



Gabriela Selent

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA
REABILITAÇÃO FÍSICA DE MEMBROS INFERIORES**

Horizontina - RS

2020

Gabriela Selent

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA
REABILITAÇÃO FÍSICA DE MEMBROS INFERIORES**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia de Controle e Automação na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Me. Paulo Marcos Flores.

Horizontina - RS

2020

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

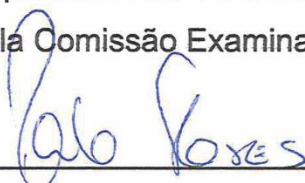
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de
curso

“Desenvolvimento e Implementação de um Braço Robótico para
Reabilitação Física de Membros Inferiores”

Elaborada por:
Gabriela Selent

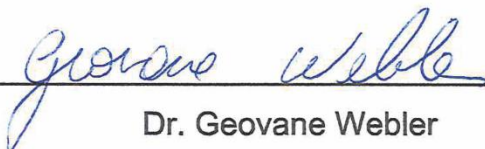
Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação

Aprovado em: 14/12/2020
Pela Comissão Examinadora



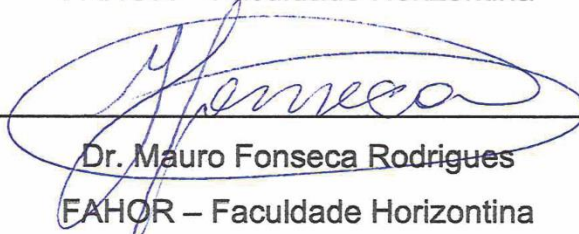
Me. Paulo Flores

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador



Dr. Geovane Webler

FAHOR – Faculdade Horizontina



Dr. Mauro Fonseca Rodrigues

FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina – RS

2020

À minha família, que não mediu esforços para que eu alcançasse os meus objetivos, especialmente ao meu pai, Adilson Selent, que sempre se manteve ao meu lado, auxiliando e dando certeza e força para prosseguir, e minha mãe, Roselei Selent pelas palavras de conforto e seu bom humor inabalável.

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha família e amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

“Cem vezes todos os dias lembro a mim mesmo que minha vida interior e exterior, depende dos trabalhos de outros homens, vivos ou mortos, e que devo esforçar-me a fim de devolver na mesma medida que recebi”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Com a evolução da tecnologia, uma área que vem buscando melhorias é a área da saúde. Esse projeto trata das dificuldades de pacientes que sofrem com a falta ou a redução dos movimentos em seus membros inferiores, e que por este motivo necessitam de atividades de fisioterapia, necessitando um profissional da área para a realização destas atividades, que acaba sofrendo as adversidades dos esforços musculares para a realização de movimentos em seu paciente. O objetivo desse projeto tenciona a implementação de um braço robótico, acionado por motor elétrico, em uma cadeira de reabilitação física, bem como os cálculos para a realização do dimensionamento do torque necessário para movimentar a estrutura. Com um estudo mais aprofundado nesse assunto, o resultado obtido foi uma estrutura para reabilitação física funcional, com uma modelagem matemática e em CAD 3D eficazes, bem como o acionamento elétrico e programação.

Palavras-chave: Tecnologia Assistiva, Robótica, Engenharia Mecânica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de juntas	19
Figura 2 – Funcionamento de um motor DC	23
Figura 3 – Pinagem microcontrolador PIC	25
Figura 4 – Plataforma open-source ARDUINO.....	25
Figura 5 – Tensor de inércia de um corpo retangular.....	31
Figura 6 – Metodologia de processo	33
Figura 7 – Determinação dos elos e juntas do braço robótico.....	35
Figura 8 – Informações técnicas do motor	40
Figura 9 – Engrenagem de redução.....	41
Figura 10 – Montagem da estrutura	42
Figura 11 – Estrutura de fixação principal	42
Figura 12 – Suporte para a perna	43
Figura 13 – Estrutura de fixação do suporte para a perna asm001 e montagem_lateral1.....	43
Figura 14 – Estrutura para fixação do motor	44
Figura 15 – Estrutura de movimentação montada.....	44
Figura 16 – Montagem estruturas laterais.....	48
Figura 17 – Montagem final da estrutura.....	49
Figura 18 – Esquema elétrico.....	51
Figura 19 – Teste 1	51
Figura 20 – Teste 2	52
Figura 21 – Validação do torque máximo	52
Figura 22 – Peso utilizado	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Projetos semelhantes	16
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos tipos de acionamentos.....	22
Tabela 3 – Parâmetros D-H para robôs com 3 GDL	28
Tabela 4 – Recursos utilizados	34
Tabela 5 – Parâmetros de D-H para o elo 1.....	36
Tabela 6 – Itens manufaturados.....	45
Tabela 7 – Itens aproveitados	45
Tabela 8 – Elementos de fixação utilizados	46
Tabela 9 – Ferramentas e equipamentos utilizados na montagem	47
Tabela 10 – Itens para acionamento elétrico	50
Tabela 11 – Peças e conjuntos	58

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

CAD – *Computer-Aided Design* – Desenho assistido por computador

D-H – *Denavit-Hartenberg*

GDL – Graus de Liberdade

IA – Inteligência Artificial

IEA - *International Ergonomics Association* - Associação Internacional de Ergonomia

PIC - *Peripheral Interface Controller* - Controlador de Interface Periférica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	TEMA.....	13
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
1.4	HIPÓTESES.....	13
1.5	JUSTIFICATIVA.....	14
1.6	OBJETIVOS.....	15
1.6.1	Objetivo Geral.....	15
1.6.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	PROJETOS SEMELHANTES.....	16
2.2	ROBÓTICA.....	17
2.2.1	História da robótica.....	17
2.2.2	Estrutura de robôs.....	18
2.2.3	Tipos de robôs.....	19
2.2.4	Robótica para reabilitação física.....	20
2.3	TIPOS DE ATUADOR PARA UM ROBÔ.....	20
2.3.1	Sistemas de acionamento.....	20
2.3.2	Vantagens e desvantagens.....	21
2.3.3	Sistema de acionamento elétrico.....	22
2.3.4	Microcontrolador PIC (<i>Peripheral Interface Controller</i>).....	24
2.3.5	Plataforma Arduino.....	25
2.4	FISIOTERAPIA.....	26
2.5	ERGONOMIA.....	26
2.6	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	27
2.6.1	Cinemática Direta.....	27
2.6.2	Parâmetros de <i>Denavit-Hartenberg</i>	27
2.6.3	Matriz Jacobiana.....	28
2.6.4	Modelo Dinâmico.....	29
2.6.5	Tensor de Inércia.....	31
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	33
3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	34
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	35
4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	35
4.1.1	Cálculo da posição.....	35
4.1.2	Cálculo da velocidade angular e linear.....	36
4.1.3	Cálculo do torque.....	37
4.1.4	Cálculo da engrenagem de redução.....	40
4.2	MODELAGEM DO PROTÓTIPO.....	41
4.2.1	Modelagem em software do protótipo.....	41
4.3	AQUISIÇÃO DOS MATERIAIS E MONTAGEM.....	44
4.2.1	Materiais e peças utilizadas.....	45
4.2.2	Recursos utilizados para montagem.....	46
4.4	ACIONAMENTO ELÉTRICO.....	49
4.4.1	Programação.....	49
4.4.2	Esquema elétrico.....	50
4.5	TESTES ESTRUTURAIS.....	51

CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DE PEÇAS E CONJUNTOS.....	58
APÊNDICE B – PROGRAMA UTILIZADO.....	78
APÊNDICE C – ESQUEMA ELÉTRICO.....	80

1 INTRODUÇÃO

Com a demanda de tecnologias para o desenvolvimento de novas soluções para os desafios que surgem diariamente, diversas áreas fundamentais para o ser humano veem a necessidade de melhorias. Áreas indispensáveis para nossa sociedade como a segurança, com aplicação de câmeras de monitoramento e alarmes, o transporte, com aplicativos que facilitam e barateiam nossa locomoção, a educação, com recursos de mídia e plataformas que facilitam o aprendizado, vem sendo modificadas para que atendam cada vez mais as nossas necessidades e até nos tragam uma certa comodidade.

Uma área sem dúvida mais importante, devido a sua complexidade e necessidade por parte da população é a da saúde, essencial e fundamental para todos nós. Sendo essa uma área muito abrangente e que demanda de profissionais qualificados, vê-se nela a busca de aplicações de novos métodos para as soluções decorrentes do cotidiano.

Dentro dessa área, existem várias ramificações e diferentes especializações, umas mais complexas que outras, mas nenhuma menos importante que outra. Um desses segmentos é a fisioterapia, que atende às necessidades por parte das pessoas que sofreram algum acidente ou por algum outro motivo perderam os movimentos, totais ou parciais, de membros inferiores e que por esses motivos, passam a necessitar de reabilitação física. Sendo assim, necessitando de atividades repetitivas específicas de movimentação desses membros atingidos para uma possível recuperação, e, da mesma forma, para o auxílio dos profissionais que exercem essa profissão, facilitando assim o atendimento a esses pacientes (GARDIN, 2019).

Tendo em vista o fácil acesso, o projeto estará voltado para a implementação de um motor elétrico em uma estrutura de reabilitação física com cunho pneumático já existente, com intuito similar, porém de uma metodologia diferente, possibilitando a utilização da estrutura em locais onde não exista fonte de ar comprimido. Também trará o desenvolvimento dos cálculos relacionados à posição e velocidade dessa estrutura, através da modelagem cinemática pelo método de multiplicação de matrizes de transformação homogênea de *D-H*.

1.1 TEMA

Implementação de um braço robótico e seus respectivos cálculos de movimentação para a reabilitação de membros inferiores.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho é delimitado pelo levantamento de referencial teórico, seguido de cálculos e implementação do protótipo, voltado para uma possível utilização em reabilitação física para pacientes com problemas de movimentação nos membros inferiores.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O projeto baseia-se em uma implementação de um motor para a movimentação de um braço robótico em uma cadeira para reabilitação física de membros inferiores, estes já construídos, e também os respectivos cálculos da posição e velocidade desse braço.

Para a reabilitação física de um indivíduo com dificuldades de movimentação nos membros inferiores recomenda-se a realização de movimentos repetitivos. Para tornar essa prática mais simples, para o paciente e profissional de saúde, pretende-se implementar um motor em uma estrutura pneumática já existente, automatizando o processo.

Conforme a situação apresentada, objetiva-se responder à questão: é possível realizar a movimentação de um braço robótico de acionamento pneumático utilizando um motor elétrico com baixo custo, mantendo a mesma eficiência do sistema anterior?

1.4 HIPÓTESES

Nesta etapa, serão desenvolvidas as possíveis respostas ao problema formulado que serão verificadas durante o estudo.

Tendo como base o problema citado, foram consideradas algumas suposições:

- a) Seria possível a utilização de um motor elétrico para a movimentação do elo do robô com as características do projeto?

- b) Uso de um motor de corrente contínua (DC), utilizado na movimentação de vidros elétricos automotivos, apresenta melhor versatilidade quanto aos locais de utilização em referência ao acionamento pneumático?
- c) Aplicação do método de *D-H* para o equacionamento pode ser um facilitador para o controle do robô?

1.5 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento exponencial de tecnologias, principalmente no decorrer da última década, cada dia mais cercados por novidades tecnológicas que vêm para auxiliar no nosso cotidiano e também, em alguns casos, realizar tarefas antes feitas por seres humanos.

Essas mudanças que a tecnologia traz não são aplicadas somente em comodidade ou bem estar, como, muitas vezes, pode parecer. Elas vêm sendo aplicadas com propósitos muito maiores que simplesmente jogos mais realistas e *smartphones* que se tornam cada vez mais relevantes na nossa vida, mas sim em áreas indispensáveis. Pode-se citar a segurança, com inúmeras formas de prevenção de acidentes devido a sensoriamento, a educação, com disponibilidade de plataformas de aprendizado online e uma, senão a mais fundamental área: a saúde. Diversos recursos que a tecnologia oferece vêm sendo aplicados nessa área, conforme dificuldades que surgem e também os novos desafios que são enfrentados, tanto pelos pacientes quanto pela parte que presta o atendimento. Uma dessas dificuldades que é enfrentada, e não é um problema recente, é a reabilitação física de pacientes que sofreram alguma lesão e/ou fratura, ou porventura outro motivo que leva a dificuldade na movimentação de seus membros inferiores. Essas dificuldades, geralmente são amenizadas e/ou curadas com o movimento repetitivo do membro afetado. Para que isso possa se realizar, é preciso um profissional especializado para efetuar os movimentos corretamente, o que resulta no esforço físico do profissional durante o atendimento.

Com a intenção de melhorar essa situação, o projeto justifica-se pela implementação de um meio de amenizar esse desgaste sofrido pelo profissional, e também viabilizar a recuperação do paciente.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é implementar em um braço robótico um motor para efetuar a sua movimentação, bem como desenvolver os cálculos necessários referente ao braço robótico para a aquisição do valor do torque necessário para movimentar a estrutura.

1.6.2 Objetivos Específicos

Destaca-se, como objetivos específicos do projeto:

- a) aplicar o método de *D-H* para o equacionamento;
- b) definir o modelo de motor mais adequado para realizar o movimento;
- c) realizar o desenho tridimensional da cadeira em software CAD;
- d) desenvolver o mecanismo para movimentação de membros inferiores;
- e) realizar os devidos testes necessários para a validação do projeto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa do projeto, serão abrangidos temas de importância para o desenvolvimento deste trabalho, com objetivo principal na descrição da robótica aplicada, bem como o embasamento teórico para a resolução das equações de posição e velocidade.

2.1 PROJETOS SEMELHANTES

Neste tópico, serão abordados projetos anteriores de cunho semelhante, com objetivo de compreender quão ampla essa área tem se tornado e, também, trazer um estudo um pouco mais aprofundado sobre o assunto, conforme tabela 1:

Tabela 1 – Projetos semelhantes

Autor	Título	Objetivo
João Pedro Rodrigues Gardin	Projeto de uma estrutura pneumática para reabilitação física de membros inferiores	Projeto e a construção de um mecanismo para auxiliar na reabilitação de membros inferiores com um sistema pneumático.
Vânia Luisa Behnen	Modelagem matemática de um robô SCARA com acionamento pneumático e identificação experimental das principais não linearidades	Descrição da modelagem matemática de um robô SCARA com 3 graus de liberdade e acionamento pneumático.
Roberta Georgen	A importância da modelagem matemática na engenharia: estudo de caso de robótica para reabilitação	Demonstrar a importância da modelagem matemática para uma solução robotizada, utilizando um estudo de caso a aplicação na reabilitação física.

Fonte: Autor, 2020

Cada autor acima citado trará auxílio com suas respectivas pesquisas, tanto na área do desenvolvimento matemático quando na robótica, cada qual com uma

temática ligeiramente voltada para uma área específica, porém, com ideias a contribuir para o atual projeto.

2.2 ROBÓTICA

Conforme Mataric (2014), para compreender o que é a robótica, primeiramente tem-se que entender o que é um robô. Um robô é um sistema que atua autonomamente, que sente o ambiente (através de sensores) e tem a capacidade para agir sobre ele, para cumprir algum objetivo, ou seja, ele deve estar no meio físico. Existem também máquinas tele operadas, ou seja, operadas à distância por seres humanos, porém estas não podem ser consideradas robôs. Sendo assim, a robótica pode ser definida como o estudo da capacidade de um robô sentir e atuar fisicamente de forma autônoma e voluntária.

2.2.1 História da robótica

Para Mataric (2014), a robótica surgiu com a teoria do controle, originada nos tempos da Grécia antiga ou antes, sendo esta teoria amplamente abordada no cunho mecânico para construção de máquinas e o estudo das suas propriedades físicas, inclusive durante a Revolução Industrial, com a máquina a vapor, teoria de controle é um dos fundamentos de engenharia que estuda diversas das propriedades de sistemas mecânicos automatizados. No século XX, a matemática clássica foi sendo utilizada para a solução desses sistemas, dando origem a teoria de controle. Porém, a matemática ficou mais complicada de ser aplicada quando os mecanismos começaram a agregar componentes elétricos e eletrônicos.

Enquanto a teoria do controle estava crescendo e se expandindo, surgia então, em meados de 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, um novo campo que se relacionava com a robótica. Norbert Wiener (1954) interessou-se em usar os princípios da teoria de controle para compreender não só sistemas artificiais, mas também os biológicos, nomeando esse novo estudo de cibernética (MATARIĆ 2014).

Segundo Wiener (1954), além da transmissão de mensagens, havia um campo mais abrangente que não incluía somente estudo da linguagem das mensagens, mas também o estudo destas para comandar as máquinas, baseando-

se no sistema biológico, desde o nível neural. Assim, a cibernética tomou como sua base o estudo da comunicação e do controle dos sistemas biológicos.

Conforme Mataric (2014), em 1956, durante uma conferência na Universidade de Dartmouth, que surgiu o campo da Inteligência Artificial. Essa conferência teve como objetivo a discussão da possibilidade de implantar inteligência em máquinas e contou com a presença de grandes pesquisadores do ramo, como Marvin Minsky, John McCarthy, Allan Newell e Herbert Simon.

Para Coppin (2013), IA faz a utilização dos métodos fundamentados no comportamento inteligente de humanos para solucionar problemas de maior complexidade.

2.2.2 Estrutura de robôs

Segundo Santos e Gorgulho (2015), um robô tem pelo menos 6 componentes:

- base fixa: normalmente estática;
- braço articulado: frequentemente chamado de manipulador mecânico;
- efetuador final: na forma de garra ou de outra ferramenta específica;
- unidade de controle: o computador do robô;
- dispositivo de programação: por exemplo, joystick e teclado;
- fonte de energia: hidráulica, pneumática ou elétrica.

Graus de Liberdade (GDL) de um sistema “são iguais ao número de parâmetros independentes (medidas) necessárias para definir uma única posição no espaço em qualquer instante de tempo” (NORTON, 2011, p. 48). Esse sistema é composto por elos e juntas, responsáveis por sua movimentação.

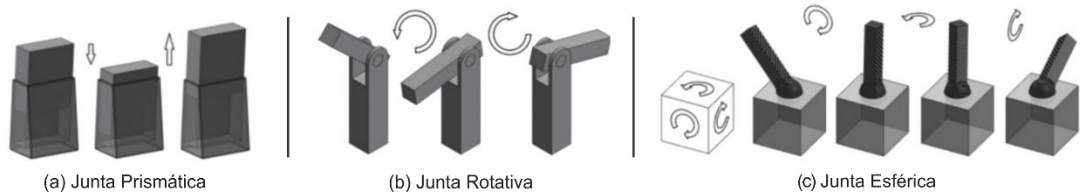
Um elo, é uma estrutura rígida com, no mínimo, dois pontos de ligação (nós) para outros elos. Conforme Norton (2011), podem ser classificados, em:

- elo binário: possui dois pontos de ligação;
- elo terciário: possui três pontos de ligação;
- elo quaterciário: possui quatro pontos de ligação.

As juntas são elementos responsáveis por conectar dois ou mais elos através dos nós, e permitir a estes o movimento.

Para Santos e Gorgulho (2015), as juntas são divididas em 3 categorias, conforme figura 1:

Figura 1 – Tipos de juntas



Fonte: adaptado de Santos e Gorgulho, 2015

- junta prismática: Movem-se em linha reta, sem rotação, formadas de duas hastes que deslizam entre si;
- junta rotacional: giram em torno de uma linha fictícia, conhecida como eixo de rotação;
- junta esférica: Atua como o arranjo de três juntas rotacionais, com rotação em torno de três eixos distintos.

2.2.3 Tipos de robôs

São geralmente classificados pelo tipo de junta que forma o seu sistema de articulação, e possibilita caracterizar alguns atributos em comum, como o espaço de trabalho e o tipo de aplicação (SANTOS; GORGULHO, 2015).

- robô cartesiano (TTT): os elos possuem somente movimentação translacional, possuindo boa rigidez mecânica, porém baixa capacidade de posicionamento devido à pouca orientação angular;
- robô cilíndrico (RTT): difere da anterior pois a primeira junta é rotativa, tendo ainda rigidez mecânica, porém apresentando menor resposta no posicionamento horizontal;
- robô esférico (RRT): é constituído por dois dos elos com movimentos rotacionais e um translacional, tendo menor rigidez mecânica, porém maior disposição no eixo radial;
- robô scara: Mesma configuração do esférico, porém com o acréscimo de *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, normalmente usados para manusear pequenos objetos, possui alta rigidez dinâmica para movimentos verticais e baixa para horizontais;
- robô articulado (RRR): Neste caso, os três elos do robô são rotativos, possibilitando a este modelo maior posicionamento e orientação, porém, menor rigidez mecânica.

2.2.4 Robótica para reabilitação física

O conceito de usar máquinas para a finalidade de reabilitação física surge em meado de 1910, com a patente de Theodor Büdingen, que criou um aparelho, alimentado por motor elétrico, para auxiliar pacientes que sofrem de doença cardíaca a caminhar (KHALILI; ZOMLEFER, 1988).

2.3 TIPOS DE ATUADOR PARA UM ROBÔ

Segundo Santos e Gorgulho (2015), para alterar a movimentação de um respectivo corpo, é preciso que uma força externa aja sobre ele, e para gerar essa força, é indispensável o uso de um dispositivo motor, podendo ser eles hidráulico, pneumático ou elétrico, cada qual com suas características, fazendo com que cada um seja mais apropriado para diferentes tipos de aplicação.

2.3.1 Sistemas de acionamento

As primeiras princípios hidráulicos remontam a Antiguidade, para fins de irrigação na bacia do rio Tigre e Eufrates, na Mesopotâmia, e na Babilônia para fins de coleta de esgoto, e com isso evoluindo conforme as necessidades de cada época. Seus princípios foram estudados também por Arquimedes, Leonardo da Vinci, Galileu Galilei, entre outros estudiosos, cada qual com sua parcela de contribuição para a formação da hidráulica conhecida hoje.

Conforme Filho e Santos (2018), um fluido é um elemento que pode escoar, adequando-se rapidamente ao contorno do meio que o contém. Tanto a hidráulica quanto a pneumática fazem uso de fluídos como meio de transferência de energia, respectivamente o óleo e o ar.

Para Netto e Fernández (2018), a hidráulica é o estudo do comportamento dos fluídos, tanto em repouso (hidrostática) quanto em movimento (hidrodinâmica).

Segundo Santos e Gorgulho (2015), o acionamento hidráulico foi a primeira forma de acionamento utilizada em um robô industrial. Seu funcionamento consiste em um motor, um equipamento compressor faz que a pressão do fluido utilizado aumentada a tal ponto que produza o deslocamento no motor, e o seu controle se dá através das válvulas, que trabalham com o controle dessa pressão produzida.

As principais aplicações da hidráulica estão onde se necessita o uso de um sistema com uma força consideravelmente grande, comparado com os demais

sistemas, nas mais diversas áreas, como em veículos, construção civil e até na aviação (FILHO; SANTOS, 2018).

Para Filho e Santos, a pneumática é a ciência que estuda a conduta dos gases (ar) na transmissão da energia. O ar é comprimido e levado via tubulação ao lugar da ação, podendo ser por expansão ou aplicação da força diretamente. É frequentemente usado nos efetadores finais do robô, além da aplicabilidade na indústria, entre outros ramos (SANTOS; GORGULHO, 2015).

Já o acionamento elétrico, conforme afirma Franchi (2014), transforma a energia elétrica em energia cinética (mecânica), com a passagem da corrente elétrica pelo mesmo, que assegura que ocorra a movimentação do eixo do motor.

2.3.2 Vantagens e desvantagens

Conforme mostrado no tópico anterior, cada tipo de acionamento possui uma aplicabilidade mais específica, conforme a necessidade e as características do sistema (Tabela 2).

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos tipos de acionamentos

Sistema de Acionamento	Vantagens	Desvantagem
Hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • O fluido utilizado (óleo) mantém as partes metálicas lubrificadas e auxilia na dissipação do calor; • Controle de grandes cargas; • Precisão de posicionamento e velocidade; 	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes robustos e caros; • Baixas velocidades do fluido; • Sujeito à vazamentos e poluição; • Fonte de energia mais cara;
Pneumático	<ul style="list-style-type: none"> • Custo relativamente baixo; • Fácil implantação e manipulação; • Segurança; • Altas velocidades de trabalho; 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo do ar comprimido; • Impurezas e umidade provocam desgastes nos componentes pneumáticos; • Escape de ar; • Menor precisão de posicionamento
Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Fonte energética de baixo custo; • Controle preciso; • Estrutura de fácil manutenção; 	<ul style="list-style-type: none"> • Não mantém torque constante; • Ocorrência de danos quando sobrecarregado o motor;

Fonte: adaptado de Filho e Santos (2018) e Santos e Gorgulho, 2015

2.3.3 Sistema de acionamento elétrico

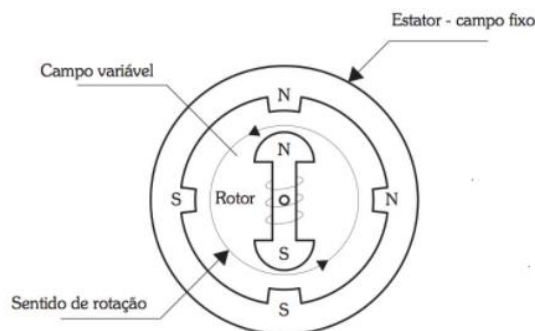
Conforme Franchi (2014), para entender como funciona o motor de corrente contínua (DC), tem-se que entender o funcionamento de seus componentes principais:

- estator: conhecido também como campo, “é a parte fixa, formada por pacotes de lâminas de aço onde são enrolados os condutores que constituem as bobinas para a formação do campo magnético” (FRANCHI, 2014, p. 42).

- rotor: chamado de armadura, é o componente do motor que se movimenta, fornecendo o movimento mecânico e também, assim como o estator, é formado por lâminas de aço, onde tem duas bobinas, que são conectadas à fonte de energia pelo coletor (comutador), permitindo a movimentação. As escovas, por serem feitas de material condutor, quase sempre grafite, conduzem a energia exterior para o coletor, onde ocorre atrito.

Para ocorrer o funcionamento de um motor DC é necessário um campo magnético no estator e no rotor, este campo magnético é criado através de uma corrente contínua aplicada no estator, mais precisamente nas bobinas, e também no rotor, criando um campo magnético em cada um. O movimento do rotor é dado então pela força de atração entre os polos destes campos magnéticos que se atraem e repelem-se à medida que o rotor gira, conforme podemos observar na figura 2 (FRANCHI, 2014).

Figura 2 – Funcionamento de um motor DC



Fonte: adaptado de Franchi, 2014

2.3.3.1 Motor de passo

Para Brites e Santos (2008) os motores de passo são dispositivos de característica eletromecânica, que convertem os pulsos elétricos recebidos em movimentação mecânica, gerando pequenas variações angulares. O rotor é movimentado em incrementos angulares, chamados de passos, e quando o pulso elétrico é recebido em uma sequência definida, o motor gira em determinada direção. Já a velocidade do rotor é definida pela frequência dos pulsos e do ângulo de rotação.

A principal vantagem do motor de passo é quando se precisa realizar um movimento com certa precisão, ou seja, quando se precisa maior controle de

variáveis como ângulo e posição, não sendo caracterizado por altas velocidades (BRITES e SANTOS, 2008).

2.3.4 Microcontrolador PIC (*Peripheral Interface Controller*)

Conforme Gimenez (2015), microcontroladores são, de uma forma geral, um circuito integrado capaz de integrar as partes de um microcomputador, contendo os recursos necessários para se tornar um sistema digital programável, tais como o microprocessador, memórias e portas de entrada/saída. Uma das vantagens dos microcontroladores é o seu baixo custo, devido a sua produção em larga escala pelas diversas fabricantes.

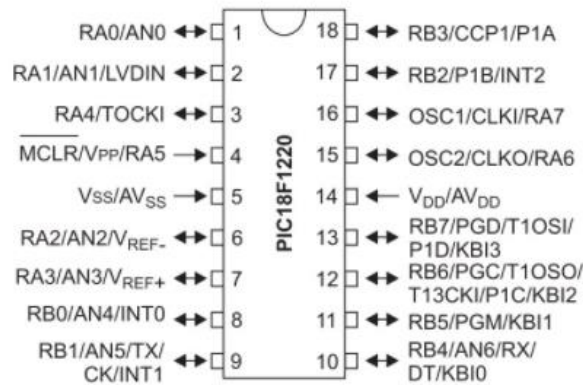
Existem vários tipos e modelos de microcontroladores, um deles é o PIC, de fabricação da Microchip Technology Inc. Uma grande vantagem da família PIC é que os seus modelos possuem as instruções e a pinagem de uma maneira parecida, mantendo a maioria das suas características básicas (SOUSA e SOUZA, 2012).

O PIC é muito utilizado em diversas áreas, tais como em automação residencial e predial, equipamentos eletrônicos de controle de portões automáticos e controle de elevadores, na eletrônica embarcada, como computadores de bordo e alarmes de carro, e na automação industrial, aplicados em braços robóticos e controladores de acesso, por exemplo (GIMENEZ, 2015).

Esses microcontroladores são divididos em dois grupos, as portas A e B, cada uma contendo oito pinos, conforme a figura 3, e os pinos de alimentação, o pino Vss para a alimentação negativa (GND) e o Vdd para a positiva (+5Vdd).

Como os modelos possuem a pinagem parecida, temos como exemplo o PIC 18F1220, para exemplificar de melhor maneira a pinagem de um microcontrolador PIC, conforme figura 3.

Figura 3 – Pinagem microcontrolador PIC



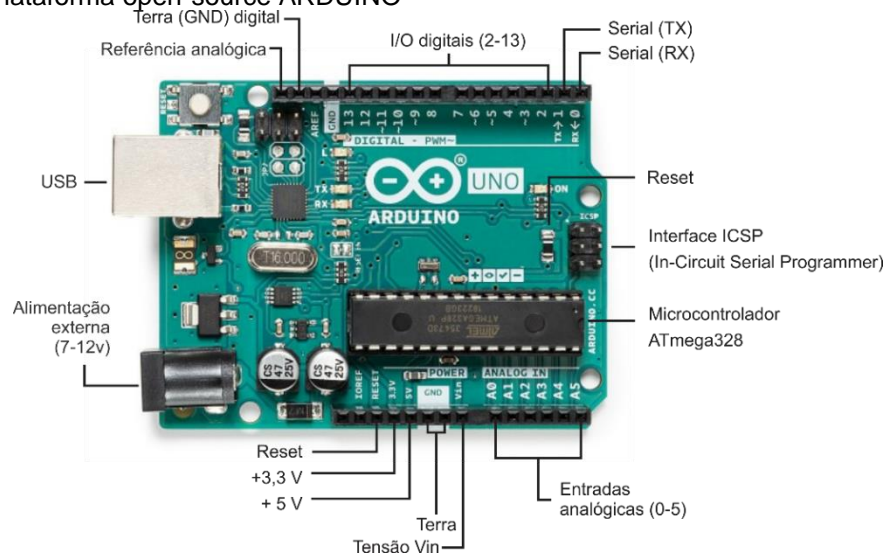
Fonte: Adaptado de Sousa e Sousa, 2012

Onde: \Rightarrow representa os pinos que são somente de entrada e \Leftrightarrow de entrada e de saída.

2.3.5 Plataforma Arduino

Conforme Junior e Silva (2015), com o propósito da redução de tempo de projeto para sistemas microcontrolados, surgem as plataformas padronizadas, entre as mais difundidas a plataforma ARDUINO, criada na Itália no ano de 2005. Desse modo, Arduino é uma plataforma *open-source* para a prototipagem eletrônica, no qual o hardware e o software são acessíveis para serem adaptados e controlados conforme a necessidade do projeto, conforme figura 4.

Figura 4 – Plataforma open-source ARDUINO



Fonte: Adaptado de store.arduino.cc.

2.4 FISIOTERAPIA

Segundo Coffito (2013) *apud* Mayworm (2016), a fisioterapia é a ciência que se ocupa do estudo, tratamento e prevenção de disfunções no nosso corpo, decorridas devido a genética, traumatismos ou doenças.

Este também define o fisioterapeuta como o profissional que atua com o propósito de promover a saúde motora, com destaque no movimento e função, desde prevenção, tratamento e recuperação de pacientes que sofreram alguma disfunção e/ou doença que afeta a sua saúde funcional. Determina também que o profissional pode atuar em conjunto com demais profissionais ou autonomamente, podendo atender tanto indivíduos específicos quanto em grupos maiores de pessoas (BARROS, 2003 *apud* MAYWORM, 2016).

2.5 ERGONOMIA

A origem da ergonomia, enquanto disciplina, surgiu no ano de 1949, com o engenheiro Kenneth Murrell, membro da *Ergonomic Research Society*, primeira sociedade voltada para a ergonomia no mundo. Conforme essa sociedade, a ergonomia é voltada ao estudo da relação do homem com o seu trabalho, com os equipamentos e o ambiente em que estes se encontram, para então ser aplicada uma solução, baseada nos conhecimentos anatômicos e fisiológicos, para problemas decorrentes dessa relação (PINHEIRO e CRIVELARO, 2014).

Conforme ABRAHÃO (2009), para a melhor utilização desses conhecimentos, a *International Ergonomics Association* (IEA) classifica em três formas diferentes a aplicação da ergonomia:

- ergonomia física: Voltada para o estudo da postura do indivíduo no trabalho, direcionada as características físicas do ser humano, como anatomia e fisiologia;
- ergonomia cognitiva: Refere-se ao estudo quando o ser humano está envolvido com sistemas, mais especificamente o volume mental de trabalho que ele recebe, ou seja, esta é voltada aos processos mentais do ser humano no trabalho, como memória e raciocínio;
- ergonomia organizacional: Inclinação a gestão organizacional, como correta definição de deveres e tarefas;

2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é o campo que analisa e realiza a simulações de sistemas para conhecer o seu comportamento previamente, sendo muito aplicada em diversas áreas, como física, economia e na engenharia (PÖRSCH, 2012).

2.6.1 Cinemática Direta

Para Craig (2006), cinemática é a ciência que descreve o deslocamento (movimento), desconsiderando as forças causadoras. Dentro desse estudo, a posição, velocidade e aceleração no que se refere a qualquer variável, fazendo referência a todas as propriedades em relação a movimentação de um manipulador.

Para Niku (2010), quando temos um robô com estrutura conhecida, como o comprimento dos elos e seus ângulos, para sabermos a sua posição e sua orientação a qualquer instante, usamos a cinemática direta.

2.6.2 Parâmetros de *Denavit-Hartenberg*

Para determinarmos a respectiva posição e orientação de uma determinada estrutura, temos uma série de parâmetros a serem seguidos, conforme mostrado em Sciavicco e Siciliano (1996), que descreve os seguintes passos:

1. Primeiro passo: determinação dos elos e das juntas de um robô;
2. Definir os eixos do sistema de referência dos elos de acordo com a convenção de *D-H*.
 - a. Localizar os eixos Z ao longo dos eixos das juntas, de forma que o eixo Z_{i-1} é o eixo da junta i ;
 - b. Localizar a origem do sistema O_i na intercessão da junta $i+1$ e a normal comum entre os eixos Z_{i-1} e Z_i ;
 - c. Localizar os eixos X_i ao longo da normal comum entre os eixos Z_{i-1} e Z_i com direção da junta i para a junta $i+1$;
 - d. Localizar os eixos Y_i para que sistema siga a regra da mão direita.
3. Determinar os Parâmetros D-H, sendo eles:
 - a. a_i - distância entre Z_{i-1} e Z_i medida ao longo do eixo X_i ;
 - b. α_i - ângulo entre o eixo Z_{i-1} e o eixo Z_i , medido em torno do eixo X_i ;
 - c. d_i - posição entre X_{i-1} e X_i , medida sobre o eixo Z_{i-1} ;

d. θ_i - ângulo entre o eixo X_{i-1} e o eixo X_i , medido em torno do eixo Z_{i-1} ;

Os autores citados apresentam em seus exemplos um manipulador com três graus de liberdade, cujos os parâmetros são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros D-H para robôs com 3 GDL

Elo	θ_i	a_i	d_i	α_i
Elo 1	θ_1	L_1	D_1	α_1
Elo 2	θ_2	L_2	D_2	α_2
Elo 3	θ_3	L_3	D_3	α_3

Fonte: Adaptado de Sciavicco e Siciliano, 1996

4. Cálculo das matrizes de Transformação Homogênea: relaciona o movimento de um elo i ao anterior $i-1$, conforme equação (1) (SICILIANO et al., 2009):

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C a_i & S\theta_i S a_i & a_1 C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C a_i & -C\theta_i S a_i & a_1 S\theta_i \\ 0 & S a_i & C a_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1]$$

5. Cálculo da matriz de Transformação Homogênea, que relaciona o efetuador final com o elo zero do robô:

$$T_3^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \quad [2]$$

2.6.3 Matriz Jacobiana

A cinemática diferencial pode ser definida como a relação entre velocidade e o efetuador final do robô, diferentemente da cinemática direta, que relaciona as variáveis articuladas com a posição final do efetuador, conforme equação 3 (SICILIANO et al., 2009).

$$V = \begin{bmatrix} \vec{P} \\ \vec{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \\ W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = J\dot{q} = \begin{bmatrix} J_{p1} \\ J_{01} \end{bmatrix} \cdot [\dot{\theta}_1] \quad [3]$$

Sendo que:

$$J\dot{q} = \begin{matrix} \rightarrow \\ Z_0 \end{matrix} X \left(\begin{matrix} \rightarrow \\ P \\ \rightarrow \\ P_0 \end{matrix} \right)_0 \quad [4]$$

2.6.4 Modelo Dinâmico

Um robô manipulador é um sistema de corpos rígidos e as equações de movimento de tais sistemas são conhecidas há muito tempo. O problema real na dinâmica do robô é prático, ou seja, encontrar fórmulas para as equações de movimento que conduzam a algoritmos computacionais eficientes (BALAFOUTIS, PATEL, 1991).

Para determinar este modelo dinâmico para descrever as características do movimento de um manipulador robótico, torna-se necessário a obtenção de uma equação que forneça uma descrição do relacionamento entre os torques do atuador da junta e o movimento dessa estrutura. Existem várias alternativas para encontrarmos o modelo dinâmico para manipuladores robóticos, entre eles as metodologias de Lagrange, Newton-Euler e Gibbs-Appell, como alternativas de ferramentas para a formulação matemática.

Neste trabalho será abordada a metodologia para formulação do modelo dinâmico de Lagrange, com base no que apresenta Sciavicco et al. (2009), onde as equações do movimento podem ser derivadas um modo sistemático independentemente do quadro de coordenadas de referência, assim, o Lagrangeano do sistema pode ser definido como uma função das coordenadas generalizadas, sendo o conjunto de variáveis q_i , com $i = 1 \dots, n$ chamado coordenadas generalizadas, que descrevem as posições dos elos de um manipulador, tem-se:

$$L = K - U \quad [5]$$

Onde K representa a energia cinética e U representa a energia potencial desse sistema. Para a equação de Lagrange, temos a seguinte expressão:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \xi_i \quad [6]$$

Onde ξ_i é a força associada com as coordenadas q_i , que estabelece relação entre a força aplicada no efetuador final e as respectivas posição, velocidade e aceleração das juntas, fazendo-se possível a derivada desse modelo dinâmico do efetuador final com base nas energias potencial e cinética produzido pelo sistema (SICILIANO et al., 2009).

A energia cinética resultante, desconsiderando a presença de um rotor na junta, é dada pela soma da energia de cada elo e do movimento do atuador, também individualmente, conforme a equação [7]:

$$K = \sum_{i=1}^n (K_{l_i}) \quad [7]$$

Onde K_{l_i} é a energia cinética produzida respectivamente pelos elos. Segundo SICILIANO et al., (2009), a energia cinética pode ser descrita como:

$$K_{li} = \frac{1}{2} \int_{V_{li}} \dot{p}_i^{*T} \dot{p}_i^* \rho dV \quad [8]$$

Para V_{li} temos o volume do link i , para \dot{p}_i^* temos a velocidade linear e ρ representa a densidade de cada porção de volume. Então, a energia cinética para o movimento de translação e rotação de cada elo é dada, respectivamente, por [9] e [10]:

$$\frac{1}{2} m_{l_i} \dot{p}_{l_i}^T \dot{p}_{l_i} \quad [9]$$

Onde m_{l_i} representa a massa do elo representado.

$$\frac{1}{2} w_i^T R_i I_{l_i}^i R_i^T w_i \quad [10]$$

Onde R_i representa a matriz da rotação para o elo representado e $I_{l_i}^i$ é a matriz que retrata o tensor de inércia do centro de massa do elo. Obtendo a soma das duas energias presentes no elo, respectivamente as equações [9] e [10], temos que a energia total no elo respresentado é:

$$K_{l_i} = \frac{1}{2} m_{l_i} \dot{p}_{l_i}^T \dot{p}_{l_i} + \frac{1}{2} w_i^T R_i I_{l_i}^i R_i^T w_i \quad [11]$$

Para a representação da energia potencial, utiliza-se o mesmo princípio da energia cinética, ou seja, a soma-se a energia dos elos, dada por:

$$U = \sum_{i=1}^n (U_{l_i}) \quad [12]$$

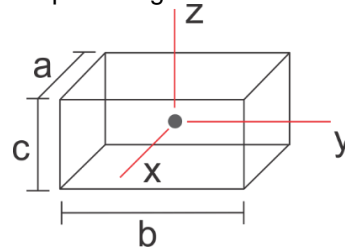
Considerando a força gravitacional, que é dada por:

$$U_{l_i} = -m_{l_i} g_0^T p_{l_i} \quad [13]$$

2.6.5 Tensor de Inércia

Para Craig (2006), fala-se de momento de inércia quando se tem o estudo de um corpo com 1 GDL, por exemplo, o movimento rotativo em um único eixo. Quando temos um corpo rígido com a possibilidade de movimentação nas três dimensões, existem muitos eixos de rotação possíveis, para tanto, calcula-se o tensor de inércia, que descreve a distribuição de massa desse objeto.

Figura 5 – Tensor de inércia de um corpo retangular



Fonte: Adaptado de Craig, 2006

Para um corpo rígido, temos:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad [14]$$

Para um corpo rígido, com formato retangular conforme figura 5, considerando que o sistema de referência se encontra no centro geométrico do corpo, em forma de tensor tem-se:

$$I = \begin{bmatrix} \frac{m}{12}(b^2 + c^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m}{12}(a^2 + c^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m}{12}(a^2 + b^2) \end{bmatrix} \quad [15]$$

3 METODOLOGIA

A pesquisa iniciou-se em um cunho bibliográfico, com levantamento de pressupostos para a formulação do referencial teórico que servirá de base de dados para a execução do projeto.

A partir deste, o projeto voltou-se para a pesquisa-ação, caracterizada como pesquisa em associação com a execução/ação do projeto, visando a melhoria das condições de tratamento de um paciente com dificuldades para movimentação nos membros inferiores e também do profissional da área que irá auxiliá-lo.

Para Gil (2002), a pesquisa-ação é ligeiramente controversa quando se trata do envolvimento do pesquisador e ação por parte de todos os envolvidos com o projeto, sendo muitas vezes vista como desprovida de clareza. Porém, vem sendo reconhecida pela sua utilidade por parte de pesquisadores.

Para Marconi e Lakatos (2003), método de pesquisa é o agrupamento de práticas sistemáticas e racionais para se alcançar um objetivo, identificando erros e contribuindo nas decisões do cientista.

Segundo Prodanov e Freitas (2013), o método da pesquisa é um meio para chegar a um determinado objetivo, sendo a finalidade dessa ciência a busca do saber. Pode-se então afirmar que o método científico se resume ao agrupamento dos processos com a finalidade de alcançar o entendimento e o saber.

Foram realizados os cálculos necessários conforme o método $D - H$, como o cálculo da posição e velocidade, e posteriormente com essas determinadas informações, a simulação do valor de torque a partir da simulação computacional, para então, a partir deste último, ser possível a escolha do motor adequado para a estrutura.

Para melhor visualização do funcionamento do motor escolhido para a estrutura, foram elaborados os desenhos de CAD 3D e 2D necessários, e também a execução do levantamento de custos de algumas peças que seriam utilizadas no projeto, conforme o modelo 2D.

Algumas das peças foram manufaturadas, afim de agilizar o processo e também garantir a precisão e qualidade das mesmas, e algumas já se encontravam a disposição devido ao projeto pneumático anterior, tendo que, em alguns casos, apenas serem feitos ajustes. Os elementos de fixação, como porcas, parafusos e arruelas, por se tratarem de itens tabelados, foram adquiridos no comércio local.

A etapa seguinte consistiu na elaboração do projeto elétrico, onde há a simulação e o desenvolvimento do esquema de acionamento elétrico, a partir de um software para a simulação de circuitos elétricos, no qual podemos observar os materiais e também os componentes elétricos/eletrônicos que serão necessários para a execução da prática do mesmo.

A partir da simulação em software do acionamento elétrico, foi realizado a montagem do sistema para o acionamento, utilizando os componentes conforme a mesma. Para tanto, foi utilizada uma plataforma Arduino para a realização da programação do circuito, estabelecendo como o acionamento da estrutura deverá se comportar.

A próxima etapa consistiu da montagem do motor elétrico, fixando-o na armação da cadeira, para a realização da movimentação da estrutura, juntamente com a do membro inferior do usuário de forma automática.

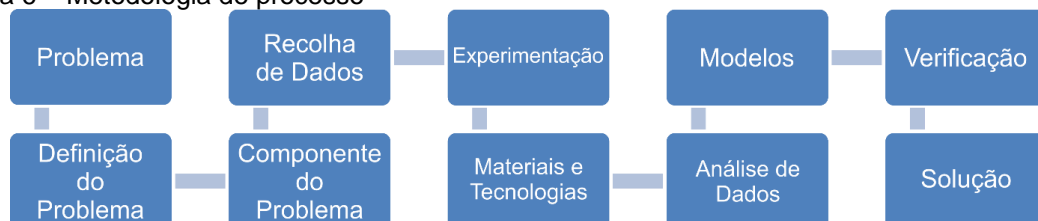
Por fim, realizou-se os testes necessários para a validação da modelagem e cálculos do projeto e a identificação de possíveis erros e/ou melhorias decorrentes no projeto.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

O método aplicado para a realização desse projeto é descrito por Bruno Munari em 1981, no livro *Das Coisas Nascem Coisas*. Segundo Munari (1981), o problema não se soluciona sozinho, porém, traz consigo os componentes para a sua solução, sabendo sua função e como utilizá-los.

Esses componentes da solução do problema podem ser conferidos, conforme a figura 6:

Figura 6 – Metodologia de processo



Fonte: Adaptado de Munari, 1981

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Nesse tópico são apresentados os materiais e recursos utilizados para a execução do projeto, dando ênfase nos meios computacionais e suas aplicações para a elaboração do trabalho, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Recursos utilizados

Nome	Descrição/ Aplicação no projeto
Software de simulação matemática - MATLAB	Destinado a executar cálculos de matrizes, voltado para o cálculo numérico. Utilizado no projeto para a resolução da equação do torque, e também a simulação do valor do atrito do sistema.
Software CAD 3D	Utilizado para simulação tridimensional de modelos, bem como auxilia na criação de protótipos, agilizando a manufatura. Foi utilizado para a simulação da estrutura da cadeira, bem como o dimensionamento dos seus componentes.
Excel	É uma ferramenta destinada a criação de planilhas eletrônicas, muito utilizada para controlar fluxos de valores. No projeto foi empregado para o controle dos custos e materiais a serem comprados/manufaturados.
Arduino	Plataforma <i>open-source</i> para a prototipagem eletrônica. Foi utilizado para a realização do controle do motor.
Motor DC TG0315003E – 24V	É um tipo de máquina elétrica que converte a energia provida de uma corrente contínua em energia mecânica, gerando um torque de saída. Foi empregado como dispositivo de acionamento da estrutura de reabilitação.
Software Simulação de Circuitos Eletrônicos - Proteus	Software para projetos eletrônicos, composto por de ferramentas, simulações e possibilita projetos de placas de circuito impresso. Foi empregado na simulação do esquema elétrico do acionamento do motor.

Fonte: Autor, 2020

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico serão expostos os resultados adquiridos através da metodologia apresentada no capítulo anterior. Serão mostradas todas as partes do projeto, mostrando cada etapa realizada até a concepção final do protótipo.

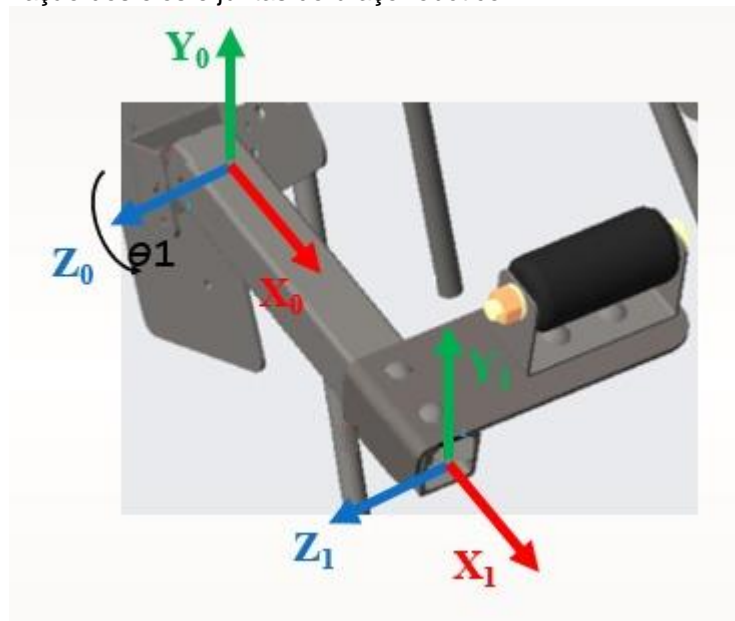
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para o correto dimensionamento do motor a ser utilizado na estrutura, foram desenvolvidos os cálculos fundamentais para encontrar o torque necessário para o acionamento do braço robótico.

4.1.1 Cálculo da posição

Conforme citado no capítulo anterior, para o cálculo da posição da estrutura em determinado momento, é preciso, primeiramente, definir os elos e juntas e também os parâmetros de *D-H*, mostrados na figura 7:

Figura 7 – Determinação dos elos e juntas do braço robótico



Fonte: Autor, 2020

Conforme tabela 3 que representa os parâmetros de *D-H*, analisando as variáveis a partir da figura 7, pode-se concluir que:

Tabela 5 – Parâmetros de D-H para o elo 1

Elo	θ_i	a_i	d_i	α_i
Elo 1	θ_1	L_1	0	0

Fonte: Autor, 2020

Para encontrar a equação da posição, utilizaremos as variáveis, e não valores inteiros para as variáveis na qual seu valor difere de 0. Aplicando os valores dos parâmetros da tabela 5 na equação [1], tem-se que:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 C_0 & S\theta_1 S_0 & l_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & C\theta_1 C_0 & -C\theta_1 S_0 & l_1 S\theta_1 \\ 0 & S_0 & C_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [16]$$

Resolvendo a equação, tem-se:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & l_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & l_1 S\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [17]$$

Como tem-se somente um elo no braço robótico, não é necessário realizar multiplicação de matrizes, caso que se aplica para dois ou mais elos. Tem-se então, como resultado para a equação da posição do braço robótico:

$$\begin{aligned} P_x &= l_1 \cos\theta_1 \\ P_y &= l_1 \sin\theta_1 \\ P_z &= 0 \end{aligned} \quad [18]$$

4.1.2 Cálculo da velocidade angular e linear

Para realizar o cálculo da velocidade, primeiramente foi necessário identificar o que se pede na equação [4], sendo necessário a retirada de dados da matriz de posição, realizada anteriormente:

$$\vec{z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \vec{p} = \begin{bmatrix} l_1 \cos\theta_1 \\ l_1 \sin\theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}; e \vec{p}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Substituindo os dados retirados na equação [4], tem-se:

$$J_{p1}\dot{q} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} l1\cos\theta1 \\ l1\sin\theta1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad [19]$$

Aplicando a regra de Sarrus para a resolver a multiplicação da matriz e encontrar o determinante, tem-se que:

$$J_{p1}\dot{q} = -l1\sin\theta1 I + l1\cos\theta1 J \quad [20]$$

Substituindo a equação [20] na equação [3], obtém-se:

$$V = \begin{bmatrix} -(l1\sin\theta1) \\ l1\cos\theta1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [\dot{\theta}_1] \quad [21]$$

Tem-se então, para a velocidade linear:

$$\dot{P}_{l1} = \begin{bmatrix} -l1\sin\theta1 \cdot \dot{\theta} \\ l1\cos\theta1 \cdot \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [22]$$

E a velocidade angular:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad [23]$$

4.1.3 Cálculo do Torque

A partir das escolhas das coordenadas, conforme descrito na figura 15, e dos cálculos de posição e velocidade, baseados nos parâmetros D-H, tem-se que:

$$\dot{P}_{l1} = \begin{bmatrix} -l1\sin\theta1 \cdot \dot{\theta} \\ l1\cos\theta1 \cdot \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix}, W_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, R_1 = \begin{bmatrix} C\theta1 & -S\theta1 & 0 \\ S\theta1 & C\theta1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } I_{i_1}^1 = \begin{bmatrix} I_{xx}^1 & -I_{xy}^1 & -I_{xz}^1 \\ -I_{yx}^1 & I_{yy}^1 & -I_{yz}^1 \\ -I_{zx}^1 & -I_{zy}^1 & -I_{zz}^1 \end{bmatrix}$$

Substituindo em [11], tem-se:

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} m_{l_{i1}} [-l_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta} \quad l_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta} \quad 0] \begin{bmatrix} I_{xx}^1 & -I_{xy}^1 & -I_{xz}^1 \\ -I_{yx}^1 & I_{yy}^1 & -I_{yz}^1 \\ -I_{zx}^1 & -I_{zy}^1 & -I_{zz}^1 \end{bmatrix} \\
&+ \frac{1}{2} [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}] \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx}^1 & -I_{xy}^1 & -I_{xz}^1 \\ -I_{yx}^1 & I_{yy}^1 & -I_{yz}^1 \\ -I_{zx}^1 & -I_{zy}^1 & -I_{zz}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_1 & S\theta_1 & 0 \\ -S\theta_1 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad [24]
\end{aligned}$$

Multiplicando, obtém-se:

$$\begin{aligned}
K_{l_1} &= \frac{1}{2} m_{l_1} (-l_1^2 \sin^2 \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 + l_1^2 \cos^2 \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2) \\
&+ \frac{1}{2} [0 \quad 0 \quad \dot{\theta}] \begin{bmatrix} I_{xx}^1 & -I_{xy}^1 & -I_{xz}^1 \\ -I_{yx}^1 & I_{yy}^1 & -I_{yz}^1 \\ -I_{zx}^1 & -I_{zy}^1 & -I_{zz}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad [25]
\end{aligned}$$

Ainda, simplificando $S^2 \theta_1 + C^2 \theta_1 = 1$, tem-se:

$$K_{l_1} = \frac{1}{2} m_{l_1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} [-I_{zx}^1 \cdot \dot{\theta} \quad -I_{zy}^1 \cdot \dot{\theta} \quad I_{zz}^1 \cdot \dot{\theta}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad [26]$$

Por fim, para a energia cinética, tem-se:

$$K_{l_1} = \frac{1}{2} m_{l_1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{zz}^1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \quad [27]$$

Para a energia potencial, sabendo que $g_0 = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ e $\dot{P}_{l_1} = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 \\ l_1 \cos \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix}$,

substituindo em [13], tem-se:

$$U_{l_1} = -m_{l_i} [g \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 \\ l_1 \sin \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [28]$$

Efetuada a multiplicação, tem-se, para a energia potencial:

$$U_{l_1} = -m_{l_i} \cdot g \cdot l_1 \cos \theta_1 \quad [29]$$

Substituindo a equação de energia cinética [27] e de energia potencial [29] na equação [5], obtém-se então a equação Lagrangeana para o sistema:

$$L = \left(\frac{1}{2} m_{l_1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{zz}^1 \dot{\theta}_1^2 \right) - (-m_{l_1} \cdot g \cdot l_1 \cos\theta_1) \quad [30]$$

Realizando as derivadas parciais de $m_{l_1} \cdot g \cdot l_1 \cos\theta_1$, de L em relação à θ_1 $\left(\frac{\partial L}{\partial q_i}\right)$, e de $\frac{1}{2} m_{l_1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{zz}^1 \dot{\theta}_1^2$, de L em relação à $\dot{\theta}_1$ $\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)$ e a derivação no tempo $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)$, e substituindo as mesmas na equação [6], tem-se que:

$$\xi_i = m_{l_1} l_1^2 \ddot{\theta}_1 + I_{zz}^1 \ddot{\theta}_1 - (-m_{l_1} \cdot g \cdot l_1 \sin\theta_1) \quad [31]$$

Simplificando $\ddot{\theta}_1$ e substituindo I_{zz}^1 por $\frac{m}{12}(a^2 + b^2)$, tem-se a equação do torque do sistema:

$$\tau_i = \ddot{\theta}_1 (m_{l_1} l_1^2 + \frac{m}{12}(a^2 + b^2)) + m_{l_1} \cdot g \cdot l_1 \sin\theta_1 \quad [32]$$

A partir dessa equação é possível definir o torque necessário para que ocorra a movimentação da estrutura, considerando um determinado ângulo θ , e também considerando uma massa de 4,30 kg, para a simulação de um paciente utilizando a cadeira.

Para o cálculo da massa da estrutura em forma retangular, tem-se:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{a \cdot b \cdot c} \quad [33]$$

Onde ρ representa a densidade do material, v o volume, a , b e c as respectivas dimensões do material, e m a massa.

Como a estrutura possui mais de um componente, e cada qual possui recortes e dobras, o cálculo foi feito desconsiderando dimensões de furos, chanfros, raios e componentes de fixação, como parafusos, porcas e arruelas.

Sabendo que a estrutura é feita de Aço SAE 1020, temos então que a densidade do material é 7.860 kg/m³, e as dimensões dos componentes, que se encontram no Apêndice A. Substituindo os valores na equação [33], temos uma massa de aproximadamente 3,5 kg.

Simulando a equação [32] no software matemático, substituindo m_{l_1} pelo valor encontrado da massa e acrescentando uma massa de 4,3 kg, ou seja, o total de massa será de 7,8 kg, representando um paciente utilizando a cadeira, e considerando um ângulo mínimo de 15°, onde iniciará o movimento e um ângulo máximo de aproximadamente 65°, onde o movimento será finalizado, e também

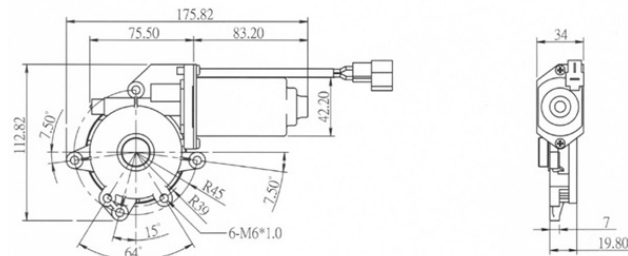
levando em conta um valor de 1,5 para o atrito do sistema, obtemos um valor de 11,6 N.m para o torque necessário para realizar o movimento da estrutura.

4.1.4 Cálculo da engrenagem de redução

Para a realização do dimensionamento da engrenagem de redução, primeiramente foi comparado o valor de torque que o motor dispunha, e o valor de torque final que a estrutura demandaria.

De acordo com as informações consultadas do motor elétrico, conforme figura 8, este possui 3 N.m de torque, e conforme cálculos realizados anteriormente, a estrutura necessita de um torque de 11,6 N.m.

Figura 8 – Informações técnicas do motor

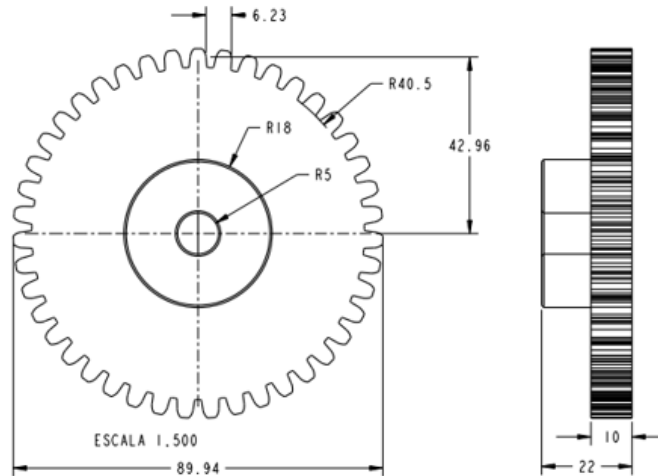


Especificação do motor		
Tensão nominal	DC 12V no terminal do motor	DC 24V no terminal do motor
Sem corrente de carga	3A MAX	2A MAX
Sem velocidade de carga	90 ± 10 RPM	90 ± 10 RPM
Carga nominal 3N * m	9A MAX	4,5 A MAX
	62 ± 10 RPM	62 ± 10 RPM
Impedir	10 ± 2,5 N * m	10 ± 2,5 N * m
	30A MAX	15A MAX
Resistência de isolamento	1M Ohm min	1M Ohm min
Rigidez dielétrica	AC 600V entre o revestimento e o terminal por 1 segundo	

Fonte: Adaptado de Rebeck Enterprise

Sabendo que a engrenagem presente no motor possui um diâmetro de 21 mm, módulo 2, 8 dentes e 4,5 mm a altura do dente, a engrenagem de redução foi calculada para aumentar o torque disponível em torno de 4,28 vezes mais, para atender a necessidade da estrutura. Ou seja, a engrenagem redutora foi feita com um diâmetro externo de 89,94 mm, módulo 2, 43 dentes e 4,5 mm a altura do dente, conforme figura 9:

Figura 9 – Engrenagem de redução



Fonte: Autor, 2020

4.2 MODELAGEM DO PROTÓTIPO

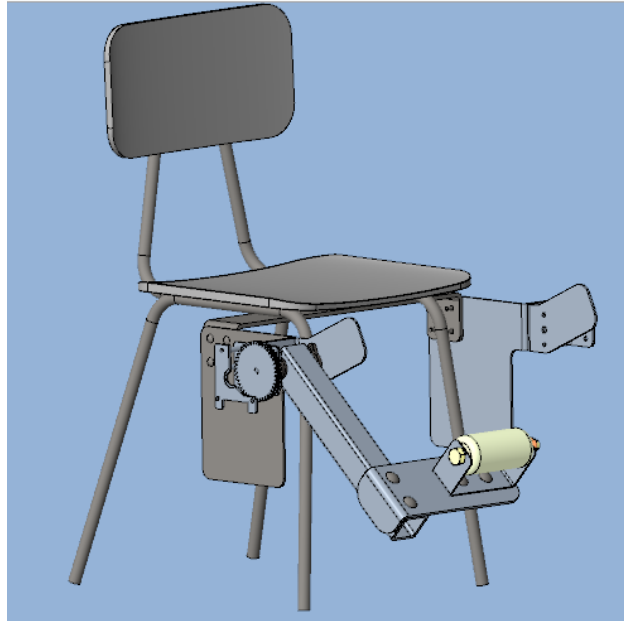
Neste tópico, será abordado como foi feita a modelagem do protótipo e seu desenvolvimento, ao que se refere a estrutura, tanto 3D quanto em 2D, ambas necessárias para a simulação do funcionamento da estrutura bem como para a manufatura e compra de peças/elementos de fixação necessários, através da visualização dos desenhos técnicos individuais de cada elemento.

4.2.1 Modelagem em software do protótipo

Para que ocorresse o desenvolvimento do protótipo, foi utilizado um software de modelagem 3D, tanto para a modelagem quanto simulação do projeto. Esta partiu de um protótipo já existente, porém com cunho pneumático, ou seja, a estrutura existente foi adaptada para receber um sistema de acionamento elétrico.

Para a realização deste, foi utilizada uma cadeira do tipo escolar, e adaptada a estrutura na mesma, conforme figura 10:

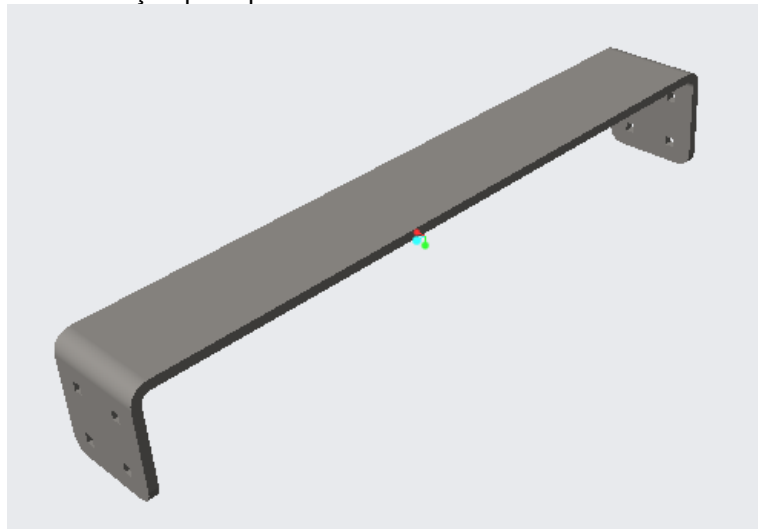
Figura 10 – Montagem da estrutura



Fonte: Autor, 2020

A fixação da estrutura dá-se por meio da estrutura principal, mostrada na figura 11, que é fixada embaixo da cadeira, e que também possibilita a troca de lado do restante da estrutura, conforme a necessidade do paciente.

Figura 11 – Estrutura de fixação principal

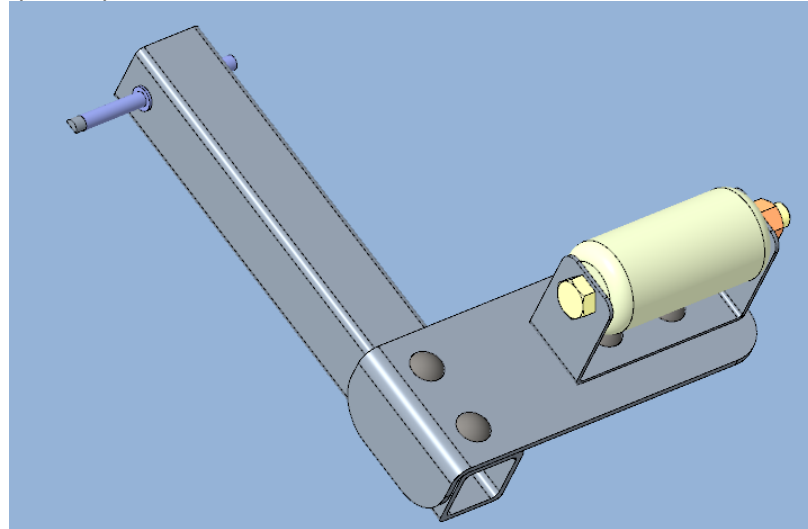


Fonte: Autor, 2020

Quanto à estrutura responsável pelo apoio do membro inferior, para realizar o movimento, trata-se de um tubo quadrado aço SAE 1020, com um suporte feito em chapa do mesmo material, para o paciente apoiar a panturrilha, mantendo o mesmo de forma confortável na cadeira. Essa estrutura é fixada na cadeira por meio

de um eixo, o que é soldado na estrutura para transmitir o movimento recebido para o restante da estrutura, conforme figura 12, chamado de conjunto suporte_perna.

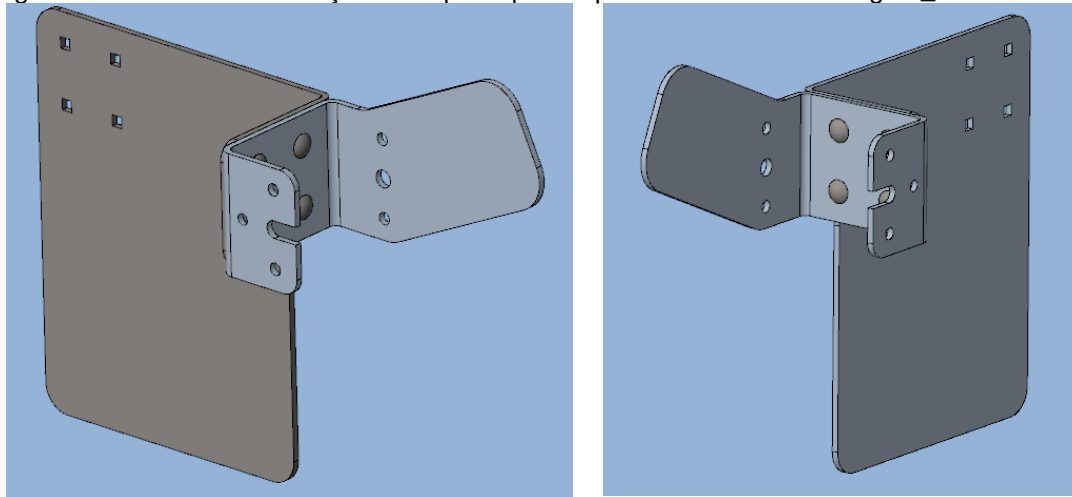
Figura 12 – Suporte para a perna



Fonte: Autor, 2020

A fixação da estrutura do suporte para a perna, mostrado na figura 12, na cadeira, dá-se por meio dos conjuntos mostrados na figura 13, fixadas a partir do eixo soldado que permite o movimento da estrutura quando acionado o motor.

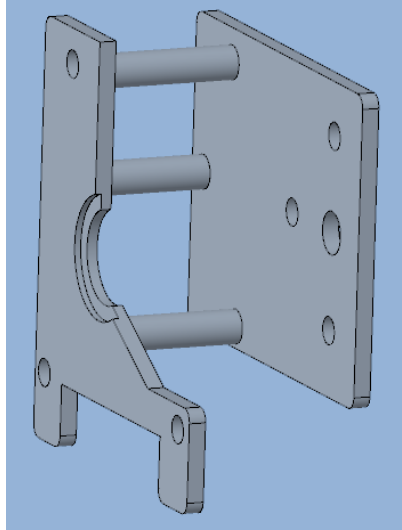
Figura 13 – Estrutura de fixação do suporte para a perna asm001 e montagem_lateral1



Fonte: Autor, 2020

Para a fixação do motor e da engrenagem, fora criado uma estrutura chamada suporte_engrenagem, utilizada para a fixação do motor e também para que a engrenagem deste tenha o contato necessário com a engrenagem redutora, fixada no eixo da estrutura suporte_perna, que transmitirá o movimento para a execução do movimento da perna do paciente, de acordo com a figura 14:

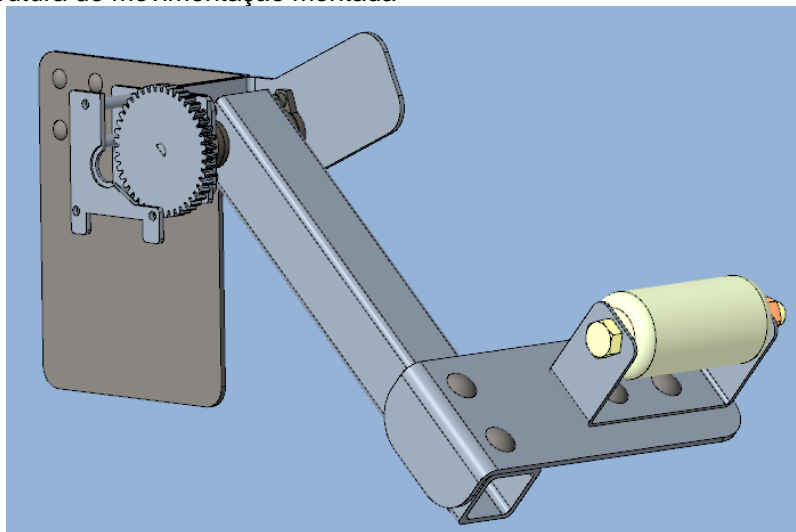
Figura 14 – Estrutura para fixação do motor



Fonte: Autor, 2020

A estrutura é montada conforme figura 15, com um eixo soldado, e duas buchas que permitem o movimento do mesmo no furo da estrutura, e também a engrenagem, responsável por transmitir o movimento para o eixo.

Figura 15 – Estrutura de movimentação montada



Fonte: Autor, 2020

4.3 AQUISIÇÃO DOS MATERIAIS E MONTAGEM

Neste tópico, serão expostos os elementos necessários referentes a montagem da cadeira, tanto peças, elementos de fixação e ferramentas/equipamentos necessários para que esta ocorresse, trazendo também como ocorreu a montagem da estrutura a partir dos conjuntos montados no software CAD.

4.3.1 Materiais e peças utilizadas

Depois da modelagem desse protótipo e identificado qual motor seria usado na estrutura, foi realizado uma listagem de materiais que foram manufaturados e componentes que foram comprados, bem como os componentes que já estavam disponíveis na instituição, como algumas peças da cadeira.

Para um melhor controle dos custos do projeto, os componentes manufaturados, feitos em uma empresa terceirizada, foram listados na tabela 6, bem como suas quantidades e respectivos valores.

Tabela 6 – Itens manufaturados

Componente	Quantidade	Custo unitário	Custo Total
Eixo	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
Engrenagem de redução	1	R\$ 115,00	R\$ 115,00
Suporte para engrenagem interna	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Suporte para engrenagem externa	1	R\$ 22,00	R\$ 22,00
Pinos	3	R\$ 4,00	R\$ 12,00
		Total:	R\$ 189,00

Fonte: Autor, 2020

Alguns dos itens da montagem da cadeira já estavam disponíveis na instituição, feitos e utilizados no projeto pneumático da mesma. A relação dos itens utilizados pode ser conferida conforme tabela 7:

Tabela 7 – Itens aproveitados

Descrição do componente	Quantidade
Travessa Suporte	1
Chapa Lateral Direita	1
Chapa Panturrilha	1
Chapa Suporte	1
Suporte Eixo Direito	1
Tubo Suporte	1
Chapa Lateral Esquerda	1
Suporte Eixo Esquerdo	1

Fonte: Autor, 2020

Quanto aos materiais que foram adquiridos no comércio local, tratam-se basicamente de elementos de fixação, por se tratarem de elementos padronizados, são de pequeno custo e acessíveis para a compra. Estes podem ser vistos na tabela 8, conforme descrição e quantidade utilizadas:

Tabela 8 – Elementos de fixação utilizados

Código	Item	Quantia	Valor unit.	Valor Total
PR0031	Parafuso Francês M6 X 20 mm	16	R\$ 0,30	R\$ 4,80
PR0050	Parafuso Francês M10 X 35 mm	2	R\$ 0,80	R\$ 1,60
PR0063	Parafuso Francês M10 X 70 mm	2	R\$ 1,40	R\$ 2,80
PR0002	Parafuso Allen M6 X 20 mm	8	R\$ 0,40	R\$ 3,20
PR0015	Parafuso Sextavado M14 X 160 mm	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
PO0001	Porca M6	16	R\$ 0,20	R\$ 3,20
PO0003	Porca M10	4	R\$ 0,60	R\$ 2,40
-	Porca M10 Borboleta	2	R\$ 0,60	R\$ 1,60
-	Arruela M6	24	R\$ 0,10	R\$ 2,40
AR0003	Arruela M10	4	R\$ 0,20	R\$ 0,80
	Total de Itens	79	Total:	R\$ 34,80

Fonte: Autor, 2020

Quanto ao motor utilizado no projeto, este foi obtido por empréstimo, tendo que ser devolvido após o uso do mesmo.

4.3.2 Recursos utilizados para montagem

Para realizar a fixação dos conjuntos na cadeira, e também a adaptação de algumas peças já existentes para acoplar novos componentes, foram utilizados os seguintes equipamentos e ferramentas, conforme a tabela 9:

Tabela 9 – Ferramentas e equipamentos utilizados na montagem

Descrição
Aparelho de solda MIG
Chave Allen 8
Chave Allen 4
Chave de boca 10
Chave de boca 13
Chave de boca 17
Furadeira

Fonte: Autor, 2020

Para que a montagem fosse realizada, foi necessária a adaptação de algumas peças, como a adição de furos para fixação de mais componentes, bem como o aumento de outros, sendo utilizada uma máquina furadeira, para a realização das modificações citadas.

Para a realização da montagem da estrutura, foi fixada a travessa suporte na cadeira, responsável pela fixação do restante da estrutura, tanto do lado esquerdo quanto do lado direito, utilizando os parafusos que foram colocados na montagem 3D, e as respectivas chaves para a montagem. Esta montagem foi chamada de cadeira_suporte.

A próxima etapa foi a realização da montagem do conjunto montagem_lateral1 que representa a estrutura do lado esquerdo e asm001, que representa a estrutura do lado direito, através do processo de solda e montagem por parafusos, que realizam a função de suporte do motor e também suporte para a estrutura, que sustentará os membros inferiores do paciente, conforme figura 16:

Figura 16 – Montagem estruturas laterais



Fonte: Autor, 2020

Em seguida foi realizada a montagem do conjunto suporte_perna, responsável pelo movimento da perna. Este então foi fixado no conjunto asm001, através do eixo soldado e dos elementos de fixação descritos no Apêndice A.

Após a fixação da estrutura principal de movimentação, foi montado a estrutura suporte_engrenagem, responsável pela fixação do motor, e também, devido a necessidade de possíveis ajustes ocasionados pelo encaixe das duas engrenagens (a engrenagem do motor e a engrenagem redutora), fora montado o motor e a engrenagem de redução neste mesmo momento. A montagem final da estrutura, pode ser conferida na figura 17:

Figura 17 – Montagem final da estrutura



Fonte: Autor, 2020

4.4 ACIONAMENTO ELÉTRICO

Para o acionamento da estrutura, foi necessário a utilização de um software para a simulação de circuitos e, posteriormente, um software para a programação utilizada para que este realize o movimento da estrutura, conforme será visto neste tópico.

4.4.1 Programação

A realização da programação para o acionamento do motor foi realizada a partir da interface própria do Arduino, conforme consta no Apêndice B.

Conforme programação, foi tomado o cuidado da realização de testes condicionais para a detecção de erros, tais como o usuário acionar ambos os botões ao mesmo tempo, o que pode gerar danos no motor (se forçado excessivamente), e também a colocação de dois sensores de fim de curso, para a realização do controle de posição da estrutura. Quando esta chegar no limite superior e acionar o botão fim de curso, o programa recebe esse sinal e não permite que a estrutura continue sendo acionada nesse sentido, da mesma forma acontece com o limite inferior.

Esse sistema evita que o motor seja exposto a sobrecargas, como aconteceria se o fim de curso fosse uma estrutura mecânica, onde não ocorreria a ação de desativar o motor assim que ele chegasse na posição final.

4.4.2 Esquema elétrico

Para que o acionamento elétrico ocorresse, foi primeiramente feita a simulação em um software de simulação de projetos eletrônicos, conforme apresentado no Apêndice C.

Conforme simulação, foram conectados nas portas digitais 5 e 6 do Arduino os botões de acionamento, respectivamente o que aciona para cima e o que aciona para baixo. Nas portas 7 e 8 foram conectados os sensores de fim de curso.

As portas 11 e 12 foram conectadas na ponte H, essa conectada no motor, sendo responsável pelo controle do mesmo.

Para realização dos testes práticos, foram utilizados os seguintes componentes, conforme tabela 10, com seus respectivos custos:

Tabela 10 – Itens para acionamento elétrico

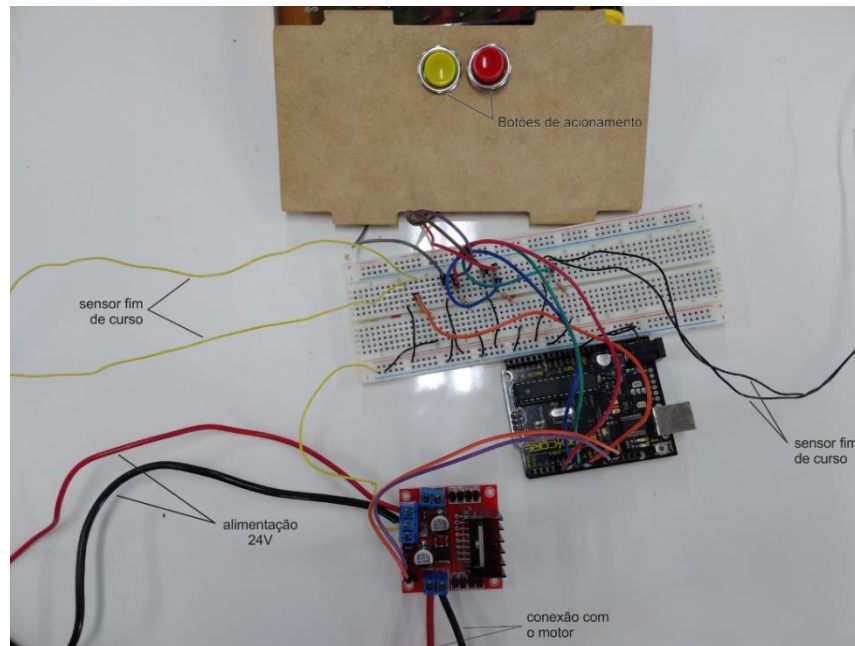
Quantidade	Item	Custo Unitário	Custo Total
2	Botões de acionamento	R\$ 5,00	R\$ 10,00
2	Sensores fim de curso	R\$ 33,00	R\$ 66,00
1	Protoboard	R\$ 00,00	R\$ 00,00
1	Ponte H	R\$ 00,00	R\$ 00,00
1	Arduino	R\$ 00,00	R\$ 00,00
20	Jumpers	R\$ 00,00	R\$ 00,00
4	Resistores 330 Ω	R\$ 00,00	R\$ 00,00
		Total:	R\$ 76,00

Fonte: Autor, 2020

Os componentes sem custos citados já estavam disponíveis.

A montagem dos componentes da tabela 10 foi realizada de acordo com o esquema elétrico simulado, mostrado na figura 18:

Figura 18 – Esquema elétrico



Fonte: Autor, 2020.

4.5 TESTES ESTRUTURAIS

Após a finalização da montagem estrutural do projeto, o próximo passo foi a realização dos testes funcionais. Para isso, o projeto contou com dois voluntários para realizar os testes, com estaturas e massas corpóreas distintas, uma vez que o protótipo deve atender a diferentes pacientes.

Abaixo, nas figuras 19 e 20 as imagens que demonstram os testes.

Figura 19 – Teste 1



Fonte: Autor, 2020.

Figura 20 – Teste 2



Fonte: Autor, 2020.

Para a validação do valor de torque máximo, foi utilizado pesos como teste, este tendo o valor de 4,3 kg, sendo acionada a estrutura com estas pequenas cargas sobre o escosto da panturrilha, conforme figura 21 e 22:

Figura 21 – Validação do torque máximo



Fonte: Autor, 2020.

Figura 22 – Peso utilizado



Fonte: Autor, 2020.

Com a realização destes testes, permitiu-se concluir que o protótipo atende a necessidade dos diferentes biotipos, apresentando-se funcional para pessoas de diferentes estaturas.

CONCLUSÃO

No decorrer do desenvolvimento deste projeto, o objetivo foi a adaptação de um motor de corrente contínua em uma estrutura de reabilitação física para pacientes com dificuldades motoras, com pouco custo, para auxiliar no processo de reabilitação dessas pessoas que necessitam de fisioterapia para a retomada de seus movimentos nos membros inferiores, sendo esta acionada por um motor elétrico.

Referente utilização dos parâmetros *D-H* para a formulação das equações necessárias para a simulação do torque necessário para o motor, mostrou-se eficaz o emprego deste método para alcançar o torque necessário para o acionamento da estrutura.

Referente manufatura de peças e componentes necessários para a montagem e adaptação da estrutura, essa mostrou-se factível, utilizando materiais em aço carbono, com processo de fabricação dominado pela indústria metalmeccânica, uma das áreas mais pujantes da região.

Uma das dificuldades encontradas foi da adaptação do motor na estrutura, em relação da transmissão do movimento para a estrutura que seria responsável pelo movimento do membro, sendo esta optada pela utilização de uma engrenagem de redução, que além de transmitir o movimento em questão, também aumenta a força transmitida para o acionamento da estrutura.

Com a execução de testes do protótipo, constatou-se que possíveis melhorias podem ser feitas em um projeto futuro, como a utilização de um motor de passo, mas, de forma geral, os objetivos citados no início do projeto foram alcançados.

Como sugestões para futuros trabalhos, indica-se que seja estabelecido um sistema de controle eletrônico, que seja utilizado um motor mais robusto e a redução da massa da parte móvel da estrutura, porém, sem que ocorra a redução de sua resistência a esforços mecânicos. Sugere-se também que, para o acionamento eletrônico, seja utilizado outro microcontrolador, tendo em vista que para esse tipo de trabalho, o uso do Arduíno não seja o ideal.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, Júlia. **Introdução à ergonomia: da prática à teoria**. São Paulo: Blucher, 2009.
- ARDUINO Store. [s.d]. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 20 ago. 2020
- BALAFOUTIS, C. A.; PATEL, R. V.: **Dynamic analysis of robot manipulators: a Cartesian tensor approach**. Canada: Springer-Science+Business Media, LLC, 1991.
- BEHNEN, Vânia Luisa. **Modelagem matemática de um robô scara com acionamento pneumático e identificação experimental das principais não linearidades**. 2017. Pós Graduação em Modelagem Matemática – UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2017.
- BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. **Motor de passo**. Niterói: [s.i].Universidade Federal Fluminense, 2008.
- COPPIN, Ben. **Inteligência artificial**. Tradução e revisão técnica: Jorge Duarte Pires Valério. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CRAIG, Jonh J. **Robótica**. México: Pearson Educación, 2006. Disponível em: <<http://files.yuki-phantomhive.webnode.mx/200000031-25e8a26e29/Robotica.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2020.
- FILHO, E. S. D. da S.; SANTOS, B. K. **Sistemas hidráulicos e pneumáticos**. Porto Alegre: Sagah, 2018.
- FRANCHI, Clairton Moro. **Sistema de acionamento elétrico**. São Paulo: Érica, 2014.
- GARDIN, João Pedro Rodrigues. **Projeto de uma estrutura pneumática para reabilitação física de membros inferiores**. 2019. Bacharelado em Engenharia Mecânica – FAHOR – Faculdade Horizontina, Horizontina – RS, 2019.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GIMENEZ, Salvador Pinillos. **Microcontroladores 8051: conceitos, operações, fluxogramas e programação**. São Paulo: Érica, 2015.
- JUNIOR, Sergio Luiz Stevan; SILVA, Rodrigo Adamshuk. **Automação e instrumentação industrial com arduino: teoria e projetos**. São Paulo: Érica, 2015.
- KHALILI D.; ZOMLEFER, M. **An intelligent robotic system for rehabilitation of joints and estimation of body segment parameters**. IEEE Trans Biomed Eng. 1988;35(2): p. 138–46.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MATARIĆ, Maja J. **Introdução à robótica**. São Paulo: Editora Unesp/Blucher, 2014.

MAYWORM, Sandra Helena. **História e fundamentos da fisioterapia**. Rio de Janeiro: Seses, 2016.

MUNARI, Bruno. **Das coisas nascem coisas**. Tradução de José Manuel de Vasconcelos. Lisboa: Edições 70, 1981.

NETTO, J. M. de A.; FERNANDEZ, F. Y. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208891/cfi/26!/4/2@100:0:0.00>>. Acesso em: 07 jun. 2020.

NIKU, Saeed B. **An introduction to robotics: analysis, control, applications**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2010.

NORTON, Robert L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre: AMGH, 2011.

PINHEIRO, A. C.; CRIVELARO, M. **Conforto ambiental: iluminação, cores, ergonomia, paisagismo e critérios para projetos**. São Paulo: Érica, 2014.

PÖRSCH, M. R. M. H; **Modelagem Matemática e Controle Proporcional de uma Bancada Acionada Pneumaticamente para Simulação de Terrenos Inclinados**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

REBECK ENTERPRISE CO. **Motor de janela elétrica HY-2740^a**. Disponível em: <http://www.rebeck-motor.com/HY-2740A.htm>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SANTOS, W. E.; GORGULHO, J. H. C. **Robótica industrial: fundamentos, tecnologias, programação e simulação**. São Paulo: Érica, 2015.

SCIAVICCO, L; SICILIANO, B. **Modeling and control of robot manipulators**. Naples: McGraw-Hill, 1996.

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L. VILLANI, L.; ORIOLO, G. **Modelling, Planning and control**. Springer: London, 2009.

SOUSA, Daniel Rodrigues de; SOUZA, David José de. **Desbravando o PIC18: ensino didático**. São Paulo: Érica, 2012. 57

VALDIERO, Antonio Carlos; GEORGEN, Roberta. 2019. **A importância da modelagem matemática na engenharia:** estudo de caso de robótica para reabilitação, VIII Congresso de professores do ensino superior da rede sinodal. Faculdade IELUSC, Joinville – Santa Catarina.

WIERNER, Norbert. **Cibernética e Sociedade:** o uso humano de seres humanos. São Paulo: Cultrix, 1954. Disponível em: <https://monoskop.org/images/c/c0/Wiener_Norbert_Cibernetica_e_sociedade_O_uso_humano_de_serres_humanos.pdf>. Acesso em: 31 maio 2020.

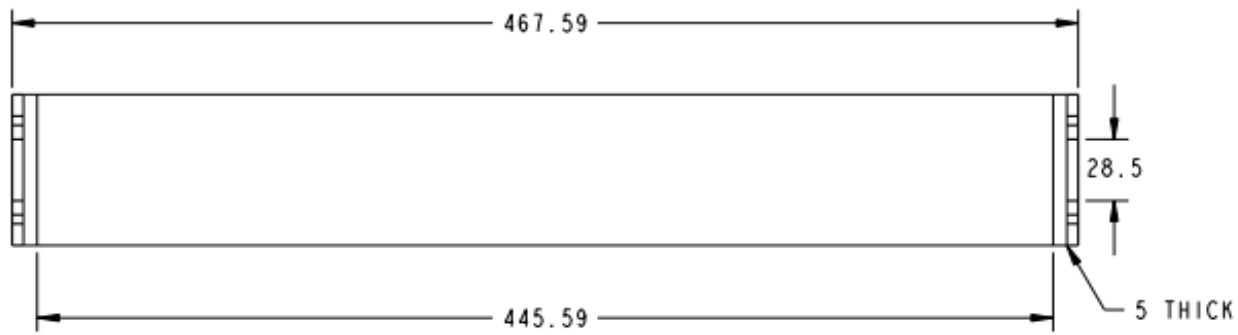
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DE PEÇAS E CONJUNTOS

Neste apêndice encontra-se detalhadas as peças e conjuntos utilizados na montagem do protótipo, conforme tabela 11:

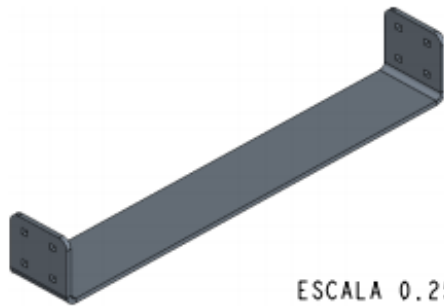
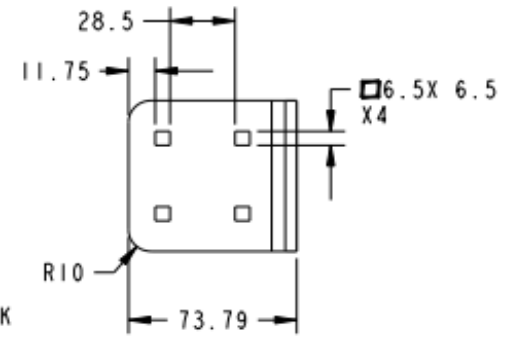
Tabela 11 – Peças e conjuntos

Código/Descrição	Nome	Quantidade	Material
0001	Travessa Suporte	1	AISI 1020
-	Chapa Lateral Direita	1	AISI 1020
0012	Chapa Panturrilha	1	AISI 1020
0026	Chapa Suporte	1	AISI 1020
0004	Suporte Eixo Direito	1	AISI 1020
PRT0006	Tubo Suporte	1	AISI 1020
-	Suporte Engrenagem Externo	1	AISI 1020
PRT0012	Engrenagem de redução	1	AISI 1020
0024	Chapa Lateral Esquerda	1	AISI 1020
0023	Suporte Eixo Esquerdo	1	AISI 1020
-	Pino	3	AISI 1020
-	Suporte Engrenagem Interno	1	AISI 1020
-	Eixo Engrenagem	1	AISI 1020
Suporte_perna	Conjunto suporte para a perna	1	
Cadeira_suporte	Cadeira com a travessa suporte	1	
Montagem_lateral1	Montagem lateral esquerda	1	
asm001	Montagem lateral direita	1	
Suporte_engrenagem	Suporte para engrenagem	1	
Montagem_final	Montagem Final	1	

Fonte: Autor, 2020

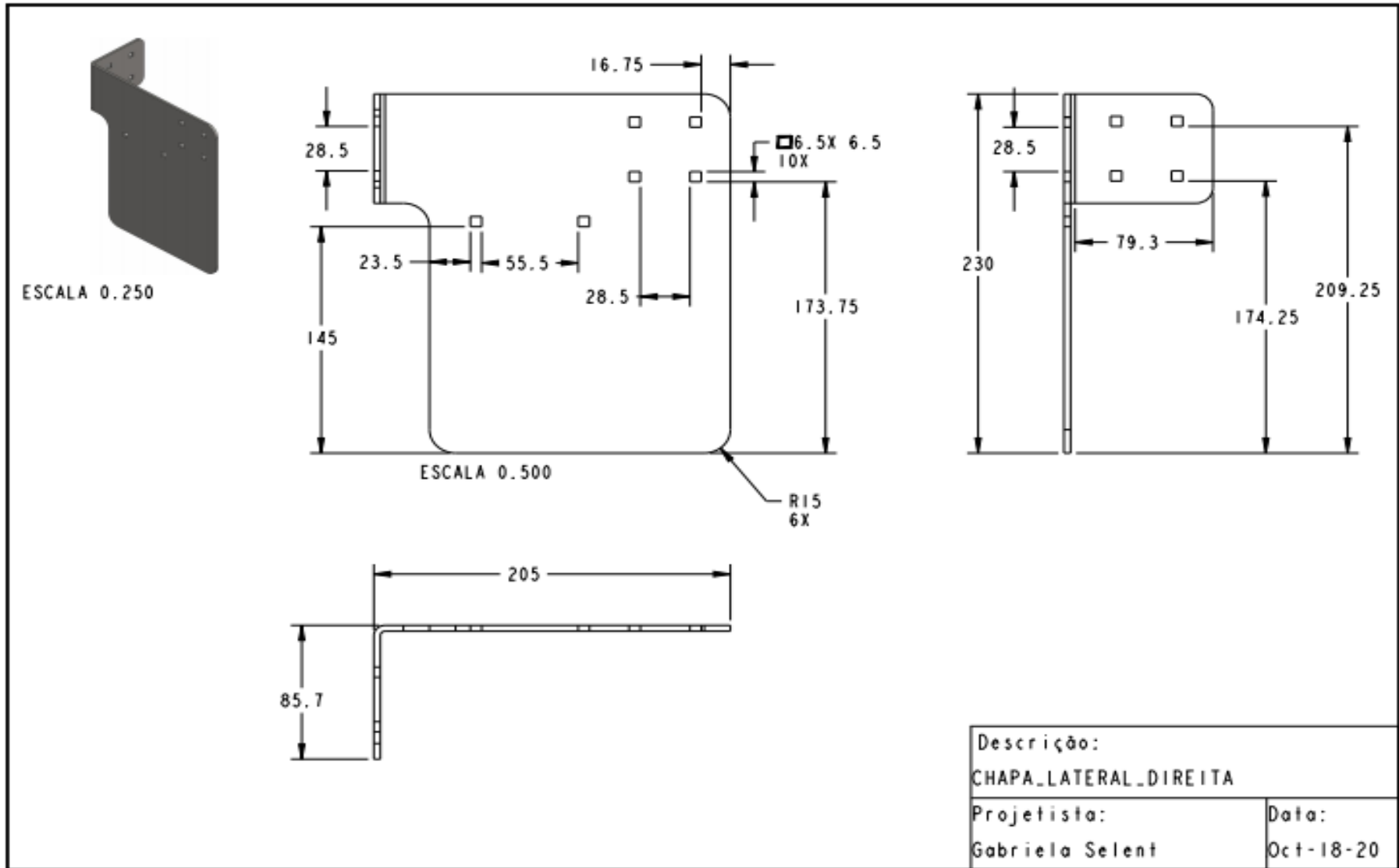


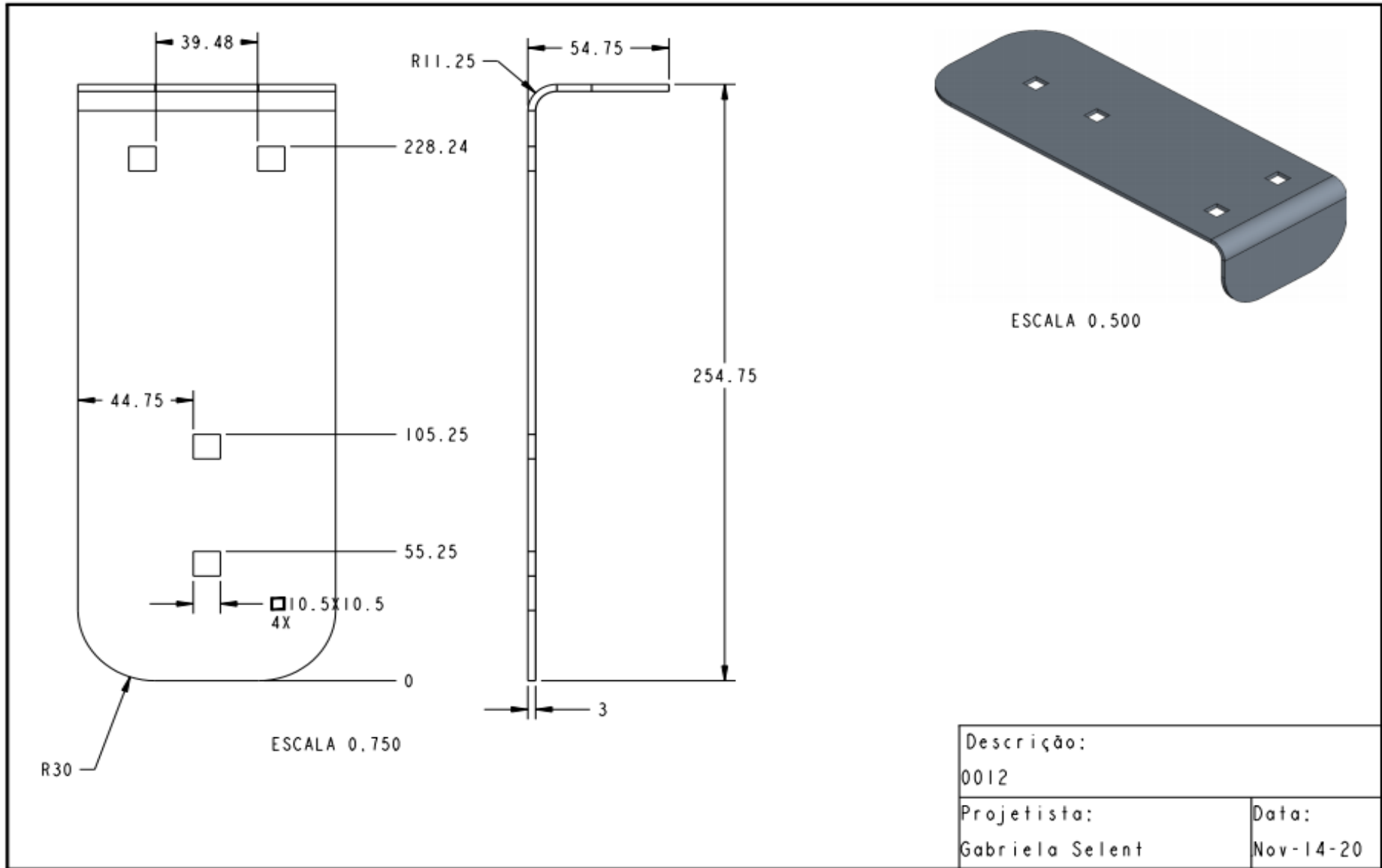
ESCALA 0.500

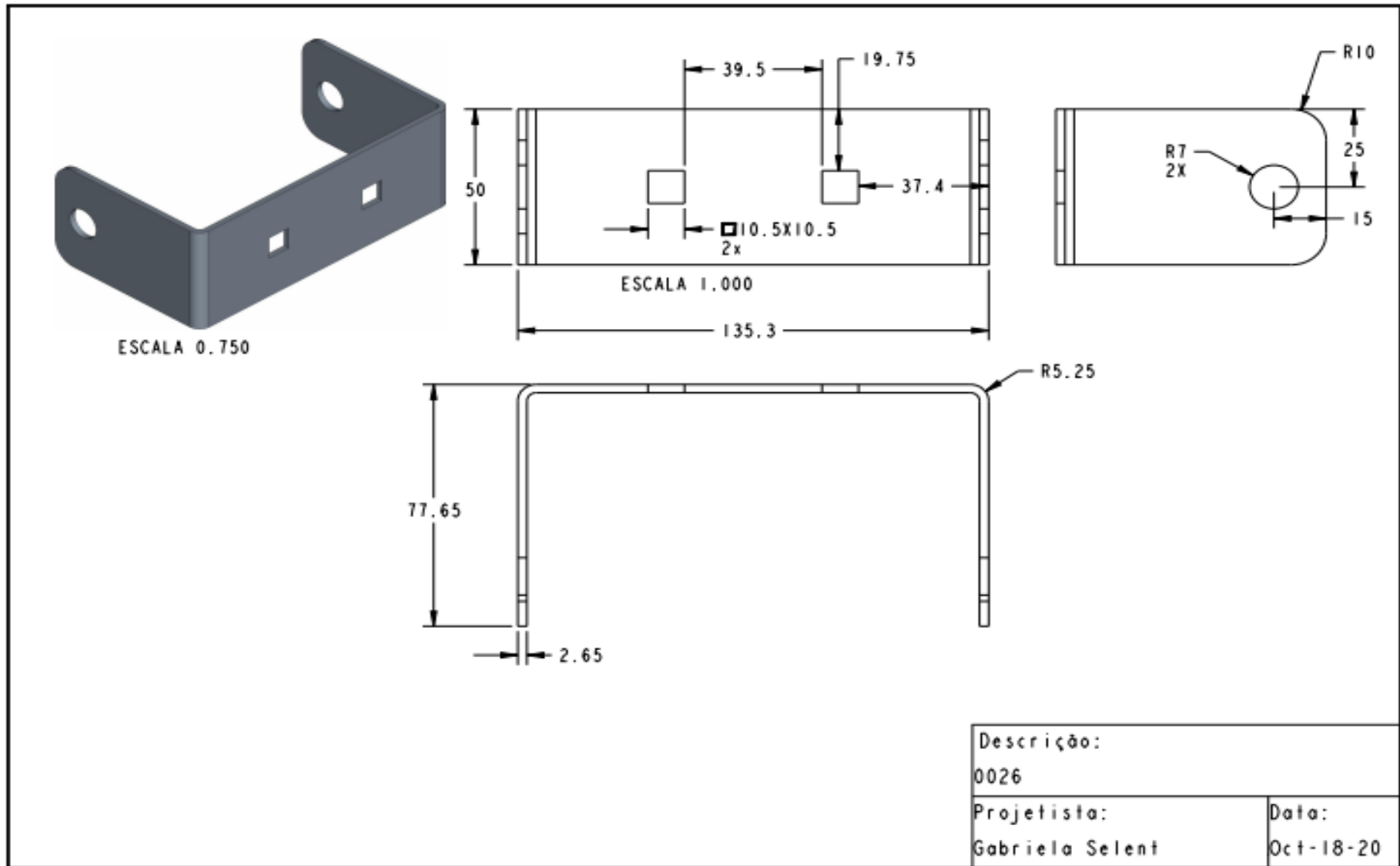


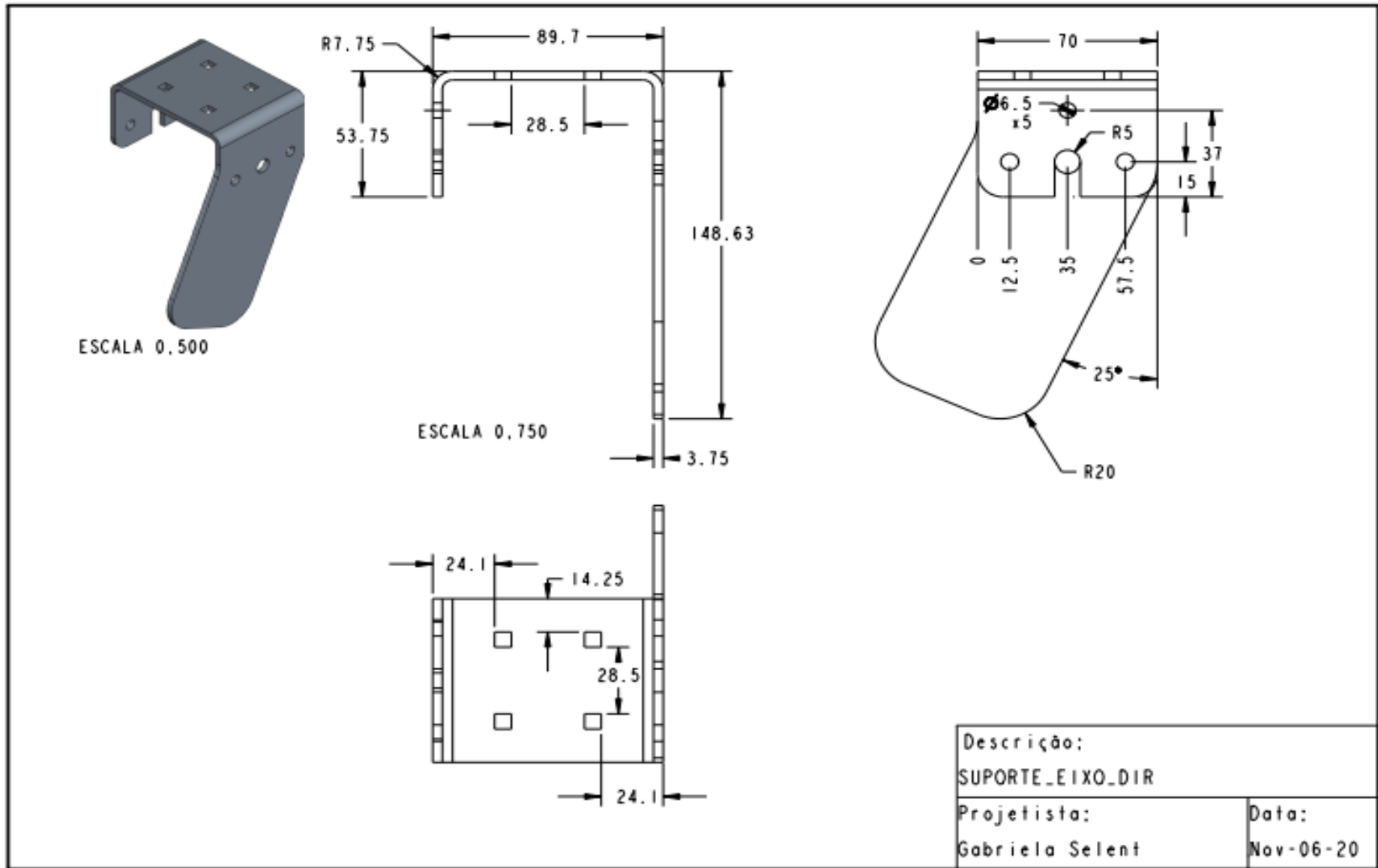
ESCALA 0.250

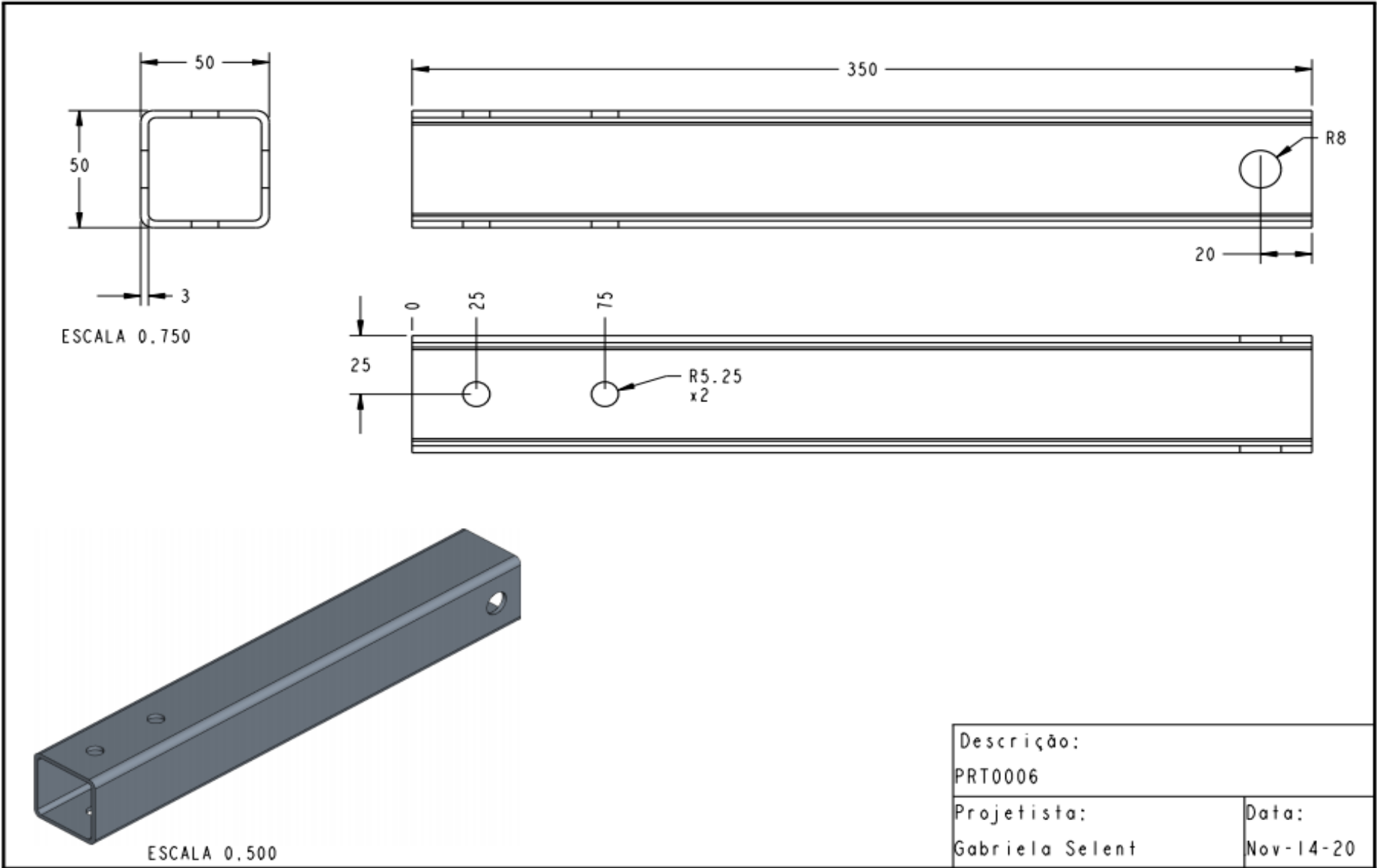
Descrição:	
TRAVESSA_SUORTE	
Projetista:	Data:
Gabriela Selent	Nov-14-20

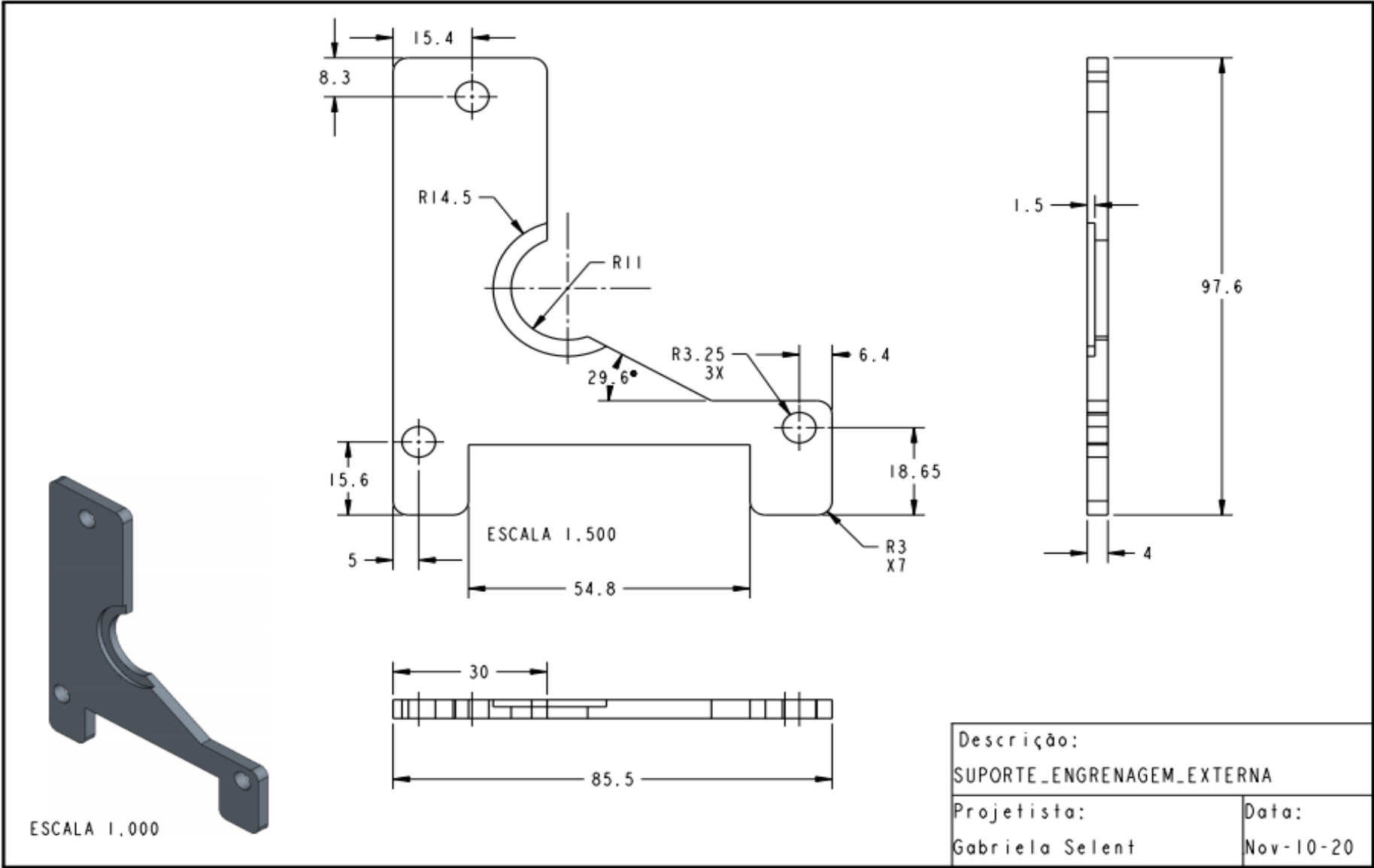


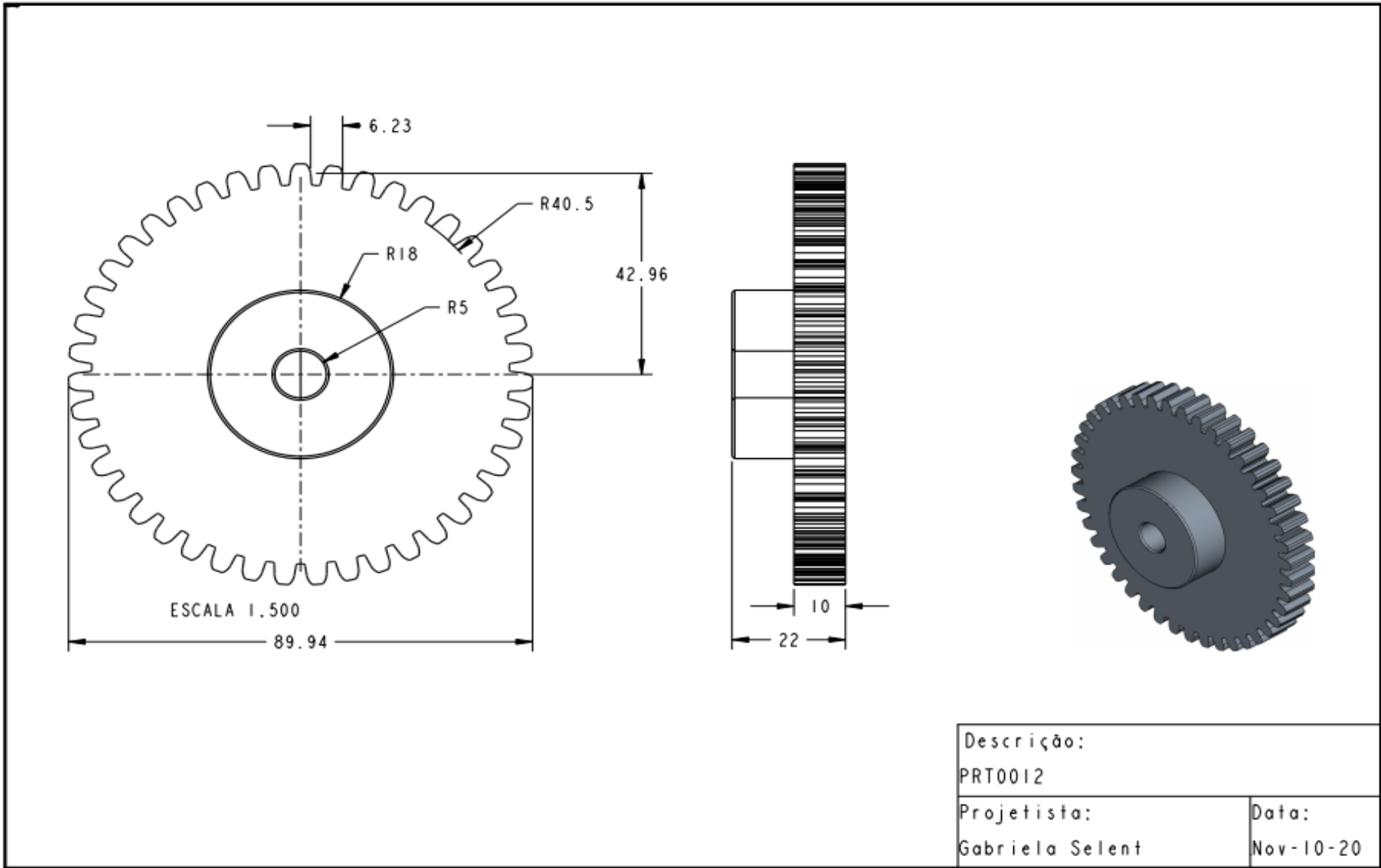


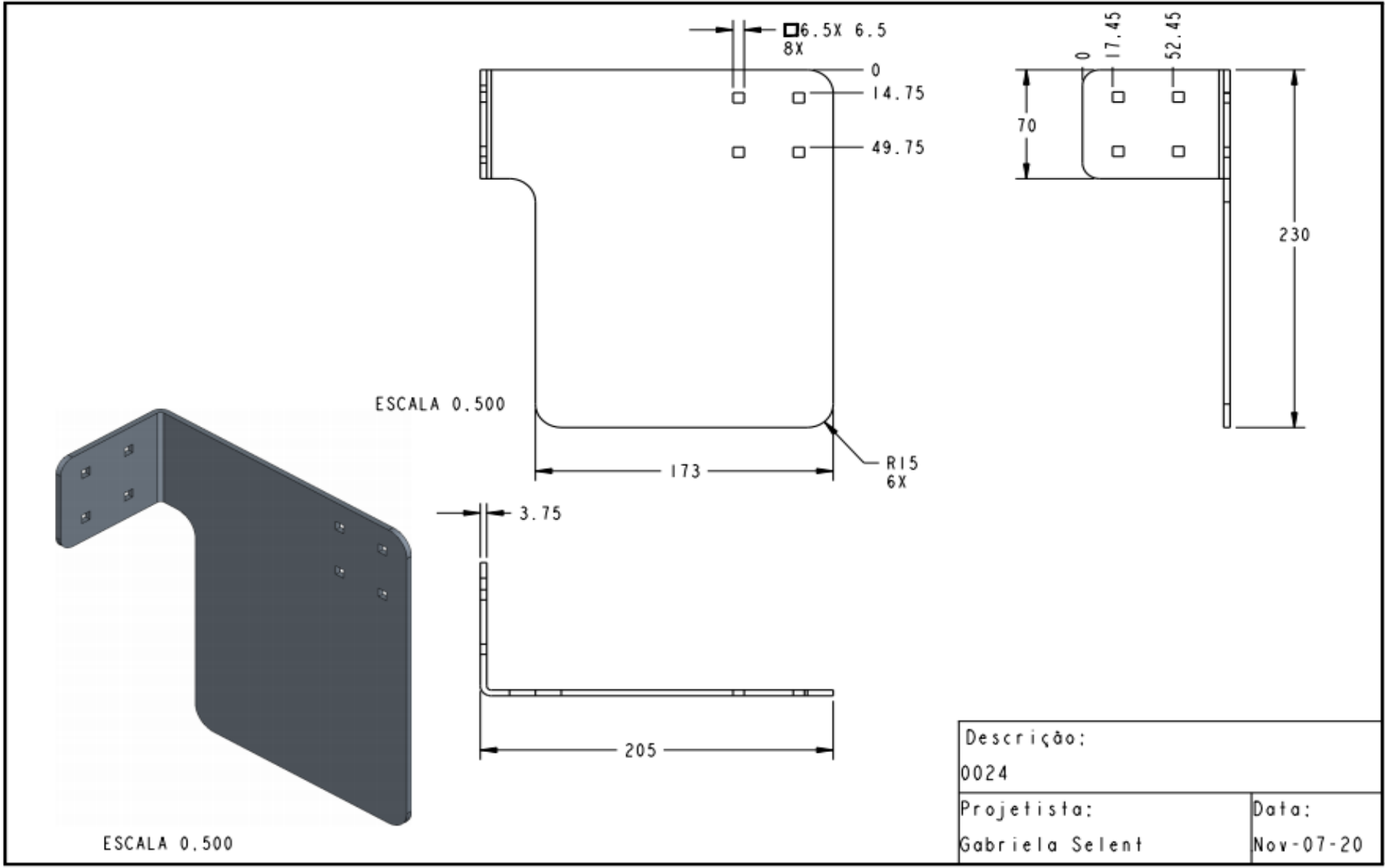


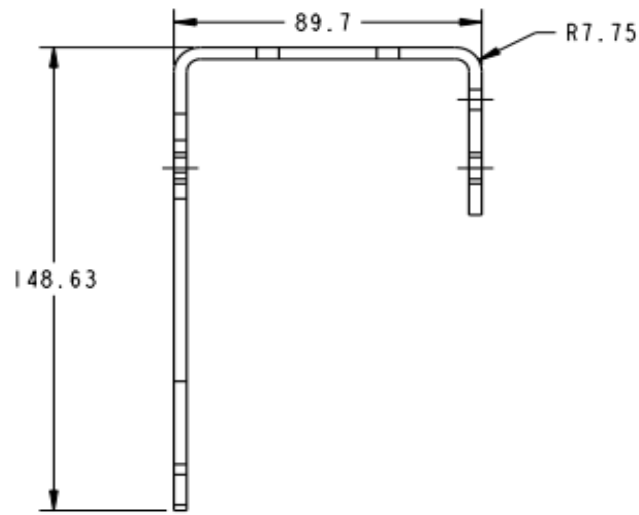




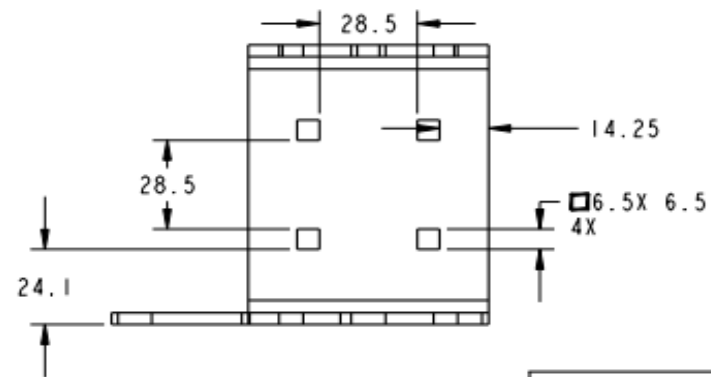
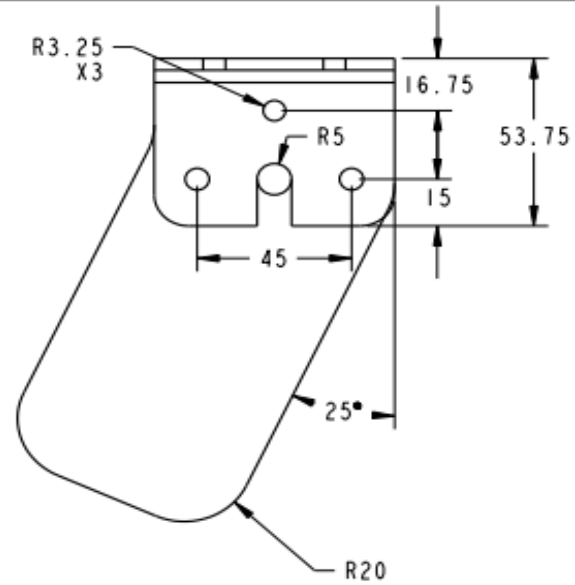






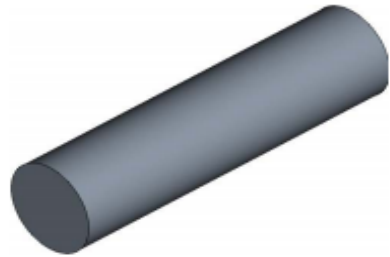


ESCALA 0.750

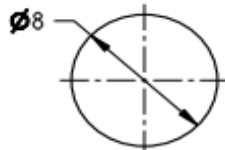


ESCALA 0.500

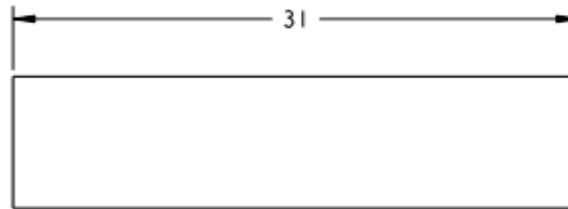
Descrição:	
0023	
Projetista:	Data:
Gabriela Selent	Nov-07-20



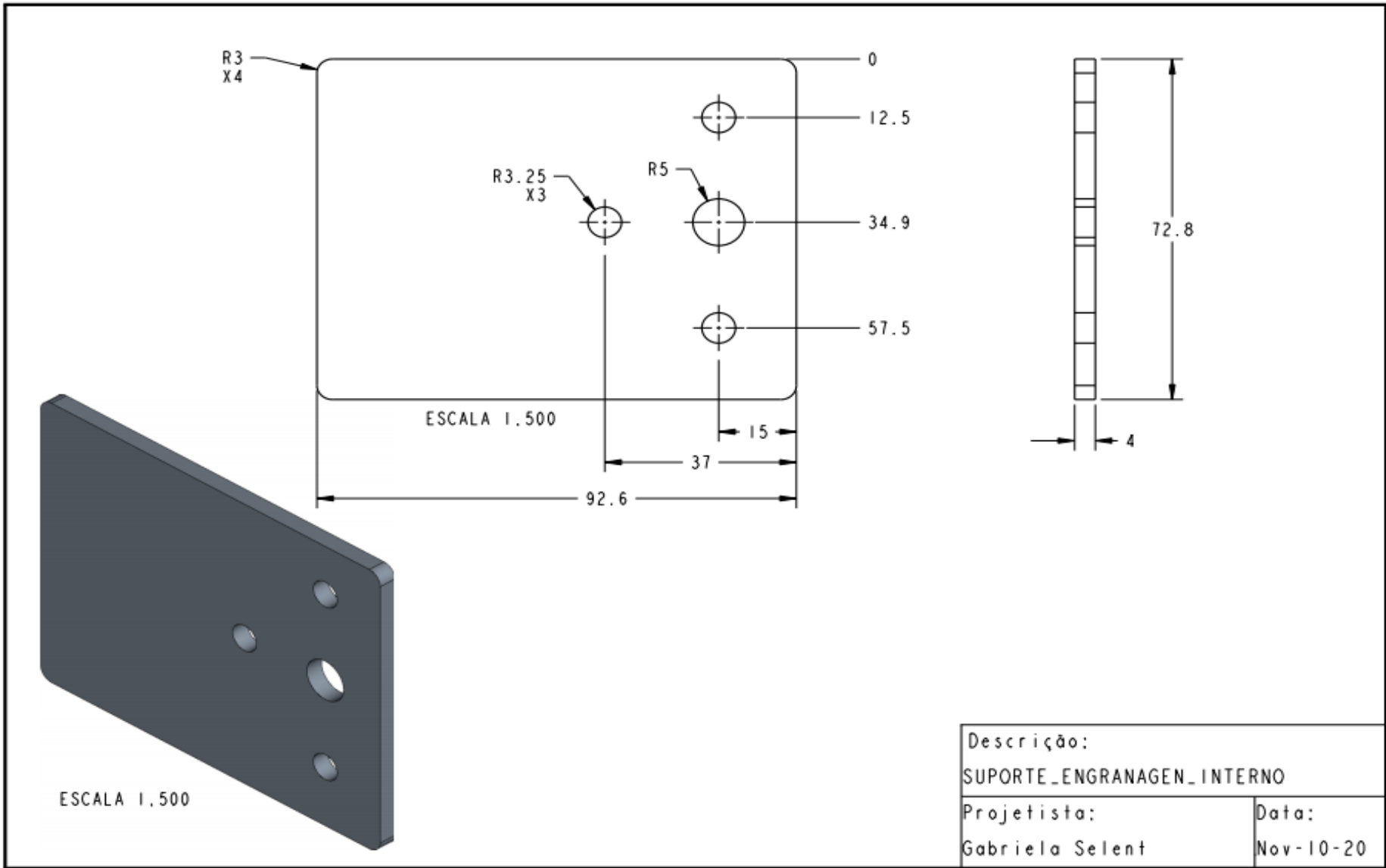
ESCALA 3.000

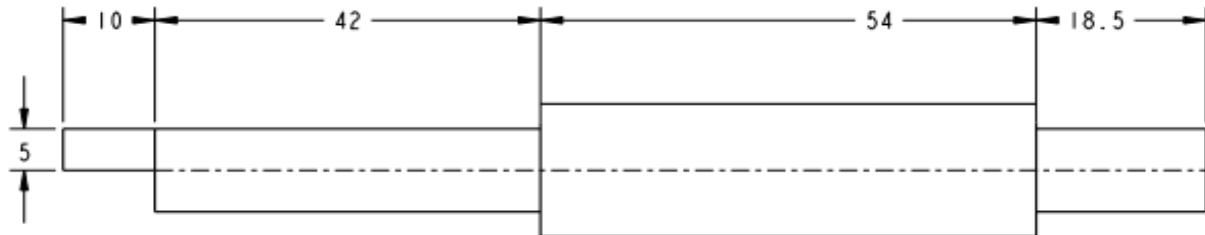


ESCALA 4.000

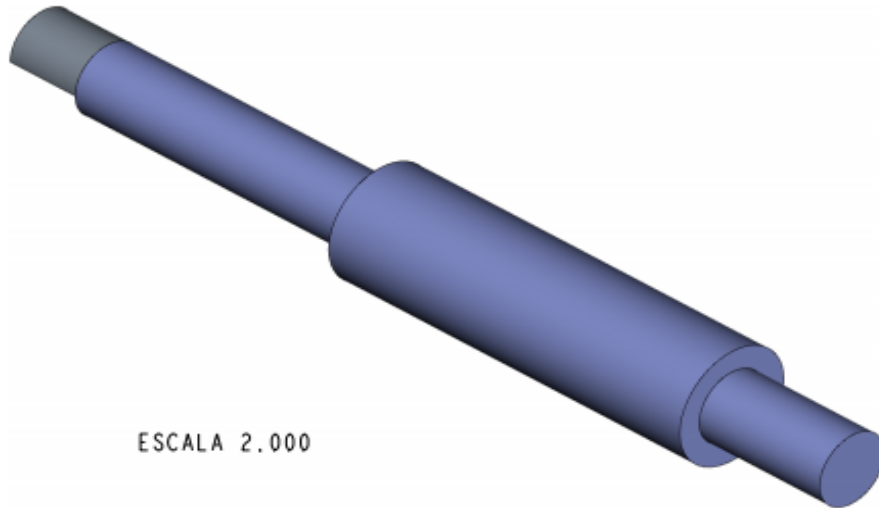
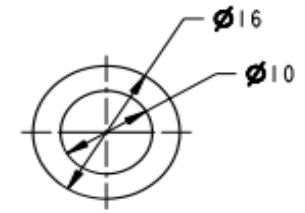


Descrição:	
PINO	
Projetista:	Data:
Gabriela Selent	Nov-10-20





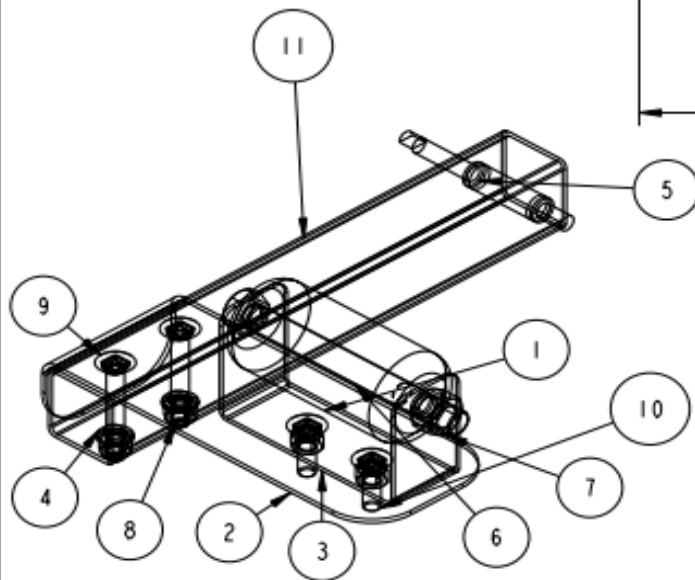
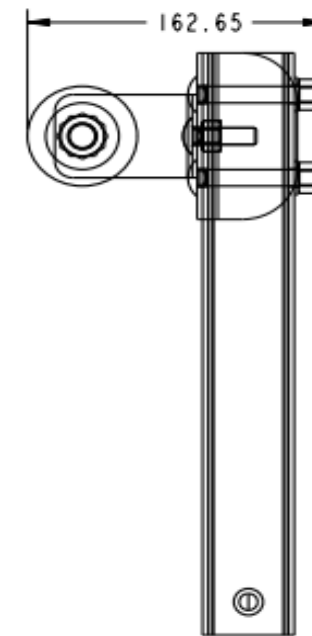
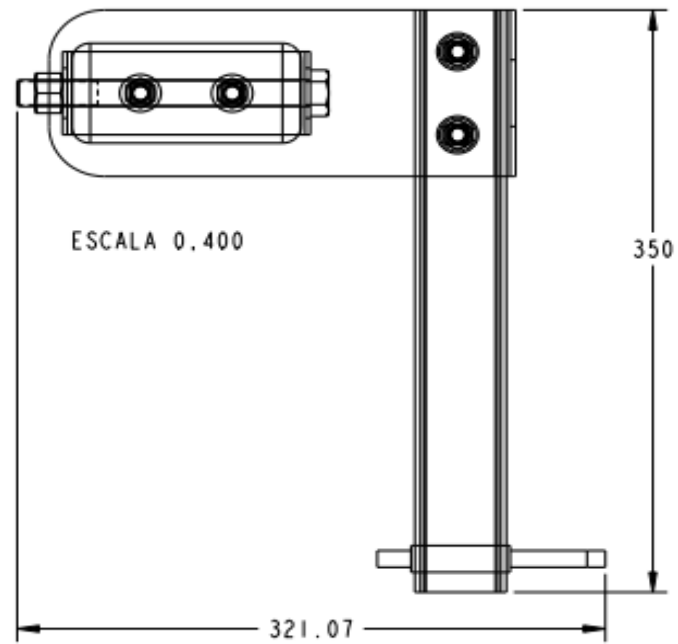
ESCALA 2.000



ESCALA 2.000

Descrição: EIXO_ENGRENAGEM	
Projetista: Gabriela Selent	Data: Nov-10-20

ITEM	QUANTIA	CODIGO
1	1	0009
2	1	0012
3	1	0026
4	2	AR0003
5	1	EIXO_ENGRENAGEM
6	1	PR0015
7	1	PO0015
8	4	PO0003
9	2	PR0050
10	2	PR0063
11	1	PRT0006



ESCALA 0.400

Descrição:
SUPORTE_PERNA

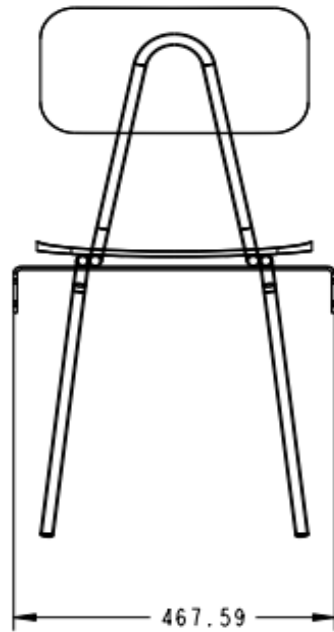
Projetista:
Gabriela Selent

Data:
Nov-15-20

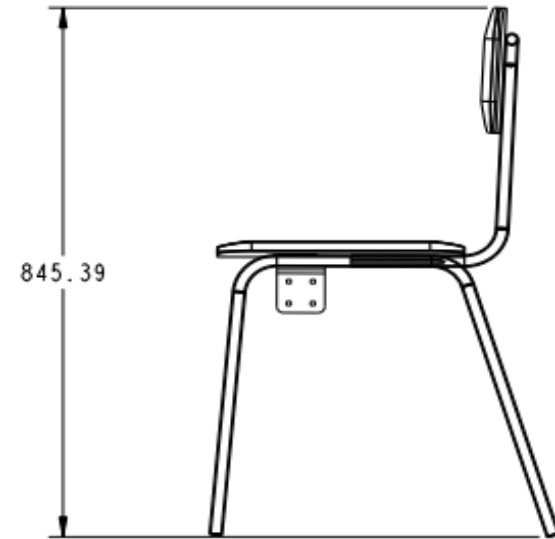
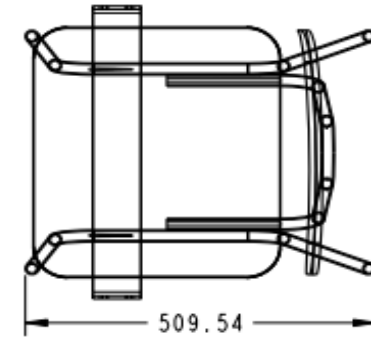
ITEM	QUANTIA	CODIGO
1	1	CADEIRA
2	1	TRAVESSA_SUORTE



ESCALA 0.150



ESCALA 0.150

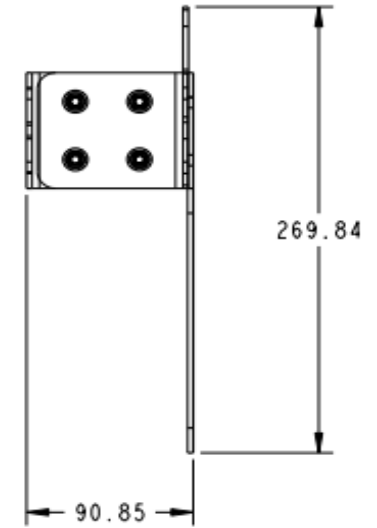
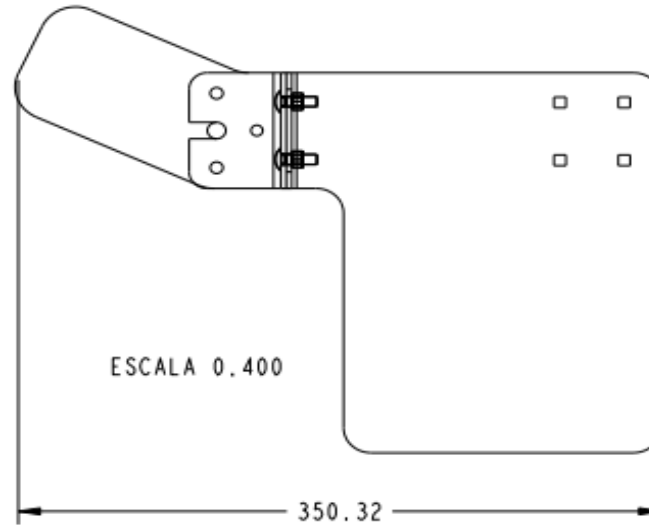
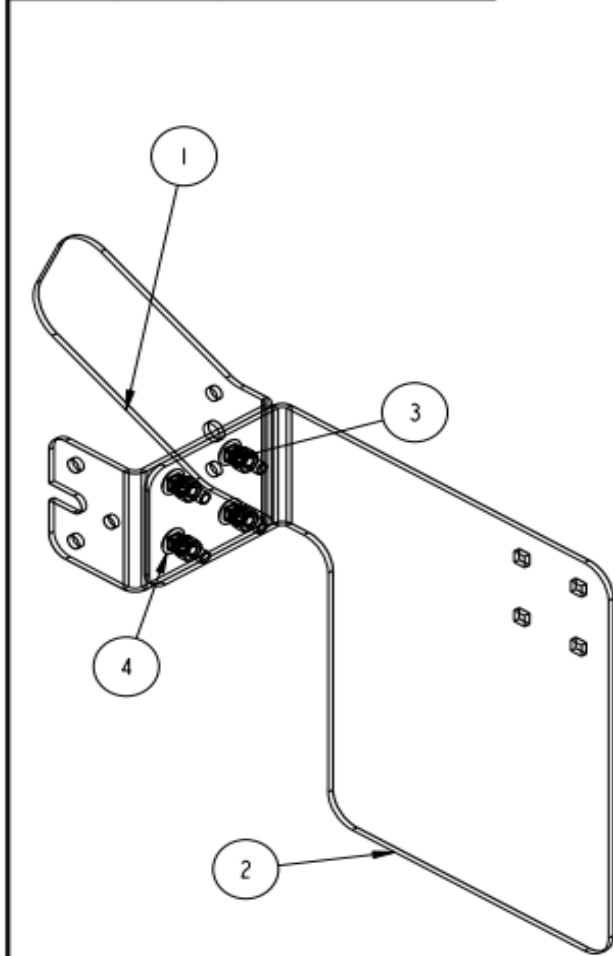


Descrição:
CADEIRA_SUORTES

Projetista:
Gabriela Selent

Data:
Nov-14-20

ITEM	QUANTIA	CÓDIGO
1	1	0023
2	1	0024
3	4	PO001
4	4	PR0031



Descrição:

MONTAGEM_LATERAL I

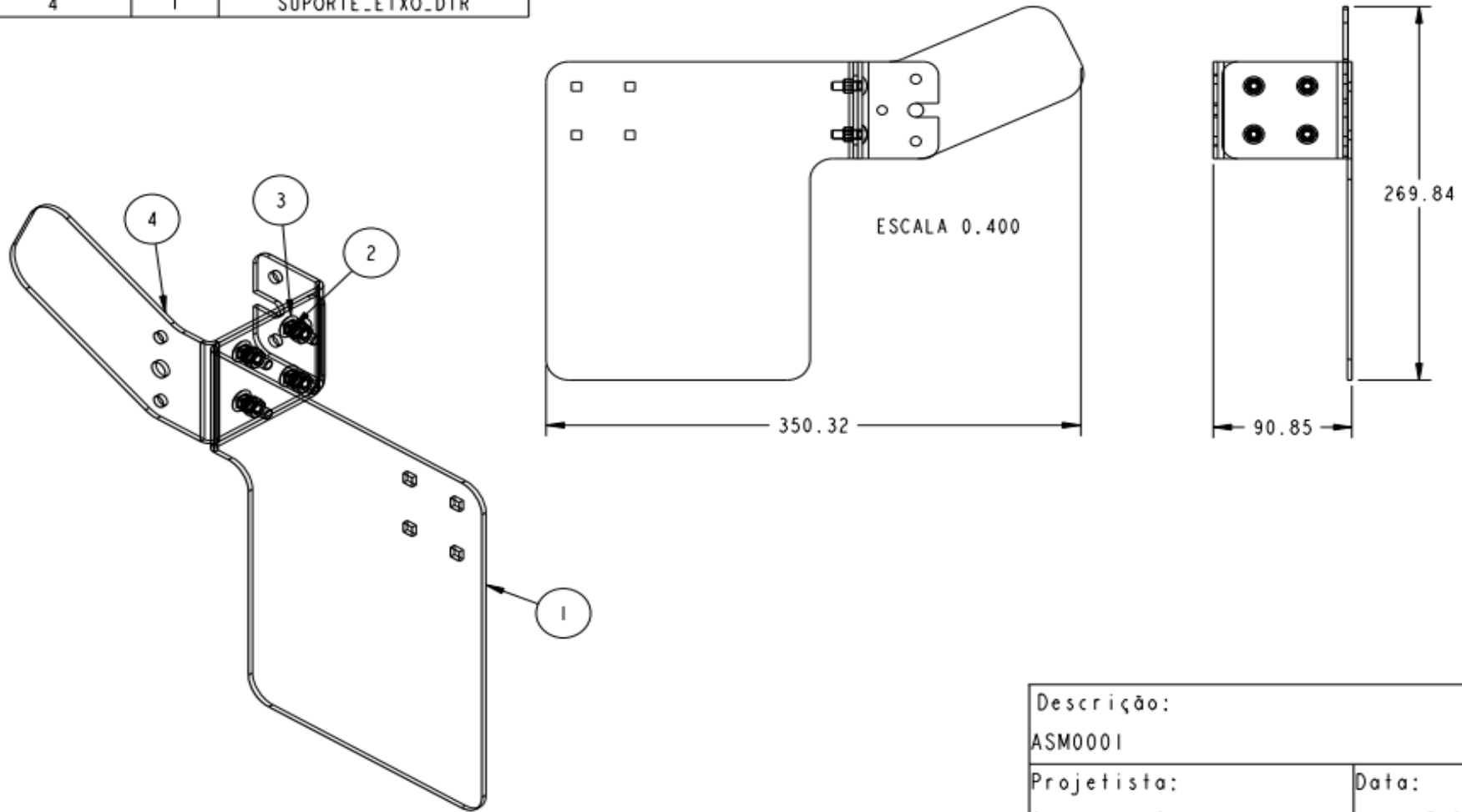
Projetista:

Gabriela Selent

Data:

Nov-15-20

ITEM	QUANTIA	CODIGO
1	1	CHAPA_LATERAL_DIREITA
2	4	PO0001
3	4	PR0031
4	1	SUPORE_EIXO_DIR



Descrição:

ASM0001

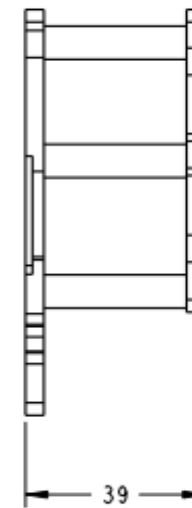
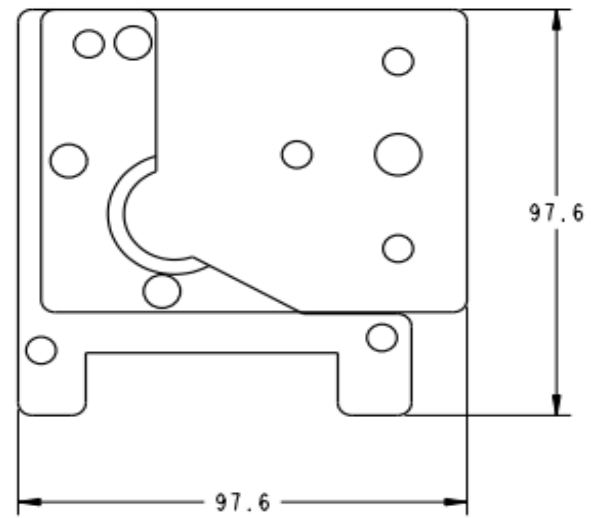
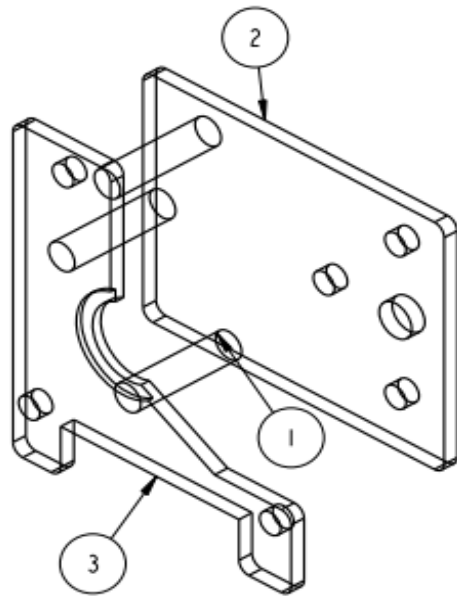
Projetista:

Gabriela Selent

Data:

Nov-15-20

ITEM	QUANTIA	CODIGO
1	3	PINO
2	1	SUPORTE_ENGRANAGEN_INTERNO
3	1	SUPORTE_ENGRENAGEM_EXTERNA



Descrição:

SUPORTE_ENGRENAGEM

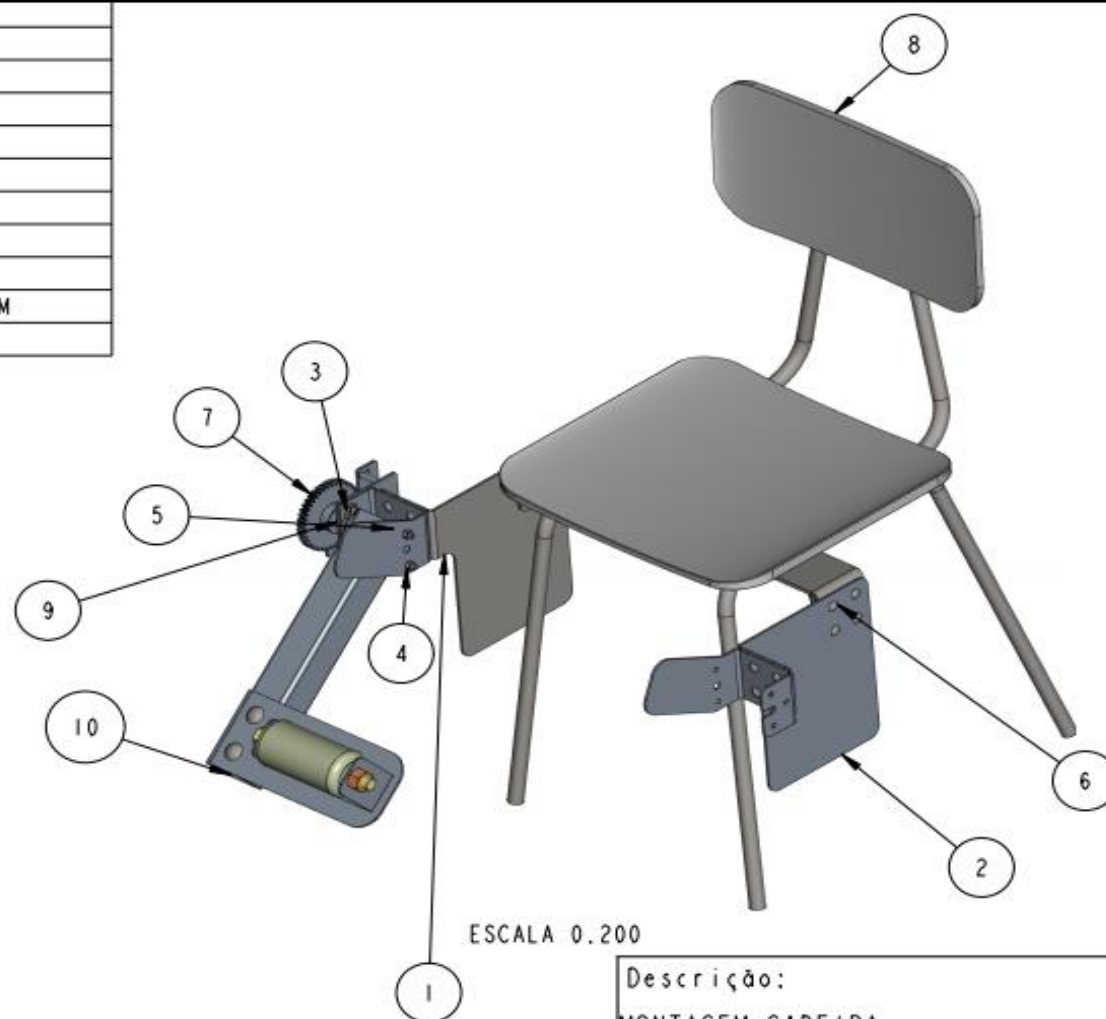
Projetista:

Gabriela Selent

Data:

Nov-15-20

ITEM	QUANTIA	CÓDIGO
1	1	ASM0001
2	1	SUPOTE_LATERAL I
3	2	MANCAIS
4	13	PO0001
5	5	PR0002
6	8	PR0031
7	1	PRT0012
8	1	CADEIRA_SUPORTE
9	1	SUPOTE_ENGRENAGEM
10	1	SUPOTE_PERNA



ESCALA 0.200

Descrição:

MONTAGEM_CADEIRA

Projetista:

Gabriela Selent

Data:

Nov-15-20

APÊNDICE B – PROGRAMA UTILIZADO

```
int botao_cima = 5; // setando os pinos que serão usados no Arduino
int botao_baixo = 6;
int botao_limite_cima = 7;
int botao_limite_baixo = 8;

int motor_A = 11;
int motor_B = 12;

int tempo = 10; // variável para tempo entre leituras

void pracima(){ // aciona o suporte_perna para cima
    digitalWrite(motor_A, HIGH);
    digitalWrite(motor_B, LOW);
}

void prabaixo(){ // aciona o suporte_perna para baixo
    digitalWrite(motor_A, LOW);
    digitalWrite(motor_B, HIGH);
}

void para(){ //desativa o motor
    digitalWrite(motor_A, LOW);
    digitalWrite(motor_B, LOW);
}

void setup() {
    pinMode(botao_cima, INPUT);
    pinMode(botao_baixo, INPUT);
    pinMode(botao_limite_cima, INPUT);
    pinMode(botao_limite_baixo, INPUT);

    pinMode(motor_A, OUTPUT);
    pinMode(motor_B, OUTPUT);
}
```

```
digitalWrite(motor_A, LOW);
digitalWrite(motor_B, LOW);
}

void loop() { // testes condicionais

if (digitalRead(botao_cima) == 1 && digitalRead(botao_baixo) == 1){

}

}else{
if (digitalRead(botao_cima) == 1){
if (digitalRead(botao_limite_cima) == 0){
    pracima();
    delay(tempo);
    para();
}
}
if (digitalRead(botao_baixo) == 1){
if (digitalRead(botao_limite_baixo) == 0){
    prabaixo();
    delay(tempo);
    para();
}
}
}
}
```


APÊNDICE C – ESQUEMA ELÉTRICO

