L298N;
- Fonte de alimentação.

Para o controle, a aquisição e processamento de dados foi utilizado o microcontrolador MyRIO 1900, e para a elaboração do controle o software Labview 2017, ambos da empresa National Instruments (National Instruments, 2020). Esses dispositivos de hardware e software foram aplicados ao projeto devido a sua ampla gama de funcionalidade e a disponibilidade no Laboratório de Manufatura da UFRN.

### 3.3. Aquisição de dados e controle

Para o funcionamento adequado ao sistema foi necessário o desenvolvimento de programas de aquisição de sinais e processamentos de dados. O projeto conta com dois atuadores (dois motores DC) e três transdutores (dois *encoders* e um acelerômetro). Os motores foram controlados pelo microcontrolador MyRIO 1900, mostrado na figura 16, que possui um processador dual-core, e entradas analógicas e digitais (National Instruments, 2021). Com a presença do *encoder*, para cada motor, foi possível indicar e controlar a posição e a orientação para cada sistema de coordenadas do conjunto.

Figura 16. Microcontrolador MyRIO 1900



Fonte: National Instruments (2021)

O programa LabView 2017 foi utilizado para o desenvolvimento dos códigos de controle. Esse software apresenta uma programação gráfica e interage diretamente com o microcontrolador MyRIO. O programa desenvolvido nesse software é nomeado como instrumento virtual (VI – Virtual instrument), sendo dividido em duas interfaces, painel frontal e diagrama de blocos. O painel frontal é responsável pela interação direta com o usuário e o diagrama de blocos contém o código gráfico que determina as funcionalidades do VI.

O controle implementado foi o Proporcional Integral e Derivativo (PID), descrito no tópico 2.2.4, por apresentar um desempenho relativamente robusto, pela sua simplicidade para projetá-lo e por ser aplicado em inúmeras funcionalidades. O algoritmo permitiu o movimento dos dois motores através de posições pré-estabelecidas, e através da interface foi possível visualizar os dados e compará-los com os resultados obtidos, fornecendo gráficos do desempenho do sistema durante a execução do programa. Além disso, o usuário teve a facilidade de modificar os parâmetros do controle caso necessário.

O planejamento de códigos computacionais para controle dos motores teve como requisitos: (a) controle de velocidade um motor de corrente contínua com um sinal de modulação por largura de pulso (PWM); (b) controle da posição de um motor de corrente contínua com posição escolhida pelo usuário; e (c) controle da posição de um motor de corrente contínua com posições pré-definidas. Além deles, outros códigos auxiliares também foram desenvolvidos com o suporte da plataforma LabVIEW 2017 para auxiliar no desenvolvimento do projeto.

### 3.4. Manufatura e análise dimensional

A manufatura teve início definindo as máquinas ferramentas, o material e as ferramentas necessárias para o processo de fabricação dos componentes mecânicos. Os materiais utilizados para a usinagem das peças foram: liga de alumínio 6061, aço 1045 e aço 1020. O corte desse material base foi realizado através da serradora fita FRANHO FM 500. Também foi utilizado o torno Nardini DT 650 para o torneamento de algumas peças nas suas dimensões nominais. Para algumas operações, foram utilizadas a fresadora universal WMW Heckert, plaina limadora Zocca-650 e a furadeira de coluna Clarck FC35A. Além disso, alguns componentes mecânicos necessitavam de alguns acabamentos através da ajustagem mecânica, realizados na bancada de ajustagem. Todos os equipamentos e materiais estavam disponíveis no Laboratório de Manufatura da UFRN. Foi necessário o uso da micro retífica Dremel para realizar o corte na pinça de fixação. Para as operações de usinagem ferramentas:

- Fresas de topo reto:  $\varnothing$  5 mm e 12 mm – Material HSS
- Fresa Módulo: M1 – Material HSS
- Brocas helicoidais:  $\varnothing$  3 mm, 3,5 mm, 4 mm, 4,5 mm, 5 mm, 8 mm, 8,25 mm, 10 mm e 11 mm  
- Material HSS
- Broca de centro: 3/16" x 7/16" e 1/8" x 5/16" – Material HSS

**PRH nº 44.1**

- Macho rígido: M3x0,5 mm e M4x0,7 mm – Material HSS
- Escareador:  $\emptyset$ 10 mm x 90° – Material HSS

A análise dimensional das peças produzidas são fundamentais para garantir os requisitos do projeto, verificando as tolerâncias dimensionais necessárias para a correta montagem e o funcionamento do sistema. Os instrumentos de medição utilizados apresentavam certificado de calibração e estavam disponíveis no Laboratório de Metrologia da UFRN. Esses são listados:

- Paquímetro universal Asimeto 0-300 mm com resolução 0,05 mm
- Paquímetro com relógio Mitutoyo 0-150 mm com resolução 0,05 mm
- Paquímetro digital Mitutoyo 0-200 mm com resolução de 0,01 mm
- Relógio comparador Mitutoyo de base magnética de resolução 0,01 mm

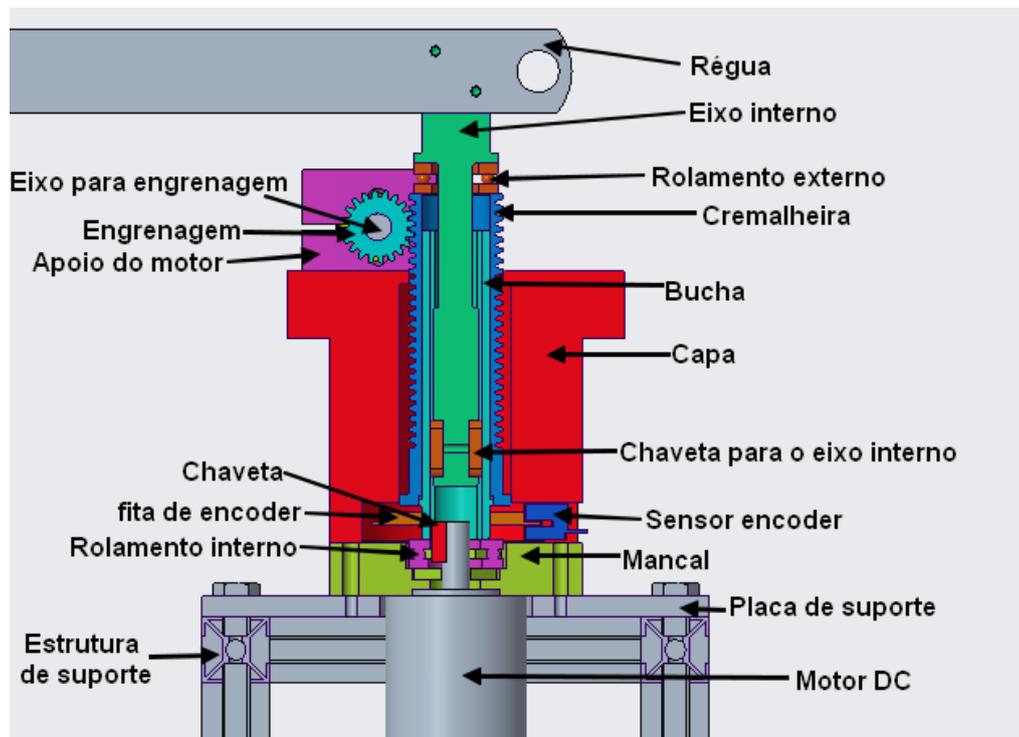
## 4. Resultados e Discussão

Esse capítulo aborda os resultados alcançados com a aplicação da metodologia utilizada e apresenta as discussões. Para uma melhor compreensão do capítulo, a estrutura está organizada com os mesmos itens da metodologia: 4.1 Projeto Conceitual e Mecânico Detalhado; 4.2. Controle.

### 4.1. Projeto conceitual e Mecânico Detalhado

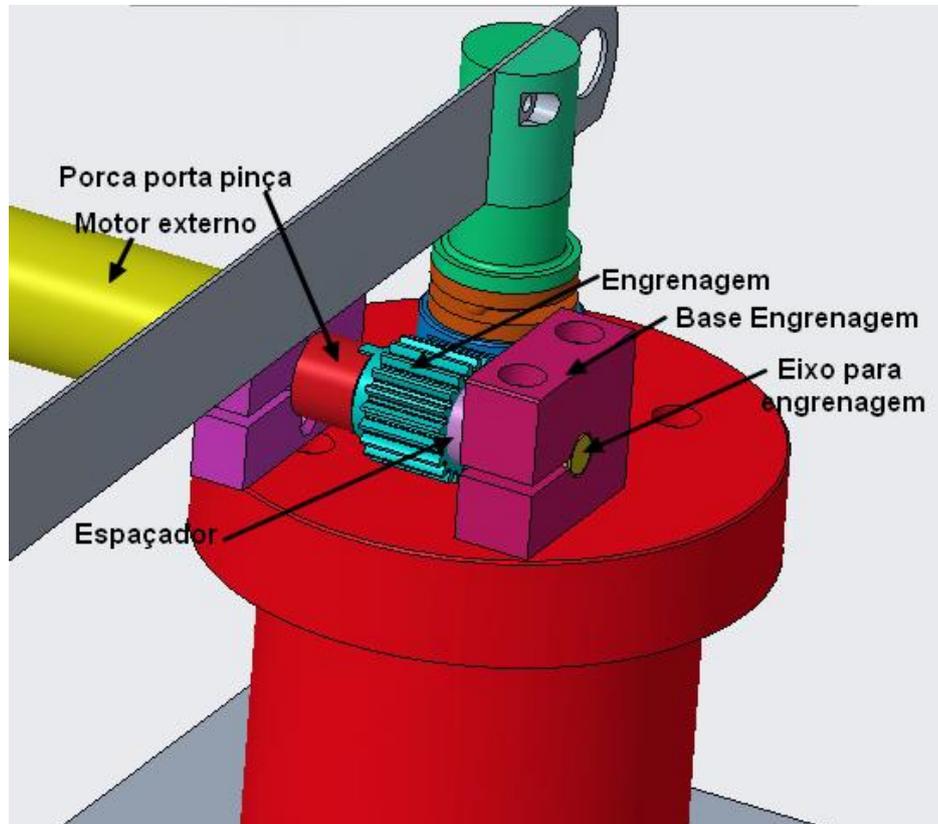
O modelo do manipulador de dois graus de liberdade proposto neste trabalho é mostrado nas Figuras 17 e 18. A estrutura desenvolvida por Porto (2019) é identificada com os componentes na cor cinza: motor DC, placa e estrutura de suporte, rolamento axial de esferas e braço flexível. A atualização projeto conceitual tem o objetivo fazer um manipulador robótico ser capaz de realizar dois movimentos: o de rotação e o de translação. No movimento de rotação, os conceitos desenvolvidos por Porto (2019) foram mantidos. Porém, as mudanças no sistema interno do manipulador permitem com que o elo flexível consiga realizar o movimento axial.

Figura 17. Modelo de manipulador com dois graus de liberdade em corte



Fonte: Autor.

Figura 18. Modelo de manipulador de dois graus de liberdade em perspectiva



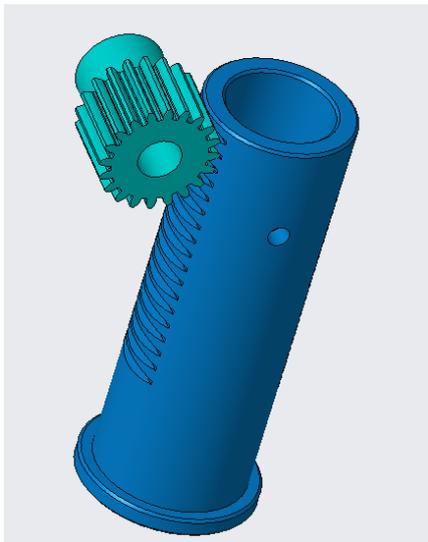
Fonte: Autor.

A ideia do novo projeto conceitual foi inspirada no sistema de funcionamento de um portão automático deslizante, no qual uma roda dentada acoplada a um motor cria um movimento axial (sistema pinhão-cremalheira). Analogamente, o portão se desloca, abrindo e fechando, de acordo com o sentido de rotação do motor. No projeto atual, um eixo com dentes, no formato de cremalheira ao longo de uma região externa da sua extensão, se assemelha ao trilho dentado utilizado no portão. A cremalheira é formada por 23 dentes, módulo 1 e ângulo de pressão de 20°, permitindo um curso axial de aproximadamente 70 mm.

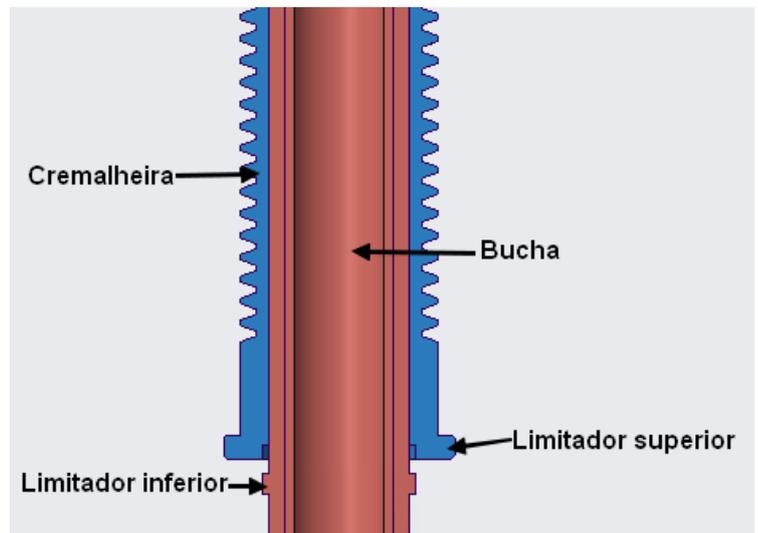
Outro ponto de alteração refere-se à redução das folgas no sistema de transferência de potência. Durante o trabalho de Porto (2019), uma folga existente entre o rolamento axial de esferas e o eixo do motor promoveu limitações durante a realização dos testes funcionais. A proposta para resolver este desafio foi a utilização de uma chaveta que conecta o eixo do motor à bucha, como mostrado na figura 17.

A figura 19a mostra o conjunto engrenagem-cremalheira, nela nota-se um aumento do diâmetro do eixo da cremalheira na parte inferior, que atua como limitador quando é atingida a altura máxima (curso de 70 mm). Semelhantemente, como mostra a figura 19b, há um limitador inferior interno a cremalheira e externo à bucha, assim, no menor curso, a cremalheira não toca na fita de encoder. O furo presente na cremalheira, permitiu sua fixação de forma a travar o sistema impedindo que ele seja desmontado ao final do curso no sentido axial. A engrenagem, de 20 dentes e módulo 1, promoveu o movimento axial do manipulador sendo acionada por um motor DC com *encoder* acoplado. Esse motor DC apresenta uma velocidade máxima de 300 RPM, um torque máximo de 0,18 N.m e uma potência máxima de 2 W. O *encoder* integrado ao eixo do motor tem uma resolução de 224,4 pulsos por revolução (PPR).

Figura 19. Cremalheira, engrenagem e bucha.



a) Cremalheira e engrenagem



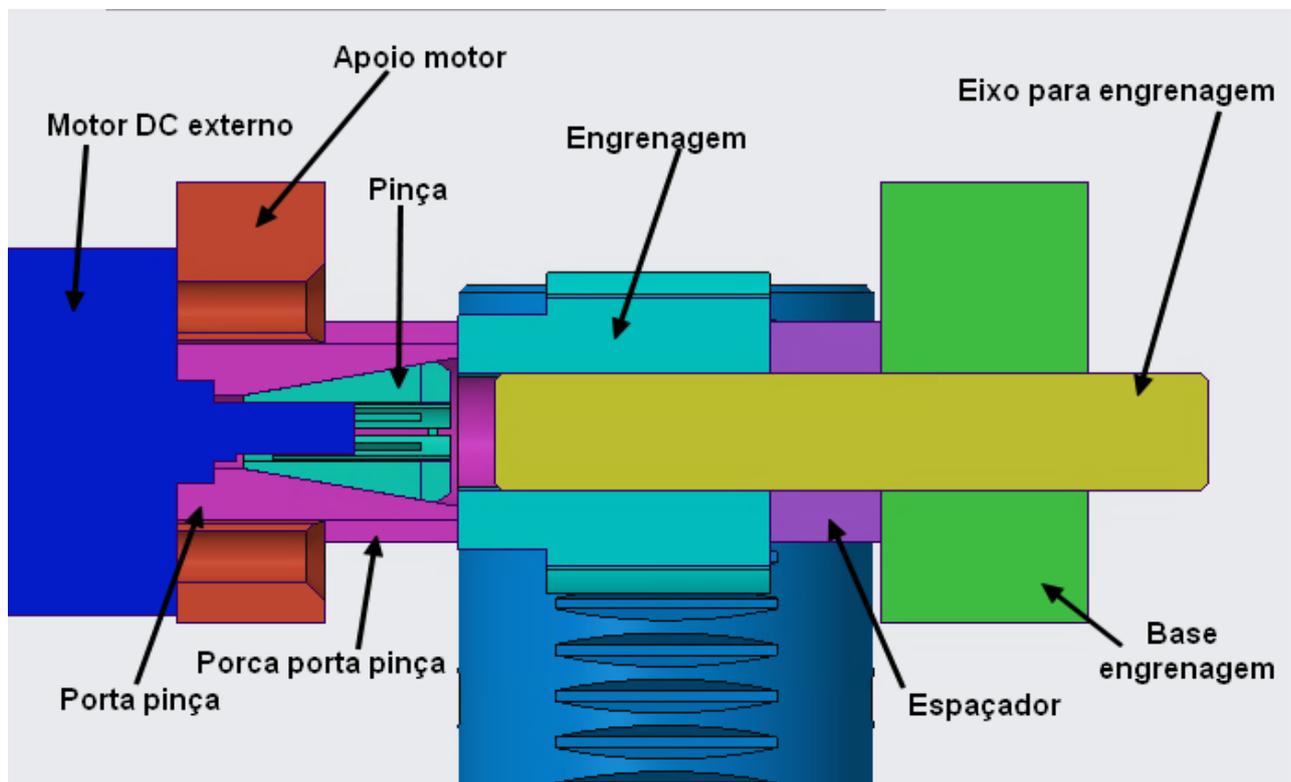
b) Vista em corte da cremalheira e bucha

Fonte: Autor.

Visto que a engrenagem apresentava um diâmetro do cubo de 8 mm e o eixo do motor DC externo um diâmetro de 4 mm, foi necessária uma adaptação para que ocorresse a transferência de torque. Como é mostrado na figura 20, uma pinça foi acoplada ao eixo do motor DC, que foi encaixada dentro do porta pinça, e a porca ao ser rosqueada gera um aperto na pinça garantindo sua alta fixação. Dois suportes foram fixados, através de parafusos M3 x 0,5 mm, na placa superior.

Um deles permitiu sustentar o motor preso através de dois parafusos M3 x 0,5 mm, outro possui um furo central por onde passa o eixo para engrenagem possibilitando o deslocamento da cremalheira. A existência de um espaçador garantiu uma fixação linear da engrenagem e anulou a existência de folgas mecânicas. A união entre a engrenagem e a porca porta pinça foi feita através de dois rasgos mostrados na figura 21a, a união permitiu a transmissão de potência entre o motor e a engrenagem.

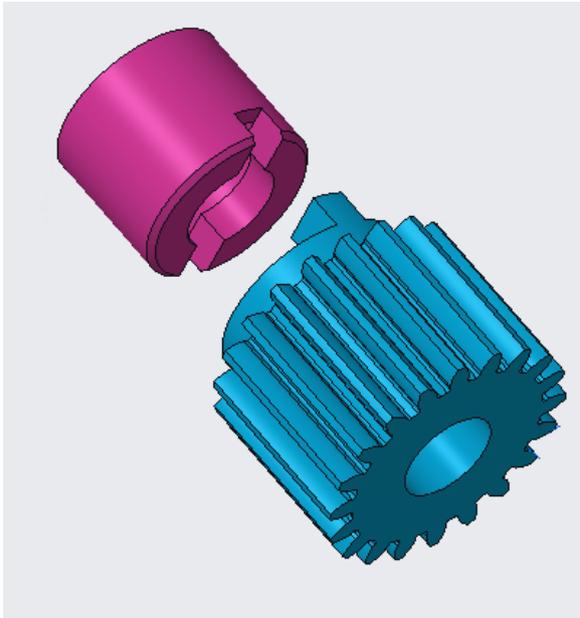
Figura 20. Montagem do Sistema de transferência



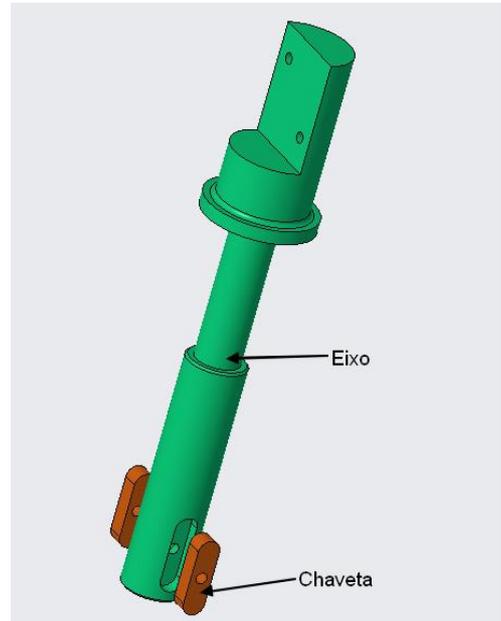
Fonte: Autor

Conforme pode ser visto na figura 17, no novo sistema interno o conjunto de bucha e chavetas permitiram a transmissão de torque para o eixo, durante os movimentos de translação e rotação. As chavetas acopladas ao eixo interno, mostradas na figura 21b, possuem um furo central para sua fixação. O suporte para fixação do elo flexível possui o modelo muito semelhante ao proposto por Porto (2019), porém o novo modelo de suporte está unido ao eixo, unificando o componente. Os furos presentes para a fixação continuam com a mesma proposta: proporcionar a troca do elo flexível se for desejado.

Figura 21. Componentes mecânicos



a) União entre a porca e a engrenagem



b) Conjunto eixo e chavetas

Fonte: Autor.

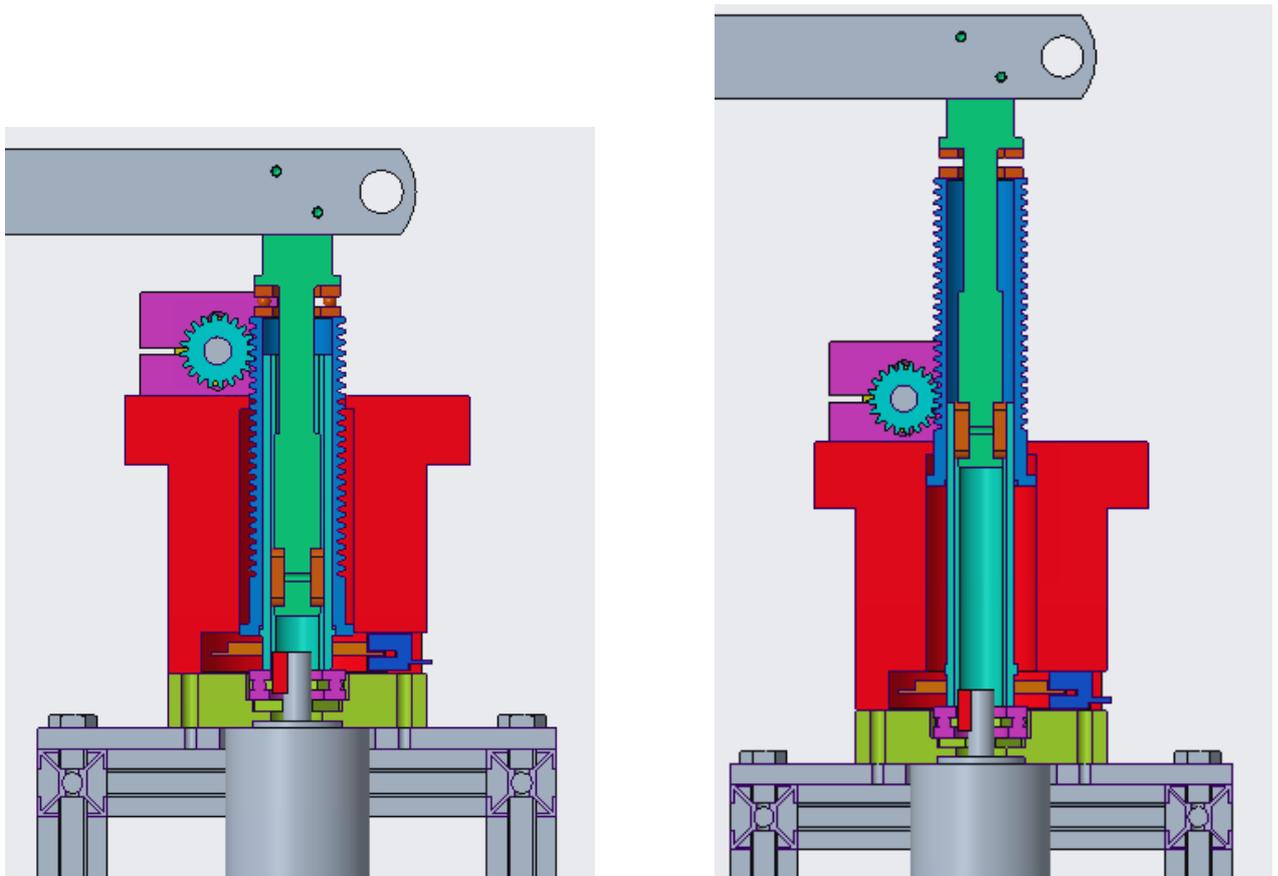
A presença do rolamento axial de esferas, entre o eixo e a cremalheira, fornece ao sistema uma redução no coeficiente de atrito, aumentando a sua capacidade de rotação. O rolamento que melhor se encaixa diante das dimensões nominais do sistema foi o rolamento axial de esferas 51100 (SKF, 2020).

A capa forneceu o alinhamento da cremalheira e do eixo e bucha durante o movimento de translação e rotação. Além disso, guiou a cremalheira durante o movimento axial. A sua fixação foi feita por quatro parafusos M4 x 0,7 mm equidistantes, os quais percorreram toda a extensão até a base de rolamento, como mostra a figura 17. Dessa forma, foi necessário manufaturar uma nova base de rolamento, muito semelhante a utilizada por Porto (2019). A mudança ocorreu apenas no furo superior para a fixação da capa. Essa fixação permitiu travar o sistema de forma que ele não seja desmontado ao ser puxado para cima.

O funcionamento interno do sistema é mostrado nas figuras 22a e 22b. Na mínima extensão o eixo interno está posicionado próximo ao eixo do motor e a cremalheira próxima ao mancal, quando a engrenagem movimenta a cremalheira para cima simultaneamente o eixo interno também sobe, até atingirem a altura máxima como é mostrado na figura 21b.

Os componentes reaproveitados pelo projeto de Porto (2019) como o motor DC, o braço flexível, rolamento axial, assim como a placa e estrutura de suporte foram constituídos da liga de alumínio 6061. Pelo projeto ter apresentado um bom desempenho e pelo material apresentar características, como boa usinabilidade, adequada resistência mecânica, alta resistência à corrosão e por ter baixa densidade quando comparada aos aços, esse material foi utilizado na manufatura dos novos componentes mecânicos. Assim, os desenhos realizados utilizados para a manufatura dos componentes estão presentes no apêndice II. As tolerâncias necessárias para a manufatura são adequadas de acordo com os equipamentos existentes no Laboratório de Manufatura.

Figura 22. Sistema de funcionamento interno



a) Sistema de dois graus de liberdade na mínima extensão mostrado em corte

b) Sistema de dois graus de liberdade na máxima extensão mostrado em corte

Fonte: Autor.

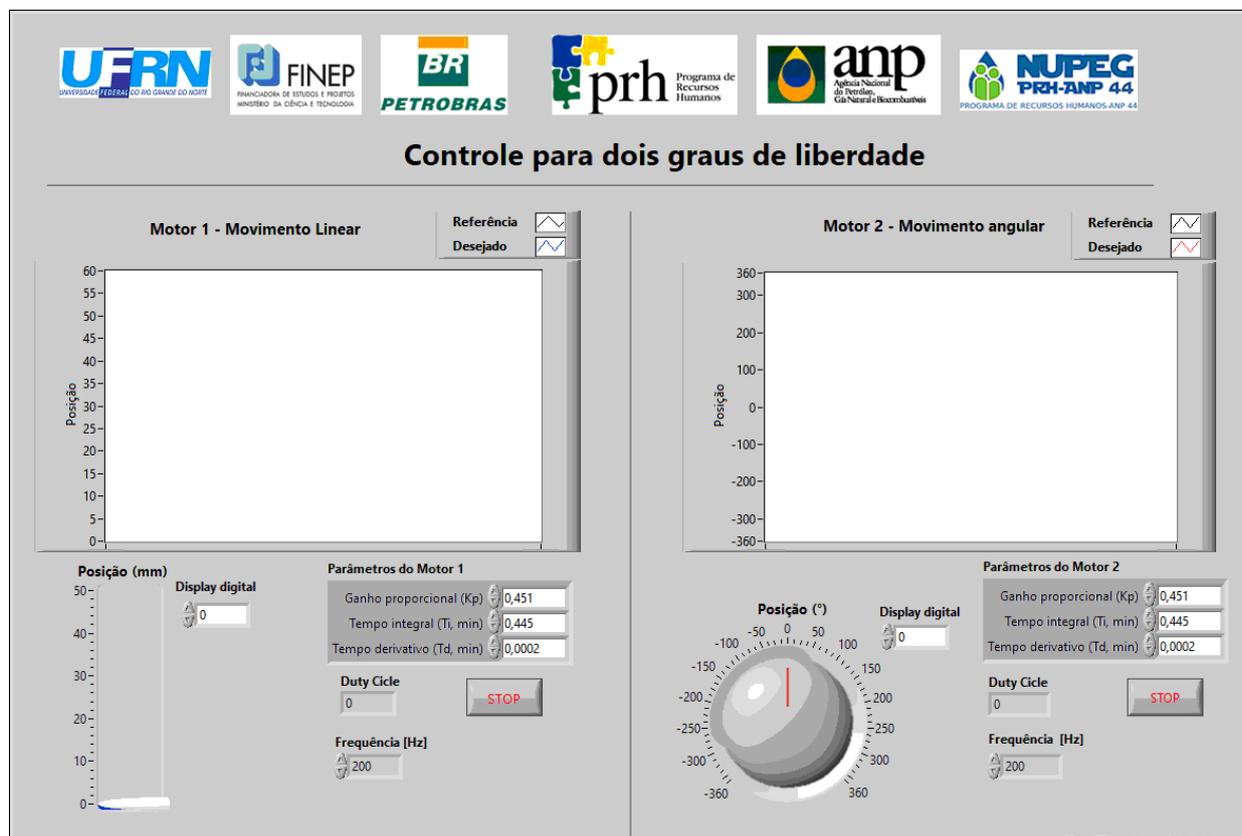
#### 4.2. Criação do programa de controle

Para permitir um funcionamento correto do sistema, foi desenvolvido um programa envolvendo dois controladores PID. O código elaborado tem o objetivo controlar a posição de dois motores DC, utilizando as ferramentas disponíveis no programa LabView. Vale ressaltar que o primeiro código realiza o controle do movimento de rotação; e o segundo, o movimento axial do manipulador robótico.

O primeiro passo para elaborar o controlador foi desenvolver um código capaz de medir a posição em tempo real, utilizando o encoder, e comparar com a posição desejada para o algoritmo atuar na variável controlada tendendo-a ao valor desejado. Os códigos computacionais desenvolvidos, na forma de diagrama de blocos, encontram-se disponíveis no apêndice I.

Dessa forma, no painel frontal, mostrado na figura 23, o usuário pode definir a posição através do botão “Posição” ou pelo “Display digital”. A presença do driver L298N permitiu a inversão de sentido de rotação, como é visto no ícone de “Posição”, referente ao motor responsável pelo movimento angular, com a presença de valores positivos e negativos. O botão posição que proporciona o movimento linear apresenta uma variação de 0 a 50 mm, diante do curso mínimo e máximo da cremalheira. Para visualizar o comportamento do sistema, a interface gráfica mostra, em tempo real, a comparação entre os estados desejados e reais do sistema.

Figura 23. Interface do Usuário do programa de controle



Fonte: Elaborada pelo autor.

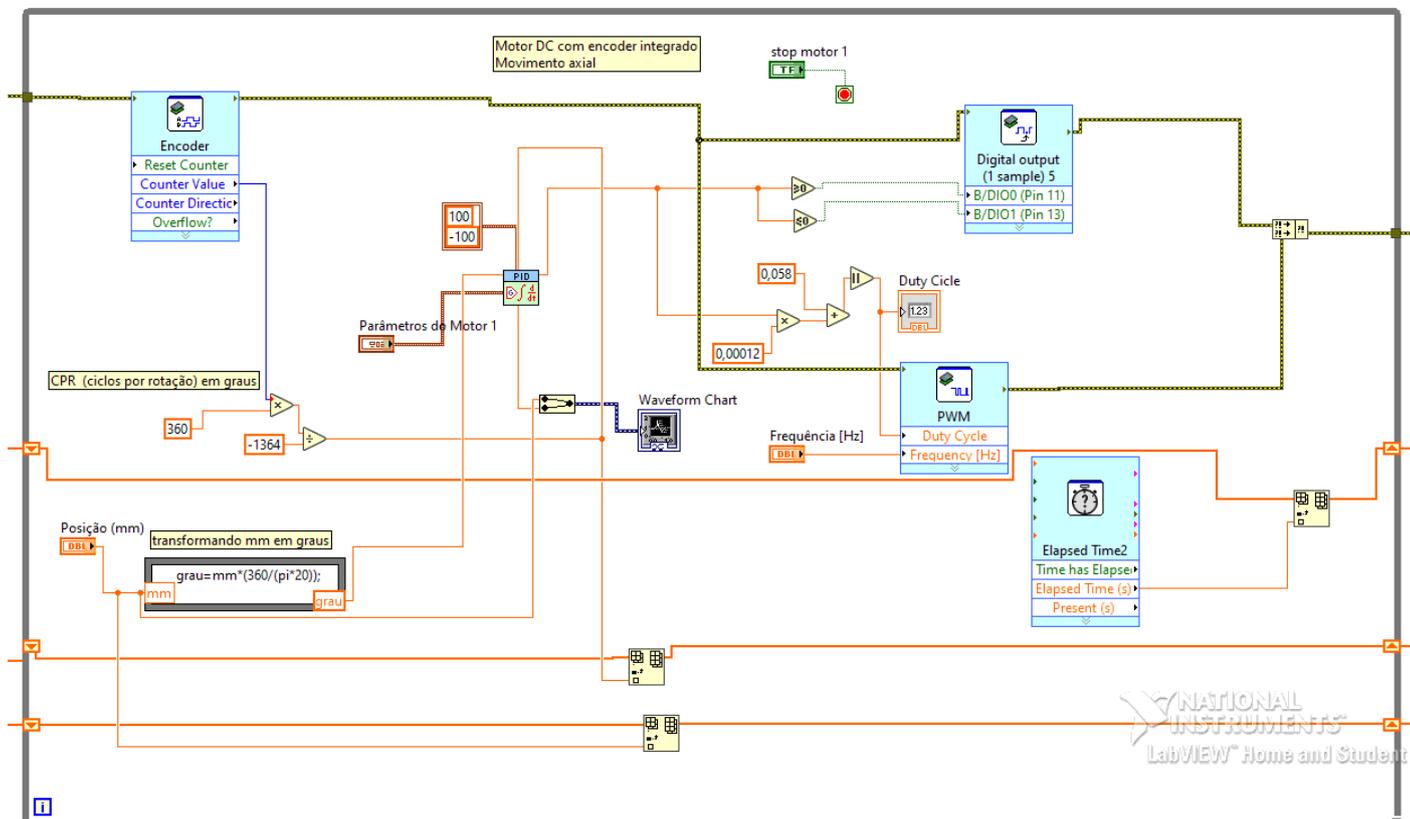
Para permitir uma adequada estabilidade durante a execução do sistema, o controle PID apresenta três parâmetros. Na interface, é possível alterar o ganho proporcional ( $K_c$ ), o tempo integral ( $T_i$ ) e o tempo derivativo ( $T_d$ ), para o motor que promove o movimento linear e para o motor que permite o movimento angular. O parâmetro proporcional produz uma resposta linear ao sistema até um certo limite, quando o  $K_c$  aumenta a resposta do sistema aumenta, entretanto se for considerado um valor muito alto a variável controlada oscila, gerando instabilidade no controle. Afim de permitir uma maior sensibilidade a pequenos erros é inserida a componente integral, assim a função do parâmetro integral é convergir o erro pra zero. A presença da componente derivada é reduzir a resposta de saída caso ocorra um aumento repentino da variável de processo (National instruments, 2021).

Com a finalidade de controlar a velocidade foi utilizado a modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*), regulando a tensão de acionamento que é enviada para cada motor

através do ciclo de trabalho, do inglês *Duty Cycle*. Assim, no painel frontal, mostrado na figura 23, o parâmetro determina a fração de tempo em que o sinal se encontra em estado ativo no indicador “*Duty cycle*”. Além disso, o usuário tem a possibilidade de determinar a frequência necessária para o sinal PWM gerado. O *duty cycle* pode variar entre 0 e 100%, e a frequência de sinal do PWM varia de 40 Hz a 40 kHz (Doering, 2016), porém a frequência adotada para o sistema tem um alcance apenas de 50 Hz a 300 Hz.

A estrutura do código elaborado mostrada na figura 24 refere-se ao motor DC com *encoder* integrado, responsável pelo movimento linear do sistema. O diagrama de blocos mostra uma parte do código desenvolvido para o presente trabalho. Nesse código computacional foi possível identificar que o algoritmo PID compara a posição atual do *encoder* com a posição indicada pelo usuário, convergindo a posição real para a posição desejada através dos parâmetros do motor. Os sinais são enviados para o motor que se movimenta até atingir a posição desejada. A aquisição dos dados reais e desejados do motor é disposta em um gráfico e em vetores para que esses dados sejam coletados em um arquivo de extensão de texto. A frequência do sinal PWM foi definida de acordo com a preferência do usuário e o *duty cycle* é ajustado no controle.

Figura 24. Diagrama de bloco do código de controle do motor DC com *encoder* integrado



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3. Validação do programa de controle

O objetivo desta etapa do projeto foi analisar a resposta do sistema diante do controle implementado. Para validar o programa elaborado foram utilizados o mecanismo desenvolvido por Porto (2019) e o motor DC com *encoder* adquirido para o aumento do grau de liberdade do sistema. Dessa forma, os parâmetros do controlador para os motores foram baseados no trabalho de Brito (2019) mas reajustados para obter um melhor desempenho do controle. Diante das características de cada motor, parâmetros diferentes para cada um foram utilizados. Além disso, foi utilizada a frequência de 200 Hz por obter uma resposta correta do sistema e por gerar um menor ruído no motor. A tabela 1 mostra os parâmetros para cada motor, sendo o motor 1 responsável pelo movimento linear do sistema e o motor 2 responsável pelo movimento angular:

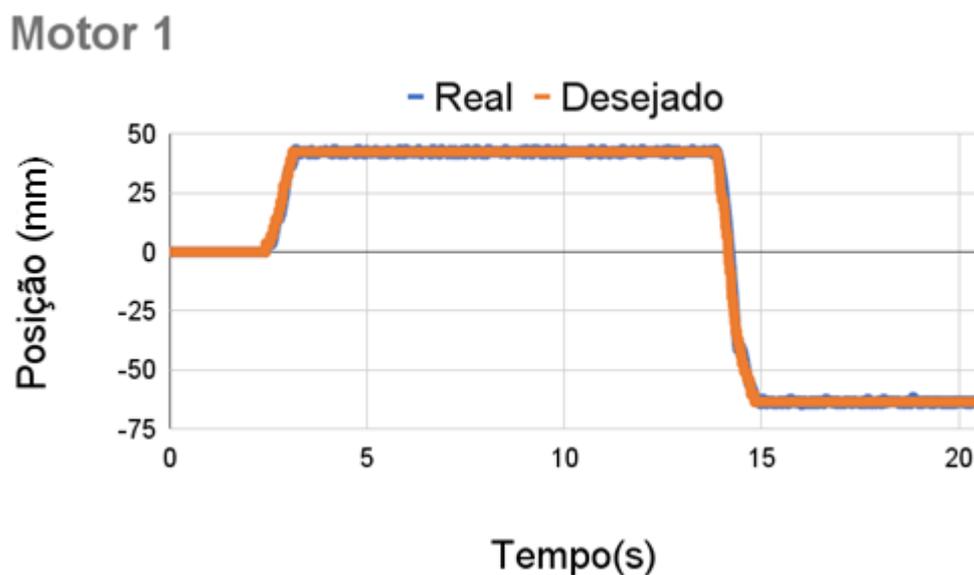
Tabela 1. Parâmetros do controlador PID

	<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>
$K_p$	0,451	0,451
$T_i$	0,445	0,445
$T_d$	0,0001	0,0002

Fonte: Produzida pelo autor.

Os gráficos das figuras 25 e 26 mostram o comportamento do controlador diante dos parâmetros aplicados. Fica evidente que o sistema apresenta uma resposta adequada, validando o controle adotado. No gráfico referente ao motor 1, que permite o movimento axial, as oscilações podem ser referentes a ruídos do sensor e apresentam uma baixa amplitude comparada a do sinal. Os ruídos presentes no motor 2, que permite o movimento angular, eram esperadas diante das folgas mecânicas existentes no sistema de Porto (2019), gerando também uma falta de precisão. Esse problema foi ajustado através da inserção de uma chaveta no conjunto.

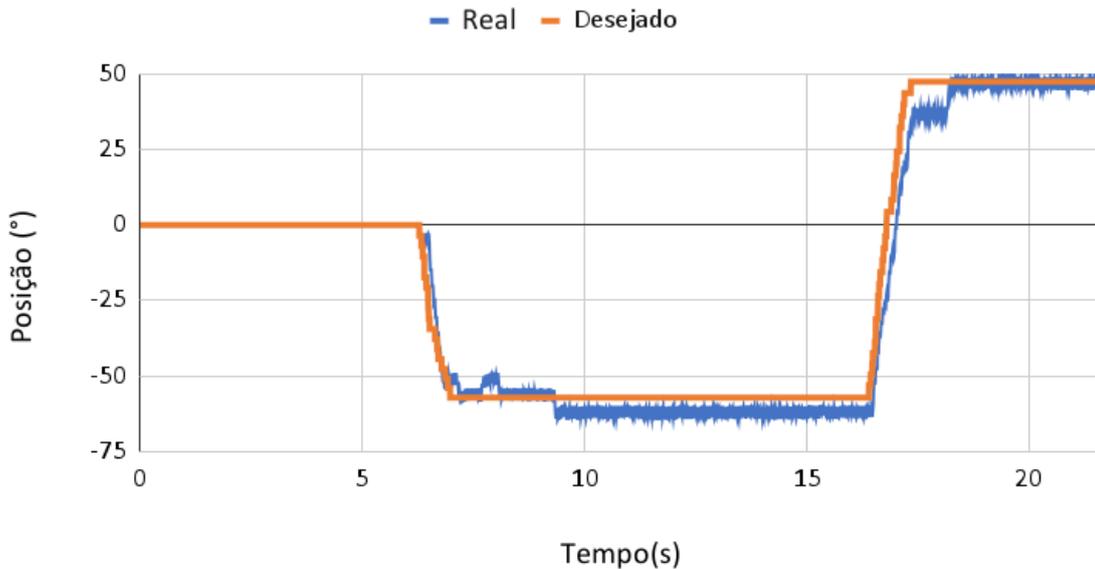
Figura 25. Desempenho do motor 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26. Desempenho do motor 2

### Motor 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, o programa desenvolvido forneceu a possibilidade de promover um controle de posição para dois motores DC. Para os dois motores houve a possibilidade de inversão de sentido de rotação, sendo o motor 2 apresentando uma variação angular de  $-360^\circ$  e  $360^\circ$ . Foi projetado um curso de 50 mm no controle de posição do motor responsável pelo movimento axial. Além disso, a velocidade de rotação do motor foi controlada através da modulação por largura de pulso.

#### 4.4. Manufatura e análise dimensional

A manufatura dos componentes mecânicos partiu de barras de liga de alumínio 6061 com diâmetros de  $\varnothing$  50 mm e 100 mm. Foram cortados 8 tarugos de alumínio de  $\varnothing$  50 mm com comprimentos que variavam de 7 mm a 145 mm, de acordo com o tamanho das peças, e 2 tarugos de alumínio com  $\varnothing$  100 mm e comprimento de 22 mm e 90 mm. As peças de aço 1045 e 1020 partiram de barras com diâmetro de  $\varnothing$  50 mm e comprimento de 20 mm e 55 mm.

Inicialmente, todos os tarugos passaram pela operação de desbaste, que se estendeu próximo as dimensões estabelecidas por cada peça. Os tarugos que passaram pelo processo de

torneamento seguem os seguintes passos: Primeiramente foi realizado um processo de faceamento para regularizar a superfície, em seguida foi formado o furo de centro, para que por fim fossem realizados os processos de furação, torneamento cilíndrico, torneamento cônico ou de rosqueamento. Em peças que apresentavam rasgos, rasgos de chaveta e dentes foi utilizado o processo de fresamento. Para componentes com superfícies planas como chavetas, base e apoio, a plaina limadora foi utilizada. Além disso, para abrir os furos presentes em alguns elementos como base, apoio, capa, dentre outros, utilizou a furadeira de coluna, em sequência, se necessário, os furos rosqueados foram finalizados manualmente com o auxílio do macho rígido. Dessa forma, podemos analisar as operações, ferramentas e materiais necessários para a manufatura de cada peça do novo sistema através da tabela 2.

Tabela 2. Operações e ferramentas utilizadas para cada peça

Item nº	Peça	Operações	Ferramentas	Material
1	Apoio do motor	Torneamento Aplainamento Furação	Broca helicoidal ( $\emptyset$ 3 mm, 4 mm, 8,25 mm e 11 mm)	Liga de alumínio 6061
2	Base da engrenagem	Torneamento Aplainamento Furação	Broca helicoidal ( $\emptyset$ 4 mm, 8 mm e 8,25 mm)	Liga de alumínio 6061
3	Bucha	Aplainamento Torneamento	Broca de centro	Liga de alumínio 6061
4	Capa	Torneamento Fresamento Furação	Broca de centro Broca helicoidal ( $\emptyset$ 4mm e 8,25 mm) Macho rígido (M4x0,7 mm) Fresa de topo reto ( $\emptyset$ 12 mm)	Liga de alumínio 6061
5	Chaveta eixo interno	Aplainamento Ajustagem mecânica	Broca helicoidal ( $\emptyset$ 3,5 mm)	Liga de alumínio 6061
6	Chaveta para motor DC	Aplainamento Ajustagem		Liga de alumínio 6061

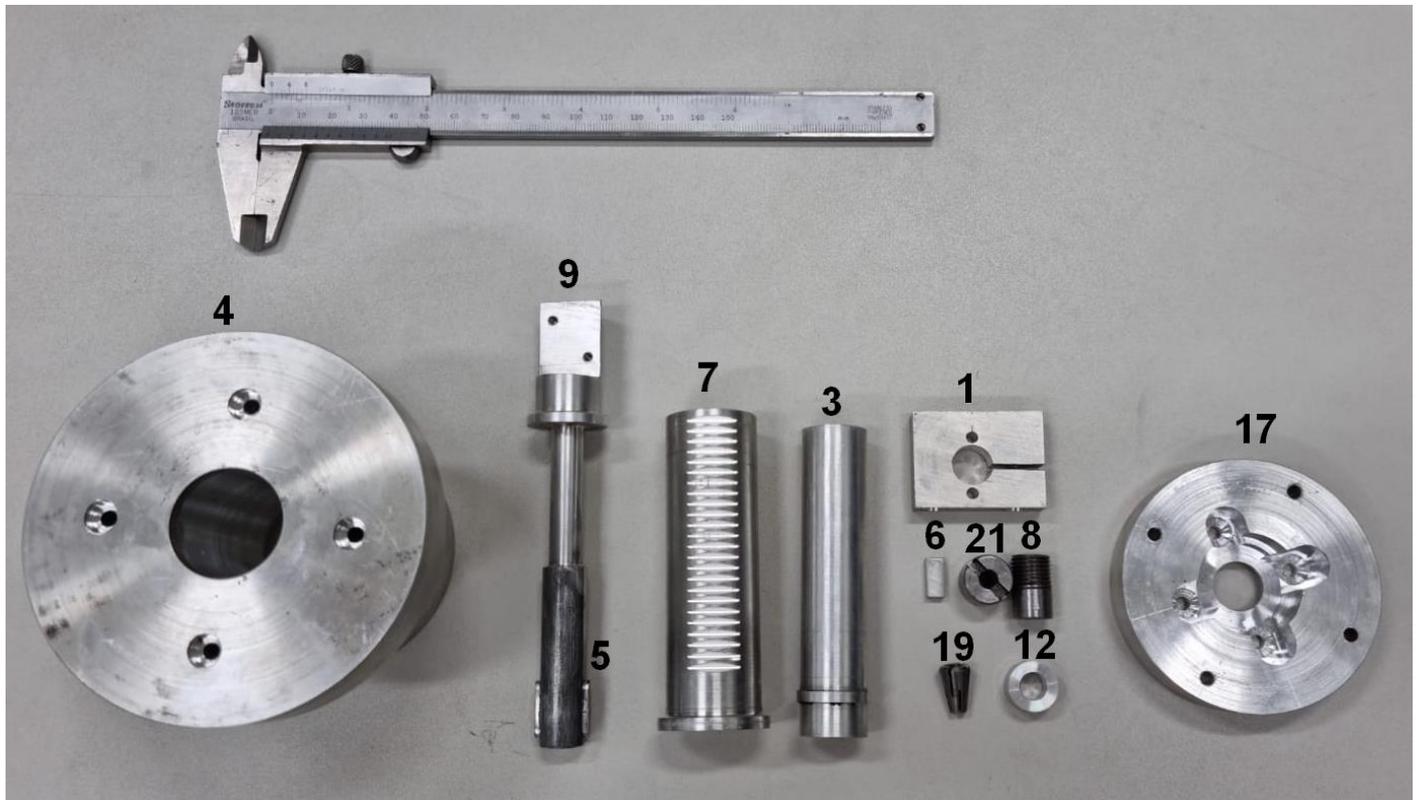
PRH nº 44.1

mecânica				
7	Cremalheira	Fresamento Torneamento	Broca de centro Broca helicoidal ( $\varnothing$ 4 mm) Fresa módulo M1	Liga de alumínio 6061
8	Cunha	Torneamento	Broca de centro Fresa de topo reto ( $\varnothing$ 3 mm)	Aço 1045
9	Eixo interno	Fresamento Torneamento	Broca helicoidal ( $\varnothing$ 3 mm) Macho rígido (M3x0,5 mm)	Liga de alumínio 6061
10	Eixo para engrenagem	Torneamento	Broca de centro	Aço 1020
11	Engrenagem 20 dentes	Aplainamento		Aço 1045
12	Espaçador	Torneamento	Broca de centro	Liga de alumínio 6061
17	Novo mancal	Torneamento Fresamento Furação	Broca de centro Broca helicoidal ( $\varnothing$ 4,5 mm) Escareador	Liga de alumínio 6061
19	Pinça	Torneamento Micro retifica	Broca de centro	Aço 1045
21	Porca porta pinça	Torneamento	Broca de centro	Liga de alumínio 6061

Fonte: Elaborado pelo autor

O processo de manufatura foi concluído e alguns componentes manufaturados são mostrados na figura 27.

Figura 27. Componentes manufacturados



Fonte: Elaborada pelo autor

A fim de atender os requisitos do projeto, todos os componentes passaram por uma análise dimensional, com os instrumentos de medição, durante e após a manufatura. Dessa forma, a tabela 3 mostra uma média de cinco medições realizadas após a manufatura de cada componente, assim como as referências das tolerâncias.

Tabela 3. Análise dimensional das peças

Item nº	Peça	Referência (mm)	Média das medições (mm)
3	Bucha	$\emptyset 20_{-0,03}^0$	19,99
		$\emptyset 22_{-0,2}^{-0,1}$	21,86
		$\emptyset 13,5_0^{+0,05}$	13,51
		$5_0^{+0,05}$	5,02
4	Capa	$\emptyset 33_0^{+0,1}$	33,05
		$\emptyset 55_0^{+0,2}$	55,16
		$\emptyset 28_0^{+0,1}$	28,01
5	Chaveta eixo interno	$17_{-0,3}^{-0,1}$	16,7
		$5_{-0,05}^{-0,02}$	4,98
		$4 \pm 0,05$	4,01
7	Cremalheira	$\emptyset 22_0^{+0,5}$	22,01
		$\emptyset 28_{-0,4}^{-0,2}$	27,77
		$\emptyset 33_{-0,2}^{-0,1}$	32,88
		$\emptyset 20_0^{+0,05}$	19,96
9	Eixo interno	$5_0^{+0,05}$	5,03
		$\emptyset 13,5_{-0,03}^0$	13,48
		$17_0^{+0,2}$	16,83
12	Espaçador	$\emptyset 8_0^{+0,02}$	8,01
19	Pinça	$\emptyset 4_0^{+0,05}$	4,01
21	Porca porta pinça	$\emptyset 8_0^{+0,02}$	8,01

Fonte: Elaborada pelo autor

Como foi visto, todas as dimensões encontram-se dentro dos limites de tolerância do projeto. Assim, a partir disso, ocorreu a montagem do sistema.

## 5. Conclusões

Diante do que foi visto, foi realizada uma fundamentação teórica. Inicialmente, foi baseada em manipuladores robóticos de dois ou mais graus de liberdade. Os trabalhos foram revisados e foram realizados resumos críticos, que também auxiliaram na criação do projeto conceitual. Em um segundo momento, a fundamentação teórica dirigiu-se para sistemas de controle e o controle de motor DC no software LabView 2017. O estudo sobre o controle foi a referência para o funcionamento do manipulador mecânico flexível.

Foi elaborado o projeto conceitual para aumentar o número de graus de liberdade. O objetivo foi a realização dos movimentos radial e axial para o manipulador flexível. O novo projeto reutilizou alguns componentes mecânicos e eletrônicos do trabalho de Porto (2019) para a criação de um novo sistema interno. Para a realização do movimento axial um motor acoplado a uma engrenagem movimenta a cremalheira, semelhantemente ao sistema pinhão-cremalheira, presente em componentes mecânicos. Com a proposta elaborada, foram realizados os desenhos e as especificações técnicas para a realização da manufatura e a compra dos componentes mecânicos do sistema.

Para a elaboração do controle foi utilizada a técnica de controle PID. Inicialmente, foi desenvolvido o programa de controle de posição para os atuadores do sistema, através software Labview. Em seguida, foram determinados os parâmetros do controlador que eram necessários para obter um bom desempenho no sistema. Dessa forma, o código desenvolvido foi validado, apresentando um comportamento esperado para o tipo de controle.

Foi realizado o processo de manufatura dos componentes mecânicos. As peças passaram pelo processo de usinagem no Laboratório de Manufatura da UFRN. Após a manufatura de cada componente foi realizada a análise dimensional, e certificou que os componentes fabricados apresentavam as tolerâncias exigidas pelo projeto. Assim, pôde ser realizada a montagem do sistema, que se encontrou pronto para o incremento de tecnologia, como um controle baseado em redes neurais artificiais para uma abordagem mais adequada para novas situações..

## Referências

AGOSTINHO, Adriana Cavalcante. **Controle por modos deslizantes aplicado ao movimento de atitude de satélites submetidos aos torques perturbadores gerados pelo movimento de um líquido**. Tese de Doutorado. Brasil. 2019.

ASTROM, Karl Johan; HAGGLUND, Tore; ASTROM, Karl J. **Advanced PID control**. Research Triangle Park, NC: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

AZHDARI, A.; CHALHOUB, N. G.; GORDANINEJAD, F. **Dynamic modeling of a revolte-prismatic flexible robot arm fabricated from advanced composite materials**. *Nonlinear Dynamics*, v. 2, n. 3, p. 171-186, 1991.

AZEVEDO, George Oliveira de Araújo. **Controle de sistemas eletro-hidráulicos via linearização por realimentação com compensação inteligente de incertezas**. 2016. Dissertação de Mestrado. Brasil.

BESSA, Wallace Moreira. **Controle por Modos Deslizantes de Sistemas Dinâmicos com Zona Morta Aplicado ao Posicionamento de ROVs**. Rio de Janeiro, 2005.

BESSA, Wallace M. et al. **A Biologically Inspired Framework for the Intelligent Control of Mechatronic Systems and Its Application to a Micro Diving Agent**. *Mathematical Problems in Engineering*, [S.l.], v. 2018, p.1-16, 30 dez. 2018. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/9648126>

BIAN, Y.; GAO, Z. **Nonlinear vibration control for flexible manipulator using 1: 1 internal resonance absorber**. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, v. 37, n. 4, p. 1053-1066, 2018.

BOLTON, William. **Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering**. Pearson Education, 2003.

BRITO, Matheus Oliveira de. Simulação e controle do tipo software in the loop para motor CC: Aplicações em PID e MPC. Tese de Conclusão de curso. 2015.

CUNHA, Guilherme Bernardino da; MACEDO, Ricardo Tombesi; SILVEIRA, Sidnei Renato. **Informática básica**. 2017.

DISTEFANO, Joseph J.; STUBBERUD, Allen R.; WILLIAMS, Ivan J. **Feedback and Control Systems**. McGraw-Hill, 2013.

FILIPPO FILHO, GUILHERME. **Automação de processos de sistemas**. Saraiva Educação AS, 2014.

FRANKLIN, Gene. F; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. Sistemas de Controle para Engenharia. Bookman. 6ª Ed. 2013

GARCÍA-VALDOVINOS, L.G. et al. **Modelling, design and robust control of a Remotely Operated Underwater Vehicle**. International Journal of Advanced Robotic Systems, v. 11, n. 1, 2014.

HUANG, HE; DONG, ERBAO; XU, MIN; YANG, JIE; LOW, KIN HUAT. **Mechanism design and kinematic analysis of a robotic manipulator driven by joints with two degrees of freedom (DOF)**. Industrial Robot: An International Journal, 2018.

KEHTARNAVAZ, Nasser; KIM, Namjin. **Digital signal processing system-level design using LabVIEW**. Elsevier, 2011.

LIU, Z; LIU, J.; HE, W. **Dynamic modeling and vibration control for a nonlinear 3-dimensional flexible manipulator**. International Journal of Robust and Nonlinear Control, v. 28, n.13, p. 3927-3945, 2018.

LOPES, A.M. **Modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estrutura em série.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Automação, instrumentação e Controle, Universidade do Porto, 2002.

MENG, DESHAN; SHE, YU; XU, WENFU; LU, WEINING; LIANG, BIN. **Dynamic modeling and vibration characteristics analysis of flexible-link and flexible-joint space manipulator.** Multibody System Dynamics, v. 43, n. 4, p. 321-347, 2018.

NAGAYAMA, T.; ISHIHARA, H.; TOMORI, H.; NAKAMURA, T. **Verification of throwing operation by a manipulator with variable viscoelastic joints with straight-fiber-type artificial muscles and magnetorheological brakes.** Advanced Robotics, v. 30, n. 21, p. 1365-1379, 2016.

PEREIRA *et al.* (2010) FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de Controle para Engenharia.** 6. ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora Ltda, 2013. 702 p.

OGATA, Katsuhiko; SEVERO, Bernardo. **Engenharia de controle moderno.** Prentice Hall do Brasil, 1998.

OLIVEIRA, Tiago Roux de. **CONTROLE POR MODOS DESLIZANTES DE SISTEMAS INCERTOS COM DIREÇÃO DE CONTROLE DESCONHECIDA.** 2006. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

PORTO, D. R. **Projeto e construção de um manipulador flexível utilizando barra instrumentada com acelerômetro.** Relatório de Iniciação Científica. 3<sup>o</sup> Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN, 2019. Disponível em: <http://www.cic.propesq.ufrn.br/index.php>. Acesso em 15 de maio de 2019

TAN, Hean Gay Rodney; LOH, Yuen Peng; HUA TAN, Ying. **Using NI LabVIEW and DAQ for a DC Motor Controller.** National Instruments. Disponível em: <<https://www.ni.com/en-sg/innovations/case-studies/19/using-ni-labview-and-daq-for-a-dc-motor-controller.html>>. Acessado em: 02 de dezembro de 2020.

SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. Applied Nonlinear Control. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

SHARMA, Richa; GAUR, Prerna; MITTAL, A. P. **Performance analysis of two-degree of freedom fractional order PID controllers for robotic manipulator with payload**. ISA transactions, v. 58, p. 279-291, 2015.

SICILIANO, BRUNO; SCIAVICCO, LORENZO; VILLANI, LUIGI; ORIOLO, GIUSEPPE. **Robotics: modelling, planning and control**. Springer Science & Business Media, 2010.

SKF, Rolamento 51100: axial de esferas, escora simples; Página de especificação. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51100>> Acesso em: 5 de janeiro de 2020.

NATIONAL INSTRUMENTS. Explicando a Teoria PID. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>> Acesso em: 23 de junho de 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS. Hardware Integration with LabView. 2020. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/13/hardware-integration-with-ni-labview.html>> Acesso em: 12 de janeiro de 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS. Suporte de software no NI MyRio Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/support/documentation/supplemental/13/required-and-optional-software-to-program-ni-myrio.html>> Acesso em: 09 de julho 2021

NATIONAL INSTRUMENTS. MyRIO-1900. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/support/model.myrio-1900.html>> Acesso em: 09 de julho de 2021

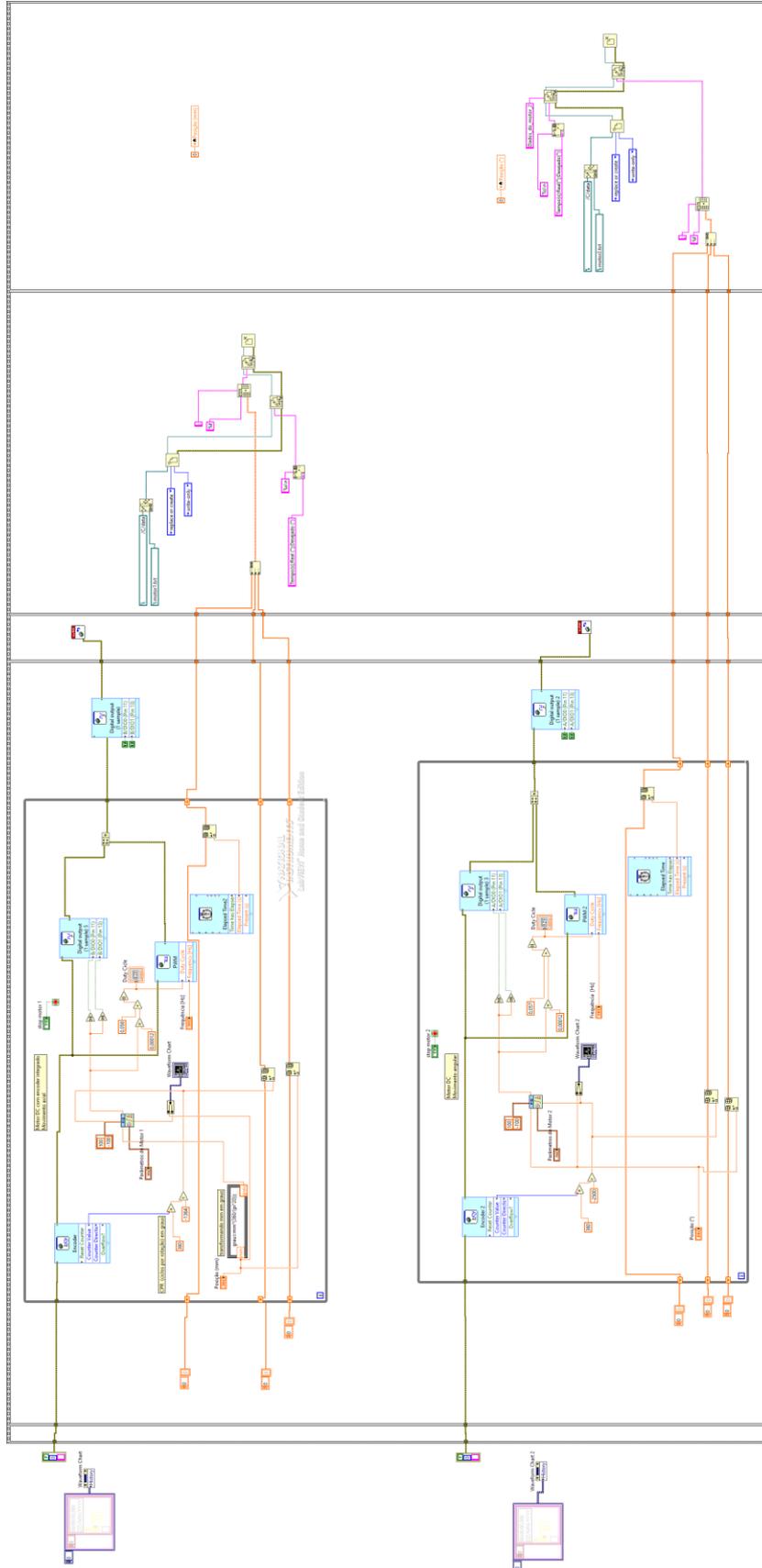
Doering, Ed. NI myRIO Project Essentials Guide. National Instruments. 2016. Disponível em: <  
[https://download.ni.com/evaluation/academic/myRIO\\_project\\_essentials\\_guide\\_\\_Feb\\_09\\_2016\\_\\_\\_  
\\_optimized.pdf](https://download.ni.com/evaluation/academic/myRIO_project_essentials_guide__Feb_09_2016___optimized.pdf) >

MIYAGI, Paulo Eigi. **Controle programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**. Editora Blucher, 1996.

DISTEFANO III, Joseph J.; STUBBERUD, Allen R.; WILLIAMS, Ivan J. **Sistemas de controle**. Bookman Editora.2014

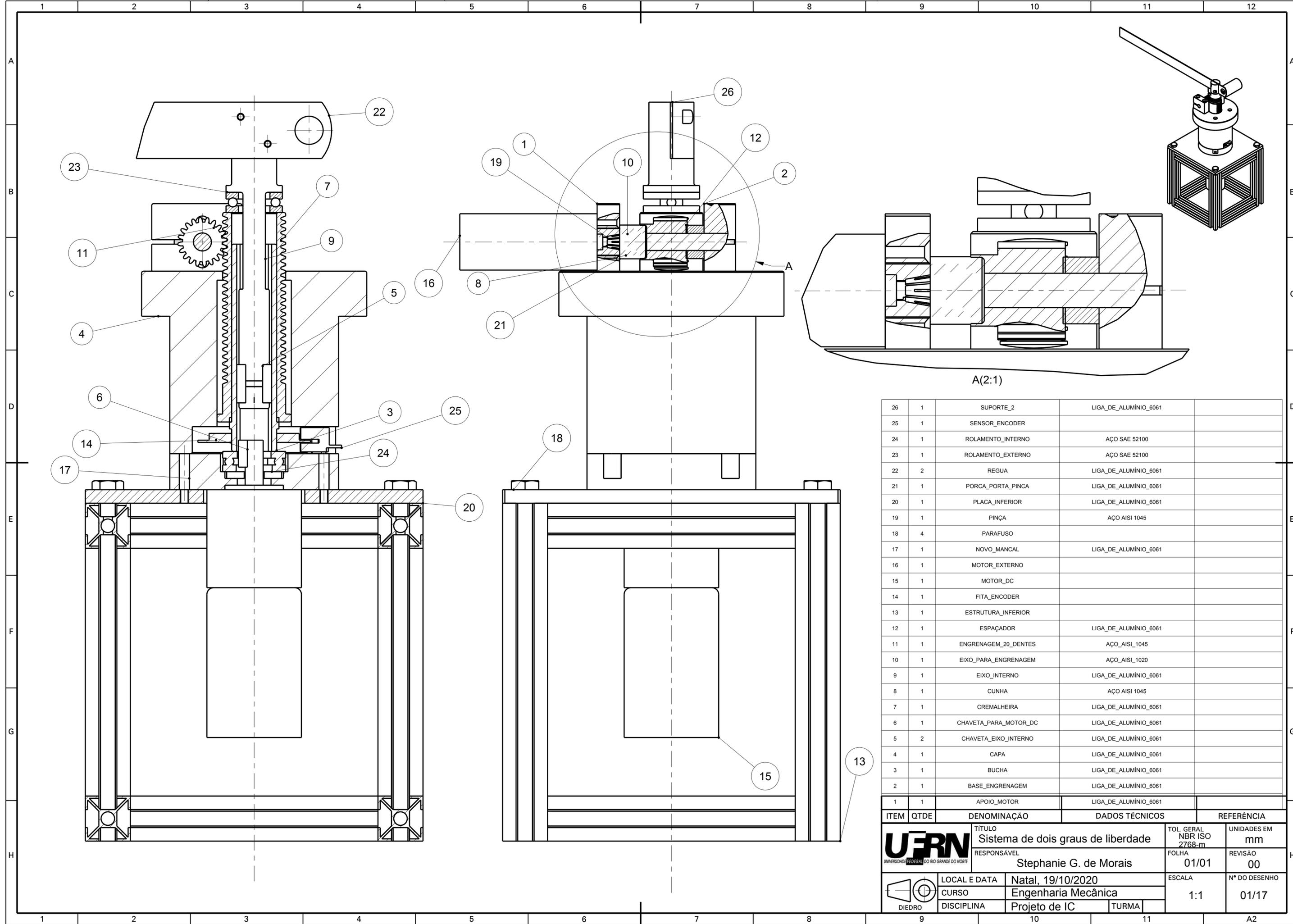
# APÊNDICE I

## CÓDIGO DO CONTROLE



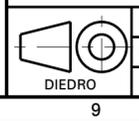
# APÊNDICE II

## PROJETO MECÂNICO



26	1	SUPORTE_2	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
25	1	SENSOR_ENCODER		
24	1	ROLAMENTO_INTERNO	AÇO SAE 52100	
23	1	ROLAMENTO_EXTERNO	AÇO SAE 52100	
22	2	REGUA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
21	1	PORCA_PORTA_PINÇA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
20	1	PLACA_INFERIOR	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
19	1	PINÇA	AÇO AISI 1045	
18	4	PARAFUSO		
17	1	NOVO_MANCAL	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
16	1	MOTOR_EXTERNO		
15	1	MOTOR_DC		
14	1	FITA_ENCODER		
13	1	ESTRUTURA_INFERIOR		
12	1	ESPAÇADOR	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
11	1	ENGRENAGEM_20_DENTES	AÇO AISI_1045	
10	1	EIXO_PARA_ENGRENAGEM	AÇO AISI_1020	
9	1	EIXO_INTERNO	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
8	1	CUNHA	AÇO AISI 1045	
7	1	CREMALHEIRA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
6	1	CHAVETA_PARA_MOTOR_DC	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
5	2	CHAVETA_EIXO_INTERNO	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
4	1	CAPA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
3	1	BUCHA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
2	1	BASE_ENGRENAGEM	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
1	1	APOIO_MOTOR	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	

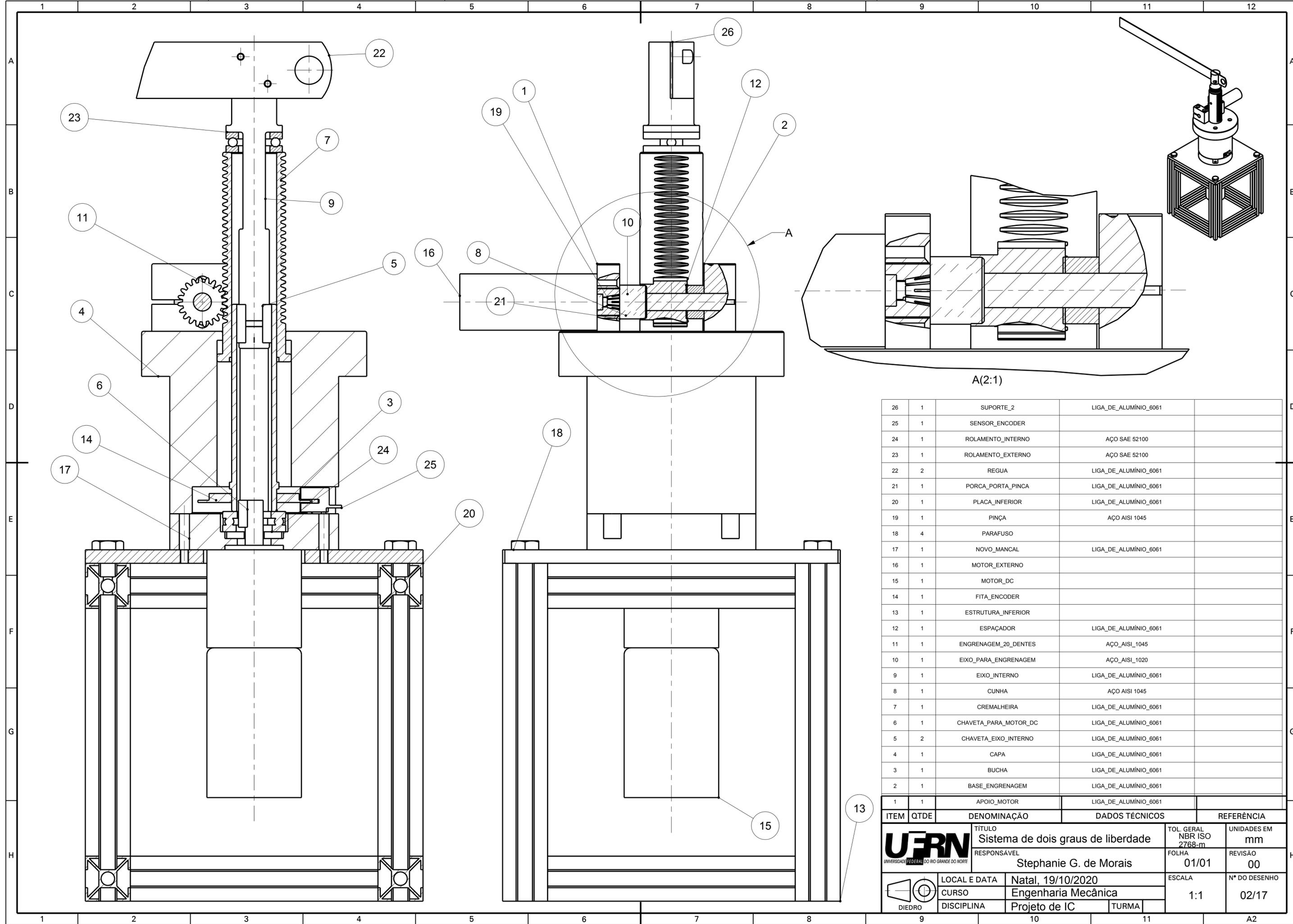
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO		UNIDADES EM
		Sistema de dois graus de liberdade		mm
		RESPONSÁVEL		REVISÃO
		Stephanie G. de Moraes		00
		LOCAL E DATA		ESCALA
		Natal, 19/10/2020		1:1
		CURSO		Nº DO DESENHO
		Engenharia Mecânica		01/17
		DISCIPLINA		
		Projeto de IC		
		TURMA		



A  
B  
C  
D  
E  
F  
G  
H

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12

A2



A(2:1)

26	1	SUPORTE_2	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
25	1	SENSOR_ENCODER		
24	1	ROLAMENTO_INTERNO	AÇO SAE 52100	
23	1	ROLAMENTO_EXTERNO	AÇO SAE 52100	
22	2	REGUA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
21	1	PORCA_PORTA_PINÇA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
20	1	PLACA_INFERIOR	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
19	1	PINÇA	AÇO AISI 1045	
18	4	PARAFUSO		
17	1	NOVO_MANCAL	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
16	1	MOTOR_EXTERNO		
15	1	MOTOR_DC		
14	1	FITA_ENCODER		
13	1	ESTRUTURA_INFERIOR		
12	1	ESPAÇADOR	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
11	1	ENGRENAGEM_20_DENTES	AÇO AISI_1045	
10	1	EIXO_PARA_ENGRENAGEM	AÇO AISI_1020	
9	1	EIXO_INTERNO	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
8	1	CUNHA	AÇO AISI 1045	
7	1	CREMALHEIRA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
6	1	CHAVETA_PARA_MOTOR_DC	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
5	2	CHAVETA_EIXO_INTERNO	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
4	1	CAPA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
3	1	BUCHA	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
2	1	BASE_ENGRENAGEM	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	

ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
1	1	APOIO_MOTOR	LIGA_DE_ALUMINIO_6061	
		TÍTULO		UNIDADES EM
		Sistema de dois graus de liberdade		mm
		RESPONSÁVEL		REVISÃO
		Stephanie G. de Moraes		00
		LOCAL E DATA		ESCALA
		Natal, 19/10/2020		1:1
		CURSO		Nº DO DESENHO
		Engenharia Mecânica		02/17
		DISCIPLINA		
		Projeto de IC		
		TURMA		



A  
B  
C  
D  
E  
F  
G  
H

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12

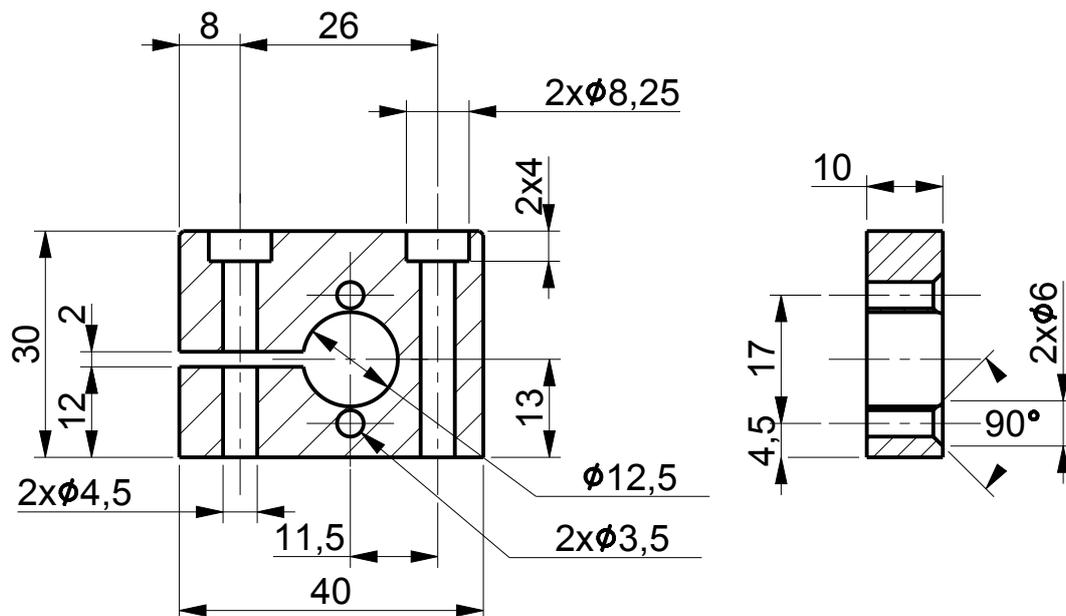
A2

1

2

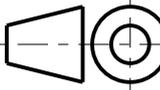
3

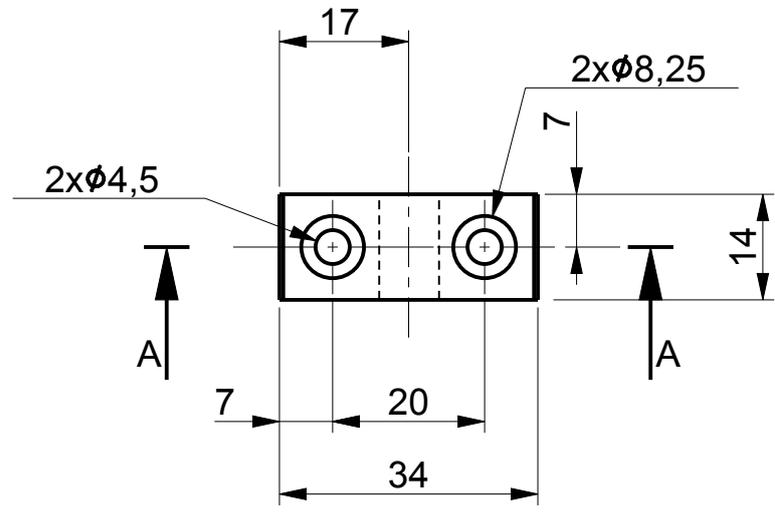
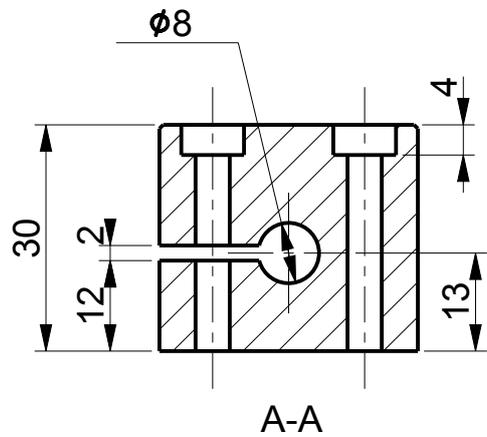
4



Nota:

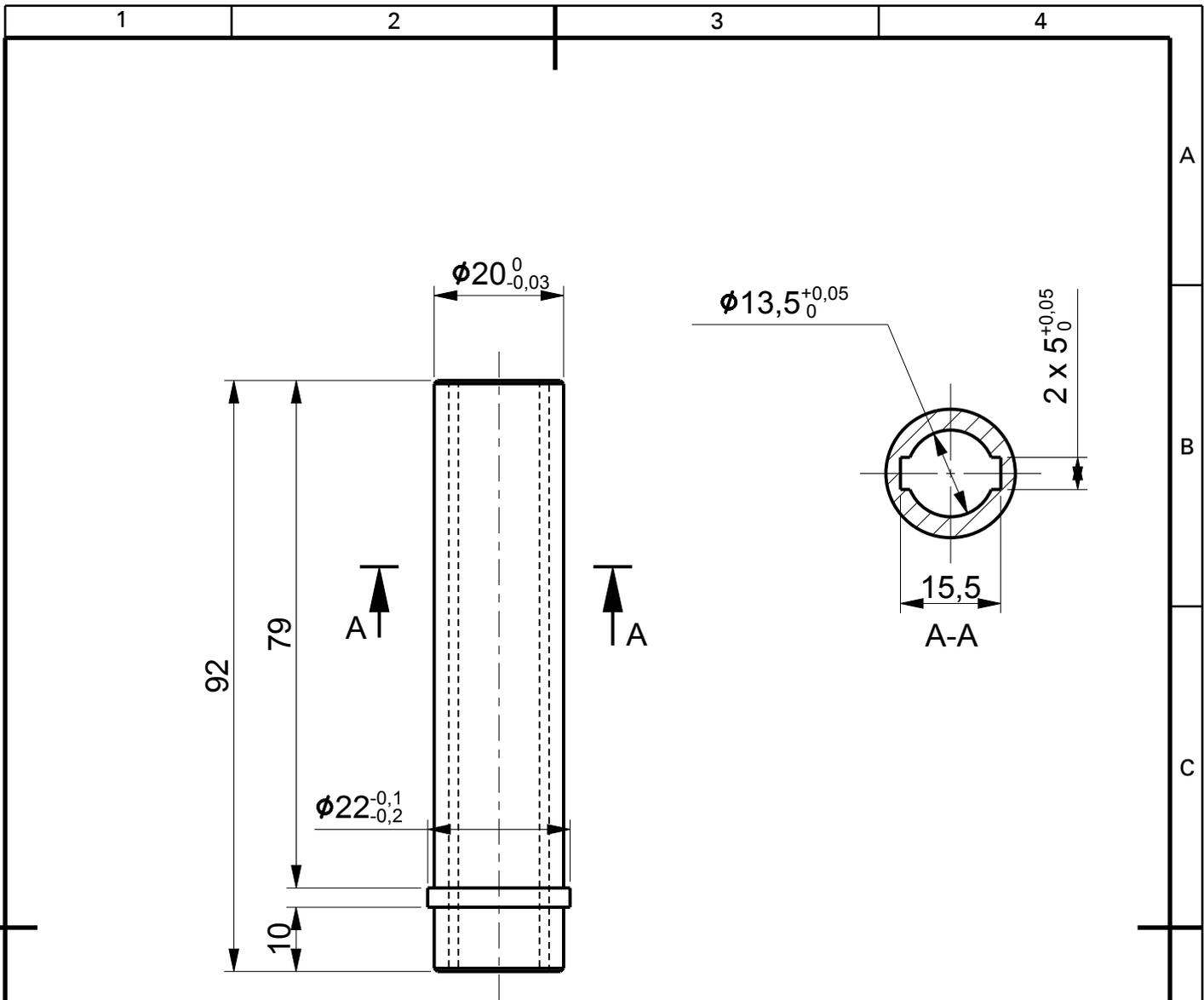
1 - Chanfros não cotados: 0,5x45°

01	01	Apoio motor	Liga de alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO		TOL. GERAL
		Sistema de dois graus de liberdade		NBR ISO 2768-m
		RESPONSÁVEL		FOLHA
		Stephanie G. de Moraes		01/01
LOCAL E DATA		Natal, 26/10/2020		ESCALA
CURSO		Engenharia Mecânica		1:1
DISCIPLINA		Projeto de IC	TURMA	
				Nº DO DESENHO
				3/17

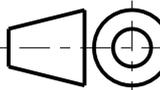


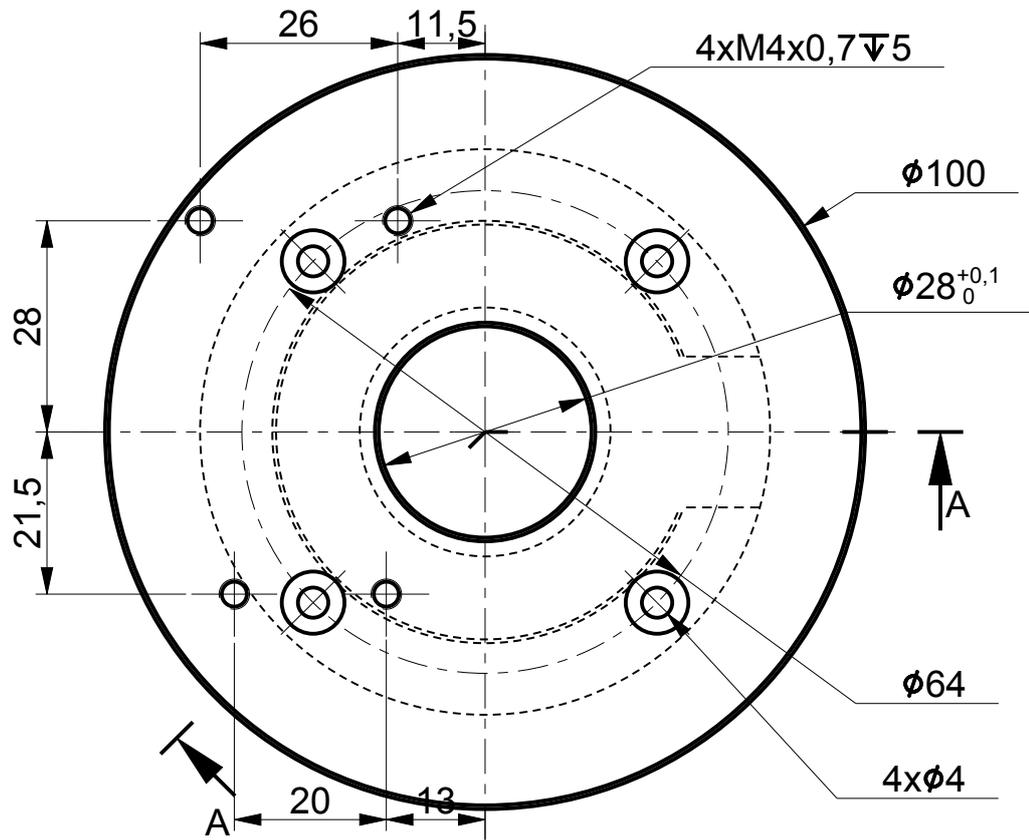
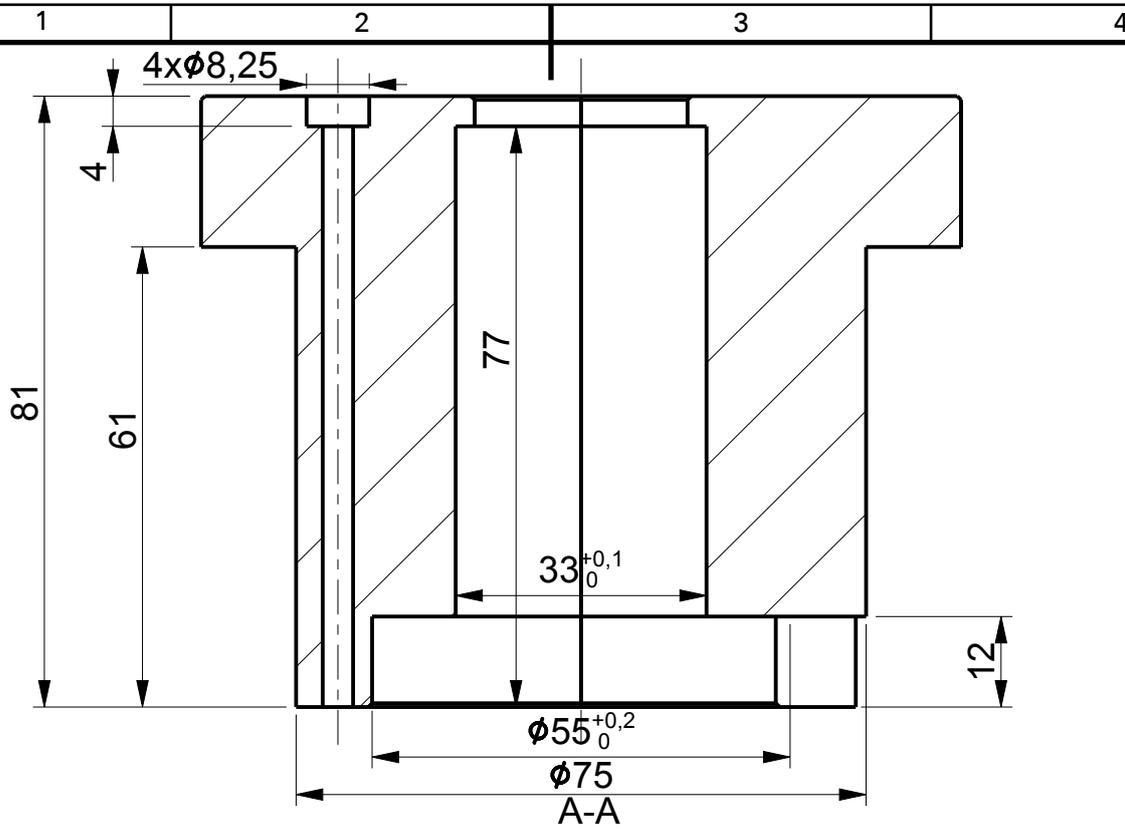
Nota:  
1 - Chanfros não cotados: 0,5x45°

02	01	Base engrenagem	Liga de alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO	Sistema de dois graus de liberdade	TOL. GERAL NBR ISO 2768-m
		UNIDADES EM	mm	
		RESPONSÁVEL	Stephanie G. de Moraes	FOLHA
		REVISÃO	00	01/01
LOCAL E DATA		Natal, 02/07/2021		ESCALA
CURSO		Engenharia Mecânica		1:1
DISCIPLINA		Projeto de IC	TURMA	
				04/17

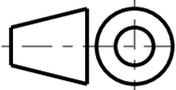


Nota:  
1 - Chanfros não cotados: 0,5x45°

03	01	Bucha	Liga de alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
	TÍTULO		TOL. GERAL	UNIDADES EM
	Sistema de dois graus de liberdade		NBR ISO 2768-m	mm
RESPONSÁVEL		FOLHA	REVISÃO	
Stephanie G. de Moraes		01/01	00	
	LOCAL E DATA	Natal, 05/10/2020		ESCALA
	CURSO	Engenharia Mecânica		N° DO DESENHO
	DISCIPLINA	Projeto de IC	TURMA	



Nota:  
1 - Chanfros não cotados:  $0,5 \times 45^\circ$

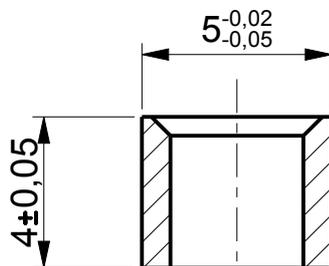
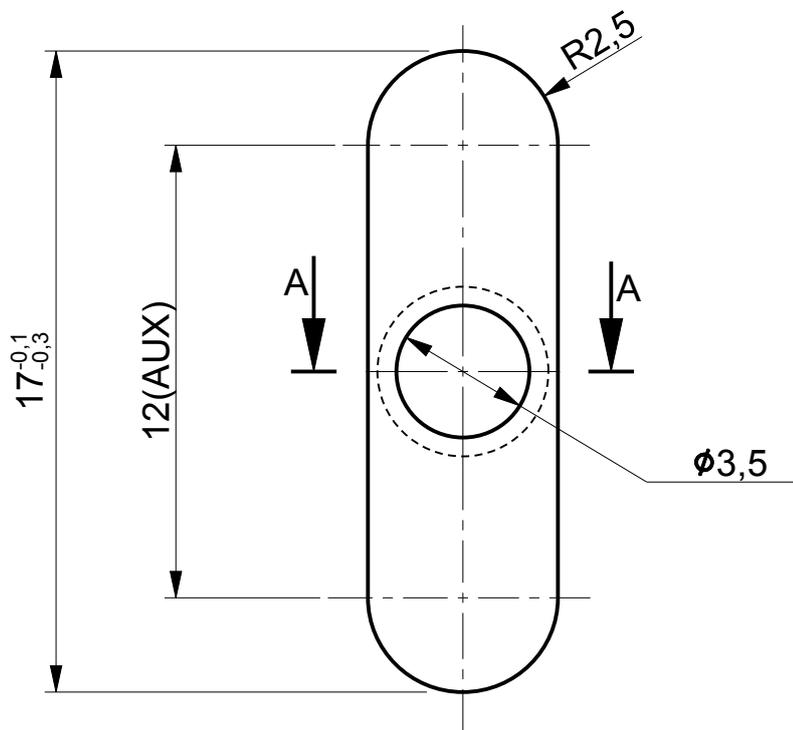
04	01	Capa	Liga de alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO	TOL. GERAL	UNIDADES EM
		Sistema de dois graus de liberdade	NBR ISO 2768-m	mm
		RESPONSÁVEL	FOLHA	REVISÃO
		Stephanie G. de Moraes	01/01	00
LOCAL E DATA		Natal, 12/06/2020	ESCALA	Nº DO DESENHO
CURSO		Engenharia Mecânica	1:1	06/17
DISCIPLINA		Projeto de IC	TURMA	

1

2

3

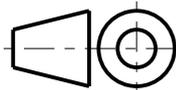
4

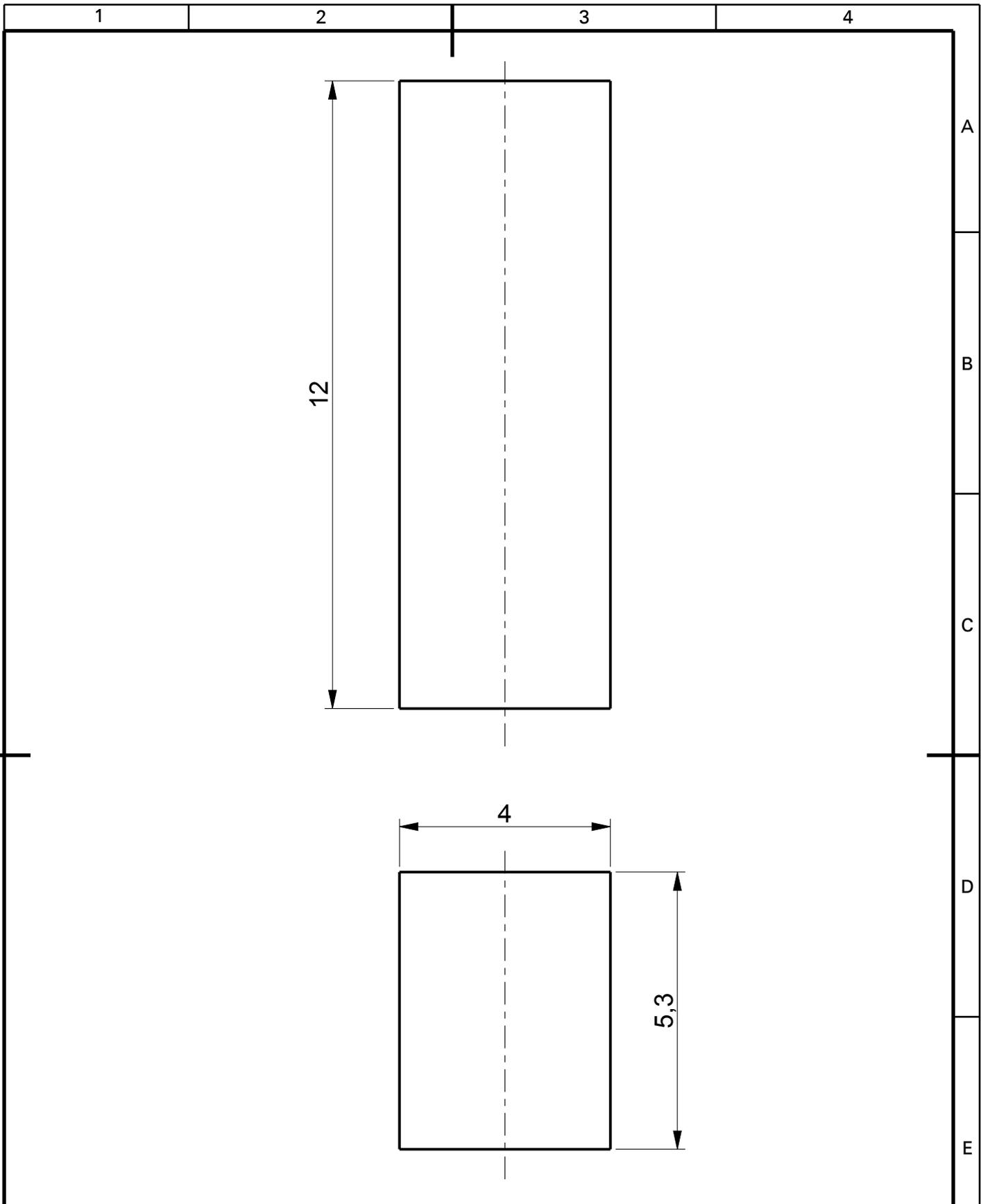


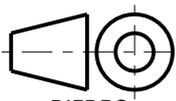
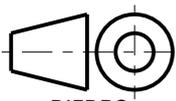
A-A

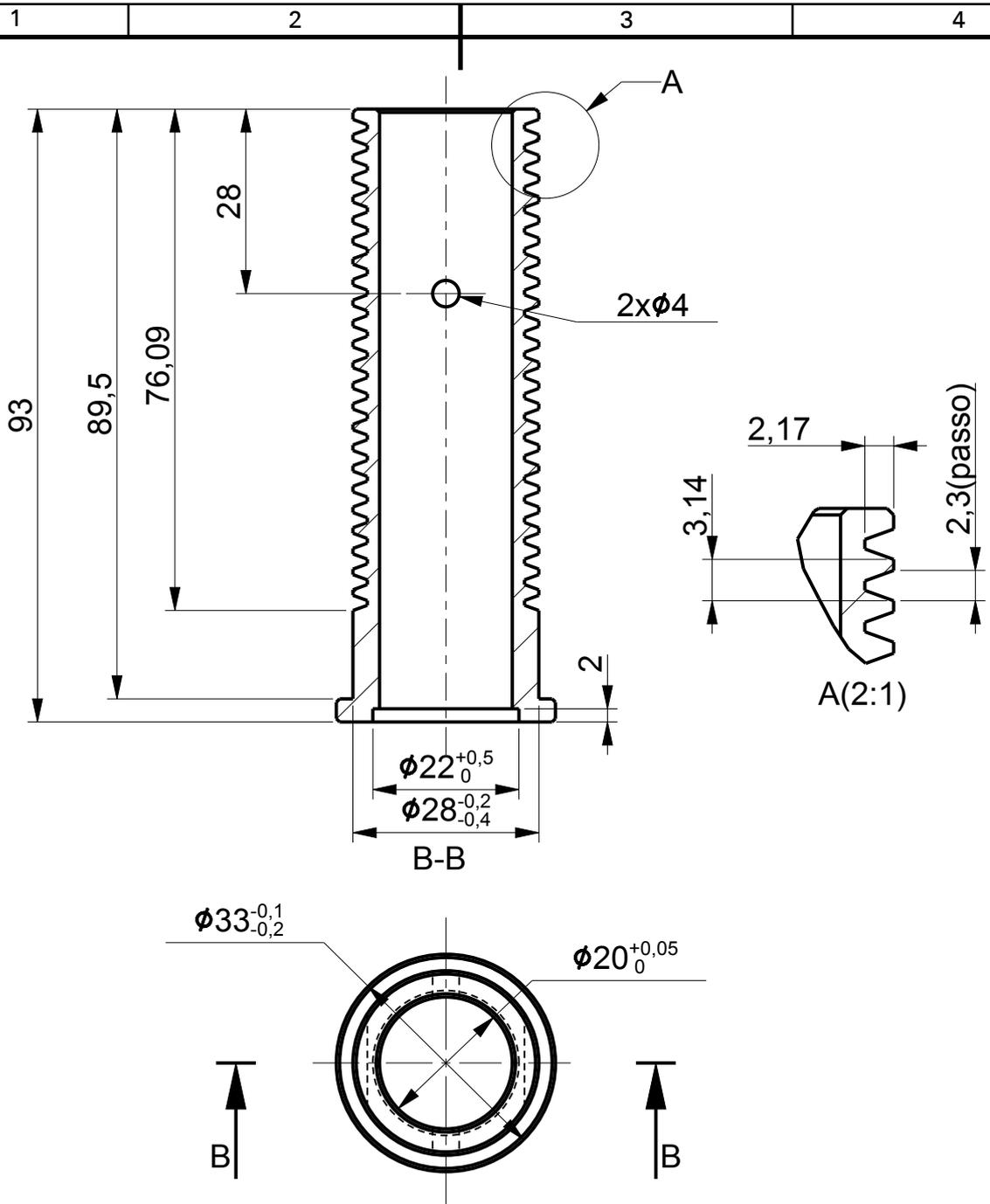
Nota:

- 1 - Eliminar os cantos vivos com chanfro de  $0,5 \times 45^\circ$
- 2 - Chanfro não cotado:  $0,5 \times 45^\circ$

ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA	
05	02	Chaveta eixo interno	Liga de alumínio 6061	-	
		<b>TÍTULO</b> Sistema de dois graus de liberdade		<b>TOL. GERAL</b> NBR ISO 2768-m	<b>UNIDADES EM</b> mm
		<b>RESPONSÁVEL</b> Stephanie G. de Moraes		<b>FOLHA</b> 01/01	<b>REVISÃO</b> 00
		<b>LOCAL E DATA</b> Natal, 09/10/2020	<b>ESCALA</b> 5:1		<b>N° DO DESENHO</b> 07/17
		<b>CURSO</b> Engenharia Mecânica			
		<b>DISCIPLINA</b> Projeto de IC	<b>TURMA</b>		



06	01	Chaveta para motor DC	Liga de alumínio 6061	-	
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA	
		TÍTULO	Sistema de dois graus de liberdade	TOL. GERAL NBR ISO 2768-m	
		UNIDADES EM	mm	FOLHA	01/01
		RESPONSÁVEL	Stephanie G. de Moraes	REVISÃO	00
		LOCAL E DATA	Natal, 10/10/2020	ESCALA	10:1
		CURSO	Engenharia Mecânica	N° DO DESENHO	08/17
		DISCIPLINA	Projeto de IC	TURMA	

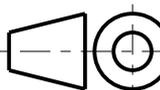


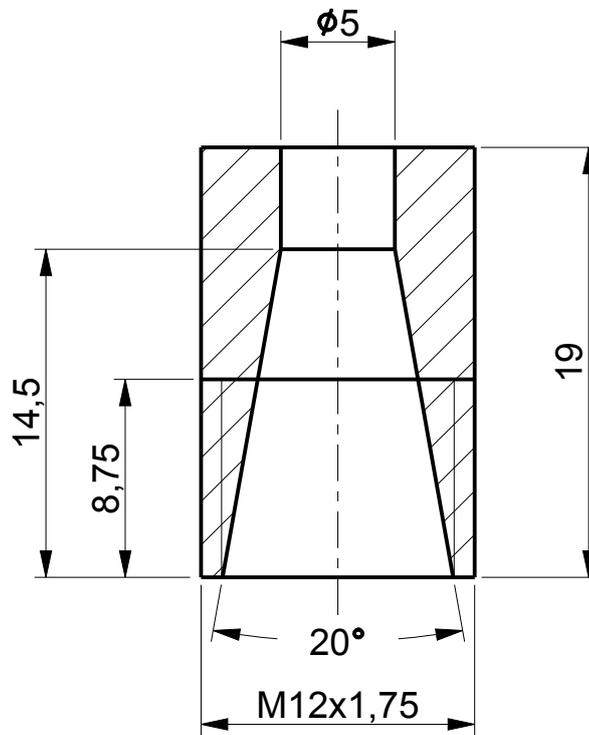
**INFORMAÇÕES DOS DENTES:**

- 1 - Módulo = 1
- 2 - Número de dentes = 17
- 3 - Ângulo de pressão = 20°

**Nota:**

- 1 - Chanfros não cotados: 0,5x45°

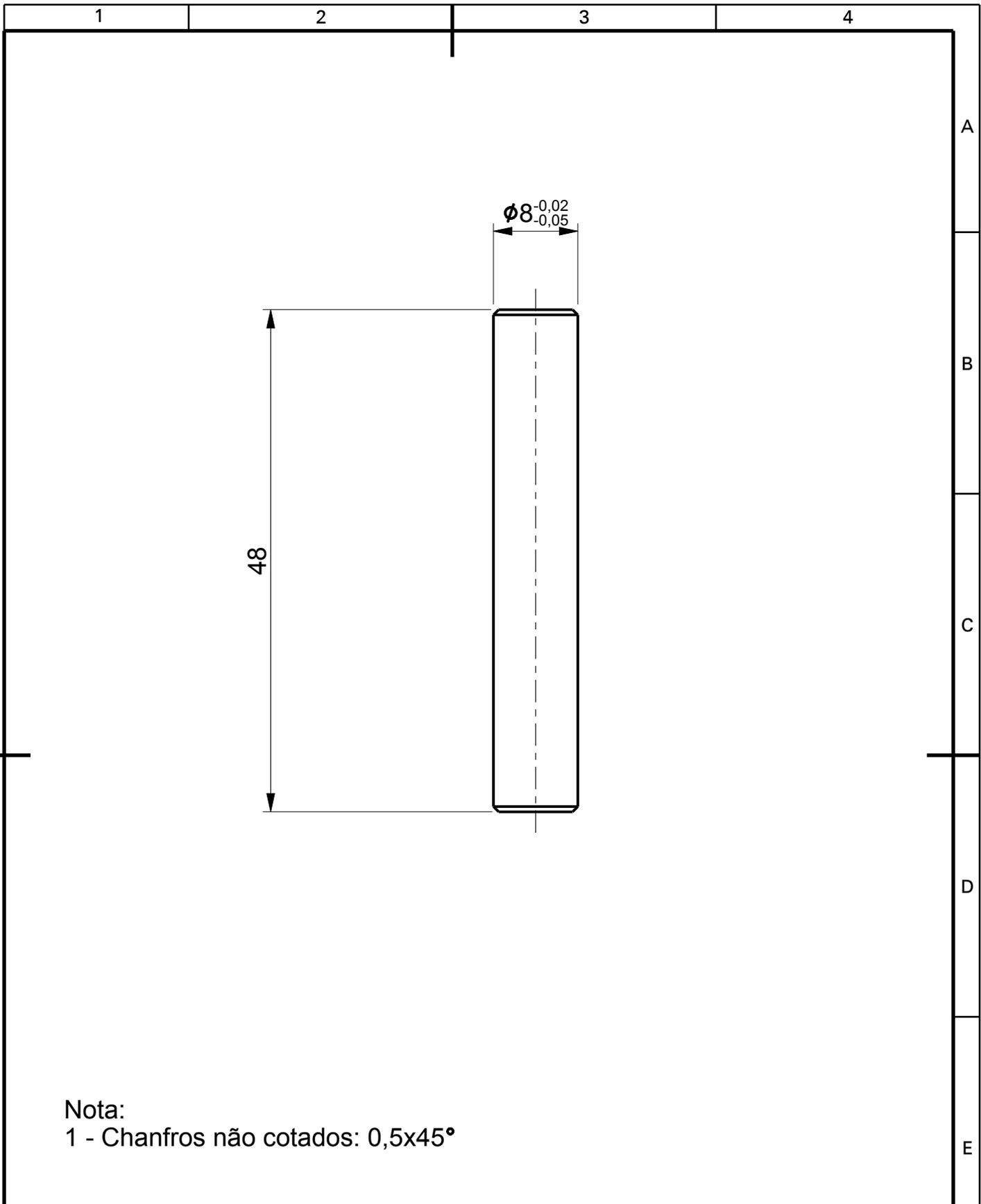
07	01	Cremalheira	Liga de alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO	TOL. GERAL	UNIDADES EM
		Sistema de dois graus de liberdade	NBR ISO 2768-m	mm
		RESPONSÁVEL	FOLHA	REVISÃO
		Stephanie G. de Moraes	01/01	00
LOCAL E DATA		Natal, 06/10/2020	ESCALA	N° DO DESENHO
CURSO		Engenharia Mecânica	1:1	9/17
DISCIPLINA		Projeto de IC		



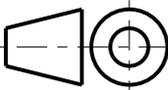
Nota:  
1 - Chanfros não cotados: 0,5x45°

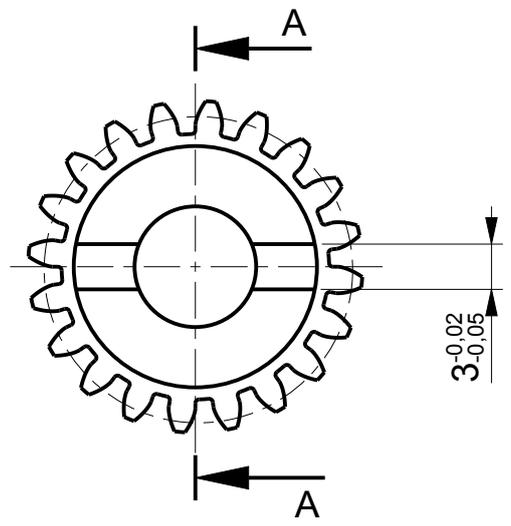
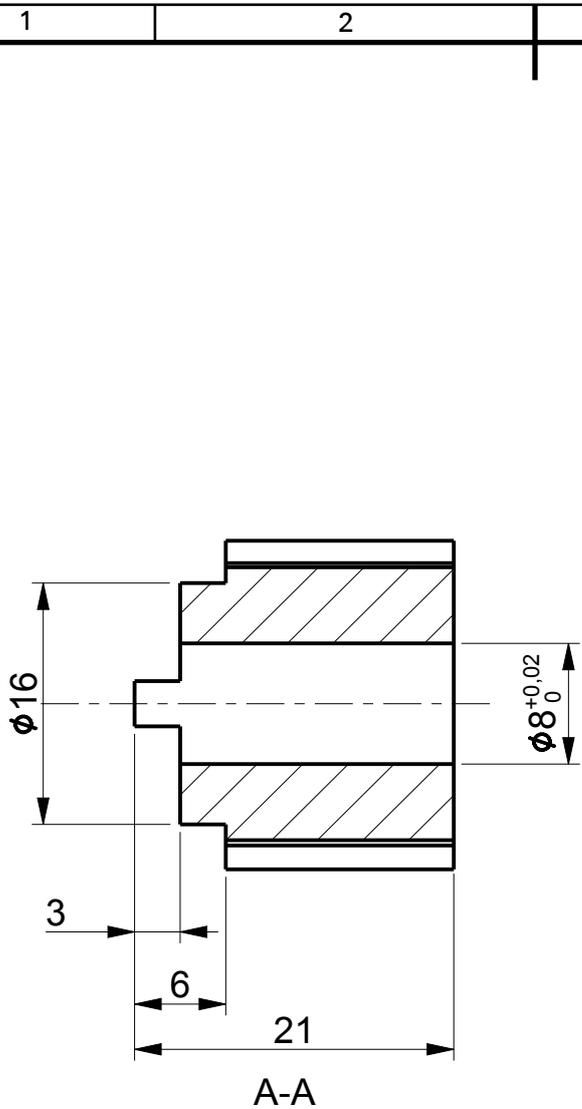
08	01	Cunha	Aço ISO 1045	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO	TOL. GERAL	UNIDADES EM
		Sistema de dois graus de liberdade		NBR ISO 2768-m
		RESPONSÁVEL	FOLHA	REVISÃO
		Stephanie G. de Moraes		01/01
LOCAL E DATA		Natal, 13/09/2021		ESCALA
CURSO		Engenharia Mecânica		N° DO DESENHO
DISCIPLINA		Projeto de IC	TURMA	
				1:1
				10/17

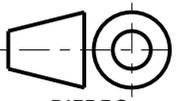


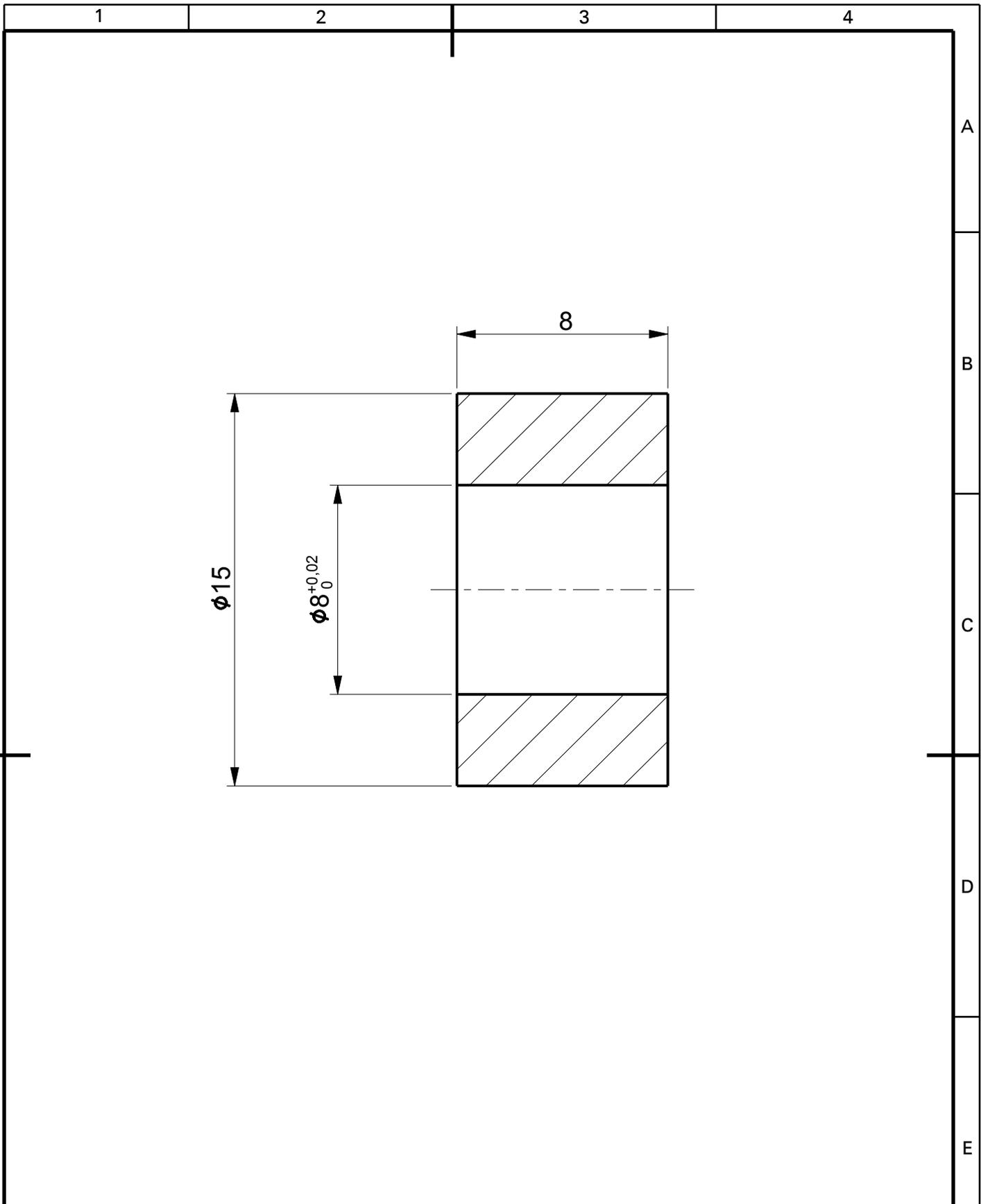


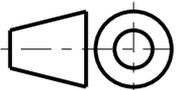
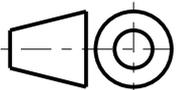
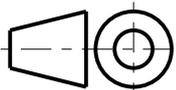
Nota:  
1 - Chanfros não cotados:  $0,5 \times 45^\circ$

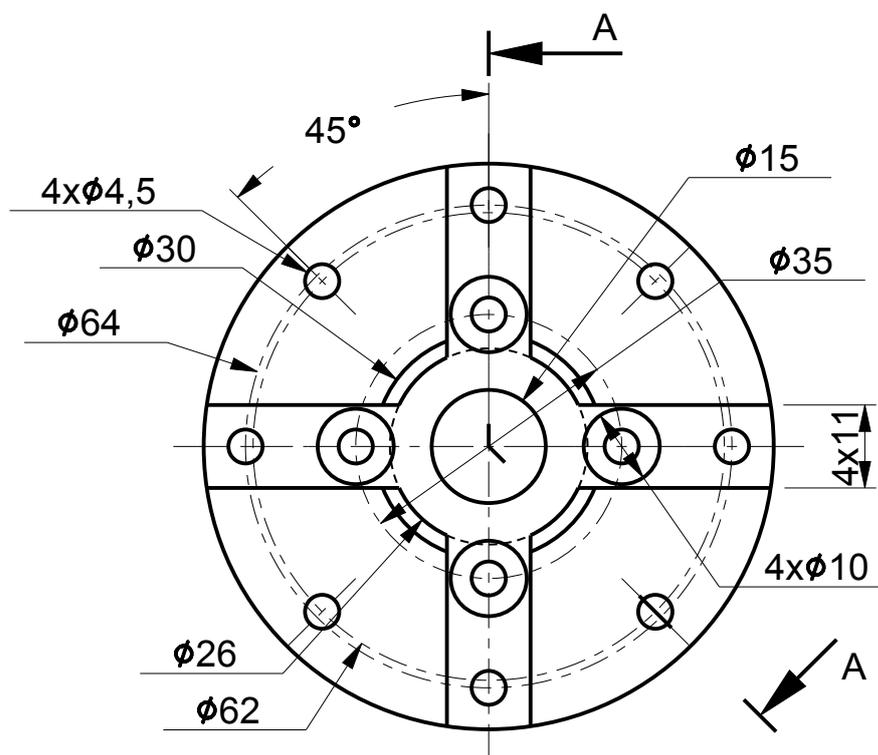
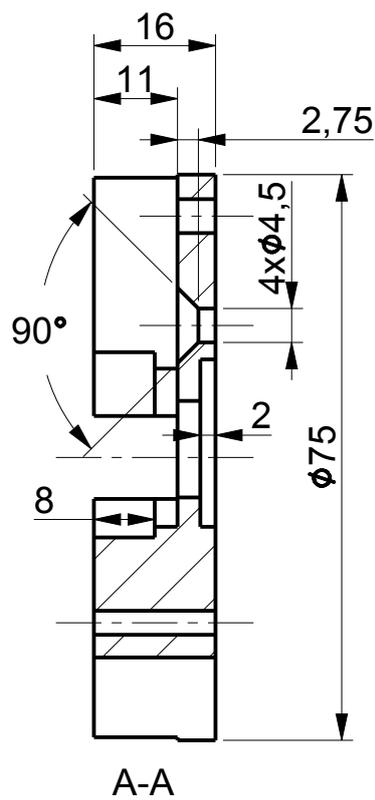
10	01	Eixo para engrenagem	Aço AISI 1020	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO	Sistema de dois graus de liberdade	TOL. GERAL NBR ISO 2768-m
		UNIDADES EM	mm	
		RESPONSÁVEL	Stephanie G. de Moraes	FOLHA
		REVISÃO	00	01/01
LOCAL E DATA		Natal, 02/07/2021		ESCALA
CURSO		Engenharia Mecânica		2:1
DISCIPLINA		Projeto de IC	TURMA	
				12/17



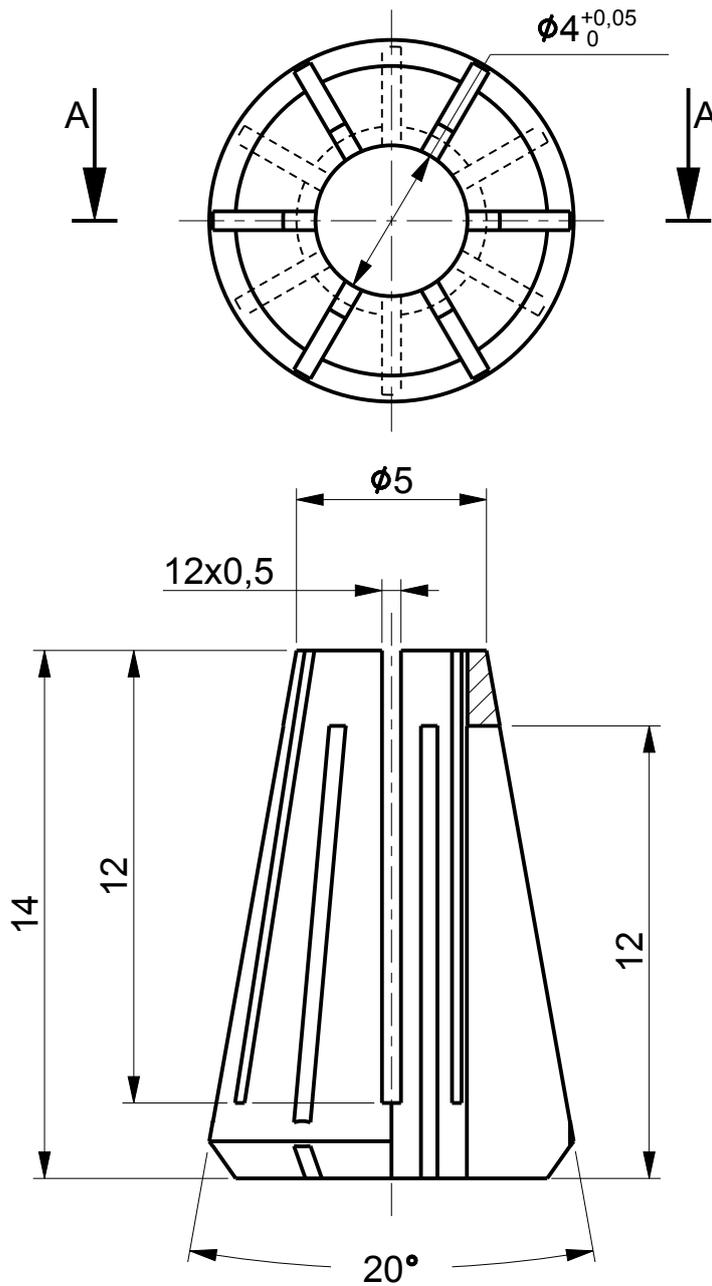
11	01	Engrenagem 20 dentes	Aço AISI 1020	-	
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA	
		TÍTULO	Sistema de dois graus de liberdade	TOL. GERAL NBR ISO 2768-m	
		UNIDADES EM	mm	FOLHA	01/01
		RESPONSÁVEL	Stephanie G. de Moraes	REVISÃO	00
		LOCAL E DATA	Natal, 02/07/2021	ESCALA	2:1
		CURSO	Engenharia Mecânica	N° DO DESENHO	13/17
		DISCIPLINA	Projeto de IC	TURMA	



12	01	Espaçador	Liga de Alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO	Sistema de dois graus de liberdade	TOL. GERAL NBR ISO 2768-m
		UNIDADES EM	mm	
		RESPONSÁVEL	Stephanie G. de Moraes	FOLHA
		REVISÃO	00	01/01
		LOCAL E DATA	Natal, 08/08/2021	ESCALA
		CURSO	Engenharia Mecânica	5:1
		DISCIPLINA	Projeto de IC	TURMA
		N° DO DESENHO	14/17	



17	01	Novo mancal	Liga de alumínio 6061	-	
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA	
		TÍTULO	Sistema de dois graus de liberdade	TOL. GERAL NBR ISO 2768-m	
		UNIDADES EM	mm	FOLHA	01/01
		RESPONSÁVEL	Stephanie G. de Moraes	REVISÃO	00
		LOCAL E DATA	Natal, 05/06/2021	ESCALA	Nº DO DESENHO
		CURSO	Engenharia Mecânica	1:1	15/17
		DISCIPLINA	Projeto de IC	TURMA	



Nota:  
1 - Chanfro não cotado: 1x45°

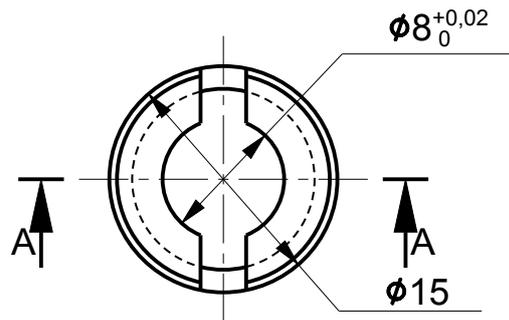
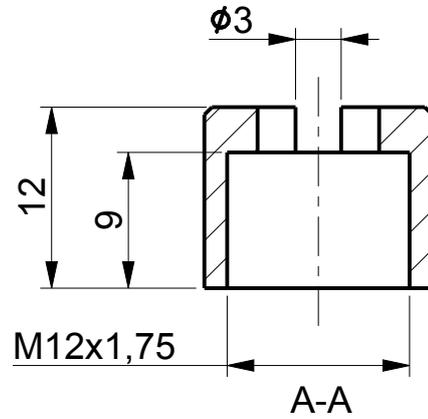
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
19	01	Pinça	Aço AISI 1045	-
		<b>TÍTULO</b> Sistema de dois graus de liberdade		<b>TOL. GERAL</b> NBR ISO 2768-m
<b>UNIDADES EM</b> mm		<b>RESPONSÁVEL</b> Stephanie Gomes de Moraes		<b>FOLHA</b> 01/01
<b>REVISÃO</b> 00		<b>LOCAL E DATA</b> Natal, 13/09/2021		<b>ESCALA</b> 5:1
<b>CURSO</b> Engenharia Mecânica		<b>N° DO DESENHO</b> 16/17		<b>F</b>
<b>DISCIPLINA</b> Projeto de IC		<b>TURMA</b>		

1

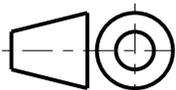
2

3

4



Nota:  
1 - Chanfro não cotado: 0,5x45°

21	01	Porca porta pinça	Liga de alumínio 6061	-
ITEM	QTDE	DENOMINAÇÃO	DADOS TÉCNICOS	REFERÊNCIA
		TÍTULO		TOL. GERAL
		Sistema de dois graus de liberdade		NBR ISO 2768-m
		RESPONSÁVEL		FOLHA
		Stephanie G. de Moraes		01/01
		LOCAL E DATA	Natal, 13/09/2021	
		CURSO	Engenharia Mecânica	
		DISCIPLINA	Projeto de IC	TURMA
		ESCALA	2:1	
			N° DO DESENHO	
			17/17	