



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Desenvolvimento de um manipulador SCARA
para auxílio à pessoa com deficiência motora**

Maria Sobrinho Leal

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

Brasília
2022

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

Desenvolvimento de um manipulador SCARA para auxílio à pessoa com deficiência motora

Maria Sobrinho Leal

Trabalho de Graduação submetido como re-
quisito parcial para obtenção do grau de Enge-
nheiro de Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Walter de Britto Vidal Filho

Brasília
2022

L435d Leal, Maria Sobrinho.
Desenvolvimento de um manipulador SCARA para auxílio à
pessoa com deficiência motora / Maria Sobrinho Leal; orientador
Walter de Britto Vidal Filho. -- Brasília, 2022.
121 p.

Trabalho de Graduação (Engenharia de Controle e Automa-
ção) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Robo SCARA. 2. Manipuladores. 3. Tetraplegia. I. de Britto
Vidal Filho, Walter, orient. II. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Desenvolvimento de um manipulador SCARA
para auxílio à pessoa com deficiência motora**

Maria Sobrinho Leal

Trabalho de Graduação submetido como re-
quisito parcial para obtenção do grau de Enge-
nheiro de Controle e Automação

Trabalho aprovado. Brasília, 26 de Setembro de 2022:

Prof. Dr. Walter de Britto Vidal Filho,
UnB/FT/ENM
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho,
UnB/FT/ENM
Examinador Interno

Prof. Dr. José Maurício Santos Torres da
Motta, UnB/FT/ENM
Examinador Interno

Brasília
2022

Este trabalho é dedicado aos meus pais Adriana e Fabricio e a todos que de alguma forma estiveram comigo durante esta jornada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família por todo o apoio e amor o que certamente me conduziu a este momento, sem vocês isto não seria possível. Agradeço também a todos os meus amigos e meu parceiro, aquele que escolhi para dividir a vida, que me acompanharam durante esta jornada me dando forças e acreditando em mim em todos os momentos, o apoio de vocês foi crucial para a realização deste trabalho e do curso.

Quero agradecer também à Mecajun por ter me ensinado tanto e me permitir vivência empreendedora e vivência na engenharia com o apoio de todos os colegas de trabalho e professores que acompanham a empresa júnior. Ao Prof. Dr. Walter de Britto agradeço também por todo o apoio, condução, orientação e por ter acreditado em mim para a realização deste trabalho.

Agradeço também a Deus por ter me dado força e coragem quando estes me faltaram e agradeço a mim mesma por ter seguido e persistido mesmo com todos os contratemplos e dificuldades.

Agradeço a todos vocês porque foram muito importantes para a realização de todo o curso e deste trabalho e tenho a vocês minha eterna gratidão por terem vivido e por estarem até hoje comigo durante esta jornada.

Maria Sobrinho Leal

“Para as pessoas sem deficiência a tecnologia torna as coisas mais fáceis. Para as pessoas com deficiência, a tecnologia torna as coisas possíveis.”
(Adabaugh)

Resumo

Estima-se que no Brasil, cerca de 200.000 pessoas sejam portadoras de tetraplegia. Essas pessoas apresentam severas limitações motoras o que causa grande isolamento destas pessoas com relação à sociedade, devido à sua incapacidade física de trabalhar devido às limitações, muitas vezes por vergonha, devido aos olhares sobre essas pessoas quando estão em ambiente público. Uma outra condição de grande impacto é a necessidade de um cuidador para a realização das mais simples atividades, desde beber água e se alimentar, todos esses aspectos dificultam ainda mais a reabilitação dessas pessoas e também diminuem a sensação de conforto para elas.

O objetivo deste trabalho foi o de realizar o projeto de um manipulador SCARA para ser acoplado a cadeiras de rodas que visa ajudar pessoas com tetraplegia a conquistar mais liberdade e confiança, além de facilitar a reintegração destas pessoas na sociedade, assim a pessoa se sente mais confortável para socializar, por exemplo. O projeto do manipulador busca ajudar o usuário a realizar algumas de suas necessidades mais básicas, como alimentação e hidratação, tirar objetos do caminho, pegar objetos, construindo um robô para ser acoplado à cadeira de rodas e que pode ser controlado por um joystick podendo carregar cargas de até 1,5kg e tendo um alcance de até 0,6m à frente da cadeira.

Este trabalho foi realizado no âmbito de um projeto de pesquisa com apoio da FAPDF.

Palavras-chave: Robo SCARA. Manipuladores. Tetraplegia.

Abstract

It is estimated that in Brazil, about 200,000 people have quadriplegia. These people have severe motor limitations, this causes great social isolation, often due to their physical inability to work due to those limitations, often out of shame because of the looks on these people when they are in a public environment. Another condition of great impact is the need for a caregiver to perform the simplest activity, from drinking water and eating. All of these aspects make the rehabilitation of these people even more difficult and also reduce the feeling of comfort for them.

The objective of this graduation work was to carry out the project of a SCARA manipulator to be mounted to wheelchairs in order to help people with quadriplegia to gain more freedom and confidence, in addition to facilitating the reintegration of these people into society so the person feels more comfortable to socialize, for example. The robotic arm sought to help the user accomplish some of their most basic needs such as feeding and hydration, taking objects out of the way, picking up objects among other features, building a robot to attach to a wheelchair and that is controlled with the use of a joystick, this robot can load up to 1.5kg and can reach up to 0,6m in front of the user.

This work was carried out as part of a research project supported by FAPDF.

Keywords: SCARA robot. Manipulator. Quadriplegia.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura dos manipuladores (SILVA, 2015)	17
Figura 2 – Onde ocorrem as lesões de cada deficiência (GARCIA, 2009)	18
Figura 3 – Primeiro protótipo de configuração SCARA montado (MAKINO, 2014)	22
Figura 4 – Volume de trabalho do manipulador SCARA (SANTOS, 2003)	23
Figura 5 – Norma de dimensionamento de cadeiras de rodas (ABNT, 2015)	23
Figura 6 – Módulo projeção de área ocupada por cadeira (ABNT, 2015)	24
Figura 7 – Alcance manual sem deslocamento do tronco (ABNT, 2015)	24
Figura 8 – Alcance manual sem deslocamento do tronco (ABNT, 2015)	24
Figura 9 – Alcance manual frontal com deslocamento do tronco (ABNT, 2015) . .	25
Figura 10 – Alcance manual lateral com deslocamento do tronco (ABNT, 2015) . .	25
Figura 11 – Manipulador <i>Raptor Arm</i> (EDWARDS, 2005)	29
Figura 12 – Imagem do FRIEND I (IVLEV; MARTENS; GRAESER, 2005)	30
Figura 13 – Imagem do FRIEND II (IVLEV; MARTENS; GRAESER, 2005)	30
Figura 14 – Imagem do <i>Weston Wheelchair</i> (HILLMAN et al., 2002)	31
Figura 15 – Imagem do Manipulador <i>Jaco</i> (DESIGNBOOM, 2019)	31
Figura 16 – Linha elástica de duas vigas com forças sendo aplicadas em diferentes posições (HIBBELER, 2010)	32
Figura 17 – Sistema de redução usando polia e correia (FERRAZ, 2012)	34
Figura 18 – Alguns tipos de rosca encontrados em parafusos (GORDO; FERREIRA, 2012)	34
Figura 19 – Perspectivas funcionais de indivíduos com lesão medular completa (tetraplegia) por nível de lesão. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013)	36
Figura 20 – Perspectivas funcionais de indivíduos com lesão medular completa (tetraplegia) por nível de lesão. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013)	37
Figura 21 – Matriz morfológica	40
Figura 22 – Posíveis posicionamentos dos manipuladores em cadeiras de rodas (fora de escala)	50
Figura 23 – Posicionamento definido	51
Figura 24 – Cadeira de Rodas Ortobras ULX (ORTOBRAS, 2020)	51
Figura 25 – Elo 1 e elo 2 iguais a 0,50 metro cada	55
Figura 26 – Elo 1 possuindo o dobro de comprimento do elo 2	55
Figura 27 – Elo 2 possuindo o dobro de comprimento do elo 1	55
Figura 28 – Elo 1 possuindo um comprimento muito maior que o comprimento do elo 2	56
Figura 29 – Elo 2 possuindo um comprimento muito maior que o comprimento do elo 1	56
Figura 30 – Modelo de rigidez com viga em balanço (CRAIG, 2012)	57
Figura 31 – Secção transversal do tubo de alumínio utilizada no projeto	57

Figura 32 – Carga aplicada no efetuador terminal (JUVINALL; MARSHEK, 2013) .	58
Figura 33 – Carga aplicada no centro de gravidade (JUVINALL; MARSHEK, 2013) .	58
Figura 34 – Modelo padrão de montagem do manipulador	59
Figura 35 – Configuração I - motores posicionados no eixo	60
Figura 36 – Configuração II - motores posicionados fora do eixo	60
Figura 37 – Esquemático de ligações do A4988 (ARDUINO E CIA , 2021)	65
Figura 38 – Rolamento linear (BRUHEL, 2020)	68
Figura 39 – TCRT5000 (OLIVEIRA, E., 2019)	70
Figura 40 – Deformação do dedo da garra adaptativa quando aplicada uma força (FESTO, 2017)	70
Figura 41 – Adaptação da garra (FESTO, 2017)	71
Figura 42 – Garra adaptativa segurando uma garrafa de plástico (MOEBIUSTECH, 2017)	71
Figura 43 – Garra adaptativa segurando uma caixa (MOEBIUSTECH, 2017)	71
Figura 44 – Garra adaptativa segurando alimentos (MOEBIUSTECH, 2017)	71
Figura 45 – Graus de liberdade de um efetuador terminal (CARRARA, 2015)	72
Figura 46 – Esquemático de montagem e movimentação da garra	72
Figura 47 – Configuração clássica do robô SCARA (MECTROL, 2022)	72
Figura 48 – Montagem geral do manipulador	73
Figura 49 – Suporte da base de elevação	74
Figura 50 – Suporte para motor de passo	74
Figura 51 – Suporte para motor de passo e fixação do elo	74
Figura 52 – Corte da base de elevação	74
Figura 53 – Furação da base de elevação	74
Figura 54 – Base de elevação montada	75
Figura 55 – Tubos utilizados para fabricação dos elos	76
Figura 56 – Montagem do primeiro elo	76
Figura 57 – Apoio de fixação da base na cadeira	76
Figura 58 – Demonstração dos blocos no interior dos elos	76
Figura 59 – Modelagem do bloco do segundo elo	76
Figura 60 – Travas para evitar deslocamento do eixo	77
Figura 61 – Montagem da redução do segundo elo	77
Figura 62 – Esquemático eletrônico para conexão dos componentes	78
Figura 63 – Manipulador Montado sem acoplar na cadeira	79
Figura 64 – Manipulador acoplado à cadeira de rodas	79
Figura 65 – Vista traseira do manipulador acoplado à cadeira de rodas	79

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de Benchmark	38
Tabela 2 – Tabela de custos e propriedades de materiais	41
Tabela 3 – Matriz de decisão	41
Tabela 4 – Matriz de decisão para atuador	46
Tabela 5 – Matriz de decisão para redutores	47
Tabela 6 – Matriz de decisão para controlador	49
Tabela 7 – Peso aproximado de alguns objetos do cotidiano	52
Tabela 8 – Inércia nas juntas	61
Tabela 9 – Torque requerido nas juntas	61
Tabela 10 – Tabela experimental de atrito entre diversos materiais (SHINGLEY, 2005)	63
Tabela 11 – Gasto de corrente de cada componente	65
Tabela 12 – Fator de ajuste da confiabilidade	67
Tabela 13 – Gasto total do manipulador	80
Tabela 14 – Benchmarking de custos	81

Lista de abreviaturas e siglas

IACS	Institute of applied Computer Science	29
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	19
NBR	Norma Brasileira	23
PCB	Placa de circuito impresso	83
PWM	Pulse Width Modulation	46
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm	23
TA	Tecnologia assistiva	36
USP	Universidade de São Paulo	25
WMRA	Wheelchair mounted Robotic Arm	28

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Manipuladores e sua estrutura básica	17
1.3	Tetraplegia	18
1.4	Entendendo o problema	19
1.5	Objetivos	20
1.6	Metodologia e Organização do Trabalho	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Manipulador SCARA	22
2.2	Cadeira Utilizada	23
2.3	Estado da arte	25
2.3.1	Braços robóticos acoplados a cadeiras de rodas	26
2.3.2	Projeto e construção de um robô manipulador SCARA	27
2.3.3	Análise de desempenho de melhorias em manipuladores	27
2.3.4	Desenvolvimento de Interfaces para braços acoplados a cadeiras de rodas	28
2.4	Manipuladores robóticos acoplados a cadeiras de rodas encontrados no mercado	28
2.4.1	Raptor	28
2.4.2	Friend	29
2.4.3	Weston Wheelchair	29
2.4.4	Jaco	30
3	REVISÃO TEÓRICA	32
3.1	Forças e torques atuantes sobre as juntas	32
3.1.1	Linha elástica	32
3.2	Sistemas de transmissão e redução em esquemas de acionamento	33
3.3	Parafusos de potência	34
4	PROJETO CONCEITUAL	35
4.1	Especificações das tarefas do manipulador	35
4.2	Benchmarking	36
4.3	Escolha dos parâmetros do manipulador	39
4.3.1	Material	39
4.3.2	Garras	42
4.3.2.1	Garras de dois dedos	42

4.3.2.2	Garras de três e cinco dedos	43
4.3.2.3	Outros tipos de garras	43
4.3.3	Atuadores	44
4.3.3.1	Motor DC	45
4.3.3.1.1	Servo Motor	45
4.3.3.1.2	Motor de Passo	46
4.3.4	Sistemas de transmissão e redução	47
4.3.5	Controlador	48
4.3.6	Configuração	49
4.4	Especificações do manipulador	51
5	PROJETO PRELIMINAR	54
5.1	Dimensionamento dos elos	54
5.2	Atuadores	59
5.2.1	Dimensionamento e posicionamento dos motores	59
5.2.1.1	Parafuso de potência	62
5.2.1.2	Polias e correias	63
5.2.2	Driver	64
5.3	Alimentação do sistema	65
5.4	Rolamentos	66
5.5	Sensores	68
5.5.1	Sensores indutivos	69
5.5.2	Sensores mecânicos	69
5.5.3	Sensores ópticos	69
5.6	Garra	70
6	PROJETO DETALHADO	73
6.1	Montagem do sistema	73
6.2	Custo do projeto	79
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
7.1	Conclusão	82
7.2	Trabalhos Futuros	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICES	89
	APÊNDICE A – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO	90
A.1	Área de trabalho do manipulador	90

A.2	Controle dos motores de passo utilizando o joystick	91
	APÊNDICE B – VISTAS 2D DAS MODELAGENS UTILIZADAS . .	95
	ANEXOS	105
	ANEXO A – DOCUMENTOS DE CONSULTAS TÉCNICAS	106
A.1	Driver A4988	106
A.2	Sensor óptico reflexivo TCRT5000	110
A.3	Correias	113
A.4	Motores de passo	115
A.5	Efetuator terminal - Garra	119

1 Introdução

1.1 Contextualização

Ao longo do tempo a humanidade passou por diversos acontecimentos que impulsionaram o desenvolvimento de tecnologias e o aprimoramento de como estas podem ajudar o ser humano de modo geral.

A segunda revolução industrial permitiu o desenvolvimento de tecnologias mais semelhantes às que conhecemos hoje, já que eram tecnologias voltadas para uma maior produção com um menor custo automatizando o trabalho, vemos aqui maquinários mais semelhantes aos que são utilizados atualmente nas indústrias, incluindo robôs que auxiliam na produção industrial.

Em meio a todos os desenvolvimentos tecnológicos ocorridos, há também o desenvolvimento da robótica de maneira geral. Em momentos anteriores foi possível conhecer modelos de autômatos criados por civilizações anteriores como na Grécia que contém registros de máquinas que se movimentavam com bombas pneumáticas, outros exemplos foram a criação de despertadores com formatos de animais e até robôs feitos para servir bebidas.(INDUSTRIAL, 2017)

Atualmente, na área da robótica, esses robôs tem objetivo de ajudar o ser humano e até substituí-lo em diversas áreas. Há então a atuação de robôs na área industrial, realizando soldagens, cortes, parafusando peças e até posicionando-as e locomovendo peças maiores e mais pesadas. Há robôs também atuando na área médica atuando em cirurgias com grande precisão de movimentos. Outra área de atuação destas máquinas é no transporte de pequenos objetos e monitoramento de áreas por meio dos drones. São diversas as áreas que se beneficiam do uso de robôs e a área a ser explorada neste trabalho é a área do uso de robótica na criação de tecnologias assistivas.

A tecnologia assistiva compreende pesquisa, fabricação, uso de equipamentos, recursos ou estratégias para potencializar habilidades funcionais de pessoas com deficiência, incapacidade ou desvantagem.(BALDASSIN; SHIMIZU; ERI, 2018) Visa trazer qualidade de vida, autonomia e inclusão social a todos aqueles que possuem alguma limitação física ou mental.

É uma área bastante pesquisada na atualidade, estudos são feitos de forma multidisciplinar para encontrar soluções, porém, para que estas tecnologias tenham adesão e realmente ajudem as pessoas que necessitam delas precisam ser inclusivas também no quesito de acessibilidade tanto de custos (deve ser financeiramente acessível) quanto precisa estar em um ambiente adaptado para recebê-la. Segundo a OMS (2017) as tecnologias assistivas

promovem os direitos humanos visto que permitem autonomia e independência (locomoção, acesso à educação e emprego, inclusão e participação, minimiza a necessidade de cuidadores, diminui custos, aumenta a dignidade além de prevenir outras condições secundárias que podem ser resultado das limitações primárias daquela pessoa).

1.2 Manipuladores e sua estrutura básica

O uso de manipuladores é extenso nas mais diversas áreas que se beneficiam da robótica, na área industrial, por exemplo, há uma gama de robôs manipuladores que trabalham com perfuração, soldagem, pintura, movimentação de peças dentre outras atividades já que estes dispositivos tem grande capacidade de realizar tarefas com repetições mantendo sua precisão e com velocidades ajustáveis à necessidade.

Um manipulador robótico possui em sua estrutura algumas partes importantes para o estudo desses mecanismos. A figura 1 mostra estas partes sendo elas os elos, juntas, efetuador terminal e base.

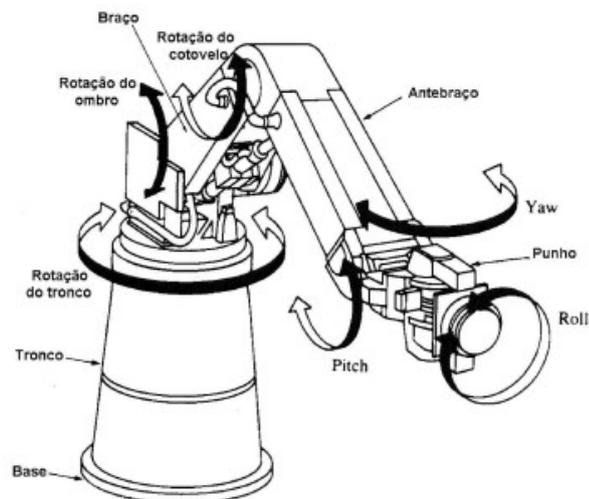


Figura 1 – Estrutura dos manipuladores (SILVA, 2015)

O efetuador terminal ou órgão terminal é a parte final do manipulador e ele pode ser de diversos tipos, pode ser uma garra, ou uma ferramenta e é definido de acordo com o objetivo final daquele manipulador. São os elos ou *links* que unem as juntas dos manipuladores.

As juntas são as partes responsáveis pela posição assumida pelos elos e como consequência, a posição assumida também pelo efetuador terminal. Essas juntas podem ser esféricas, rotacionais, prismáticas e cilíndricas e cada tipo de junta possui uma quantidade de graus de liberdade que define ao final o volume de trabalho deste manipulador. A base dos manipuladores é fixa e suporta o robô de forma geral.

Os manipuladores podem ser de diversos tipos de acordo com seu volume de trabalho que é definido pelos graus de liberdade de cada elo do robô, os graus de liberdade do manipu-

lador é igual ao somatório dos graus de liberdade de cada elo individual. Os manipuladores podem ter algumas configurações clássicas dentre elas: (CARRARA, 2015)

- Robô cartesiano: Possui três graus de liberdade sendo as três juntas prismáticas
- Robô cilíndrico: É composta por uma junta prismática na base, uma outra junta rotativa e conectada a esta há mais uma junta prismática.
- Robô polar ou esférico: É composto por duas juntas rotativas e uma junta prismática
- Robô articulado: É composto por três juntas rotativas e se assemelham bastante ao braço humano.

Há também outras diversas configurações, algumas mais clássicas, outras com maior complexidade devido à maior quantidade de graus de liberdade, como os manipuladores de propósito geral e robôs redundantes.

1.3 Tetraplegia

A tetraplegia é uma deficiência que ocorre devido a lesões que atingem a medula espinhal acometendo a coluna cervical, também recebe o nome de quadriplegia e se diferencia da paraplegia. A paraplegia é causada por uma lesão na medula abaixo da região torácica e afeta apenas o tronco e os membros inferiores, preservando a força do braço enquanto que a tetraplegia resulta em perda de movimentos e sensações dos braços, pernas e tronco. (REDE D'OR, 2017)

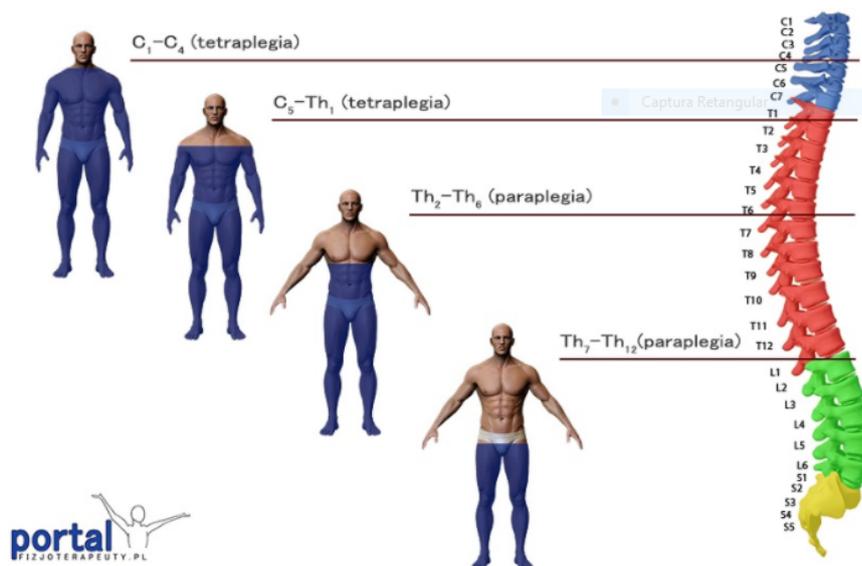


Figura 2 – Onde ocorrem as lesões de cada deficiência (GARCIA, 2009)

Essas lesões podem acontecer das mais diversas maneiras, podem ser causadas por acidentes de trânsito e até no lazer, acidentes de trabalho, armas e doenças neurológicas sendo a sua maioria causados por acidentes de trânsito. (GARCIA, 2009)

No CENSO de 1991 foram registradas 46.998 pessoas com tetraplegia no Brasil IBGE (1991), no censo de 2000 não foi obtida esta informação de maneira separada porém é estimado que existam cerca de 200.000 pessoas em condição de tetraplegia no Brasil e devido às limitações causadas por esta deficiência a pessoa se torna dependente de cuidadores para a execução de praticamente todas as suas atividades diárias e de forma resultante ocorre o afastamento do paciente do convívio social.(BORGES, 2002)

A depender da altura da lesão o paciente pode ter um comprometimento maior ou menor de seus membros e funções, quanto mais alta a lesão, maior a perda, sendo a tetraplegia completa quando o paciente perde todas as sensações e movimentos dos membros ou a tetraplegia incompleta quando alguns movimentos involuntários e algumas sensações são mantidas. A tetraplegia ocorre em lesões nos segmentos cervicais de C1 a C8 que são vértebras responsáveis pelo controle nervoso de alguns órgãos. De acordo com a vértebra afetada podemos ter alguns efeitos sobre o corpo. (REEVE, C.; REEVE, D., 2020)

- Nível C1 a C3 : Pode exigir o uso de respiradores além de limitações na fala;
- Nível C4: Perda de movimento e sensação nos braços e pernas, embora tenham algum movimento nos ombros e pescoço;
- No nível C5: Consegue realizar pequenos movimentos na região dos braços como flexionar o cotovelo e virar as palmas das mãos;
- No nível C6: Paciente tem controle parcial do tronco;
- No nível C7: Paciente tem controle parcial do tronco e alguma atividade nos tríceps;
- No nível C8: Movimento nos dedos, mantem a funcionalidade das mãos

1.4 Entendendo o problema

Como as pessoas acometidas de tetraplegia precisam de acompanhamento constante o custo de vida dessas pessoas aumenta, é necessário pagar cuidadores especializados, além de todos os medicamentos para regular algumas funções que podem ter sido afetadas como circulação e respiração, sondas e fraldas devido à falta de controle de suas funções excretoras e adaptação.(SCRAMIN; MACHADO, 2006)

Essas pessoas por passarem a ter diversas limitações acabam perdendo bastante de sua vida profissional também, resultando em perda de auto estima e problemas psicológicos por terem tanta dependência, o que gera uma sensação de medo e receio a essas pessoas,

qualquer pequeno ganho de independência gera a essas pessoas maior confiança e facilidade para voltar à sua vida social e até profissional. (MACHADO; SCRAMIN, 2010)

Segundo a OMS (2017) o acesso a tecnologias assistivas é também de grande importância visto que ajuda a minimizar a necessidade destes cuidadores, diminui alguns custos e pode até melhorar a auto estima do paciente que conseguirá de maneira independente realizar algumas atividades, tudo isso melhora o convívio social deste paciente e sua possível recuperação. Porém algumas tecnologias assistivas ainda não são acessíveis, incluindo os manipuladores acoplados a cadeiras de rodas, soluções de mercado ainda possuem um custo muito alto além de toda a adaptação necessária do ambiente e até da cadeira a ser utilizada. Essas tecnologias podem trazer inúmeros ganhos aos seus usuários e seus cuidadores melhorando sua qualidade de vida, economizando recursos e reintegrando esta pessoa no meio social e até profissional.

1.5 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral realizar os estudos para o projeto de um manipulador acoplado a cadeira de rodas de configuração SCARA de custo menos elevado que realiza funções básicas de pegar e movimentar objetos menores tal como a construção de um protótipo para o sistema projetado. A criação do dispositivo busca uma participação da pessoa acometida de tetraplegia de algumas pequenas ações no seu dia a dia gerando independência e reintegração social.

Esse tipo de tecnologia assistiva garante esta participação ativa do indivíduo diminuindo suas dependências e melhorando inclusive o processo de recuperação e sua qualidade de vida, visto que de maneira geral, pessoas com tetraplegia precisam de auxílio para poder realizar até as ações mais simples do dia a dia, devido às perdas motoras.

1.6 Metodologia e Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em algumas etapas para facilitar sua leitura e entendimento sendo elas:

- Introdução : Contendo informações importantes sobre contextualização, problemática e conteúdos introdutórios sobre o que será apresentado e trabalhado ao longo do projeto e do trabalho;
- Referências Bibliográficas: Capítulo contendo o estado da arte desta tecnologia assistiva, o que foi feito anteriormente e estudo de manipuladores acoplados a cadeiras de rodas assim como estudos sobre a configuração SCARA em robôs;

-
- Revisão Teórica: Capítulo que apresenta os estudos em conteúdos necessários para a construção e realização do projeto;
 - Projeto Conceitual: Aborda os requisitos de projetos, as preferências no projeto e foi realizado um estudo acerca das soluções já existentes para poder servir como base.
 - Projeto Preliminar: Esta etapa aborda o desenvolvimento da solução encontrada e análises necessárias para sua montagem, é a parte teórica do projeto e as definições com base nessas etapas
 - Projeto Detalhado: Aborda a finalização do projeto, a modelagem, montagem e a construção em si do protótipo. Envolve também os testes, ajustes necessários e outras informações importantes para o fechamento do projeto.
 - Conclusão: Contém a perspectiva geral do trabalho, possíveis melhorias e passos a serem seguidos.

Para a realização do projeto será utilizada a metodologia de projeto proposta por Pahl & Beitz que contém quatro etapas macro, sendo elas: Projeto Informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado. O projeto total do manipulador será então realizado da seguinte forma

- Projeto Informacional: Nesta etapa são levantadas informações acerca do projeto de forma geral, em qual ambiente ele deve atuar e quais são suas restrições e especificações. É feito também um levantamento sobre o estado da arte desta solução para entender soluções já existentes, suas problemáticas e possíveis melhorias;
- Projeto Conceitual: Nesta etapa busca-se detalhar todas as funções do projeto a ser desenvolvido, montar possíveis modelos para a construção destas soluções e selecionar o modelo que poderá alcançar a melhor solução para essas funções definidas anteriormente;
- Projeto Preliminar: Nesta etapa é realizado o projeto técnico para o modelo escolhido anteriormente, montagem de modelo CAD e análise para garantir que os requisitos serão atendidos;
- Projeto Detalhado: Fase de desenvolvimento do projeto, ajuste das especificações técnicas e montagem da documentação do projeto.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Manipulador SCARA

A configuração SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) foi proposta pelo Professor Hiroshi Makino e sua equipe e seu primeiro modelo foi construído em 1978, o primeiro protótipo montado pode ser visto na figura 3.

Esta configuração possui quatro graus de liberdade sendo as duas primeiras juntas articuladas rotativas possuindo, cada uma, um grau de liberdade e mais os dois graus de liberdade do efetuador terminal que realiza seu movimento vertical indo para cima e para baixo mais a rotação do efetuador terminal. (MAKINO, 2014)

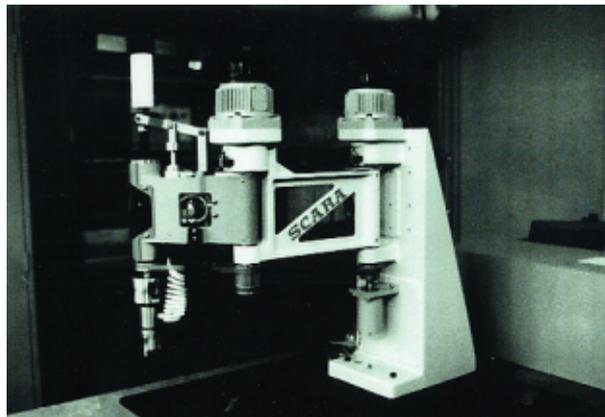


Figura 3 – Primeiro protótipo de configuração SCARA montado (MAKINO, 2014)

Inicialmente o SCARA surgiu da necessidade, industrial, de inserir peças com precisão, funções *Peg in hole* e essa configuração possui esta vantagem, é muito precisa para esta funcionalidade, porém estão sendo estudadas novas possibilidades com esta configuração, se aproveitando mais de suas vantagens.

Esta configuração recebeu este nome devido à sua complacência seletiva, em robótica a complacência é o contrário da rigidez, como uma flexibilidade, na aplicação da força o braço cede ao movimento tornando a sua movimentação mais suave retornando à sua posição quando a força é retirada. (MAKINO, 2014)

A complacência seletiva do robô SCARA é alta para forças horizontais e para rotações no eixo vertical já para as forças verticais e para rotações no eixo horizontal, é pequena.

Com relação ao seu uso o robô SCARA tem uma simplicidade relativa no momento de sua modelagem e programação, essa configuração também diminui os esforços sobre os motores já que não é necessário trabalhar contra a gravidade, ele precisa vencer apenas atrito e a inércia rotacional do manipulador o que proporciona também uma maior velocidade

ao manipulador. O fato de não necessitar de motores com torque muito alto também reduz custos na escolha do atuador. Sua estrutura no geral também possui uma facilidade muito grande em se movimentar e alcançar posições e objetos, com precisão. Na figura 4 está representado o volume de trabalho do robô SCARA.(SANTOS, 2003)

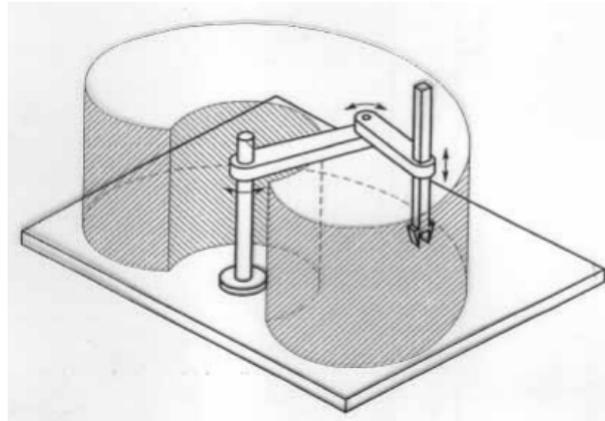


Figura 4 – Volume de trabalho do manipulador SCARA (SANTOS, 2003)

2.2 Cadeira Utilizada

Para o acoplamento é necessário o conhecimento da cadeira que irá recebê-lo para a definição de requisitos. A norma internacional que rege os padrões das cadeiras de rodas é a ISO 6440 e a norma nacional é a NBR 9050. Para cadeiras manuais ou motorizadas existem as dimensões referenciais mostrada na figura 5 a serem levadas em conta.

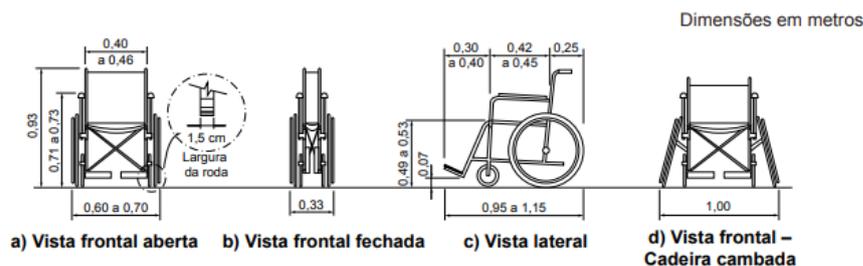


Figura 5 – Norma de dimensionamento de cadeiras de rodas (ABNT, 2015)

Outro ponto importante é a área a ser ocupada pela cadeira com ou sem o usuário, essa cadeira deve manter a área ocupada mostrada na figura 6.

Questões estéticas acompanham de forma muito próxima o desenvolvimento deste tipo de solução já que é um acessório que acompanha seu usuário em todas as horas do seu dia, podendo ser que esse usuário chegue a utilizar a cadeira até o resto de sua vida, por isso é um ponto importante a se atentar quanto ao posicionamento deste manipulador na cadeira e seus detalhes visuais.

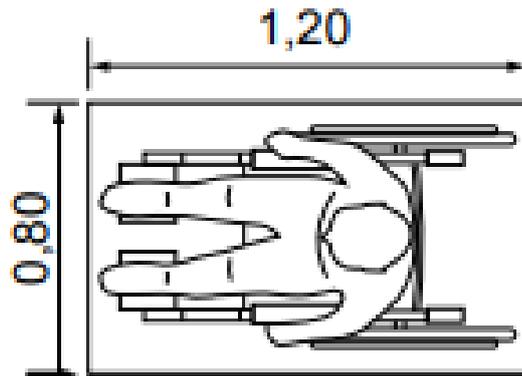


Figura 6 – Módulo projeção de área ocupada por cadeira (ABNT, 2015)

É necessário se atentar a uma outra norma também sendo essa com relação aos padrões definidos de alcance para pessoas que utilizam cadeiras de rodas, existe uma padronização definida a esses alcances que pode ser utilizada como referência para definir o alcance do manipulador em diversas situações. Para todas as medidas mostradas a seguir existem as dimensões dadas em metros. Para alcance manual sem o deslocamento do tronco há como padrão as medidas definidas nas figuras 7 e 8

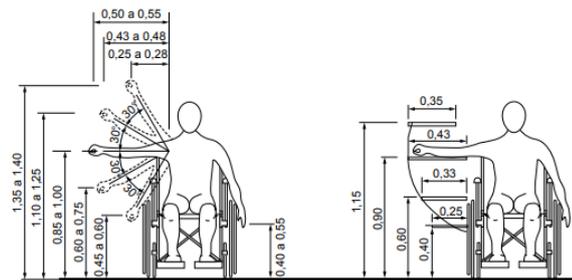


Figura 7 – Alcance manual sem deslocamento do tronco (ABNT, 2015)

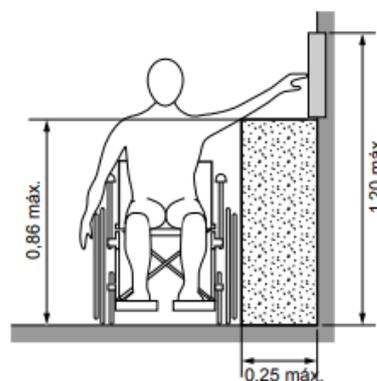


Figura 8 – Alcance manual sem deslocamento do tronco (ABNT, 2015)

Para alcance frontal há as medições mostradas na figura 9 e para alcance lateral com deslocamento de tronco temos as dimensões mostradas na figura 10

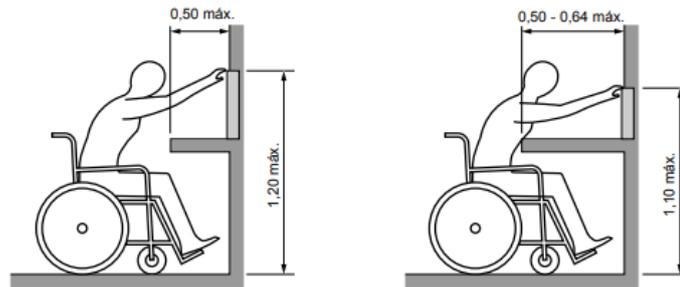


Figura 9 – Alcance manual frontal com deslocamento do tronco (ABNT, 2015)

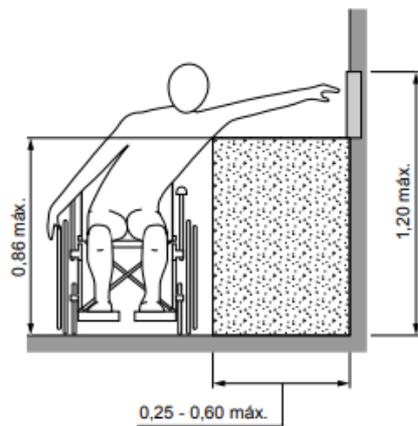


Figura 10 – Alcance manual lateral com deslocamento do tronco (ABNT, 2015)

Essas dimensões servirão de guia para a definição de parâmetros do manipulador com relação aos alcances que o manipulador deve atingir para que possa ser utilizado pelo usuário nos mais diversos ambientes.

2.3 Estado da arte

Entendendo a importância das tecnologias assistivas para pessoas com deficiências motoras cada dia mais têm sido buscadas alternativas para a melhoria das condições de vida destas pessoas, sua integração novamente na sociedade e diminuir sua necessidade de ter cuidadores realizando as atividades mais básicas destas pessoas, incluindo necessidades vitais como se alimentar e se hidratar.

Em um estudo feito para a revista de enfermagem da USP foram avaliados os sentimentos de pessoas que tinham necessidade constante de um cuidador e como isso afetava o psicológico destas pessoas trazendo sensações como medo e preocupação com seus cuidadores e a possível falta destes o que pode acarretar em grandes prejuízos às pessoas com deficiência que não conseguem realizar suas necessidades básicas e vitais (MACHADO; SCRAMIN, 2010)

Por este motivo tem surgido diversas possibilidades e estudos para resolver estes

problemas, principalmente no ambiente atual em que o uso de manipuladores robóticos tem sido bastante extensivo, por exemplo, na área industrial, foi percebido um grande potencial de utilizar estas tecnologias para resolver outros problemas relacionadas a outras áreas, a área da saúde é uma delas. Algumas universidades e pesquisadores tem focado bastante no estudo destes manipuladores e estes estudos e as soluções encontradas tendem a melhorar e aumentar em volume cada vez mais.

Devido a importância dos manipuladores acoplados às cadeiras de rodas alguns estudos tem sido realizados em todo o mundo buscando soluções aceitáveis e de melhor custo para esta aplicação em busca de fornecer essa maior liberdade às pessoas com deficiências motoras.

2.3.1 Braços robóticos acoplados a cadeiras de rodas

Na Universidade de Brasília em [Neto \(2019\)](#) foi feito o projeto de um manipulador com o objetivo de ajudar o usuário a realizar tarefas básicas podendo assim pegar, posicionar e agarrar objetos do dia a dia. Foi então realizado o projeto teórico de um robô com 6 (seis) graus de liberdade sendo reduzidos alguns requisitos importantes como massa e custo de construção do manipulador.

No Brasil há alguns poucos estudos nessa área, muitos estudos ainda estão focados na movimentação da cadeira de rodas. Um estudo feito na Universidade Federal do Rio Grande do Norte fez o estudo de um cadeira de rodas robótica que contém um manipulador. O objetivo do projeto era a criação de uma cadeira de baixo custo que transporia desníveis e barreiras na movimentação da cadeira e fosse um auxílio a esses usuários, porém o foco do artigo não era a construção do manipulador e sim a movimentação da cadeira, por isso há poucas informações sobre o desenvolvimento geral desta solução. ([OLIVEIRA, I. A. D., 2013](#))

No exterior já foram feitos mais estudos acerca de manipuladores acoplados a cadeiras de rodas utilizando algumas configurações distintas de manipuladores. ([HILLMAN et al., 2002](#)) trabalharam no projeto de um manipulador de configuração SCARA com o objetivo de realizar atividades básicas como alimentação, higiene e mobilidade. O robô utilizou um *joystick* para controlar o manipulador e uma garra como efetuator terminal para realizar as atividades, neste projeto foi montado um *mock-up* bem avaliado pelas pessoas que o testaram.

Um outro projeto desenvolvido nos Países Baixos é o Manus desenvolvido por [Driessen, Evers e Woerden \(2001\)](#), um manipulador montado em cadeira de rodas também para a realização de atividades básicas como alimentação e hidratação. O manipulador desenvolvido tem 6 (seis) graus de liberdade e têm sido feitos estudos para aprimorar o controle e sua interface usuário-manipulador.

Em [Edwards \(2005\)](#) na Universidade do Sul da Flórida foi explorado um manipulador para ajudar pessoas com mobilidade reduzida ou inexistente nos membros superiores. Foi

desenvolvido um manipulador de 7 (sete) graus de liberdade em que foram diminuídos valores de massa. O resultado permitia controle com todos os graus de liberdade e testes realizados mostraram o bom funcionamento do manipulador.

No Canadá, na universidade de Laval, está sendo desenvolvido o SIARA ([CLOUÂTRE et al., 2021](#)), um robô com seis graus de liberdade para ser acoplado a uma cadeira de rodas que busca de forma acessível ajudar pessoas com limitações motoras a realizar atividades básicas de alimentação e hidratação, pegar objetos e alcançar o chão. O manipulador possui um alcance de 1,1m e *payload* de 300g quando completamente estendido e sua construção foi feita em alumínio e PLA. Sua arquitetura articulada foi montada de forma a alcançar o chão para pegar objetos caídos até alcançar a cabeça do usuário para possibilitar a alimentação. Foi utilizado um sistema de balanceamento para poder reduzir o torque necessário dos motores reduzindo então o custo do manipulador.

2.3.2 Projeto e construção de um robô manipulador SCARA

A configuração SCARA inicialmente era utilizada em processos de montagem devido a sua complacência seletiva, porém hoje tem sido adaptadas novas funcionalidades nas mais diversas áreas para essa configuração. Na UnB também tem ocorrido diversos estudos para estes manipuladores.

No estudo realizado em [Castro \(2019\)](#) desenvolveu um manipulador SCARA com fins didáticos buscando precisão e repetibilidade que possam propiciar ao estudante um contato próximo a esses robôs. Os resultados alcançados foram promissores permitindo grande alcance a diversas posições, foi montado um manipulador de baixo custo com uso de impressão 3D e com materiais acessíveis.

Em [Otavio Mello \(2016\)](#) foi estudado também o projeto mecatrônico de um manipulador SCARA com 3 (três) graus de liberdade para fins didáticos e foi construído o protótipo do robô para avaliar o projeto. O projeto se mostrou com boa repetibilidade com o uso de motores de passo.

Diversos outros estudos como os apresentados por [Mariappan e Veerabathiran \(2016\)](#) e [Haq et al. \(2021\)](#) foram realizados em todo o mundo visando melhorar a modelagem, controle, contorno de obstáculos na movimentação do manipulador dentre outros estudos que otimizam o uso dessa configuração.

2.3.3 Análise de desempenho de melhorias em manipuladores

Outro aspecto importante no desenvolvimento dos manipuladores é o desempenho e melhorias propostas para esses robôs o que ajuda no projeto destes manipuladores. Na UnB foram realizados alguns estudos de análise de desempenho e projetos de melhoria para estes robôs.

Rocha (2016) mostra o desenvolvimento de uma análise para robô SCARA e foi proposto ao final do projeto também um software de interface de controle do robô. Outras melhorias e projetos futuros foram propostos também.

No trabalho de Marconi Mello (2016) foi avaliado o desempenho de um manipulador com 5 (cinco) graus de liberdade. Parâmetros como acurácia e repetibilidade. A partir dos resultados encontrados nas análises foram propostas diversas melhorias para o robô e projetos futuros para melhorar o desempenho do manipulador.

2.3.4 Desenvolvimento de Interfaces para braços acoplados a cadeiras de rodas

Outro ponto importante na construção de manipuladores é a interface de controle para o uso destes robôs para que o usuário possa utilizar o manipulador acoplado à cadeira de rodas. Um exemplo destes trabalhos na UnB é o Torres (2020) em que foi trabalhado um circuito de instrumentação e acionamento do manipulador . Foram estudados o projeto eletro-eletrônico e o sistema de comando do manipulador e foram propostos sistemas de instrumentação e perspectivas futuras para o trabalho.

No trabalho Tsui et al. (2008) foram propostas interfaces de uso do manipulador Manus. Foi feito o teste de quatro interfaces de controle para identificar e pegar um objeto (*joystick*, *touch screen*, câmera fixa e câmera em movimento) e dentre esses métodos foram ponderadas as avaliações dos usuários para prós e contras de cada um deles.

São vários os aspectos que impactam no desenvolvimento de um projeto de WMRA e de acordo com o foco de cada trabalho esses aspectos devem ser estudados para a obtenção de um projeto que funcione de forma satisfatória considerando as economias de custo para aumentar a acessibilidade desses robôs àqueles usuários que necessitam.

2.4 Manipuladores robóticos acoplados a cadeiras de rodas encontrados no mercado

Existem diversos modelos sendo estudados nas universidades ao redor do mundo porém no mercado já existem alguns manipuladores acoplados em cadeiras de rodas sendo comercializados. Para um projeto mais assertivo é importante conhecer estas opções que já são fornecidas para entender, inclusive, as restrições utilizadas nestes produtos.

2.4.1 Raptor

É um manipulador produzido pela *Applied Resources Inc* que busca um custo mais baixo de venda tendo 4 (quatro) graus de liberdade e seu controle pode ser feito por Joystick

ou um controlador de botões, porém sem a possibilidade de ser pré-programado e seu robô é montado ao lado direito da cadeira. [Edwards \(2005\)](#)



Figura 11 – Manipulador *Raptor Arm* ([EDWARDS, 2005](#))

2.4.2 Friend

É um manipulador que tem como objetivo realizar tarefas simples como alimentação, posicionamento de objetos, ter acesso a bebidas utilizando uma interface amigável, sendo controlada por um computador que contém câmeras e um microfone. O equipamento, em sua primeira versão, o FRIEND I, utiliza um manipulador MANUS (com seis graus de liberdade) ([DRIESSEN; EVERS; WOERDEN, 2001](#)) e comandos de voz podem ser utilizados para fazer o controle do manipulador, com o auxílio das câmeras, objetos podem ser enquadrados e por comandos de voz podem ser agarrados pelo manipulador.

Apesar de todo o sistema, algumas ações precisam ser realizadas em posições específicas de dispositivos auxiliares, como por exemplo, uma bandeja em que o copo e garrafa devem estar corretamente posicionados para que o manipulador possa servir água.

A nova versão -FRIEND II- conta com um robô com 7(sete) graus de liberdade desenvolvido pela *amtec robotics* e uma mão robótica com 5 (cinco) dedos desenvolvido pelo *IACS (Institute of Applied Computer Science)*. Essa nova versão é mais robusta, o braço se assemelha mais a um braço e mãos humanas, trazendo um melhor aspecto visual. ([IVLEV; MARTENS; GRAESER, 2005](#))

2.4.3 Weston Wheelchair

Esse manipulador tem como inspiração os movimentos horizontais do SCARA, tendo como movimento vertical apenas um atuador, porém esta configuração acabou apresentando alguns problemas de uso como limitação de alcance do chão. Então após alguns ajustes foi encontrada uma configuração lateral para que o manipulador pudesse atender aos seus



Figura 12 – Imagem do FRIEND I (IVLEV; MARTENS; GRAESER, 2005)



Figura 13 – Imagem do FRIEND II (IVLEV; MARTENS; GRAESER, 2005)

objetivos, auxílio na alimentação e hidratação, Higiene pessoal e portar alguns objetos. O Mockup da segunda configuração proposta está apresentada na figura 14. (HILLMAN et al., 2002)

2.4.4 Jaco

É um manipulador assistivo desenvolvido pela *KINOVA* para pessoas com limitações motoras, principalmente na parte superior do corpo que busca ajudar em atividades do dia a dia. Sua garra possui 2 (dois) ou 3 (três) pinças e pode ser acoplada a cadeiras elétricas. Este manipulador está sendo mostrado na figura 15.(DESIGNBOOM, 2019)

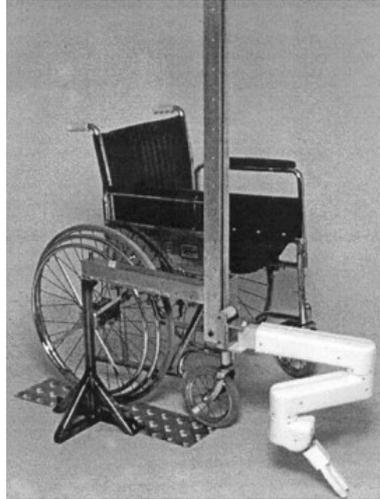


Figura 14 – Imagem do *Weston Wheelchair* (HILLMAN et al., 2002)



Figura 15 – Imagem do Manipulador *Jaco* (DESIGNBOOM, 2019)

3 Revisão Teórica

3.1 Forças e torques atuantes sobre as juntas

Em um projeto com barras rígidas, o peso da estrutura e até as cargas aplicadas sobre esta impactam em sua deflexão, ou seja, na deformação que pode ocorrer quando estas cargas são aplicadas. Devido a estes deslocamentos é importante definir limites visto que grandes deflexões podem ser prejudiciais ao manipulador e na execução de suas atividades, visto que se espera que o manipulador alcance uma posição porém ele alcança uma outra como resultado do deslocamento que a viga sofreu. Existem algumas maneiras de realizar esta análise de deflexão como a análise analítica e também recursos como o uso da linha elástica.

3.1.1 Linha elástica

A linha elástica é o diagrama de deflexão do eixo longitudinal de uma viga, passando pelo centróide. A linha elástica não é utilizada em escala, é um recurso visual que ajuda a entender os elementos que resistem ao deslocamento

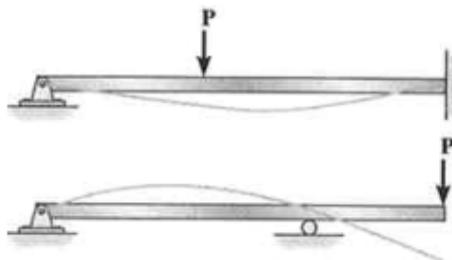


Figura 16 – Linha elástica de duas vigas com forças sendo aplicadas em diferentes posições (HIBBELER, 2010)

Os valores limite para as deformações usualmente são indicados por normas, porém quando se trata da deflexão em manipuladores não existe nenhum valor referência ou limite, sabendo apenas que os manipuladores industriais exigem uma deflexão menor visando uma maior precisão em seus movimentos.

O manipulador SCARA possui a vantagem de não precisar agir contra a gravidade em sua movimentação devido à sua configuração, isto permite um projeto com valores de tolerância de deflexão menores garantindo uma maior repetibilidade e precisão dos movimentos. É muito importante fazer uma análise e estudo acerca de quanto de deflexão deve ser aceita para que, durante o projeto, o manipulador seja dimensionado de maneira a atender aos requisitos como alcance e payload sem ser prejudicado pela deflexão.

3.2 Sistemas de transmissão e redução em esquemas de acionamento

Em um sistema como os manipuladores, a configuração espacial de aplicação das cargas e a distância entre essa aplicação e o eixo de movimentação impacta nos esforços atuantes sobre os elos. Isto pode impactar positivamente ou negativamente na inércia total daquele elo, exigindo torques maiores do motor para a movimentação do elo e da carga que atua sobre ele.

Por isso muitas vezes se faz necessário o uso de transmissão de movimento visando esta redução de inércia, uma maneira de buscar esta diminuição de inércia é aproximar os motores do eixo, para diminuir o torque causado por sua massa. Visto que o motor não estará no eixo de movimentação, a rotação do motor deve ser transmitida para o eixo e para isso existem diversas técnicas de transmissão de movimento, dentre elas o uso de cabos, polias e correias, transmissão por barras, parafusos e engrenagens.

É importante também realizar o estudo dos sistemas de redução. Muitas vezes os atuadores não conseguem fornecer a quantidade necessária de torque ou a velocidade necessária para o bom funcionamento do sistema, então são utilizados sistemas de redução que podem aumentar o torque fornecido pelo motor e diminuir a sua velocidade assim como pode-se obter o caso contrário obter o aumento da velocidade do atuador diminuindo o torque fornecido. Existem alguns mecanismos de redução como as engrenagens, polias e correias, redutores harmônicos, redutores planetários. Esses sistemas possuem suas vantagens e desvantagens e devem ser analisados para que possa ser feita a melhor escolha possível dentro de um projeto. (CRAIG, 2012)

Trem de engrenagens: Possuem um bom desempenho se as folgas forem bem trabalhadas, porém, são muito pesadas e volumosas, podendo também possuir um custo muito alto a depender do material utilizado.

Polias e correias: Esse sistema possui menos problemas com relação às folgas, e podem possuir um custo menos elevado a depender do material utilizado, o funcionamento das polias e correias em um sistema de redução está representado na figura 17.

Parafuso sem fim: É uma solução mais cara e complexa, porém, possui a possibilidade de autotravamento o que pode ser importante para determinadas soluções.

Redutor Harmônico: É uma opção de custo mais elevado, mas que garante movimentos suaves e reduções altas.

Redutor Planetário: É uma opção bem complexa, porém de alto custo, mas que garante um aumento de torque com alta eficiência.

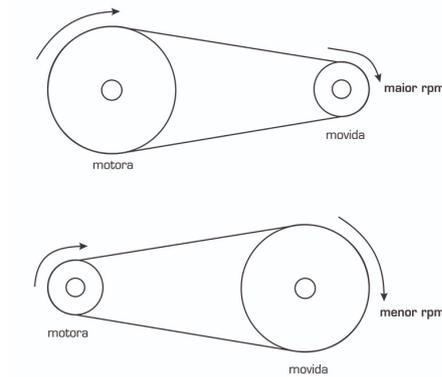


Figura 17 – Sistema de redução usando polia e correia (FERRAZ, 2012)

3.3 Parafusos de potência

Dentro do contexto de transmissão de movimento, muitas vezes surge a necessidade de transformar o movimento angular do motor em um movimento linear e um dos recursos utilizados são os parafusos de potência que também fornecem determinada redução. Eles possuem diversos tipos diferentes de rosca que impactam em sua aplicação. Dentre os tipos mais comuns estão o triangular, trapezoidal, quadrado e redondo, além da ACME que tem se popularizado. Alguns desses perfis estão representados na figura 18

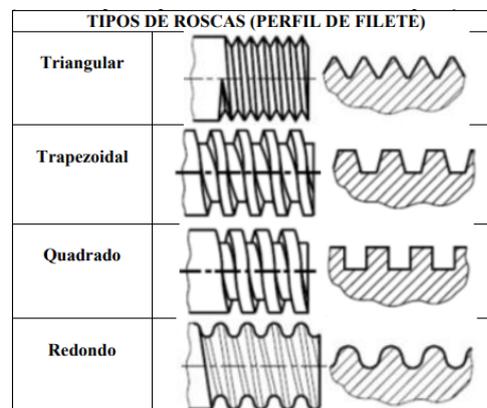


Figura 18 – Alguns tipos de rosca encontrados em parafusos (GORDO; FERREIRA, 2012)

Triangular: Muito utilizada em parafusos e porcas para união de peças

Trapezoidal: Transmissão de movimento com uniformidade e suavidade

Quadrado: Parafusos que sofrem grandes esforços e choques durante a transmissão

Redondo: Parafusos sujeitos a grandes esforços e com grandes diâmetros

Dente de serra: Para esforços em um sentido. (GORDO; FERREIRA, 2012)

4 Projeto Conceitual

4.1 Especificações das tarefas do manipulador

Para seguir com os próximos passos de projeto é de suma importância entender quais os objetivos gerais do manipulador. As decisões feitas quanto ao que o manipulador pode fazer pelo usuário terá influência direta com o projeto e as especificações gerais de atuadores, materiais utilizados, dimensionamento do próprio manipulador e até o posicionamento do manipulador na cadeira de rodas.

É conhecido que pessoas em condições de tetraplegia sofrem muitas limitações motoras que as incapacitam de realizar as tarefas mais básicas e vitais, como alimentação e hidratação, o objetivo proposto deste manipulador é poder auxiliar estas pessoas permitindo-lhes maior liberdade para realizar algumas tarefas mais básicas já que esta sensação de colaboração é inclusive muito importante para a recuperação geral do paciente e melhoria do seu quadro, como foi explorado em [OMS \(2017\)](#).

Existem algumas áreas que são comumente estudadas e exploradas em tecnologias assistivas já que são atividades de grande importância para o dia a dia em comunidade são estas: ([HILLMAN et al., 2002](#))

- Comer e beber.
- Higiene Pessoal: Barbear, tomar banho, aplicar maquiagem entre outros.
- Trabalho: Manipular e carregar papeis, CD's, acessar computadores entre outros.
- Mobilidade: Movimentação de modo geral, tirar objetos do caminho, abrir portas, ligar e desligar luzes.
- Pegar objetos de modo geral e colocar em outro lugar, pegar objetos de estantes entre outros.

Pensando nestas atividades básicas propostas o WMRA trabalhado neste projeto busca ajudar o usuário na sua alimentação e hidratação, pegar objetos, posicionar estes objetos e pegá-los de estantes e até do chão em caso de queda destes objetos ou até organização do local em que o usuário da WMRA está. O manipulador também irá buscar ajudar na mobilidade permitindo ligar e desligar luzes, abrir portas, poder tirar objetos do caminho do paciente acometido de tetraplegia.

Estes objetivos definidos irão então guiar todo o projeto da cadeira lembrando também do foco de manter o manipulador acoplado leve, resistente e com um custo mais acessível para que mais pessoas possam possuir esta TA e possam alcançar uma maior liberdade.

4.2 Benchmarking

Foram recolhidas informações de WMRA's que já existem no mercado e que já foram trabalhadas em universidades para que as escolhas de projetos destes manipuladores possam ser estudadas e analisadas buscando uma base para as escolhas do manipulador trabalhado neste projeto.

O estudo das necessidades dos pacientes com tetraplegia foi realizado também para que fosse possível definir as especificações das tarefas realizadas pelo manipulador, exploradas na seção anterior deste trabalho, com base no nível da lesão (C1 - C8) e de acordo com o que o paciente é capaz de realizar apesar da condição da lesão, assim como mostrado nas figuras 19 e 20.

Último nível inervado/ principais músculos acrescentados	Metas funcionais
C1-C3 Esternocleidomastóideo, possível parte do trapézio e do diafragma	Locomoção e alívio de pressão com cadeira de rodas motorizada com inclinação eletrônica (controle cervical ou mentoniano), uso do computador com <i>softwares</i> de controle de <i>mouse</i> /emuladores de <i>mouse</i> , uso de unidades de controle ambiental, dependente de respirador portátil.
C4 Inervação plena do diafragma e trapézio	Locomoção e alívio de pressão com cadeira de rodas motorizada com inclinação eletrônica (controle cervical, mentoniano ou sugar/soprar), uso do computador com <i>softwares</i> de controle de <i>mouse</i> /emuladores de <i>mouse</i> ou <i>clip</i> (bucal, mentoniano ou de cabeça), uso de unidades de controle ambiental.
C5 Parte do deltoide, parte do bíceps, romboides, parte do manguito rotador	Capaz de auxiliar no banho, alimentação, escrita e auto-cuidado com adaptações utilizando estabilizador de punho. Auxilia no vestuário de membros superiores. Locomoção com cadeira de rodas convencional com pinos nos sobrearos e mancal adiantado + rodas anti-tombo. Transferências com apoio de cinta de transferências. Uso do computador com suporte de punho e <i>clip</i> para digitação e/ou <i>softwares</i> de controle do <i>mouse</i> . Capaz de realizar alívios de pressão por deslocamento mínimo do corpo.
C6 Parte do serrátil anterior, parte do peitoral, parte do grande dorsal, deltoide, bíceps, extensores radiais do carpo	Capaz de auxiliar no banho, alimentação, escrita e autocuidado com adaptações sem necessidade de estabilizador de punho. Pode se beneficiar de engrossadores. Auxilia no vestuário de membros superiores. Locomoção com cadeira de rodas convencional com pinos nos sobrearos ou faixa aderente e mancal adiantado + rodas anti-tombo. Auxilia nas transferências com auxílio da tábua de transferências, com ou sem cinta. Uso do computador com <i>clip</i> para digitação e <i>mouses</i> adaptados ou convencionais. Realiza preensão por tenodese. Capaz de realizar alívios de pressão por deslocamento do corpo.

Figura 19 – Perspectivas funcionais de indivíduos com lesão medular completa (tetraplegia) por nível de lesão. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013)

Serão exploradas estas necessidades ao longo da escolha de cada parte e aspecto do manipulador, mas existem pontos importantes o acesso a objetos em estantes, no chão e à frente do usuário da cadeira de rodas, as limitações quanto ao peso do manipulador e seu

Último nível inervado/ principais músculos acrescentados	Metas funcionais
C7 Tríceps, flexores e extensores extrínsecos dos dedos, parte dos flexores de punho	Capaz de auxiliar no banho, alimentação, escrita e autocuidado com ou sem adaptações. Pode se beneficiar de engrossadores. Auxilia no vestuário de membros superiores e inferiores. Locomoção com cadeira de rodas manual com ou sem pinos nos sobreiros ou faixa aderente, preferencialmente com mancal adiantado + rodas anti-tombo. Independente ou parcialmente dependente para transferências com tábua de transferências e independência no leito. Uso do computador com <i>clip</i> para digitação e <i>mouses</i> adaptados ou convencionais. Realiza preensão por tenodese. Capaz de realizar alívios de pressão por <i>push-up's</i> .
C8-T1 Intrínsecos da mão incluindo polegar	Independente para alimentação, escrita, autocuidado e uso do computador. Banho independente mas pode precisar de auxílio para lavar e secar membros inferiores. Independente para o vestuário. Locomoção em cadeira de rodas manual sem adaptações nos aros de propulsão. Independente para transferências mas pode precisar de tábua e/ou técnica adaptada. Independente para mobilidade no leito. Independente para realizar os alívios de pressão por <i>push-up's</i> .

Figura 20 – Perspectivas funcionais de indivíduos com lesão medular completa (tetraplegia) por nível de lesão. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013)

tamanho para que ele possa se adequar bem à cadeira e até questões estéticas que são muito importantes também para o manipulador. (OMS, 2017)

Foram buscadas referências quanto aos principais aspectos destes manipuladores como os atuadores utilizados, a massa do projeto e payload (carga útil que o manipulador suporta) para que fosse possível ter uma base para o projeto atual, outras informações como o alcance do manipulador também foram analisadas para chegar a uma escolha definitiva para este projeto. Outras informações como garras, o controle utilizado, graus de liberdade serão utilizadas como objetos de estudo para as escolhas deste projeto.

Foi montada então a tabela 1 que demonstra todas as informações obtidas. Destas, apenas o manipulador do Neto (2019) foi desenvolvido no Brasil, em especial na Universidade de Brasília.

Com base nesta tabela e em estudos de produtos disponíveis no mercado foram selecionados alguns materiais, atuadores, produtos em geral que foram levados em consideração para as escolhas do manipulador desenvolvido neste projeto.

Para a decisão destes materiais foram utilizadas algumas metodologias de escolha que serão exploradas neste documento.

-	Raptor	Friend	Weston Wheelchair	Jaco	Manus	Luis Fernando
Massa (kg)	7,937	0,243 (garra)	-	5	até 10	9
Payload (kg)	1,81	11	-	1,5(até 45cm)	1,2	1,5
Atuadores	5 motores solid state	pneumático e hidráulico	24v	motor cc sem escova	motor de passo e motor cc	servo motor
Garra (dedos)	2	2/5	2	2/3	2	2
Posicionamento do manipulador	lado direito	lado direito	lado direito próximo aos ombros	lado direito	lateral esquerda ou direita	lateral direita
Controle	joystick/ controle com 10 botões	voz e câmeras	joystick	joystick para mãos ou pés ou celular	-	joystick
Alcance (m)	0,121	-	1,2	0,9	1,1	0,9
Material	-	-	alumínio	fibra de carbono	pvc, pla/abs, nylon e alumínio	-
Graus de Liberdade	5	11	5	6	6	6

Tabela 1 – Tabela de Benchmark

4.3 Escolha dos parâmetros do manipulador

Com base nos estudos feitos sobre as necessidades e as soluções já propostas foram escolhidas algumas opções para cada decisão que precisa ser tomada e foi utilizada a matriz morfológica para a tomada de decisão de alguns destes parâmetros do manipulador, outros parâmetros foram escolhidos com base na análise das funcionalidades.

A técnica da matriz morfológica é uma técnica combinatória e generativa que busca trazer uma visualização ordenada das opções para facilitar as escolhas. É uma técnica para fazer a análise de similares compreendendo as partes e os componentes necessários facilitando a diferenciação. Utilizando-a é possível dividir o problema em subproblemas incluindo diversas combinações para o resultado final. (BONSIEPE; KELLNER; POESSNECKER, 1984)

Segundo Rudibert (2009) alguns procedimentos podem ser tomados para o uso desta metodologia:

1. Identificar o critério de seleção que será usado na análise morfológica (Funcional, econômico, estético...)
2. Selecionar as melhores opções dentre as opções possíveis
3. Identificar os elementos cruciais para o critério adotado e classificar os componentes
4. Eliminar soluções irrelevantes ou incompatíveis com o projeto de modo geral.

Com base nesses procedimentos foi montada então a matriz morfológica mostrada na figura 21. Nela foram inseridas algumas possíveis opções com base em pesquisas específicas para cada parte do projeto que precisa ser definida. Há então opções para o material do manipulador, a garra a ser utilizada, os atuadores, o controlador e o posicionamento do manipulador montado na cadeira.

As opções foram selecionadas com base em um *brainstorm* e filtradas de acordo com suas funcionalidades e propriedades gerando diversas possibilidades, depois foi feita a seleção de cada componente.

4.3.1 Material

A escolha do material é muito importante já que sua estrutura física irá resistir aos esforços atuantes sobre o manipulador. A escolha do material também tem grande impacto no custo do projeto e no peso final do manipulador, na estética de modo geral e na maneira como será feita a fabricação do WMRA.

Foi feita decisão com base na matriz de decisão. Foram definidos como principais aspectos a serem estudados para os materiais o seu custo, a possibilidade de fabricação, a sua rigidez, peso e estética final do manipulador com aquele material determinado. Para avaliar

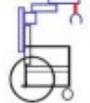
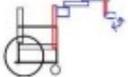
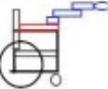
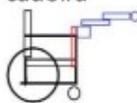
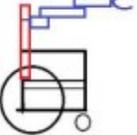
Material	ABS 	Aço 	Borracha 	Alumínio 	Kevlar 	Fibra de carbono 
Garra	Garra de dois dedos paralelos 	Garra de dois dedos adaptiva 	Garra de três dedos 	Garras suaves flexíveis 	Ventosas 	Garra de dois dedos de pressão 
Atuadores	Pneumático 	Hidráulico 	Motor de passo 	Servo Motor 	Motor DC 	
Controlador	Arduíno 	Raspberry 	CLP 			
Configurações	Parte traseira da cadeira 	Parte dianteira da cadeira 	Na parte lateral com deslocamento horizontal 	Mais à frente da cadeira 	Trilho vertical na parte frontal da cadeira 	Na lateral próximo aos ombros com deslocamento vertical 

Figura 21 – Matriz morfológica

com base nestes aspectos foi feita uma definição de pesos de acordo com a importância de cada propriedade a ser avaliada. Com base em [Zavadil et al. \(2014\)](#) foram definidos pesos de 1 - 5 para cada aspecto.

O baixo peso, baixo custo e possibilidade de fabricação possuem peso maior (peso 4) visto que busca-se tornar o projeto mais acessível diminuindo seu custo de execução. O baixo peso tem grande impacto no centro de gravidade da cadeira e consumo de energia e busca-se materiais que permitem uma fabricação mais facilitada para possibilitar a prototipagem e diminuir os custos.

A rigidez (peso 3) tem uma grande importância também já que o objeto terá que reagir aos esforços então buscando uma melhor repetitividade para o manipulador. Busca-se um material mais rígido, porém esse peso não foi setado maior já que, por sua estrutura de montagem, o manipulador do tipo SCARA já possui uma boa exatidão e repetibilidade considerando que não atua contra a gravidade. A estética (peso 2) também foi inserida

como um aspecto importante já que em OMS (2017) foi feito um estudo que define que as TA's precisam buscar também aspectos para melhorar a auto estima e aceitação do usuário. Considerando que o manipulador será um instrumento que acompanhará diariamente o paciente, é importante que ele se sinta a vontade com seu uso.

Visando estes aspectos foi criada uma tabela com massa específica que influencia diretamente no peso do manipulador, o módulo de Young para avaliar a rigidez do material e seu custo de aquisição, a tabela 2 montada foi utilizada como referência para a tomada de decisão

Material	Massa específica ($\frac{kg}{m^3}$)	Modulo de Young (GPa)	Custo ($\frac{R\$}{kg}$)
ABS	1241	1,3359	145,99
Aço	7860	200	7
Borracha	1000	$0,76 \times 10^{-3}$	10,42
Alumínio	2710	70	16,65
Kevlar	1,44	131	100
Fibra de carbono	1760	181	232,28
PVC	1380	2,84	6,27

Tabela 2 – Tabela de custos e propriedades de materiais

Com base na tabela 2 de custos e propriedades e nos pesos definidos anteriormente foi montada a matriz de decisão com valores de 1 a 5 para cada propriedade de cada material selecionado, valores mais próximos de 5 são valores para melhor cenário e valores tendendo a 1 são valores para pior cenário. A matriz de decisão está sendo representada na tabela 3.

-	Baixo custo	Possibilidade de fabricação	Maior Rigidez	Baixo Peso	Estética
Pesos	4	4	3	4	2
ABS	2	4	2	4	4
Aço	5	4	5	1	4
Borracha	4	2	1	4	3
Alumínio	4	4	3	4	4
Kevlar	2	2	4	5	3
Fibra de carbono	1	1	5	3	4
PVC	5	5	2	4	1

Tabela 3 – Matriz de decisão

Após a alocação de valores para cada propriedade de cada material foram obtidos os valores finais para cada material onde o material de maior valor é o selecionado. Esse valor é obtido pelo somatório da multiplicação dos pesos pelo valor do pior ou do melhor cenário

de cada material para cada propriedade. Foram obtidos então os seguintes valores de pontos acumulados por cada material:

- **ABS:** 54
- **Aço:** 63
- **Borracha:** 49
- **Alumínio:** 65
- **Kevlar:** 54
- **Fibra de carbono:** 43
- **PVC:** 64

De acordo com o resultado da tabela de decisões foi definido como material o alumínio com pontuação de 65 pontos.

4.3.2 Garras

As garras são um tipo, dentre diversos, de efetuador terminal utilizado nos manipuladores e seu objetivo é segurar e mover objetos de lugar. Existem diversas configurações de garra sendo desenvolvidas e comercializadas na indústria e no mercado de modo geral. Estas podem ser utilizadas nos mais diversos ambientes, desde o ambiente fabril que exigem uma precisão e força maiores até às cozinhas que exigem garras delicadas que não agredam o alimento e mantenham padrões de higiene mais rígidos.

Para a escolha da garra a ser utilizada no projeto foi feita uma pesquisa de funcionalidades de cada tipo de garra dentre as mais populares no mercado de acordo com as necessidades do manipulador da WMRA a ser desenvolvido neste trabalho.

Para a seleção foram estudadas garras de dois, três e cinco dedos e garras mais específicas como as ventosas e garras flexíveis, suas vantagens e características serão exploradas durante esta seção.

4.3.2.1 Garras de dois dedos

As garras de dois dedos são caracterizadas pelo uso de apenas dois dedos que ao se aproximarem conseguem agarrar o objeto e segurá-lo para locomoção. Foram estudadas as garras de dois dedos paralelas, as garras adaptivas e a garra de dois dedos simples.

A garra de dois dedos simples são garras mais limitadas, que geralmente são utilizadas para agarrar objetos cilíndricos e possuem determinada limitação de abertura o que

não permite pegar objetos de qualquer tamanho. Tendo em visto de que não é tão versátil é necessário que os objetos a serem segurados por elas tenham tamanhos e formatos predefinidos para garantir a segurança. O programador também precisa modelar muito bem o controle da garra para que esta possa segurar bem os objetos e manipulá-los.

Uma outra configuração dessas garras são as garras paralelas, que podem ter um acionamento elétrico, pneumático ou hidráulico e são muito utilizadas na indústria. Como possuem dois dedos ela naturalmente fornece uma certa facilidade no controle já que sabemos onde o objeto está já que ele só pode estar entre os dois dedos, porém elas nos trazem algumas desvantagens, são muito rígidas e pressionam o objeto entre os dedos, porém seus dedos não se adequam à forma do objeto o que inviabiliza o uso de diversos formatos de objeto, como os cilíndricos.

As garras de dois dedos adaptivas são uma outra configuração destas garras que é mais flexível e se adaptam ao objeto que estão segurando. Suas garras possuem espécies de membranas que se deformam ao agarrar o objeto se adaptando ao seu formato o que permite que o manipulador possa pegar mais formatos de objetos, esta garra mantém a vantagem citada na configuração anterior de que a programação é facilitada já que sabemos onde o objeto está. (BARRETTE, 2016)

4.3.2.2 Garras de três e cinco dedos

As garras de três dedos, quando comparadas às de dois possuem uma maior flexibilidade e facilidade para agarrar diversos formatos de objetos. Elas funcionam particularmente muito bem para objetos redondos e cilíndricos, porém possuem a desvantagem de que nem sempre sabemos onde o objeto está posicionado na garra, isto faz com que o seu controle seja mais complexo. Estas garras são também mais caras. (VALE ORMINDO et al., 2015)

As garras com cinco dedos são garras ainda mais complexas considerando as de três dedos. Elas se assemelham às mãos humanas o que traz uma maior versatilidade para pegar diversos tipos de objetos. Como os objetos se adaptam melhor dentro da garra, ela requer menos força para agarrar e manter estes objetos, porém ela possui uma maior complexidade de controle e de construção e são garras mais caras.

4.3.2.3 Outros tipos de garras

Dentre os diversos tipos de garras que tem sido desenvolvidas existem as ventosas. São garras utilizadas em situações bem específicas como indústrias de vidros para manipular folhas de vidro. Elas exigem que o objeto esteja limpo, seco e seja plano o que limita bastante seu uso apesar de serem garras de controle bem simples e bem leves o que ajuda na definição do peso do manipulador.

Um outro exemplo de configuração são as garras suaves flexíveis. Estas garras pos-

suem as pinças de silicone o que permite uma boa limpeza, ideal para a manipulação de objetos delicados sem causar danos, como alimentos.(BARRETTE, 2016)

Para definir a melhor garra para o manipulador deve-se considerar, primeiramente, os tipos de objetos que é necessário manipular. O usuário deve ser capaz de manipular copos, instrumentos para alimentação, abrir portas, manipular instrumentos do dia a dia de modo geral o que significa que os objetos a serem agarrados pelas garras não terão formatos pré definidos. É necessário que o manipulador possa auxiliar sem que seja necessário mudar todo o ambiente do usuário, logo, as garras paralelas, as ventosas e as garras de dois dedos simples foram eliminadas como possibilidades já que elas exigem formatos de objetos específicos.

Outro ponto importante para a definição das garras é o controle destas. Quanto mais complexo é o controle e construção da garra, mais elevado é seu valor, sendo então uma desvantagem para estas garras, apesar de que elas permitem uma maior flexibilidade de objetos a serem manipulados. Então foram eliminadas as garras de três, de cinco dedos e as garras flexíveis.

Tendo em vista estes pontos estudados foi decidido o uso das garras de dois dedos adaptivas. Elas possuem um controle facilitado por possuírem apenas dois dedos, mas a possibilidade de objetos que pode-se manipular é muito boa devido à sua estrutura se adaptar a estes objetos, o que aproxima a garra da realidade do usuário.

4.3.3 Atuadores

Existem diversas opções de atuadores no mercado, e dentre estes atuadores cada um possui um tipo de acionamento podendo eles ser: hidráulicos, pneumáticos ou elétricos. Todos estes tipos de acionamento são amplamente utilizados na indústria e nos produtos comercializados que tenham a exigência de um atuador, porém cada tipo de acionamento possui suas vantagens de uso. Com base na pesquisa de benchmark foram separados alguns tipos de atuadores e com base em seu acionamento foram definidos os atuadores a ser utilizados de modo geral.

Foram estudados então os sistemas pneumáticos, elétricos e hidráulicos e com base em suas características foi selecionado o sistema de acionamento mais apropriado ao manipulador a ser projetado

O sistema de acionamento pneumático possui a vantagem de ser econômico e fácil de manter. É um tipo de acionamento largamente utilizado na indústria e eles possuem uma boa precisão para duas posições, posições estas em que o atuador estiver com compressão ou sem compressão, porém as posições intermediárias não possuem tamanha precisão o que inviabiliza este tipo de acionamento para a necessidade do manipulador em questão. (CASTRO, 2019)

Na indústria um acionamento muito utilizado é o hidráulico, ele geralmente é utili-

zado em manipuladores maiores, produz bastante torque para objetos mais pesados, grandes cargas. Porém não é um acionamento tão apropriado para o uso em manipuladores acoplados visto que eles possuem risco de vazamento e exigem manutenções caras apesar de seu custo ser inferior ao acionamento elétrico, seu custo inicial para a implantação também é alto. Outro fator importante que inviabiliza o uso nesta aplicação é que eles necessitam de reservatório e compressor, tornando inviável para um sistema móvel.

O acionamento elétrico é muito utilizado em manipuladores de pequeno e médio porte porque gera menos torque que o acionamento hidráulico, por exemplo. Porém esse acionamento é mais preciso, uma necessidade do manipulador já que seu objetivo é facilitar o dia a dia do usuário. Uma outra vantagem é que esse tipo de acionamento é mais compacto o que diminui o peso e o espaço ocupado na cadeira o que é muito importante pensando também na estética do produto final.

Devido às vantagens e desvantagens mostradas acima foi definido o uso de acionamento elétrico. Esse tipo de acionamento é muito vantajoso também considerando que alguns usuários do manipulador possuem cadeiras que já são elétricas, sendo possível então aproveitar esta bateria já utilizada na cadeira para alimentar o manipulador.

Com base no tipo de acionamento escolhido foram separados três atuadores para serem estudados, atuadores também separados com base na tabela de benchmark e as possíveis escolhas foram: motor DC, servo motor e Motor de passo.

4.3.3.1 Motor DC

São motores que funcionam com corrente contínua e fazem a transformação de energia elétrica em energia mecânica. Esses atuadores precisam do uso de redutores para poder alcançar um bom torque e precisa ser trabalhado no sistema uma maneira de cortar a corrente fornecida já que o motor realiza o giro enquanto estiver sendo energizado. Por outro lado estes atuadores possuem uma precisão muito boa e a construção de seu controle é facilitada.

No mercado existem diversos motores que são DC. Um dos motores DC muito utilizados nos manipuladores e robôs de maneira geral são os servo motores e os motores de passo que serão explorados a seguir.

4.3.3.1.1 Servo Motor

Os servo motores podem ser tanto DC quanto AC nesta seção será feito um estudo dos servo motores DC. Estes atuadores realizam os giros com base em uma determinada angulação e são atuadores recentes, porém largamente utilizados na indústria e em manipuladores porque possuem alta precisão e podem ser de corrente contínua. São motores

mais caros e que, em tamanho industrial exigem um sistema de controle mais robusto para poder funcionar de forma apropriada, trabalhando em malha fechada.

Os servo motores são controlados por pulsos PWM podem ser de atuação direta em que se tem um menor desgaste sem necessidade de lubrificação e maiores acelerações. Como as perdas são menores também é possível ter um aumento de eficiência e menores folgas. Esses servo motores também podem fazer uso de redutores e assim é possível optar por atuadores menores e mais precisos em relação aos servo motores de acionamento direto, apesar de terem uma menor eficiência. (CARRARA, 2015)

4.3.3.1.2 Motor de Passo

Esse atuador permite um posicionamento mais preciso e rotações exatas, podem ser de imã permanente, de relutância variável ou híbrido. Esses manipuladores permitem um controle digital e fornecem boa repetibilidade. Uma outra vantagem é que não há necessidade de uso de redutores. Esse tipo de atuador pode fazer o giro tanto em sentido horário como anti-horário, porém em velocidades mais baixas podem haver vibrações que devem ser reduzidas para não prejudicar o projeto. (CASTRO, 2019)

Com base nas informações obtidas sobre cada atuador citado anteriormente foi montada uma matriz de decisão para definir qual atuador seria utilizado. Para a definição dos pesos foram avaliados em cada motor 4 (quatro) parâmetros, o custo que possui peso 4 (quatro) devido a busca de redução do custo do projeto, precisão com peso 3 (três) em busca de entregar um projeto com boa precisão ao usuário, massa do atuador com peso 3 (três) de acordo com a busca de reduzir o peso total do manipulador e a facilidade de montagem com peso 3 (três) para poder reduzir o tempo e o custo da montagem. a tabela então esta sendo representada na tabela 4

-	Baixo custo	Precisão	Menor Peso	Montagem facilitada
Pesos	4	3	3	3
Motor de passo	5	4	4	5
Servo motor	4	5	5	4
Motor DC com escovas	4	4	3	3

Tabela 4 – Matriz de decisão para atuador

Com base na matriz apresentada os valores de pontuação obtidos para cada atuador foram:

- **Motor de passo:** 59

- **Servo motor:** 58
- **Motor DC:** 46

Com base na pontuação obtida foi decidido o uso de motor de passo para movimentar os elos do manipulador

4.3.4 Sistemas de transmissão e redução

Visando o payload do manipulador e a massa do material utilizado na fabricação será utilizado um sistema de transmissão para que seja possível diminuir a inércia do manipulador aplicando os motores mais próximos da base o que diminui o torque total do sistema diminuindo também os motores. Isso garante motores mais baratos e de menor massa, além de um melhor aproveitamento do motor que apresenta problemas de trepidação quando atua com torques muito próximos ao seu torque limite.

O sistema de redução também será utilizado buscando aumentar o torque do motor evitando uma sobrecarga deste e buscando também sua diminuição o que resulta em custos menores ao manipulador, apesar de aumentar a complexidade do projeto.

Foram estudados sistemas que poderiam atuar tanto como transmissores de movimento quanto como redutores, evitando assim uma grande quantidade de elementos no manipulador o que poderia comprometer a massa geral do sistema e também a questão estética.

Foram então separados alguns sistemas de transmissão/redução mais utilizados para que fosse feito um estudo de qual destes sistemas se adequaria melhor à solução, foi utilizada então uma matriz de decisão com pesos de 1 a 5 dentro de alguns critérios elencados como importantes para o projeto.

-	Baixo custo	Precisão de montagem	Menor Peso	Tamanho
Pesos	4	3	3	4
Trem de engrenagens	4	4	3	3
Polias e correias	5	4	3	3
Parafuso sem fim	1	2	4	4
Redutor harmônico	2	2	3	4
Redutor planetário	3	3	4	4

Tabela 5 – Matriz de decisão para redutores

Com base na tabela foram encontrados os seguintes valores:

- **Trem de engrenagens:** 49
- **Polias e Correias:** 53
- **Parafuso sem fim:** 38
- **Redutor harmônico:** 39
- **Redutor planetário:** 49

Com base nos valores encontrados foi definido o uso de polias e correias, solução que também abrange a questão da transmissão do movimento, assim, será estudada a redução necessária e o posicionamento dos motores. A solução também permite uma redução de custo se for utilizado um outro tipo de material, por exemplo, utilizar polias impressas em impressora 3D.

4.3.5 Controlador

Outra etapa importante é a definição do controlador para realizar o controle do manipulador. Foram separadas opções de mercado mais populares por sua praticidade, o uso de PCB's foi desclassificado por exigir um maior tempo em montagem e impressão da placa. Então foram selecionadas três possíveis soluções: CLP, Arduino e Raspberry.

O Arduino é um micro controlador que possui um baixo custo de aquisição e placas compactas que exigem menos espaço para aloca-las. Possui uma memória RAM e memória flash pequenas, mas possui uma grande facilidade de uso, além da possibilidade de utilizar os mais diversos shields e bibliotecas para o auxílio do controlador. (TORELLA, 2020)

O raspberry é um micro processador com uma memória RAM mais potente que a do arduino e memória expansível com uso de cartão de memória. Por ser um micro processador possui um maior poder computacional, entretanto também possui um maior custo. Apesar de seu poder computacional o Raspberry não é recomendado para atividades em tempo real e tanto ele quanto o arduino podem sofrer interferências do ambiente o que faz com que não sejam recomendados para atividades em chão de fábrica visto que não suportam exposição ao sol, temperaturas extremas, alta umidade e ruídos da indústria.

O CLP (controlador lógico programável) é um controlador mais robusto, utilizado largamente na indústria de modo geral, são menos propensos aos ruídos e condições industriais e possuem sistemas para detecção de falhas, porém possui um custo mais alto e são maiores que os controladores apresentados anteriormente. (FREITAS, 2013)

Com base nas características de cada controlador foi montada uma matriz de decisão para a decisão. Foram decididos os pesos com base em custo em que foi utilizado peso 4

(quatro), disponibilidade em que o peso escolhido foi 4 (quatro), facilidade de trabalhar 3 (três) e a possibilidade de utilizar extensões para cumprir os papéis requerido terá peso 3 (três). Todos os controladores possuem capacidade de realizar a movimentação dos manipuladores e por isso foram utilizados os requisitos apresentados anteriormente para a escolha do controlador.

Sendo assim a matriz será apresentada na tabela 6

-	Baixo custo	Disponibilidade	Facilidade para trabalhar	Extensões
Pesos	4	4	3	3
Arduíno	5	5	5	5
Raspberry	4	5	4	5
CLP	2	3	3	5

Tabela 6 – Matriz de decisão para controlador

Os pontos adquiridos para cada controlador foram:

- **Arduíno:** 70
- **Raspberry:** 63
- **CLP:** 44

Com base nas pontuações definidas foi decidido o uso de arduíno como controlador para o projeto

4.3.6 Configuração

Para a definição do posicionamento do manipulador montado à cadeira de rodas é necessário se atentar também às normas aplicadas a essas cadeiras. A [ABNT \(2015\)](#) determina alguns tamanhos e áreas ocupadas pela cadeira para que possam ser adaptados diversos ambientes para que se tornem acessíveis aos usuários de cadeiras de rodas. Para garantir que o usuário da WMRA consiga acessar os mais diversos locais é necessário garantir que o manipulador esteja dentro da área definida pelo módulo de referência apresentado na figura 6.

As cadeiras de rodas motorizadas e as não motorizadas, possuem os tamanhos definidos na figura 5. Tendo em vista o tamanho padrão das cadeiras e sua área ocupada mostrada na figura 6 podemos então perceber uma folga frontal de 0,25 a 0,05 m e uma folga lateral de 0,2 a 0,1 m.

Com base no estudo de benchmark foram encontradas algumas possíveis configurações que serão mostradas na figura 22

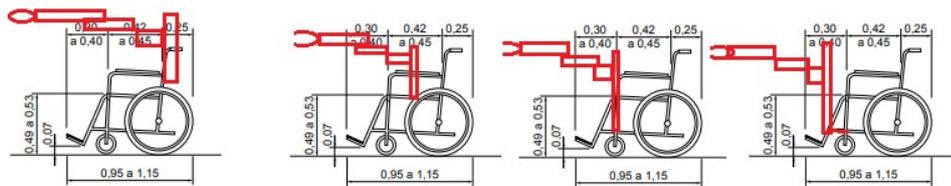


Figura 22 – Posíveis posicionamentos os manipuladores em cadeiras de rodas (fora de escala)

Para a construção de WMRA's já projetadas e até comercializadas, pesquisadores trabalharam com a construção de mockups e até pesquisas com usuários para escolher a configuração mais confortável e que não trouxesse interferências negativas à experiência do usuário. O posicionamento do manipulador trabalhado neste projeto será escolhido com base nestes estudos teóricos e empíricos já realizados.

Em [Edwards \(2005\)](#) foram realizados estudos para as configurações frontal, lateral e traseira e elencou algumas características importantes acerca de cada uma. Para a configuração lateral foi elencada a largura da cadeira, fator importante devido à acessibilidade do cadeirante a ambientes que possuam portas de largura padrão. Uma outra característica é que o manipulador precisa de elos maiores para poder alcançar a área frontal que é a área em que o manipulador irá trabalhar mais. Com elos maiores há um aumento de esforços nos atuadores e um aumento no peso do manipulador de maneira geral, visando a estrutura do manipulador SCARA e seu volume de trabalho para que ele alcance posições acima do plano do manipulador, necessita-se também de um deslocamento vertical que pode atrapalhar a visão do usuário.

Para a configuração traseira há a vantagem de não atrapalhar o usuário, seu campo de visão, nem aumenta as dimensões lateral e frontal da cadeira. Também há uma melhora estética no braço quando este não está em uso, porém são necessários elos maiores para posuir o alcance desejado o que causa o aumento dos esforços no atuador. Este posicionamento também limita a realização de trabalhos na região frontal do manipulador como alcançar o chão.

Quanto ao posicionamento frontal há vantagens como o alcance de toda a área frontal incluindo o chão, também é necessário que os elos sejam menores que os elos dos outros posicionamentos propostos para um mesmo alcance. Em seu artigo [Hillman et al. \(2002\)](#) também realizou diversos estudos e testes para a posição frontal e foram pontuados problemas como o manipulador atrapalhar a visão do usuário da cadeira e sua estrutura vertical chamar muita atenção na região frontal o que pode causar muito impacto nas interações sociais. Um outro problema do posicionamento frontal é que ele impede o usuário de se sentar em mesas ou bancadas por causa do manipulador.

Para a execução deste protótipo foi escolhida a posição traseira mais para a lateral da cadeira, próxima a um dos ombros do usuário, como apresentada na figura 23 que deverá ser

adaptada para o espaço de folga entre a largura da cadeira e a largura definida nas normas, dessa maneira é possível permitir uma acessibilidade do usuário em ambientes, mas também garante que este possa se sentar sob mesas caso seja necessário. Um outro ponto importante para esta escolha foi a cadeira disponível para trabalho, no laboratório GRACO, a cadeira que está sendo tomada como base é uma Ortobras ULX apresentada na figura 24. Como esta cadeira possui pouco espaço nas laterais, ao lado das rodas, esse posicionamento facilitaria a montagem e evitaria aumentar muito a área ocupada pela cadeira.

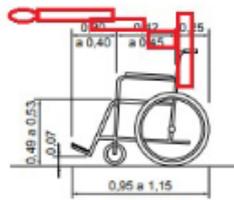


Figura 23 – Posicionamento definido



Figura 24 – Cadeira de Rodas Ortobras ULX (ORTOBRAS, 2020)

4.4 Especificações do manipulador

Para definir as especificações do robô foram também analisados os manipuladores apresentados na tabela 1 para que o manipulador projetado possa ter requisitos semelhantes aos manipuladores utilizados em mercado.

Para a definição do *payload* (carga útil) foram analisadas a carga útil dos manipuladores de mercado e logo após os objetos mais utilizados no cotidiano e que fariam parte da rotina do usuário com seu manipulador. De acordo com os payloads dos manipuladores estudados no benchmarking foi encontrado o payload médio em kg, desconsiderando o manipulador Friend que possui um Payload muito superior aos outros

$$\frac{payload_{Raptor} + payload_{Jaco} + payload_{Manus} + payload_{Luis}}{4} \quad (4.1)$$

$$\frac{1,81 + 1,5 + 1,2 + 1,5}{4} = 1,5kg \quad (4.2)$$

Após encontrar este valor médio foi feita a análise dos objetos que o usuário deverá ser capaz de segurar com o manipulador trabalhado para que possa realizar atividades básicas, os valores encontrados podem ser consultados na tabela 7.

Esses pesos foram obtidos pesando objetos do dia a dia com uma balança de cozinha. Objetos do dia a dia, em geral, possuem um peso menor do que esta carga útil média encontrada.

Objeto	Massa (kg)
Garfo	0,036
Copo de água (vidro 300ml)	0,55
Livro (600pgs capa dura)	0,9
Prato de cerâmica (vazio)	0,4

Tabela 7 – Peso aproximado de alguns objetos do cotidiano

Para objetos mais comuns do cotidiano vê-se que sua massa é inferior à carga útil média encontrada, porém é possível perceber que alguns objetos podem alcançar massas maiores, por exemplo, para um copo de água cheio ou um prato com alimentos dentro, desta forma será almejado um payload médio de 1,5kg para que o manipulador se mantenha dentro dos valores comumente atingidos pelos manipuladores e garantir que o manipulador consiga agarrar os objetos do cotidiano. Devido aos objetivos do manipulador não serão definidos pesos de carga útil maiores para garantir um manipulador mais econômico ao final do projeto e um projeto mais leve. A média de payload seria muito superior a este valor escolhido se fosse considerado o manipulador FRIEND que possui um payload muito superior aos outros.

Uma outra definição que deve ser feita e que é de extrema importância é o alcance do manipulador visto que isto determina o tamanho dos elos e conseqüentemente os cálculos de outros parâmetros do manipulador. De acordo com a [ABNT \(2015\)](#) as cadeiras devem permitir, com deslocamento de tronco, que o usuário alcance até 1,2m de altura, 0,64m à sua frente e 0,6m esticando os braços na lateral.

Como o objetivo do manipulador é trazer mais liberdade ao usuário, será estudado um manipulador que permita um alcance próximo à boca do usuário para que este consiga se alimentar e se hidratar e que o usuário consiga pegar objetos que estejam um pouco acima de sua cabeça também, como objetos em estantes. Para o alcance frontal foi calculada também a média alcançada pelos manipuladores estudados na tabela 1.

$$\frac{alcance_{Raptor} + alcance_{Weston} + alcance_{Jaco} + alcance_{Manus} + alcance_{Luis}}{5} \quad (4.3)$$

$$\frac{1,21 + 1,2 + 0,9 + 1,1 + 0,9}{5} = 1,062m \quad (4.4)$$

De acordo com a média encontrada e as normas para alcances em cadeiras de rodas definidas pela [ABNT \(2015\)](#) será definido um alcance de 1m na lateral e à frente do usuário um alcance superior a meio metro, isto supre os valores exigidos pela norma e garante um alcance maior para o usuário. Devido à estrutura horizontal e suas vantagens de exigir menos esforços do motor é passível de ser estudado o aumento deste alcance em trabalhos futuros para que o usuário possa, por exemplo, abrir portas com maior facilidade, sem que a cadeira se choque à porta.

5 Projeto Preliminar

5.1 Dimensionamento dos elos

Tendo como base os requisitos de projeto que foram definidos no projeto conceitual foi necessário um estudo de como seriam melhor distribuídos os comprimentos de cada elo. Esta questão envolve diversos fatores que devem ser estudados para que seja encontrada a melhor solução possível.

Dentre estes fatores há o estudo da distribuição das cargas durante a aplicação destas. A depender do comprimento de cada elo e da posição em que seriam posicionados os motores e aplicadas as cargas, ou se os elos tiverem comprimento mal distribuído, esses fatores poderiam aumentar desnecessariamente a inércia total do sistema. Inércias muito altas impactam no projeto aumentando custos com motores maiores para movimentar a carga ou aumentar a secção transversal dos elos para evitar deformações e deflexões do manipulador.

Um outro ponto importante a ser estudando quando se trata do dimensionamento dos elos é o volume de trabalho, entender os objetivos do manipulador é importante na hora desta tomada de decisão para que o manipulador tenha condições de atuar como é esperado no projeto e fornecer mais liberdade ao usuário.

Foram definidas três principais hipóteses de comprimentos dos elos e foram testadas as áreas de trabalho de cada uma destas hipóteses para que fosse decidida a melhor opção. Para a geração dos volumes de trabalho foi utilizado um script em MatLab que permitiu uma melhor visualização de onde o elo do manipulador poderia atuar, o que norteou a escolha dentro das hipóteses levantadas.

As hipóteses foram testadas de acordo com o alcance total definido de 1 metro, o primeiro teste foi feito com os elos de mesmo tamanho, cada um com 0,50 metro, a segunda bateria de testes foi feita com um elo sendo o dobro do outro e a terceira bateria de testes foi feita considerando um elo possuindo um comprimento muito maior com relação ao outro. O objetivo é entender qual configuração trará uma área de trabalho mais completa e que atendessem melhor ao projeto. Foram testados para cada caso uma movimentação de 0° a 180° em cada um dos elos.

Nas figuras 25, 26, 27, 28 e 29 são mostradas as áreas de trabalho encontradas para diversos tamanhos de elos e há também uma representação destes elos em um determinado ponto da área de trabalho em que o elo 1 está sendo representado pela linha vermelha e o elo 2 está sendo representado pela linha verde sobre as figuras. O ponto preto representa o ponto (0,0) e o efetuador terminal estaria na extremidade livre da linha verde.

A figura 25 mostra o resultado da área de trabalho considerando os dois elos possuindo o mesmo comprimento (0,5 m cada).

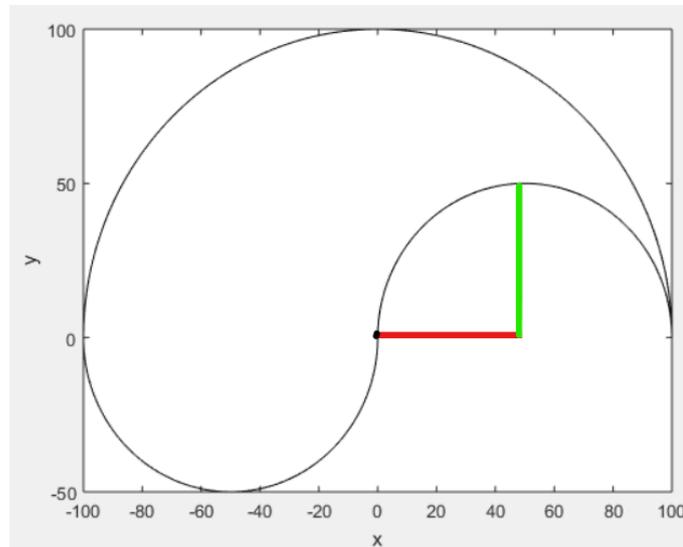


Figura 25 – Elo 1 e elo 2 iguais a 0,50 metro cada

Foi feito um teste também para áreas de trabalho quando um elo possui o dobro do tamanho do outro. A figura 26 representa a área de trabalho quando o elo 1 possui comprimento igual a 0,67 m e o elo 2 possui 0,33 m. A figura 27 representa a área de trabalho quando o elo 2 possui o dobro de comprimento do elo 1

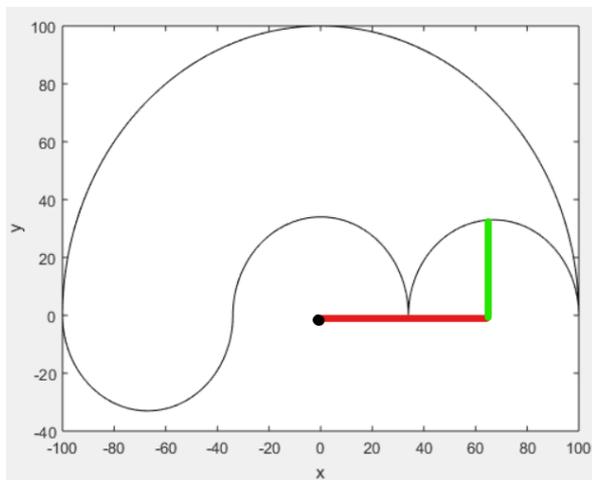


Figura 26 – Elo 1 possuindo o dobro de comprimento do elo 2

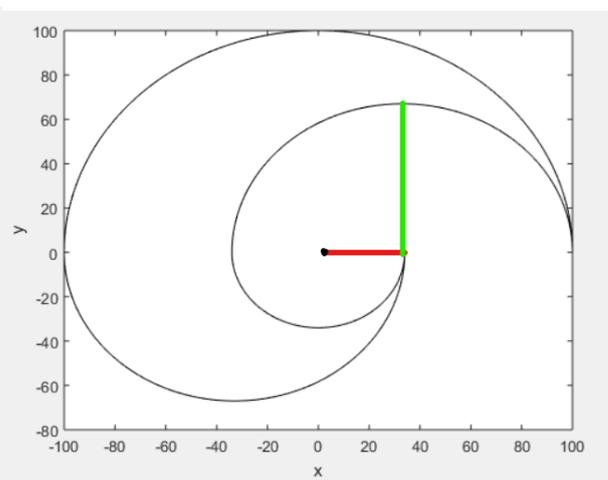


Figura 27 – Elo 2 possuindo o dobro de comprimento do elo 1

A última bateria de testes foi feita para testar o extremo, o caso de um elo do manipulador ser muito maior que o outro, foram utilizados então nos testes os comprimentos de 0,8 m no elo 1 e 0,2 m no elo 2, para o segundo teste os valores foram invertidos e os resultados estão apresentados nas figuras 28 e 29

Com base nas imagens foi possível perceber que as figuras 25 e 26 apresentaram os melhores resultados, com áreas de trabalho mais abrangentes e que poderiam atender

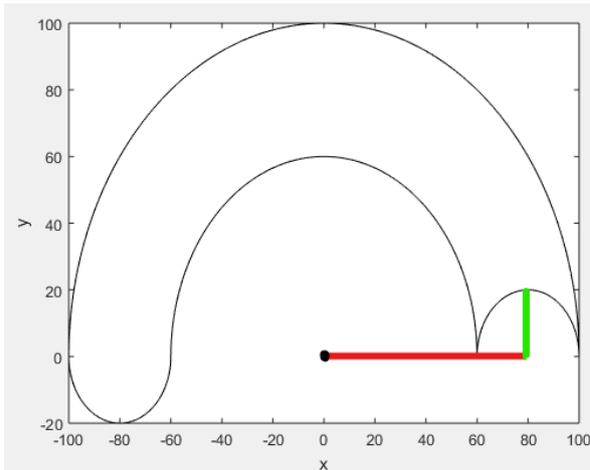


Figura 28 – Elo 1 possuindo um comprimento muito maior que o comprimento do elo 2

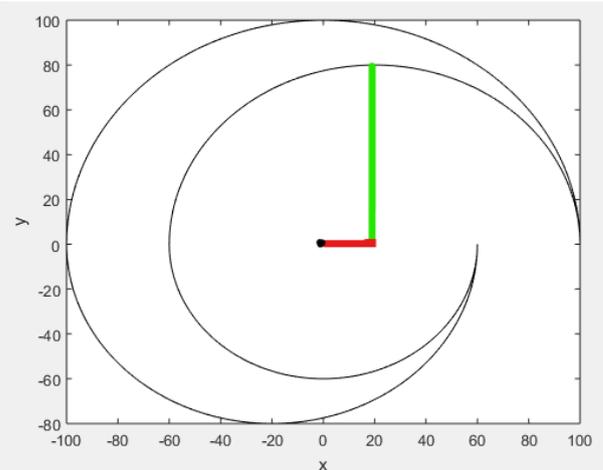


Figura 29 – Elo 2 possuindo um comprimento muito maior que o comprimento do elo 1

melhor ao usuário. Em busca de um melhor balanceamento e com base nas áreas de trabalho estudadas foi então definido o uso de dois tubos com comprimentos iguais, resultando em dois tubos de 0,5 m cada.

Após a escolha do comprimento do elo é importante também fazer um estudo acerca da deflexão do tubo de alumínio quando aplicada uma carga sobre o manipulador, com base na deflexão máxima permitida pelo manipulador é possível dimensionar o tubo escolhendo sua seção transversal. Não há em literatura nenhuma definição deflexão máxima, porém robôs industriais buscam menores valores para garantir uma maior precisão durante a operação.

Foi definida ainda assim uma taxa de deflexão baixa, ou seja, um erro no posicionamento do manipulador, visto que a configuração SCARA garante que o manipulador não irá atuar contra a gravidade, o que permite um controle mais facilitado por parte do usuário, visto que o controle não será feito com realimentação para manter o posicionamento. O manipulador será controlado unicamente pelo usuário e grandes deflexões podem dificultar o uso.

Segundo [Craig \(2012\)](#), os elos do manipulador podem ser considerados como vigas em balanço, visto que seu único apoio está nos eixos de movimentação. Esse tipo de viga apresenta deflexões maiores e devem ser feitos cálculos com o intuito de acessar um menor desvio. De maneira a simplificar os cálculos da deflexão o manipulador pode ser considerado, com seus dois elos, como uma única viga e os cálculos serem aplicados em cima deste modelo tendo então um esquema aproximado ao da imagem [30](#)

Para os cálculos no manipulador Scara é necessário entender onde as forças serão aplicadas, e no sistema há a presença da carga de payload suportado pelo manipulador, para os cálculos considerado um payload 1,5kg aplicado na extremidade do sistema e também a

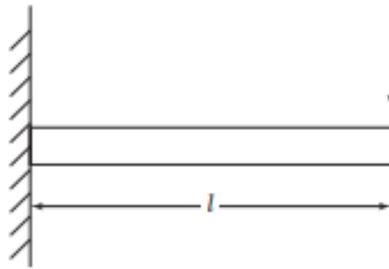


Figura 30 – Modelo de rigidez com viga em balanço (CRAIG, 2012)

carga da massa dos elos do manipulador aplicada em seu centro de gravidade. A princípio será realizado o cálculo em cima de valores aproximados, como peso do tubo e peso dos atuadores a fim de encontrar um valor base e após os dimensionamentos, os valores serão ajustados com base nas massas reais encontradas.

O projeto pode ser aproximado com base nas imagens 30 e 31 e os cálculos serão feitos utilizando uma flecha máxima de 0,5% do comprimento da viga.

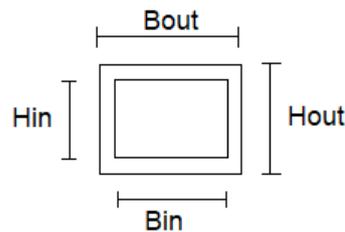


Figura 31 – Secção transversal do tubo de alumínio utilizada no projeto

Esse desvio pode ser calculado utilizando as equações 5.1 e 5.2 que representam a carga aplicada pelo objeto carregado pelo manipulador, aplicado no efetuador terminal e a carga da massa do próprio manipulador. Sendo δ o deslocamento da viga quando uma carga for aplicada. L representa o ponto de aplicação da carga, E é o módulo de elasticidade do material e I é o momento de inércia. (JUVINALL; MARSHEK, 2013)

$$\delta_1 = \frac{PL^3}{3EI} \quad (5.1)$$

$$\delta_2 = \frac{Pa^2}{6EI}(3L - x) \quad (5.2)$$

Para os cálculos foram consideradas as seguinte massas:

- Garra: 1 kg
- Payload: 1,5 kg

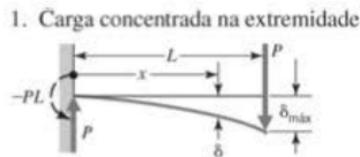


Figura 32 – Carga aplicada no efetuador terminal

(JUVINALL; MARSHEK, 2013)

2. Carga concentrada em uma seção qualquer

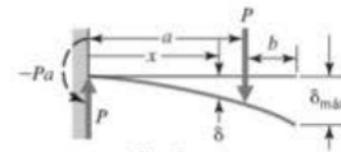


Figura 33 – Carga aplicada no centro de gravidade

(JUVINALL; MARSHEK, 2013)

- Motores: 0,5 kg (cada)
- Estrutura: 2 kg (dois elos)

O momento de área pode ser dado pela equação 5.3: (MELLO, O., 2016)

$$I = \frac{B_{out}H_{out}^3 - B_{in}H_{in}^3}{12} \quad (5.3)$$

Após a realização dos cálculos foram testadas secções transversais encontradas no mercado que apresentassem o deslocamento máximo da estrutura igual a 0,005 m

$$\delta_1 + \delta_2 = 0,005 \quad (5.4)$$

Foi encontrada então uma secção transversal mínima para um tubo quadrado com 38,10 mm x 38,10 mm e espessura de 3,17 mm que apresentava desvio máximo da flecha igual a $\delta = 0,003892$ mm, uma diferença de $e = 0,0011072$ do valor esperado de $\delta_{max} = 0,005$.

Definido o alcance dos elos, foi estudada a melhor opção de secção transversal com base na rigidez desta, podendo então ser trabalhados tubos de secção transversal circular ou quadrada, considerando tubos, visto que o objetivo é facilitar a montagem e reduzir o peso total do sistema.

Para o cálculo da rigidez é possível utilizar a equação 5.5 para secção transversal redonda oca e a equação 5.6 para a secção transversal quadrada. (CRAIG, 2012)

$$K_{circular} = \frac{3\pi E(d_s^4 - d_e^4)}{64l^3} \quad (5.5)$$

$$K_{quadrado} = \frac{E(w_o^4 - w_i^4)}{4l^3} \quad (5.6)$$

Em que d_s e d_e são os diâmetros externo e interno do tubo redondo e w_o e w_i são as larguras externas e internas do tubo. E é o módulo de elasticidade.

Considerando uma mesma área de secção para perfis quadrados ou circulares é possível chegar à relação mostrada na equação 5.7:

$$w^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (5.7)$$

Fazendo a relação entre os dois valores de rigidez, é possível obter que a secção transversal quadrada possui uma rigidez aproximadamente 1,28 vezes maior que a rigidez de um tubo de secção transversal circular para a mesma área da secção. Unindo essa maior rigidez, com a facilidade maior de adquirir tubos quadrados de alumínio, devido à disponibilidade, foi definido o uso de tubos de secção transversal quadrada.

5.2 Atuadores

5.2.1 Dimensionamento e posicionamento dos motores

Após a definição da secção transversal dos elos, é necessário fazer a realização do dimensionamento dos motores para que sejam calculados os torques necessários e o motor de passo a ser utilizado com base no torque encontrado. Para o correto dimensionamento é necessário primeiro definir o posicionamento dos atuadores, visto que, a depender de onde estes estão posicionados, a inércia do sistema muda resultando em uma necessidade maior ou menor de torques.

Foram definidos inicialmente duas propostas de posicionamento destes atuadores, o primeiro necessitando de transmissão de movimento, tendo os atuadores posicionados fora do eixo de movimentação e a outra proposta são os atuadores posicionados diretamente no eixo. A partir disso é possível fazer o cálculo da inércia total do sistema o que possibilita o cálculo do torque total requisitado ao motor.

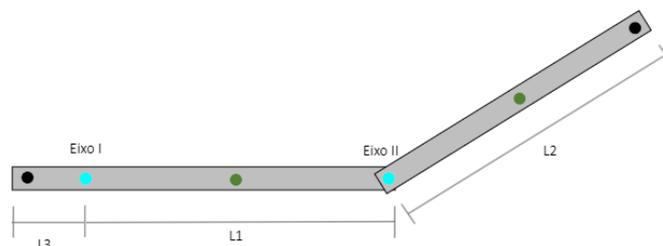


Figura 34 – Modelo padrão de montagem do manipulador

As configurações foram montadas com base na estrutura da figura 34. As fórmulas 5.8, 5.9 e 5.10 são fórmulas gerais que serão utilizadas para calcular os torque em cada uma dos eixos apresentados na figura 34.

Para a realização dos cálculos é necessário entender onde os motores estarão posicionados na configuração do manipulador e inicialmente foram estudadas duas configurações,

uma configuração onde os atuadores serão instalados diretamente no eixo, como apresentado na figura 35 e a segunda configuração contém todos os motores em uma extremidade e a movimentação será transmitida para os eixos utilizando sistemas de correias e polias, como apresentado na figura 36

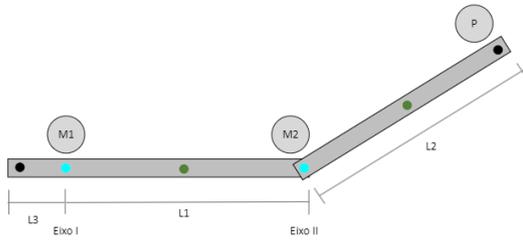


Figura 35 – Configuração I - motores posicionados no eixo

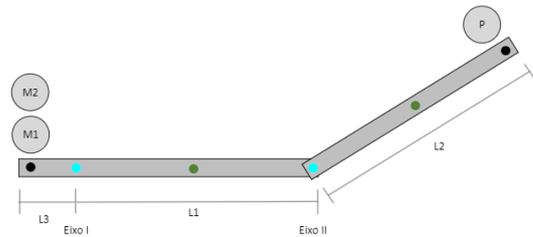


Figura 36 – Configuração II - motores posicionados fora do eixo

Para os cálculos foram aplicadas as mesmas cargas utilizadas no cálculo de deflexão dos elos, porém a massa da estrutura foi adaptada a valores comerciais encontrados para tubos quadrados de alumínio de dimensões 38x38 mm e espessura de 3,17mm que possui a massa de 1,196 kg/m.

Para a configuração I (figura 35) foram encontrados as equações de inércia 5.8 para o eixo 1 e a fórmula 5.9 para o eixo 2.

$$I_{eixo1} = P(L_1 + L_2)^2 + M_{tubo2}(L_1 + \frac{L_2}{2})^2 + M_2L_1^2 + M_{tubo1}(\frac{L_1}{2})^2 \quad (5.8)$$

$$I_{eixo2} = PL_2^2 + M_{tubo2}\frac{L_2^2}{4} \quad (5.9)$$

Onde M_{tubo1} consiste na massa do primeiro elo e M_{tubo2} consiste na massa do segundo elo. A massa M_2 consiste na massa aproximada do motor de passo de 0,5kg. o símbolo I_{eixo2} representa a inércia da segunda junta e P é a carga do payload mais o peso da carga, aqui foi considerado que o conjunto é equivalente a 2,5kg.

Para o cálculo da inércia da configuração II (figura 36) no eixo I pode ser utilizada a fórmula 5.10 e no eixo 2 pode ser utilizada a fórmula 5.9 para o eixo 2.

$$I_{eixo1} = P(L_1 + L_2)^2 + M_{tubo2}(L_1 + \frac{L_2}{2})^2 + M_{tubo1}(\frac{L_1}{2})^2 + (M_1 + M_2)L_{,,3}^2 + M_{tubo3}(\frac{L_3}{2})^2 \quad (5.10)$$

Onde M_1 e M_2 são as massas dos motores aproximadas para 0,5kg e o L_3 consiste no valor 0,1m e L_1 e L_2 consistem no comprimento dos elos de 0,5m cada. M_{tubo1} e M_{tubo2} consistem na massa de cada tubo, consistindo no valor aproximado de 0,598kg. P é a carga do payload e o peso da carga, aqui foi considerado que o conjunto equivale a 2,5kg.

-	Conf I	Conf II
Eixo I (kgm^2)	2,998	2,88
Eixo II (kgm^2)	0,6623	0,6623

Tabela 8 – Inércia nas juntas

Os resultados de Inércia encontrados estão apresentados na tabela 8

O eixo II possui a mesma inércia para as duas configurações visto que foi considerado uma mesma garra já contendo seu motor acoplado, sem possibilidade de posicionar em outro eixo.

Basta encontrar o torque com base na inércia para que seja possível decidir o motor de passo ideal para cada uma das configurações. Foi considerada uma velocidade que permitisse que em 5 segundos cada elo fizesse uma movimentação de 180° , com base nisso e a partir das relações entre a velocidade angular e velocidade linear é possível encontrar o torque necessário. (RESNICK; HALLIDAY, 1983)

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} \quad (5.11)$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta T} \quad (5.12)$$

$$\tau = I\alpha \quad (5.13)$$

Com base na equação 5.11 foi encontrada a velocidade angular e posteriormente a aceleração angular utilizando a equação 5.12. Foi encontrada então uma aceleração angular $\alpha = 0,1256 \frac{rad}{s^2}$.

Utilizando a aceleração angular e a inércia em cada elo foi encontrado o torque necessário para girar os eixos resultando em

-	Conf I	Conf II
Eixo I ($kgfcm$)	3,839	3,692
Eixo I (Nm)	0,3765	0,3621
Eixo II ($kgfcm$)	0,848	0,848
Eixo II (Nm)	0,08318	0,08318

Tabela 9 – Torque requerido nas juntas

Com base nos torques exigidos por cada elo, foi pesquisado o motor de passo que pudesse atender aos requisitos, foi aplicado um valor de 10% a mais para cobrir pequenos recursos a mais que serão inseridos no manipulador, como por exemplo, polias, parafusos,

dentre outros, foi encontrado então, catalogados, os motores Nema 17 para o segundo eixo e o Nema 23 para o primeiro eixo.

Resta dimensionar o motor que irá fazer o movimento vertical do manipulador, levantando ou abaixando os elos do manipulador.

5.2.1.1 Parafuso de potência

Será necessário executar um movimento linear na base, visto que o motor executa movimentos rotacionais, será necessário utilizar mecanismos que permitam a transformação do movimento rotacional em linear. Um dos dispositivos mais utilizados para esta finalidade são os parafusos de potência, ou como são mais conhecidos, os parafusos de avanço. (CRAIG, 2012)

O parafuso de potência possui algumas características como o tamanho de seu avanço, o tipo de rosca, número de entradas, e deve ser escolhido de acordo com a disponibilidade e de maneira também a satisfazer os requisitos de projeto. Para a elevação e descida do manipulador foi escolhido o fuso de perfil de rosca trapezoidal, aplicado quando se quer ter movimentos mais suaves, requisito importante para a WMRA considerando a segurança do usuário considerando que este dispositivo será sempre utilizado ao lado do usuário e deve-se evitar movimentos bruscos e violentos. (GORDO; FERREIRA, 2012)

O parafuso trapezoidal também é mais facilmente encontrado em lojas e é mais facilmente usinado o que garantiu sua popularização. Ele é característico por possuir uma angulação de $\alpha = 30^\circ$. Será utilizado no projeto o parafuso TR8, facilmente encontrado no mercado, possuindo um passo de 2mm e um diâmetro de 8mm. Um fuso de diâmetro menor foi utilizado com o intuito de diminuir o peso total do sistema e seu avanço foi definido principalmente pela facilidade de obtenção deste fuso e fazendo a adaptação do projeto diante das características do fuso.

Para que seja dimensionado o motor de passo utilizado na base, será necessário realizar o cálculo do torque no parafuso e com base neste torque fazer a escolha do atuador mais adequado. Para o cálculo do torque, existem algumas equações que podem ser utilizadas, porém são equações distintas para os torques de subida e de descida da carga. Para o dimensionamento serão calculadas as duas opções (subida e descida) e será utilizado o maior torque requerido ao motor. As equações de torque estão representadas nas equações 5.14 e 5.15 e além destas duas equações, deve ser acrescido ao torque total, o torque que será aplicado na castanha que está representado na equação 5.16. (BUDYNAS; NISBETT, 2007)

$$\tau_r = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi\mu d_m \sec\alpha}{\pi d_m - \mu l \sec\alpha} \right) \quad (5.14)$$

$$\tau_d = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{\pi\mu d_m - l}{\pi d_m + \mu l} \right) \quad (5.15)$$

$$\tau_c = \frac{F\mu_c d_c}{2} \quad (5.16)$$

Onde τ_r é o torque de subida do manipulador, τ_d é o torque de descida e τ_c é o torque na castanha. F é a força aplicada pela carga e massas no manipulador. d_m é o diâmetro da rosca e μ é o atrito entre o parafuso e a porca. Os valores de atrito podem ser encontrados na tabela 10 que apresenta os coeficientes de atritos entre alguns materiais obtida de maneira experimental de acordo com os materiais do parafuso e da porca.

Material do parafuso	Material da Porca			
	Aço	Bronze	Latão	Ferro fundido
Aço (seco)	0,15 - 0,25	0,15-0,23	0,15-0,19	0,15 - 0,25
Aço (lubrificado)	0,11 - 0,17	0,10-0,16	0,10-0,15	0,11 - 0,17
Bronze	0,08 - 0,12	0,04-0,06	-	0,06 - 0,09

Tabela 10 – Tabela experimental de atrito entre diversos materiais (SHINGLEY, 2005)

A partir das equações para cálculo de torque no fuso, somando o resultado da fórmula 5.14 ao torque aplicado na castanha (equação 5.16) foi encontrado um torque exigido ao motor da base para a subida da carga de 3,569 kgfcm (0,349 Nm). Para a descida da carga foi feito o mesmo procedimento e foi encontrado um valor um valor de 2,5492 kgfcm (0,249 Nm), estes valores de torque irão exigir o uso de um motor Nema 23, com base no datasheet base utilizado para os dimensionamentos dos atuadores.

5.2.1.2 Polias e correias

Optou-se por utilizar uma redução nos motores dos elos 1 e 2 para aumentar o torque movido o que permitiria a redução do tamanho do motor do elo 1, visto que a depender da redução calculada, seria possível utilizar um Nema 17 ao invés do Nema 23, reduzindo também o peso do atuador no sistema e no elo 2 será utilizada uma redução para que haja uma folga maior entre o torque máximo do motor e o torque exigido pelo sistema, evitando as trepidações e perda de precisão que podem ocorrer no motor de passo quando toda sua capacidade de torque é utilizada, visto que esse torque a mais exigido gera uma quebra de sincronismo entre o driver e o rotor.

Um ponto importante a ser considerado é que em caso de uso de redução em que se busca aumentar o torque fornecido pelo motor, há a perda de velocidade deste motor, sendo esta proporcional ao aumento do torque, sendo assim, deve ser avaliada cautelosamente quanto de redução será feita de maneira a não prejudicar o sistema.

Inicialmente o cálculo foi feito para que os elos percorressem 180° em até 5s. Com o uso da redução a velocidade iria cair proporcionalmente, então foi projetada uma redução de

1:2 visto que a velocidade dos elos, apesar de cair pela metade, ainda conseguiria percorrer o espaço proposto em um intervalo de tempo curto, sem prejudicar o uso do sistema.

Para a montagem da redução foi utilizado o conjunto de polias e correia 2GT composto por uma polia de 20 dentes e uma segunda polia que 40 dentes que serão utilizadas, respectivamente como a polia motora e a polia movida. Esse conjunto foi escolhido em busca da facilidade em encontrar no mercado esses componentes, e também o tamanho das polias que é reduzido garantindo então uma melhor utilização do espaço na montagem do manipulador.

5.2.2 Driver

Para o acionamento dos motores de passo é necessário utilizar drivers que são responsáveis pela energização, de maneira coordenada, das bobinas. O driver também fornece a corrente necessária para alimentar o motor e esta informação, tirada de seu datasheet, é importante na escolha do driver a ser utilizado durante o projeto.

A primeira característica estudada foi a polaridade do driver. O driver precisa possuir a mesma polaridade do motor. No caso deste projeto em que está sendo utilizado um motor bipolar, o driver precisa possuir esta característica.

Existem diversos drivers disponíveis no mercado, cada um possui determinadas especificações que são estudadas durante a escolha. Alguns drivers tem se popularizado e são comumente utilizados juntamente aos motores de passo, dentre eles estão o A4988, o TB67S, ULN2003.

Para a aplicação no projeto foi escolhido o driver A4988. Este driver fornece uma corrente de $\pm 2A$, um valor de corrente correto para a alimentação de ambos motores, tanto o Nema 17, quanto o Nema 23. O Nema 17 e o Nema 23 utilizados terão duas fases, possuindo um ângulo de deslocamento de $1,8^\circ$. A informação sobre a corrente necessária para alimentar o motor pode ser encontrada no datasheet dos motores de passo. Utilizando o datasheet foi encontrado que o Nema 17 bipolar necessita de $0,07 A/fase$, e o Nema 23 bipolar necessita de $1,2 A/fase$, garantindo, então que o driver escolhido atende aos motores utilizados caso as duas fases do Nema 23 não sejam acionadas.

Outro ponto importante para a escolha do driver foi a facilidade de obtenção e uso. Além do custo baixo, o driver A4988 é facilmente encontrado, além de possuir shields prontos para uso destes drivers juntamente ao arduino. Isto facilita o controle destes motores utilizando o microcontrolador. Pode ser utilizado o Shield CNC V3 que pode ser acoplado facilmente ao arduino UNO e possui capacidade de controlar até 4 drivers, no projeto serão necessários três drivers, visto que serão utilizados três motores, porém o Arduino utilizado será o Mega 2560 devido a quantidade de portas requeridas pelos sensores, motores e joystick. A figura 37 mostra as ligações do driver para acionamento do motor.

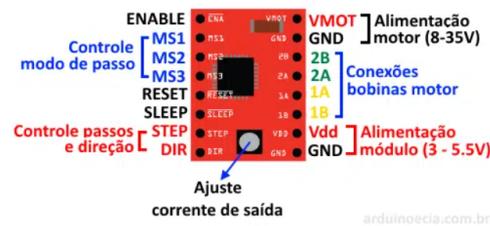


Figura 37 – Esquemático de ligações do A4988 (ARDUINO E CIA , 2021)

5.3 Alimentação do sistema

Em busca de um sistema que seja móvel e que possa acompanhar a cadeira de rodas, o projeto proposto é utilizar baterias na cadeira de rodas que possam alimentar o manipulador. Caso a cadeira seja elétrica, é viável também, a depender do gasto da cadeira de rodas, aproveitar da bateria já conectada à cadeira para alimentar o manipulador, evitando instalações adicionais na cadeira.

Considerando cadeiras de rodas comuns, não elétricas, o projeto precisaria de uma alimentação externa. Sendo assim será proposto o uso de baterias para ligar os motores, drivers e elementos elétricos do sistema do manipulador.

O manipulador não tem como propósito o uso contínuo, ininterrupto. O usuário, quando necessitar, irá acionar os motores, mover os elos e posicionar e depois o manipulador ficará parado até a próxima interação do usuário. Porém, para fazer um dimensionamento melhor da bateria, será considerado o uso ininterrupto do manipulador para que seja encontrado o gasto do total do sistema.

Utilizando os datasheets e informações sobre cada componente, foi encontrado o gasto de corrente por componente e as informações foram inseridas na tabela 11.

Componente	Gasto por componente (A)	Quantidade	Gasto total (A)
Nema 17 (2 fases)	0,42 (por fase)	2	1,68
Nema 23 (2 fases)	1,2 (por fase)	1	2,4
Driver A4988	0,004	2	0,008
Driver L298N	0,004	1	0,004
Sensor de fim de curso	0,31	6	1,86
Arduíno	1,11	1	1,11
Total	-	-	7,062

Tabela 11 – Gasto de corrente de cada componente

O gasto total do sistema seria então de aproximadamente 7,1 A. Considerando um sistema que funcionaria sem pausas, é possível estimar o uso do manipulador por 4 horas de uso contínuo para evitar cargas constantes e o trabalho envolvido em fazer o carregamento da bateria e aumentar a disponibilidade do manipulador diminuindo o tempo que o mani-

pulador ficaria sem ser utilizado enquanto a bateria carrega. Para atender a essa demanda seria necessário uma bateria com capacidade de 28,4 Ah.

Consultando catálogos, foi encontrada a bateria mais próxima a esse valor que possa atender às 4 horas continuamente, a bateria de 33 Ah e 12V. Ela conseguirá atender o manipulador por aproximadamente 4h30 de uso constante. Há a possibilidade também de utilizar a bateria com capacidade de 28Ah e 12V, porém o sistema iria durar um pouco menos que 4 h, atendendo aproximadamente 3h50

O manipulador irá ser utilizado por muito mais tempo antes da necessidade de recarga porque o seu uso não será contínuo, será sob demanda. As baterias de menor amperagem/hora costumam ser menores e mais leves, diminuindo o peso do equipamento na cadeira e possuem valor de aquisição menor, por isso não serão utilizadas no projeto baterias que fornecem alimentação suficiente para o funcionamento contínuo do manipulador por mais horas.

A bateria fornece 12V e alguns elementos exigem uma alimentação menor, como o arduino e os sensores, por isso, deve ser utilizado um regulador de tensão que consiga fornecer a voltagem esperada pelo sistema, porém que forneça uma corrente adequada para o bom funcionamento dos componentes.

Considerando todos os componentes que necessitariam de um regulador, seria necessária uma corrente de aproximadamente 3 A e 5V para a alimentação. O regulador de tensão LM2596 é uma boa alternativa, é um regulador de tensão step-down que possui saídas em tensões ajustáveis ou fixas para 3,3V, 5V ou 12V atendendo às necessidades do projeto, sua tensão de entrada é de até 40V e este regulador entrega até 3A de corrente, além de ter um custo baixo para uso no projeto.

Então o sistema de alimentação do projeto irá consistir no uso de uma bateria de 12V e 28Ah que visa o uso contínuo do manipulador por aproximadamente 3h50 e um regulador de tensão que ficará responsável pela alimentação do microcontrolador e dos sensores de fim de curso utilizados no projeto.

5.4 Rolamentos

Em algumas partes do projeto é importante utilizar rolamentos. Os rolamentos buscam reduzir o atrito em partes móveis, como por exemplo, em eixos. Os rolamentos reduzem os esforços de cargas e facilitam na movimentação de objetos em um sistema.

É possível utilizar juntamente aos rolamentos, mancais que possuem maior resistência e suporte são muito utilizados em eixos e possuem um custo baixo e fácil instalação e manutenção.

Para a escolha dos rolamentos é importante entender se estes conseguem atender ao

uso requerido a estes. Foi estudado inicialmente o rolamento 608ZZ que é um rolamento bastante popular, resultando em um componente de baixo custo. Usualmente ele é utilizado em skates e patins, porém foi estudado como este rolamento se portaria e se ele poderia ser utilizado no projeto.

Um cálculo importante a ser feito é a vida dos rolamentos, o número de rotações que serão executadas antes que o rolamento comece a apresentar sinais de fadiga. A vida do rolamento depende de diversos fatores, dentre eles o material, a carga suportada, o ambiente em que o rolamento está instalado (temperatura, poeira, lubrificação...). Para calcular a vida, pode-se utilizar a relação apresentada na equação 5.17. (FORTULAN; JUNIOR; CARVALHO, 2018)

$$L_{mr} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (5.17)$$

Sendo C a carga dinâmica do rolamento, informação tirada de catálogo e P a carga dinâmica aplicada, ambas em Newtons(N). A fórmula da vida pode ser ajustada para a equação 5.18

$$L = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (5.18)$$

Esses valores podem ser obtidos em catálogos fornecidos por fabricantes. O valor de a_1 , representa a confiabilidade antes da falha pode ser obtido da tabela 12, esta tabela foi retirada do fabricante SKF

%	a_1
90	1,00
95	0,62
96	0,53
97	0,44
98	0,33
99	0,21

Tabela 12 – Fator de ajuste da confiabilidade

Foi selecionado então um valor de confiabilidade de 95%. Deve ser definido também o a_2 que é o fator de ajuste para material do rolamento. Para condições inferiores a temperatura menor que 150°C pode ser considerado um valor de a_2 igual a 1,00. (FORTULAN; JUNIOR; CARVALHO, 2018)

O valor de a_3 que é o equivalente ao fator de ajuste para lubrificação também possui um valor tabelado que pode ser aproximado para o valor de 1.00. Para a realização dos cálculos, será utilizada como base uma tabela guia para valores nominais de vida com base na classe da máquina. (SKF, 2015).

Foi encontrada na tabela presente em [SKF \(2015\)](#), de acordo com a classe do manipulador projetado, uma carga de 10000 a 25000 horas de trabalho considerando máquinas com 8 horas de trabalho não totalmente utilizados. Então esses valores serão utilizados considerando o valor máximo de 25000 horas de trabalho, resultando então em uma vida de $L=15500$. ([FORTULAN; JUNIOR; CARVALHO, 2018](#))

Com este valor pode ser encontrada então a vida para milhões de rotação por meio da equação 5.19

$$L_{mr} = 60(10^{-6})nL \quad (5.19)$$

Considerando uma rotação máxima de 15rpm e substituindo os valores na equação 5.17 é possível encontrar uma carga de 1,042KN, aplicando 10% de segurança ao valor. O 608ZZ possui resistência à carga estática de até 1,37KN, então este rolamento suporta o uso no manipulador projetado sendo então o rolamento escolhido para os elos.

Foi utilizado também o rolamento linear ou bucha de esfera linear no eixo vertical da base, esse rolamento está representado na figura 38. Esse rolamento é muito utilizado em impressoras 3D e máquinas CNC, ele diminui o atrito para cargas que sejam de leve a moderada e que requerem um movimento linear, exigindo menos dos motores para realizar a movimentação ascendente e descendente. Esses rolamentos possuem alta resistência e uma boa durabilidade, além de possuírem um baixo custo e garantirem para o sistema uma maior durabilidade e menos riscos operacionais durante o uso. ([BRUHEL, 2020](#))



Figura 38 – Rolamento linear ([BRUHEL, 2020](#))

5.5 Sensores

Para a implementação do projeto o único sensoriamento utilizado serão os sensores de fim de curso, necessário durante o uso de motores de passo para essa aplicação, porque o motor de passo não guarda registro de sua posição. Será utilizado um sensor de fim de curso para garantir a segurança do sistema e evitar que os elos do manipulador ultrapassem a posição segura e machuquem o usuário ou se choquem à própria estrutura. Existem diversos

tipos de sensores que podem ser utilizados como sensores de fim de curso, para o projeto foram estudados sensores ópticos, indutivos e mecânicos.

5.5.1 Sensores indutivos

São sensores com a capacidade de detectar a presença de metais, sendo um sensor de proximidade, visto que consegue detectar esta presença em distâncias pequenas. São sensores mais robustos, sua estrutura garante que o sensor possa trabalhar em ambientes adversos, com presença de poeira e líquidos. Este sensor é muito utilizado na indústria para diversas aplicações e possui boa precisão além de que pode ser utilizado para detectar o alumínio, no caso do funcionamento como sensor de fim de curso, porém apresenta um custo muito alto para ser utilizado no projeto. (PANIN, 2018)

5.5.2 Sensores mecânicos

Os sensores mecânicos conseguem captar a presença de objetos, a proximidade e até posições de objetos por meio de recursos mecânicos, como por exemplo, switches, interruptores, dentre outros recursos. Esses sensores são muito utilizados como sensores de fim de curso principalmente por possuírem um custo muito baixo, sendo uma boa opção para projetos.

Uma objeção quanto ao uso desses sensores é que eles podem apresentar trepidações ou ruídos, visto que a detecção do objeto é feita pelo contato, então devem ser utilizados filtros e tratamentos para poder ignorar os ruídos e garantir o bom funcionamento deste sensor dentro do sistema. (BRAGA, 2019)

5.5.3 Sensores ópticos

Os sensores ópticos são sensores que trabalham com raios de luz sendo transformados em sinais elétricos. Essa luz pode ser do tipo laser, raios infravermelhos, Leds, a necessidade do sistema define qual sensor será utilizado. Um dos possíveis sensores ópticos para serem utilizados no projeto é o sensor óptico reflexivo, ele funciona a partir da reflexão da luz que é emitida pelo próprio sensor, essa luz é polarizada o que garante que o sensor detecte apenas a luz emitida e não outras luzes presentes no ambiente. (OLIVEIRA, E., 2019)

Esse modelo de sensor também permite detecção a distâncias maiores e funciona muito bem com metais que podem refletir a luz devido a sua superfície reflexiva. Foi escolhido então para o projeto, o uso de um sensor óptico reflexivo que possui baixo custo e fácil ligação com o arduino, controlador a ser utilizado no projeto.

O sensor óptico escolhido, o TCRT5000, mostrado na figura 39. Este sensor é muito utilizado em aplicações de robótica, para detecção de obstáculos ou até mesmo como sensor

de fim de curso e funciona muito bem para projetos que utilizam o arduino, porque consomem uma corrente muito baixa, 60mA, e possuem fácil ligação com a placa, também possui uma codificação mais simples.

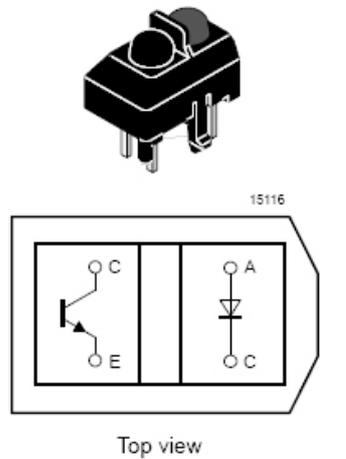


Figura 39 – TCRT5000 (OLIVEIRA, E., 2019)

5.6 Garra

A garra escolhida foi uma garra de dois dedos adaptativa e por possuir dois dedos apenas, o controle é mais simples. A garra adaptativa possui membranas que consegue se adaptar ao formato do objeto que está agarrando. Os objetos caseiros possuem diversos formatos, redondos, cilíndricos, quadrados e alguns desses formatos dificultam o uso apropriado da garra comum que não consegue agarrar de maneira segura ocorrendo o deslizamento do objeto.

A garra adaptativa ainda possui um custo alto, e poucos fabricantes que trabalham com este tipo de garra, porém podem ser feitos estudos de como desenvolver uma garra deste tipo para adaptar ao projeto e diminuir o custo. Sua deformação quando ocorre o movimento de agarrar pode ser visto na figura 40. Este tipo de garra também evita a deformação do objeto que está sendo agarrado, como alimentos do tipo frutas, copos de vidro e garrafas plásticas.

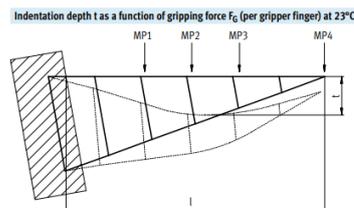


Figura 40 – Deformação do dedo da garra adaptativa quando aplicada uma força (FESTO, 2017)

As figuras 41, 42, 43 e 44 mostram a garra sendo utilizada para diversos objetos e formatos.

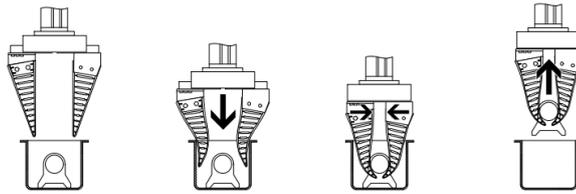


Figura 41 – Adaptação da garra (FESTO, 2017)



Figura 42 – Garra adaptativa segurando uma garrafa de plástico (MOEBIUSTECH, 2017)



Figura 43 – Garra adaptativa segurando uma caixa (MOEBIUSTECH, 2017)



Figura 44 – Garra adaptativa segurando alimentos (MOEBIUSTECH, 2017)

Um outro fator importante é o posicionamento da garra para que o usuário consiga pegar os objetos. O manipulador SCARA possui seu efetuador terminal na ponta do segundo elo e ele faz movimentos translacionais e rotacionais, usualmente uma ferramenta de furo ou uma garra para tarefas de pick-and-place, porém como o manipulador deve ajudar usuários a pegar objetos e se alimentar, se hidratar, o efetuador deve ser pensado de forma que permita essas funcionalidades.

Um efetuador terminal pode ter até três graus de liberdade, são estes chamados de *Roll* ou rolamento/rolagem, *yaw* ou guinada e *pitch* ou arfagem, estes estão sendo mostrado na figura 45

A movimentação de rolamento é a rotação do punho em torno do braço, o movimento de arfagem é uma movimentação vertical e a guinada é a movimentação horizontal (CARRARA, 2015). Com base nessas movimentações, devem ser analisadas algumas tarefas que o manipulador deve fazer para que seja escolhido o tipo de movimentação que a garra deverá fazer.

O objetivo do manipulador é ajudar na alimentação e na hidratação do usuário, além de poder pegar objetos, abrir e fechar portas e desviar obstáculos. Para que o usuário possa

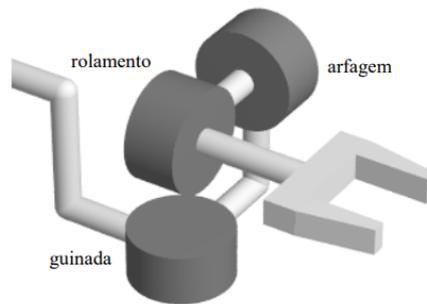


Figura 45 – Graus de liberdade de um efetuador terminal (CARRARA, 2015)

beber, é necessário virar o copo, o que pode ser feito com o movimento de rolamento, por exemplo, colocar a colher na boca pode também exigir essa movimentação. É interessante também que a garra possa também realizar o movimento de arfagem para pegar objetos de posições diferentes ou de maneira a facilitar o manuseio deste. Para diminuir a quantidade de graus de liberdade pode-se definir apenas essas duas movimentações, sem a guinada e suprir essa falta com a movimentação dos elos do manipulador.

No projeto então foi definido um efetuador terminal na ponta do manipulador e com dois graus de liberdade, ele irá realizar movimentações de arfagem e rolamento, como mostrado na figura 46.



Figura 46 – Esquemático de montagem e movimentação da garra

O efetuador deste manipulador não ficará posicionado como nos manipuladores SCARA clássicos, como mostrado na figura 47 porque esta configuração não iria atender o uso proposto para este projeto de alimentação e hidratação do usuário.



Figura 47 – Configuração clássica do robô SCARA (MECTROL, 2022)

Não será feito o projeto e acoplamento da garra neste projeto, porém o objetivo desta seção é trazer a proposta de como a garra pode ser acoplada e utilizada pelo manipulador para que esta atenda também às tarefas definidas para o manipulador.

6 Projeto Detalhado

6.1 Montagem do sistema

Todo o sistema do manipulador foi feito pensando em uma montagem simplificada, que possa atender às normas da NBR 9050 permitindo que o usuário possa passar por portas de 80 cm de largura. A montagem também foi feita com base nos cálculos executados ao longo do desenvolvimento, como posicionamento dos motores, porém com algumas adaptações que facilitarão a montagem do sistema como um todo. O projeto busca trazer um melhor aspecto estético então o material escolhido, o alumínio, além de garantir mais resistência ao manipulador ele também é um metal mais leve, o que resulta em um impacto menor no peso total do manipulador. Os atuadores foram também dimensionados de maneira a conseguir os menores motores diminuindo o peso total do manipulador e evitando sobrecarga na cadeira o que dificultaria a locomoção do usuário.

Outro aspecto importante foi a busca por diminuir a complexidade de fabricação, buscando componentes que podem ser facilmente encontrados, ou impressos em impressoras 3D e os materiais metálicos são facilmente cortados, por CNC's e empresas de metalúrgica. Os posicionamentos de alguns componentes do manipulador foram adaptados para facilitar também a fabricação e adequar melhor as necessidades do projeto com a configuração SCARA.

A modelagem 3D do manipulador com as adaptações feitas a partir dos modelos teóricos está apresentada na figura 48.

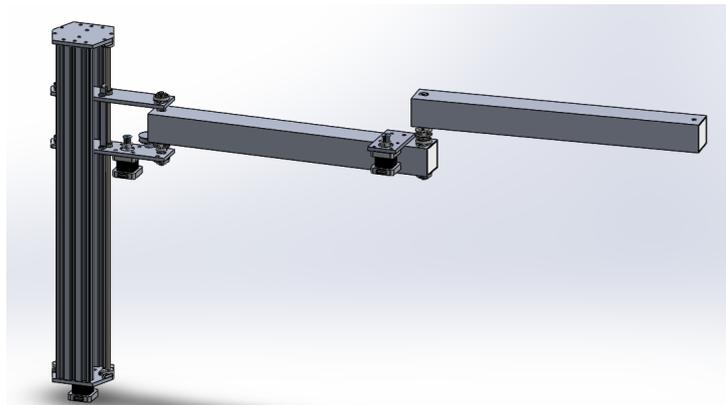


Figura 48 – Montagem geral do manipulador

Antes da montagem física do manipulador, foi feita a modelagem em CAD de todo o sistema do manipulador utilizando o software *Solidworks*. Alguns elementos com padrão de mercado foram utilizados no software, porém com modelagens já prontas encontradas na comunidade que utiliza o programa, como os motores de passo, as polias, o parafuso

de potência e sua castanha, dentre outros elementos como os rolamentos e parafusos que possuem tamanhos pré definidos já que são valores padronizados.

Para a construção física do manipulador existe a etapa de fabricação e compra das peças e a etapa de montagem e ajustes do manipulador. Serão exploradas algumas metodologias de fabricação para algumas peças no projeto.

As peças de alumínio utilizadas para a base e o topo da elevação foram cortadas e furadas utilizando uma CNC. Esses suportes podem ser vistos na figura 49.

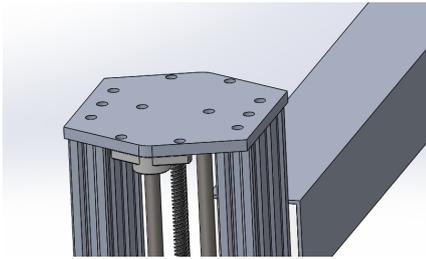


Figura 49 – Suporte da base de elevação

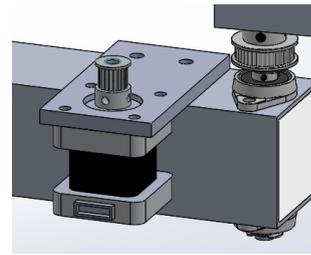


Figura 50 – Suporte para motor de passo

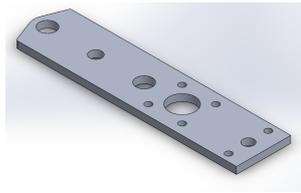


Figura 51 – Suporte para motor de passo e fixação do elo

O processo de corte e furação estão representados nas figuras 52 e 53



Figura 52 – Corte da base de elevação



Figura 53 – Furação da base de elevação

A base de elevação montada pode ser vista na figura 54. Esta base será acoplada na parte posterior lateral da cadeira, essa posição garante que a cadeira consiga entrar sob mesas, e que o manipulador não fique constantemente na frente do manipulador.

Outras peças como o suporte para motor de passo e os suportes para o primeiro elo foram compradas já cortadas pela metalúrgica, no formato desejado e espessura de 6,35 mm,



Figura 54 – Base de elevação montada

como mostrado nas figuras 50 e 51. Esses cortes feitos por empresas que trabalham na área garantem um ganho de tempo e maior precisão.

Os elos foram feitos utilizando tubos de alumínio já comprados na secção transversal quadrada oca de 50x50 mm, valor de secção superior ao que foi calculado, mas que oferece os tamanhos mais próximos do calculado e que foram encontrados em Brasília para esse tipo de tubo e foram cortados no comprimento definido (0,5 m) já pela metalúrgica em que foram adquiridos.

Para simplificar a montagem, os dois elos possuem a mesma configuração, salvo alguns furos que foram feitos utilizando o auxílio de uma furadeira. Os perfis estruturais de alumínio utilizados para sustentação foram comprados nos tamanhos dimensionados para o manipulador, para facilitar todo o processo de montagem e os eixos retificados utilizados na base de elevação foram cortados utilizando uma lixadeira. Os tubos utilizados e o início da montagem podem ser vistos nas figuras 55 e 56.

Algumas peças foram fabricadas utilizando a impressora 3D como a abraçadeira de fixação, o apoio da base na cadeira, a polia maior utilizada na redução dos motores e o suporte de apoio do primeiro elo no eixo. Alguns desses componentes são mostrados na figura 57. Foi utilizado plástico PLA com preenchimento 100%. Essas peças servem para fixação, nivelamento e apoio dos componentes do sistema.

Essas peças foram escolhidas para serem fabricadas por meio de impressão 3D pela flexibilidade e rapidez de fabricação, além do custo ser menor do que o custo de uma usinagem. Dentro dos elos foi utilizado um bloco para a passagem do eixo o que permitiu um alinhamento mais fácil e preciso do eixo do motor nos elos. A montagem e modelagem



Figura 55 – Tubos utilizados para fabricação dos elos



Figura 56 – Montagem do primeiro elo

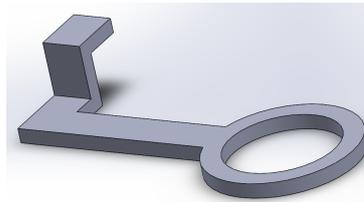


Figura 57 – Apoio de fixação da base na cadeira

dos blocos impressos em PLA estão representados nas figuras 58 e 59.

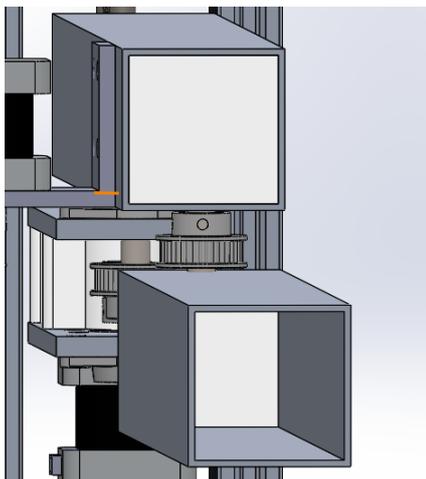


Figura 58 – Demonstração dos blocos no interior dos elos

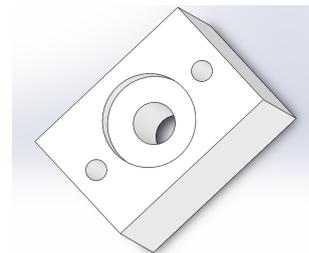


Figura 59 – Modelagem do bloco do segundo elo

As partes que compõe o manipulador foram fixadas utilizando parafusos sextavados de 5mmx25 e 6x25mm e porcas em algumas das fixações. Para a parte de fixação na cadeira foram utilizados também encaixes e abraçadeiras para trazer maior ajuste. O eixo do motor foi preso aos elos, para permitir a movimentação, também utilizando parafusos. No eixo dos motores também foram utilizadas travas para evitar que o eixo se deslocasse verticalmente e

se soltasse da montagem do manipulador, como mostrado na figura 60

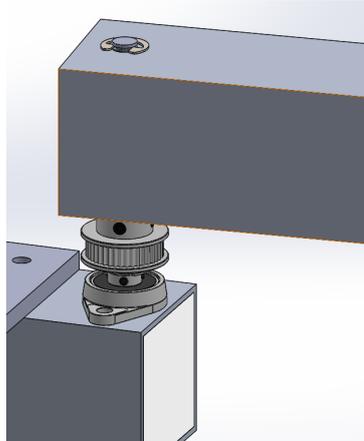


Figura 60 – Travas para evitar deslocamento do eixo

Para a montagem da redução do sistema, foram utilizadas as polias e correias, a localização dos motores foi também adaptada para o tamanho de correia encontrada a de 200 mm de perímetro. Foi necessário também utilizar, no primeiro elo, um esticador para que a correia não tivesse folgas, já que a localização possível para o motor e para o eixo era menor do que a distância exigida pela correia. A montagem da redução no segundo elo por ser vista na figura 61.



Figura 61 – Montagem da redução do segundo elo

A parte eletrônica foi construída utilizando o arduíno e a protoboard como uma montagem preliminar, que posteriormente pode ser substituída por uma placa de circuito impresso. As conexões foram feitas utilizando fios e a alimentação, neste protótipo, não será feita utilizando a bateria dimensionada no projeto e sim com uma fonte que se liga à tomada, também de 12V, visto que a fonte já possui o regulador de tensão, e os sistemas de proteção montados.

O arduíno utilizado foi o Mega 2560 devido à quantidade de portas exigidas para todo o sistema e a montagem do sistema foi feita utilizando os drivers diretamente conectados à protoboard. Não foi utilizado o SHIELD CNC V3 porque ele apresenta vantagens, principalmente para o uso do arduíno UNO. Os sensores de fim de curso apresentam uma resposta analógica em que é possível controlar a distância de detecção, então são necessárias 6 portas analógicas para os sensores, o joystick exige mais 2 portas analógicas e uma digital e cada motor necessita de duas portas digitais. O esquemático das ligações está representado na figura 62, o esquemático foi projetado utilizando o software de criação de projetos eletrônicos *Proteus* e a partir desta montagem é possível criar o modelo para impressão de uma PCB para a instalação dos componentes.

O sistema eletrônico montado fica responsável pelo controle eixo a eixo dos elos e da base do manipulador utilizando um joystick já com os sensores de fim de curso instalados para garantir a segurança do usuário.

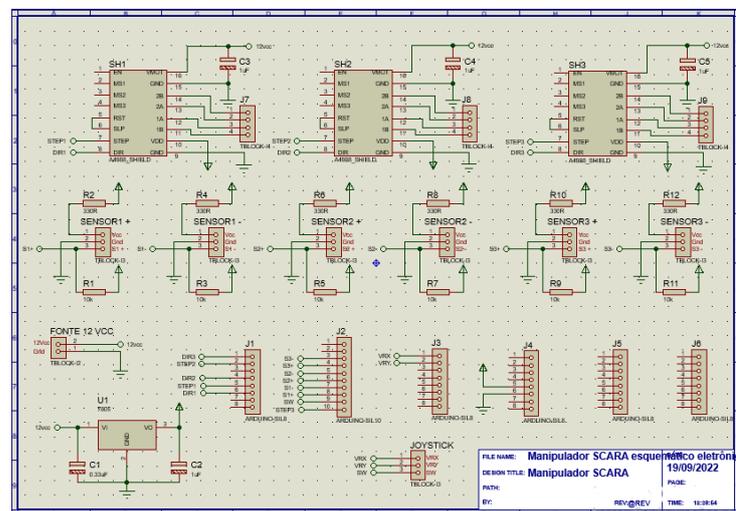


Figura 62 – Esquemático eletrônico para conexão dos componentes

A figura 63 mostra a montagem total do manipulador, sem o acoplamento com a cadeira de rodas

O acoplamento da cadeira foi feito utilizando abraçadeiras e outras estruturas em impressão 3D. Como a cadeira não pode ser modificada com soldas e furações, foi necessário adaptar o sistema de maneira que o peso do manipulador não o desnivelasse, o que exigiu um uso maior de material e de estruturas para a fixação. O resultado pode ser visto nas



Figura 63 – Manipulador Montado sem acoplar na cadeira

imagens 64 e 65



Figura 64 – Manipulador acoplado à cadeira de rodas



Figura 65 – Vista traseira do manipulador acoplado à cadeira de rodas

6.2 Custo do projeto

Ao final do projeto, foram levantados todos os componentes elétricos e peças mecânicas utilizadas para que fosse possível realizar o relatório do custo do material total para fabricação e montagem do projeto. Os custos serão apresentados na tabela 13.

Com as escolhas feitas para este manipulador e os custos que foram mapeados para a produção deste manipulador, foi obtido um bom resultado preliminar que está abaixo do preço de venda dos outros manipuladores estudados na seção de Benchmarking deste projeto, a tabela de custos está representada na tabela 13. Algumas melhorias ainda precisam ser feitas ao projeto para que se torne viável comercialmente, porém o custo de material já apresenta grande diferença dos outros manipuladores referência que foram estudados. Outros custos como mão de obra e o custo para adquirir maquinário não está sendo considerado nesta tabela, nem o custo da bateria para o caso de acoplamento ao sistema, apenas o custo de

Componente	Custo por unidade(R\$)	Quantidade	Gasto total(R\$)
Nema 17	150,00 /un	2 un	300,00
Nema 23	170,00 /un	1 un	170,00
Driver A4988	16,90 /un	3 un	50,70
Acoplamento flexível	45,00 /un	1 un	45,00
Parafuso de potência TR8	131,50 /m	0,6 m	78,90
Eixo retificado de alumínio 8mm	40,00 /m	1,5 m	60,00
Perfil de alumínio estrutural 8mm	80,00 /m	1,2 m	96,00
Polia GT2 20 dentes	7,20 /un	2 un	14,40
Peças de alumínio Chapas, base, suportes, elos	119,90 /kg	2,3 kg	275,77
Mancais (Kfl08)	12,85 /un	4 un	51,40
Rolamento (608ZZ)	1,00 /un	2 un	2,00
Rolamento Linear (LM8uu)	7,00 /un	4 un	28,00
Filamento PLA	99,90 /kg	0,1 kg	9,99
Correia 200mm de perímetro	20,00 /un	2 un	40,00
Parafuso sextavado 5x25 mm	0,33 /un	42 un	13,86
Parafuso sextavado 6x25 mm	0,38 /un	12 un	4,56
Suporte de eixo retificado SHF 8mm	14,90 /un	4 un	59,60
Porcas 5 mm	0,26 /un	42 un	10,92
Arduíno Mega 2560	184,90 /un	1 un	184,90
Trava tipo C para eixo de motor	5,00 /un	12 un	60,00
Sensor TCRT5000	1,20 /un	6 un	7,20
Braçadeira	0,25 /un	1 un	0,25
Joystick	15,00 /un	1 un	15,00
Cabos	1,30 /m	12 m	15,60
Total	-	-	1594,05

Tabela 13 – Gasto total do manipulador

fabricação relacionado à compra das peças na metalúrgica que já está incluído no valor do material.

O valor deu superior ao manipulador do Neto (2019), porém ao criar a tabela de custos, o projeto dele não apresentava a precificação dos materiais necessários para o controle dos motores e a parte elétrica e eletrônica como o controlador, drivers entre outros, sendo assim, os valores seguem semelhantes ao considerar esses componentes e a mudança também do

Manipulador	Custo
Raptor	R\$ 36.000,00
Friend	-
Weston Wheelchair	-
Jaco	R\$ 140.000,00
Manus	R\$ 72.000,00
Luis Fernando	R\$ 1.251,59

Tabela 14 – Benchmarking de custos

material escolhido para o projeto.

7 Considerações finais

7.1 Conclusão

O presente trabalho teve como intuito o estudo, definições de projeto e construção de protótipo de um manipulador robótico do tipo SCARA com funções assistivas, acoplado a cadeiras de rodas, que possam viabilizar uma maior independência aos usuários com tetraplegia. Utilizando metodologias de projeto e estudos teóricos foi possível construir o projeto teórico e o protótipo para o manipulador proposto.

Dentro da metodologia de projeto foram feitos estudos de benchmarking para entender o que já tinha sido feito e entender o que se espera de projetos que seguem esta linha, estudos do funcionamento, cargas e estruturas para o dimensionamento dos atuadores, elos, baterias entre outros, e definição dos parâmetros do manipulador para que o projeto proposto possa atender às necessidades mais básicas das pessoas com limitações motoras, buscando um custo mais baixo com relação aos projetos já existentes sem abrir mão do bom funcionamento do sistema.

Foram definidos os parâmetros que foram utilizados na construção do protótipo do manipulador assim como as adaptações necessárias, posteriores ao projeto teórico, para que o projeto pudesse ser construído e foi realizada a construção do protótipo do manipulador e seu acoplamento na cadeira de rodas utilizada como base. Os códigos utilizados no projeto também estão disponíveis neste relatório para que possam ser consultados.

Ao final do projeto foi analisado que o manipulador consegue levantar o Payload escolhido de 1,5kg, sendo o manipulador controlado por um joystick simples. Seu acoplamento também permitiu que o usuário com cadeira de rodas consiga se sentar sob mesas, passar por portas de tamanho padrão (80 cm) e alcançar objetos que estejam um pouco acima de sua cabeça, assim como atender a pessoas de diversas alturas. Tendo sido atingidos os objetivos definidos como requisitos do projeto.

A cadeira utilizada no projeto é também muito importante para o acoplamento do manipulador. Uma cadeira que possa passar por adaptações, por exemplo, apresentaria uma fixação mais firme do protótipo, evitando que este ficasse desalinhado. O tipo de cadeira pode também impactar no projeto, por exemplo, cadeiras com mais espaço podem garantir um acoplamento mais confortável ao usuário e à pessoa que irá empurrar a cadeira, embora tenham sido feitos esforços para garantir, neste protótipo, um acoplamento mais compacto e confortável.

7.2 Trabalhos Futuros

Este projeto visa entregar uma proposta inicial de manipulador acoplado a cadeiras de rodas trazendo algumas funcionalidades de maneira mais básica, mas que podem ser exploradas e projetadas para o aprimoramento de diversos recursos no manipulador de forma que, como um sistema fechado e projetado, ele possa ser construído em massa e até comercializado como um manipulador com funções assistivas de baixo custo.

Dentro deste projeto pode ser feito um estudo para controle dos motores, para que o usuário de maior limitação, que não possui movimentação alguma abaixo do pescoço, possam utilizar o projeto com facilidade, seja utilizando um controlador no queixo, ou por sopro, por exemplo, mas que permita a manipulação dos atuadores a fim de realizar as funções esperadas pela garra. Pode ser feito também um estudo de movimentação dos elos que possa ser feito de maneira conjunta, movimentando os dois elos em conjunto e não apenas fazer a movimentação eixo por eixo.

Uma outra área que pode ser trabalhada dentro deste projeto é a construção do sistema de alimentação móvel, a bateria, para que ela possa ser ligada à cadeira com segurança e possua uma boa autonomia, ou realizar adaptações em cadeiras de rodas elétricas, para aproveitar a bateria da cadeira e alimentar o manipulador SCARA proposto neste projeto.

Um outro estudo a ser feito é o projeto e adaptação da garra para que ela tenha capacidade de agarrar os objetos no payload previsto de 1,5kg, sendo leve e de controle simples e que ela mantenha todas as funcionalidades de uma garra, porém sendo também comandada pelo mesmo controle que fará a movimentação dos elos, de maneira adaptada para pessoas com tetraplegia.

A parte elétrica pode ser também impressa e montada em PCB's para garantir um uso mais seguro do sistema evitando fiação exposta, evitando que os cabos se soltem e mantendo a estética do sistema no geral mais bonita e organizada

E para finalizar, podem ser realizados estudos de otimização do projeto e profissionalização do projeto para que ele possa se tornar um projeto comercial ou até oferecendo esses manipuladores de maneira gratuita para que possam ser utilizados em projetos sociais.

Referências

- ABNT. **ABNT NBR 9050 Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos/ Accessibility to buildings, equipment and the urban environment**. Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Citado nas pp. 23–25, 49, 52, 53.
- ARDUINO E CIA. **Como usar o driver A4988 com motor de passo Nema 17**. 2021. Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/driver-a4988-com-motor-de-passo-nema-17/>>. Citado na p. 65.
- BALDASSIN, V.; SHIMIZU, C.; ERI, H. Tecnologia Assistiva e qualidade de vida na tetraplegia: Abordagem bioética. **Rev. bioét.**, v. 26, n. 4, p. 574–586, 2018. Citado na p. 16.
- BARRETTE, M. B. **Why Use a Robot Gripper with 3 Fingers?** 2016. Disponível em: <<https://blog.robotiq.com/why-use-a-robot-gripper-with-3-fingers>>. Citado nas pp. 43, 44.
- BONSIEPE, G.; KELLNER, P.; POESSNECKER, H. **Metodologia Experimental: Desenho Industrial**. Brasília, DF, 1984. Citado na p. 39.
- BORGES, J. A. **O que é Tetraplegia?** 2002. Disponível em: <<http://intervox.nce.ufrj.br/motrix/tetraplegia.htm#:~:text=Embora%5C%20os%5C%20dados%5C%20do%5C%20censo,rela%5C%C3%5C%A7%5C%C3%5C%A3o%5C%20a%5C%20uma%5C%20pessoa%5C%20normal.>>>. Citado na p. 19.
- BRAGA, N. C. **Todos os tipos de sensores**. 2019. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/electronica/52-artigos-diversos/9875-todos-os-tipos-de-sensores-art1158>>. Citado na p. 69.
- BRUHEL. **Rolamento linear | Catálogo, Vantagens e TUDO o que você precisa saber!** 2020. Disponível em: <<https://www.bruhel.com.br/rolamento-linear-catalogo-vantagens-e-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>>. Citado na p. 68.
- BUDYNAS, R. C.; NISBETT, J. K. **Parafusos de movimento**. 8. ed. Avenue of the Americas, New York, NY, 2007. ISBN 9780073529288. Citado na p. 62.
- CARRARA, V. INTRODUÇÃO À ROBÓTICA INDUSTRIAL. In: INSTITUTO nacional de pesquisas espaciais - INPE. São José dos Campos - SP - Brasil, 2015. P. 101. Citado nas pp. 18, 46, 71, 72.
- CASTRO, A. L. A. de. Projeto e construção de um robô manipulador SCARA. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia - Departamento de engenharia mecânica, Projeto de Graduação, Brasília, DF, 2019. Citado nas pp. 27, 44, 46.

- CLOUÂTRE, J.; DOYON, C.; BOUFFARD, J.; CAMPEAU-LECOURS, A. **Preliminary Development of SIARA (Six-DoF Assistive Robotic Arm)**. Quebec, Canada, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/353954160_Preliminary_Development_of_SIARA_Six-DoF_Assistive_Robotic_Arm>. Citado na p. 27.
- CRAIG, J. J. **Robótica**. 3. ed. Rua Nelson Francisco, 26, 2012. ISBN 9788581431284. Citado nas pp. 33, 56–58, 62.
- DESIGNBOOM. **KINOVA's 'JACO' is a robotic arm designed to give independence to power wheelchair users**. 2019. Disponível em: <<https://www.designboom.com/technology/kinova-jaco-assistive-robotic-arm-07-08-2019/>>. Citado nas pp. 30, 31.
- DRIESSEN, B. J. F.; EVERS, H. G.; WOERDEN, J. A. V. **MANUS - a wheelchair-mounted rehabilitation robot**. The Netherlands, 2001. Citado nas pp. 26, 29.
- EDWARDS, K. D. **Design, Construction and Testing of a Wheelchair-Mounted Robotic Arm**. 2005. Disponível em: <<https://scholarcommons.usf.edu/etd>>. Citado nas pp. 26, 29, 50.
- FERRAZ, F. **TELECURSO 2000 CÁLCULO TÉCNICO "CÁLCULOS DE RPM"**. Santo Amaro, BA, 2012. Citado na p. 34.
- FESTO. **Adaptive gripper fingers DHAS**. 2017. Disponível em: <<https://www.festo.com/media/pim/048/D15000100122048.PDF>>. Citado nas pp. 70, 71.
- FORTULAN, C. A.; JUNIOR, E. M.; CARVALHO, J. de. **Aula 12 – Dimensionamento de mancais de rolamentos**. São Carlos - SP, 2018. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4324279/mod_resource/content/0/aula12-Dimensionamento_de_rolamentos.pdf>. Citado nas pp. 67, 68.
- FREITAS, C. M. **CLP – Controlador Lógico Programável – Parte 1**. 2013. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/clp-parte1/>>. Citado na p. 48.
- GARCIA, V. **O que é paraplegia e tetraplegia**. 2009. Disponível em: <<https://www.deficienteciente.com.br/o-que-e-paraplegia-e-tetraplegia.html>>. Citado nas pp. 18, 19.
- GORDO, N.; FERREIRA, J. **Mecânica: Elementos de Máquinas**. São Paulo, 2012. Citado nas pp. 34, 62.
- HAQ, R. U.; KUMAR, U.; KUMAR, N.; BARANWAL, Y.; MURSALEEN, M.; SHEIKH, N. A. **Design and Manufacturing of Low Cost SCARA Robot**. 2021. Disponível em: <www.ijert.org>. Citado na p. 27.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. Áv Ermano Marchetti, 1435: Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 9788576053736. Citado na p. 32.

- HILLMAN, M.; HAGAN, K.; HAGAN, S.; JEPSON, J.; ORPWOOD, R. The weston wheelchair mounted assistive robot - The design story. **Robotica**, v. 20, p. 125–132, 2 2002. ISSN 02635747. DOI: [10.1017/S0263574701003897](https://doi.org/10.1017/S0263574701003897). Citado nas pp. 26, 30, 31, 35, 50.
- IBGE. **Censo demográfico 1991**. 1991. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo%5C?id=782%5C&view=detalhes>. Citado na p. 19.
- INDUSTRIAL, R. **História da Robótica**. 2017. Disponível em: <https://sites.google.com/site/roboticaindustrialnoseculoxxi/9o-ano>. Citado na p. 16.
- IVLEV, O.; MARTENS, C.; GRAESER, A. **Rehabilitation Robots FRIEND-I and FRIEND-II with the dexterous lightweight manipulator**. v. 17. 2005. P. 111–123. ISBN 10554181/05. Citado nas pp. 29, 30.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **PROJETO DE COMPONENTES DE MÁQUINAS**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2013. ISBN 9788521615781. Citado nas pp. 57, 58.
- MACHADO, W. C. A.; SCRAMIN, A. P. (In)dependência funcional na dependente relação de homens tetraplégicos com seus (in)substituíveis pais/cuidadores. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, Universidade de São Paulo, Escola de Enfermagem, v. 44, p. 53–60, 1 mar. 2010. ISSN 0080-6234. DOI: [10.1590/S0080-62342010000100008](https://doi.org/10.1590/S0080-62342010000100008). Disponível em: <http://www.scielo.br/j/reeusp/a/qMHrvRMtXPgpFVj4bKLMgvD/abstract/?lang=pt>. Citado nas pp. 20, 25.
- MAKINO, H. Development of the SCARA. **Journal of Robotics and Mechatronics**, Fuji Technology Press, v. 26, p. 5–8, 1 2014. ISSN 18838049. DOI: [10.20965/jrm.2014.p0005](https://doi.org/10.20965/jrm.2014.p0005). Citado na p. 22.
- MARIAPPAN, S. M.; VEERABATHIRAN, A. Modelling and simulation of multi spindle drilling redundant SCARA robot using SolidWorks and MATLAB/SimMechanics. **Revista Facultad de Ingenieria**, Universidad de Antioquia, v. 2016, p. 63–72, 81 2016. ISSN 24222844. DOI: [10.17533/udea.redin.n81a06](https://doi.org/10.17533/udea.redin.n81a06). Citado na p. 27.
- MECTROL. **ROBÔ SCARA HIWIN RS406 DE 4 EIXOS - SUPORTA ATÉ 6KG (IP20)**. 2022. Disponível em: <https://mectrol.com.br/robo-scara-hiwin-rs406>. Citado na p. 72.
- MELLO, M. Análise de Desempenho e Melhorias em Robô Manipulador. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia - Departamento de engenharia mecânica, Projeto de Graduação, Brasília, DF, 2016. Citado na p. 28.
- MELLO, O. Desenvolvimento de um robô manipulador SCARA. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia - Departamento de engenharia mecânica, Projeto de Graduação, Brasília, DF, 2016. Citado nas pp. 27, 58.

- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Diretrizes de Atenção à pessoa com lesão medular.** Área Técnica de Saúde da Pessoa com Deficiência SAF Sul, Trecho 2, Edifício Premium, Torre 2, bloco F, térreo, sala 11, Brasília, DF: Editora MS, 2013. ISBN 9788533420250. Disponível em: <www.saude.gov.br>. Citado nas pp. 36, 37.
- MOEBIUSTECH. **Pistão robô biônico flexível, mais novo 2kg de carga grande, garra de seleção de frutas, dedo mecânico, pneumático adaptativo.** 2017. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/i/1005002065516967.html>>. Citado na p. 71.
- NETO, L. F. d. S. Desenvolvimento de um manipulador robótico para aplicações assistivas. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia - Departamento de engenharia mecânica -Projeto de graduação, Brasília DF, p. 182, 2019. Citado nas pp. 26, 37, 80.
- OLIVEIRA, E. **Como usar com Arduino – Sensor Óptico Reflexivo TCRT5000.** 2019. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/arduino-utilizando-o-sensor-reflexivo-tcrt5000>>. Citado nas pp. 69, 70.
- OLIVEIRA, I. A. D. Desenvolvimento de uma cadeira de rodas robótica para transporte de portador de necessidades especiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, centro de tecnologia - programa de pós-graduação em engenharia elétrica e computação, p. 89, 2013. Citado na p. 26.
- OMS. **Lista de Produtos Assistivos Prioritários.** Geneva, 2017. CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Citado nas pp. 16, 20, 35, 37, 41.
- ORTOBRAS. **ULX.** 2020. Disponível em: <https://ortobras.com.br/cadeira_de_rodas/ulx/>. Citado na p. 51.
- PANIN, L. K. **SENSORES INDUTIVOS – CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES.** 2018. Disponível em: <<http://www.tecniar.com.br/noticias/sensores-indutivos-caracteristicas-e-aplicacoes/>>. Citado na p. 69.
- REDE D'OR. **Tetraplegia: O que é, sintomas, tratamentos e causas.** 2017. Disponível em: <<https://www.rededorsaoluiz.com.br/doencas/tetraplegia>>. Citado na p. 18.
- REEVE, C.; REEVE, D. **Lesão medular.** 2020. Disponível em: <<https://www.christophereeve.org/pt/international/portuguese-hub/sa%C3%BAde/causas-de-paralisia/les%C3%A3o-medular>>. Citado na p. 19.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983. ISBN 8521602987. Citado na p. 61.
- ROCHA, E. S. A. Análise de desempenho e controle de um robô SCARA. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia - Departamento de engenharia mecânica, Projeto de Graduação, Brasília, DF, 2016. Citado na p. 28.
- RUDIBERT, K. J. **Cenarização: a ferramenta essencial para uma estratégia efetiva.** Rio de Janeiro, RJ, 2009. Citado na p. 39.

- SANTOS, V. M. F. **Robótica Industrial Apontamentos teóricos Exercícios para aulas práticas Problemas de exame resolvidos**. 2003. Citado na p. 23.
- SCRAMIN, A. P.; MACHADO, W. C. A. Cuidar de pessoas com tetraplegia no ambiente domiciliário: intervenções de enfermagem na dependência de longo prazo. **Escola Anna Nery**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 10, p. 501–508, 3 dez. 2006. ISSN 1414-8145. DOI: 10.1590/S1414-81452006000300020. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/ean/a/PjTKM59YYx4sdsymkTfrksM/?lang=pt>>. Citado na p. 19.
- SHINGLEY, J. E. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. ISBN 9788536305622. Citado na p. 63.
- SILVA, R. M. da. **Introdução à dinâmica e ao controle de manipuladores robóticos**. 2015. Citado na p. 17.
- SKF. **Rolling bearings - Rolamentos de esferas**. 2015. Citado nas pp. 67, 68.
- TORELLA, M. **Arduino Ou Raspberry Pi: Qual Escolher?** 2020. Disponível em: <<https://lobodarobotica.com/blog/arduino-ou-raspberry-pi-qual-escolher/>>. Citado na p. 48.
- TORRES, R. A. **Instrumentação e controle de braço robótico para deficientes**. Brasília, DF, 2020. Citado na p. 28.
- TSUI, K.; YANCO, H.; KONTAK, D.; BELIVEAU, L. Development and Evaluation of a Flexible Interface for a Wheelchair Mounted Robotic Arm. **HRI 2008 : Proceedings of the Third ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction : March 12-5**, Institute of Electrical et al., Amsterdam, the Netherlands, 2008. Citado na p. 28.
- VALE ORMINDO, T. do; CARLOS, R.; ALVES, N.; FRAGOSO, P. E.; LEONARDO; VIDAL, C. **APLICAÇÕES DE ROBÔS INDUSTRIAIS COM GARRAS MECÂNICAS**. 2015. Citado na p. 43.
- ZAVADIL, P.; VARGAS SCHERER, F. de; TEIXEIRA, F. G.; SILVA, R. P. da; KOLTERMANN, T.; CATTANI, A. **Possibilidades de uso da matriz morfológica no processo de geração de alternativas em design**. Gramado-RS, 2014. Disponível em: <www.proceedings.blucher.com.br/evento/11ped>. Citado na p. 40.

Apêndices

APÊNDICE A – Códigos de programação

A.1 Área de trabalho do manipulador

Código A.1 – Código de Matlab para a obtenção de área de trabalho

```

1 %Deslocamentos máximo e mínimo de cada elo
2 function [] =
    GeradordeWorkspace(theta1Min,theta1Max,theta2Min,theta2Max)
3
4 %suaviza as curvas do gerador
5 samples=200;
6
7 %Tamanho dos elos
8 a1=20;
9 a2=80;
10
11 %Transformação de graus em radianos
12 theta1_rad= pi*[theta1Min, theta1Max]/180;
13 theta2_rad=pi*[theta2Min,theta2Max]/180;
14
15 %gera um vetor linear de espaço
16 theta1= pi*linspace(theta1Min, theta1Max, samples)/180;
17 theta2= pi*linspace(theta2Min,theta2Max, samples)/180;
18
19 x=zeros(2*length(theta1_rad),length(theta2));
20 y= zeros(2-length(theta1_rad),length(theta2));
21
22 %Armazena posições para o plot
23 for t=1:2
24     for aux1=1:length(theta1)
25         x(t,aux1)= a1*cos(theta1(aux1)) +
                a2*cos(theta1(aux1)+theta2_rad(t));
26         y(t,aux1)= a1*sin(theta1(aux1)) +
                a2*sin(theta1(aux1)+theta2_rad(t));
27     end
28
29     for aux2=1:length(theta1)
30         x(t+2,aux2)= a1*cos(theta1_rad(t)) +
                a2*cos(theta1_rad(t)+theta2(aux2));
31         y(t+2,aux2)= a1*sin(theta1_rad(t)) +
                a2*sin(theta1_rad(t)+theta2(aux2));
32     end
33 end
34 x=x';

```

```

35     y=y';
36
37     plot(x(:,1),y(:,1),'k')
38     hold on
39     plot(x(:,2),y(:,2),'k')
40     plot(x(:,3),y(:,3),'k')
41     plot(x(:,4),y(:,4),'k')
42 end

```

A.2 Controle dos motores de passo utilizando o joystick

Código A.2 – Código de Arduino para controle de motor de passo usando o driver A4988 e um joystick

```

1  const int dirBase    = 2; //Dir motor base
2  const int stepBase  = 3; //Step motor base
3
4  const int dirElo1   = 4; //Dir motor elo 1
5  const int stepElo1  = 6; //Step motor elo 1
6
7  const int dirElo2   = 7; //Dir motor elo 2
8  const int stepElo2  = 8; //Step motor elo 2
9
10
11 int sensor_sup_Base = A2; //Sensor superior da base
12 int sensor_inf_Base = A3; //Sensor inferior da base
13 int sensor_dir_elo1  = A4; //Sensor do lado direito do elo1
14 int sensor_esq_elo1  = A5; //Sensor do lado esquerdo do elo 1
15 int sensor_dir_elo2  = A6; //Sensor do lado direito do elo 2
16 int sensor_esq_elo2  = A7; //Sensor do lado esquerdo do elo 2
17
18 int Mx = A0; //Joystick eixo x
19 int My = A1; //Joystick eixo y
20 int button = 9; //Botão do joystick
21
22 int vrx_data = 0; //Dados do joystick eixo x
23 int vry_data = 0; //Leitura do joystick eixo y
24
25 int counterElo = 1; //Define qual elo será movimentado pelo eixo x
26 int  sSupBase, sInfBase, sdirElo1, sesqElo1, sdirElo2, sesqElo2;
27 bool PressButton;
28
29 void setup()
30 {
31     //Definição dos pinos dos motores e joystick
32     pinMode(dirBase , OUTPUT);
33     pinMode(stepBase, OUTPUT);
34     pinMode(dirElo1 , OUTPUT);

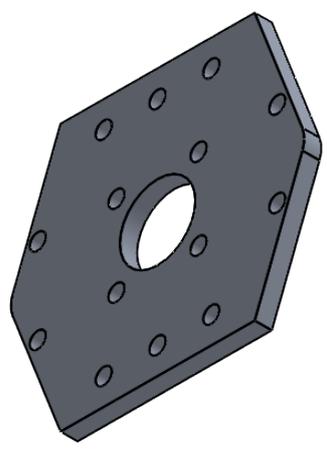
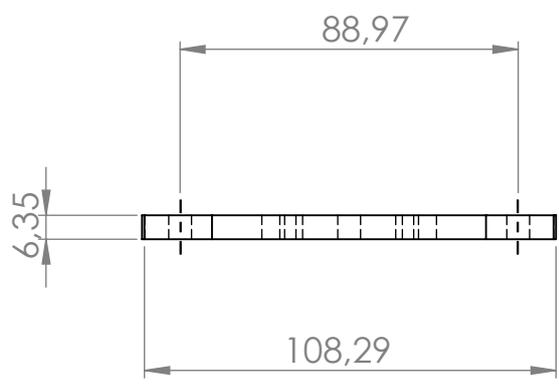
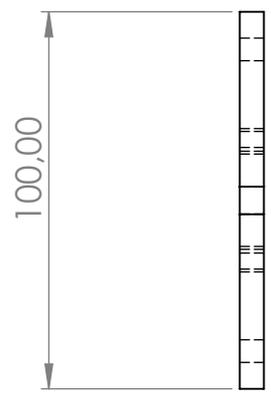
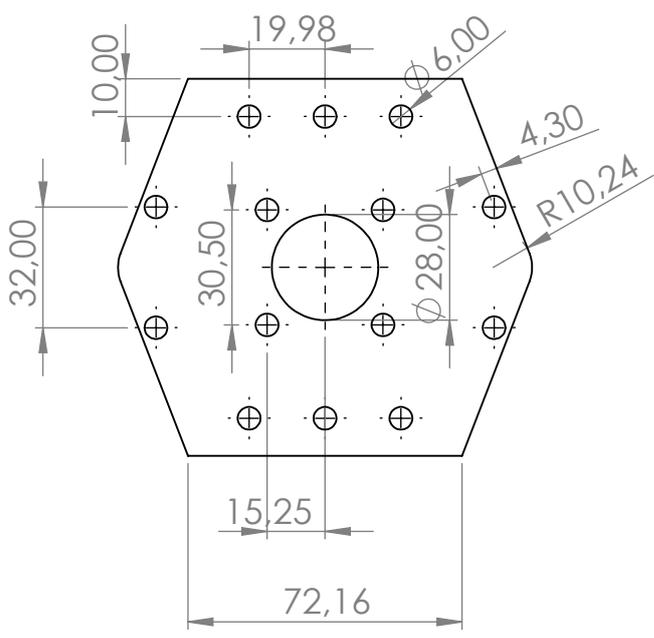
```

```
35 pinMode(stepElo1, OUTPUT);
36 pinMode(dirElo2, OUTPUT);
37 pinMode(stepElo2, OUTPUT);
38 pinMode(button, INPUT_PULLUP);
39 Serial.begin(9600);
40 }
41
42 void loop()
43 {
44     //Leitura dos sensores
45     sSupBase = analogRead(sensor_sup_Base);
46     sInfBase = analogRead(sensor_inf_Base);
47     sdirElo1 = analogRead(sensor_dir_elo1);
48     sesqElo1 = analogRead(sensor_esq_elo1);
49     sdirElo2 = analogRead(sensor_dir_elo2);
50     sesqElo2 = analogRead(sensor_esq_elo2);
51
52     //Leitura do joystick
53     vrx_data = analogRead(Mx);
54     vry_data = analogRead(My);
55     PressButton = digitalRead(button);
56
57
58     //Muda o elo a ser movimentado quando o joystick é precionado
59     //CounterElo = 1 -> Primeiro elo
60     //CounterElo = 2 -> Segundo elo
61
62     if (!PressButton) {
63
64
65         delay(150);
66         if (counterElo == 1) {
67             counterElo = 2;
68
69         }
70         else {
71             counterElo = 1;
72
73         }
74     }
75
76
77     //Joystick na posição central não movimenta nenhum elo
78     if ( (vrx_data > 450) && (vrx_data < 520) )
79     {
80         ;
81     }
82
83     if ( (vry_data > 450) && (vry_data < 520) )
84     {
85         ;
86     }
```

```
87
88 //Movimentação da junta translacional da base
89   if (vry_data < 450  && sSupBase < 1015) {
90       digitalWrite(dirBase, HIGH);
91       digitalWrite(stepBase, HIGH);
92       delayMicroseconds(500);
93       digitalWrite(stepBase, LOW);
94       delayMicroseconds(500);
95
96   }
97
98
99   if (vry_data > 520 && sInfBase < 1015 ) {
100
101       digitalWrite(dirBase, LOW);
102       digitalWrite(stepBase, HIGH);
103       delayMicroseconds(500);
104       digitalWrite(stepBase, LOW);
105       delayMicroseconds(500);
106   }
107
108 //Movimentação da junta rotacional do elo 1
109   if (vrx_data < 450 && counterElo == 1 && sdirElo1<1000) {
110       digitalWrite(dirElo1, LOW);
111       digitalWrite(stepElo1, HIGH);
112       delayMicroseconds(10);
113       digitalWrite(stepElo1, LOW);
114       delayMicroseconds(10);
115
116   }
117
118
119   if (vrx_data > 520 && counterElo == 1 && sesqElo1<1000) {
120
121       digitalWrite(dirElo1, HIGH);
122       digitalWrite(stepElo1, HIGH);
123       delayMicroseconds(500);
124       digitalWrite(stepElo1, LOW);
125       delayMicroseconds(500);
126
127   }
128
129
130
131 //Movimento da junta rotacional do elo 2
132   if (vrx_data < 450 && counterElo == 2  && sdirElo2<1000) {
133       digitalWrite(dirElo2, LOW);
134       digitalWrite(stepElo2, HIGH);
135       delayMicroseconds(500);
136       digitalWrite(stepElo2, LOW);
137       delayMicroseconds(500);
138   }
```

```
139
140
141  if (vrx_data > 520 && counterElo == 2 && sesqElo1 < 1000) {
142      digitalWrite(dirElo2, HIGH);
143      digitalWrite(stepElo2, HIGH);
144      delayMicroseconds(500);
145      digitalWrite(stepElo2, LOW);
146      delayMicroseconds(500);
147  }
148
149 }
```

APÊNDICE B – Vistas 2D das modelagens utilizadas



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

TÍTULO:
**Base da elevação
Suporte do motor**

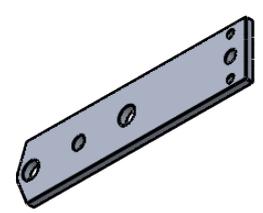
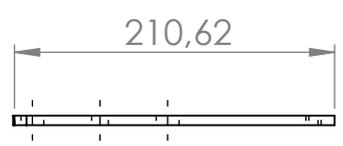
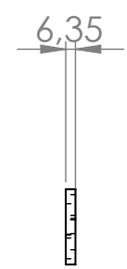
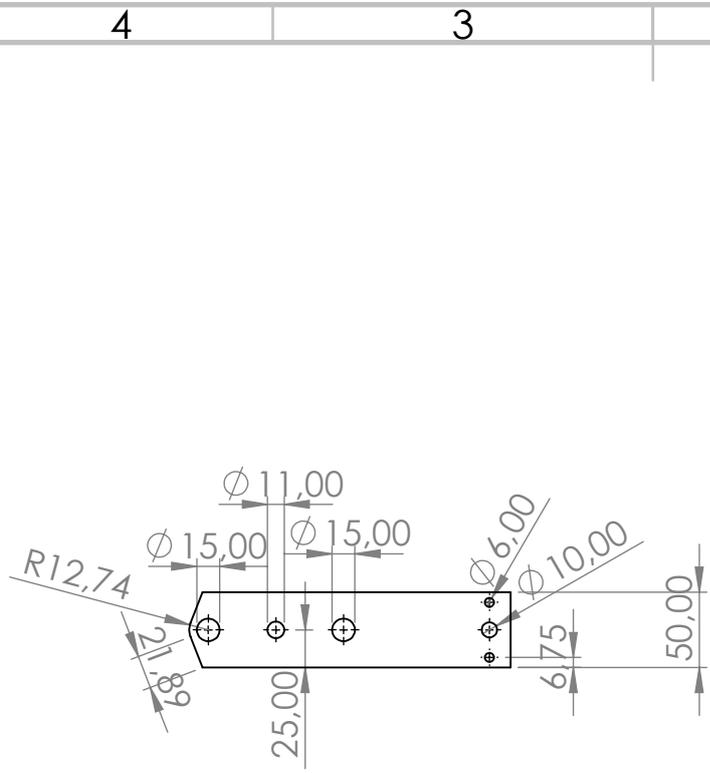
DES. Nº

A4

PESO:

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1



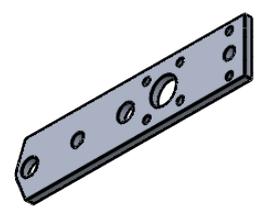
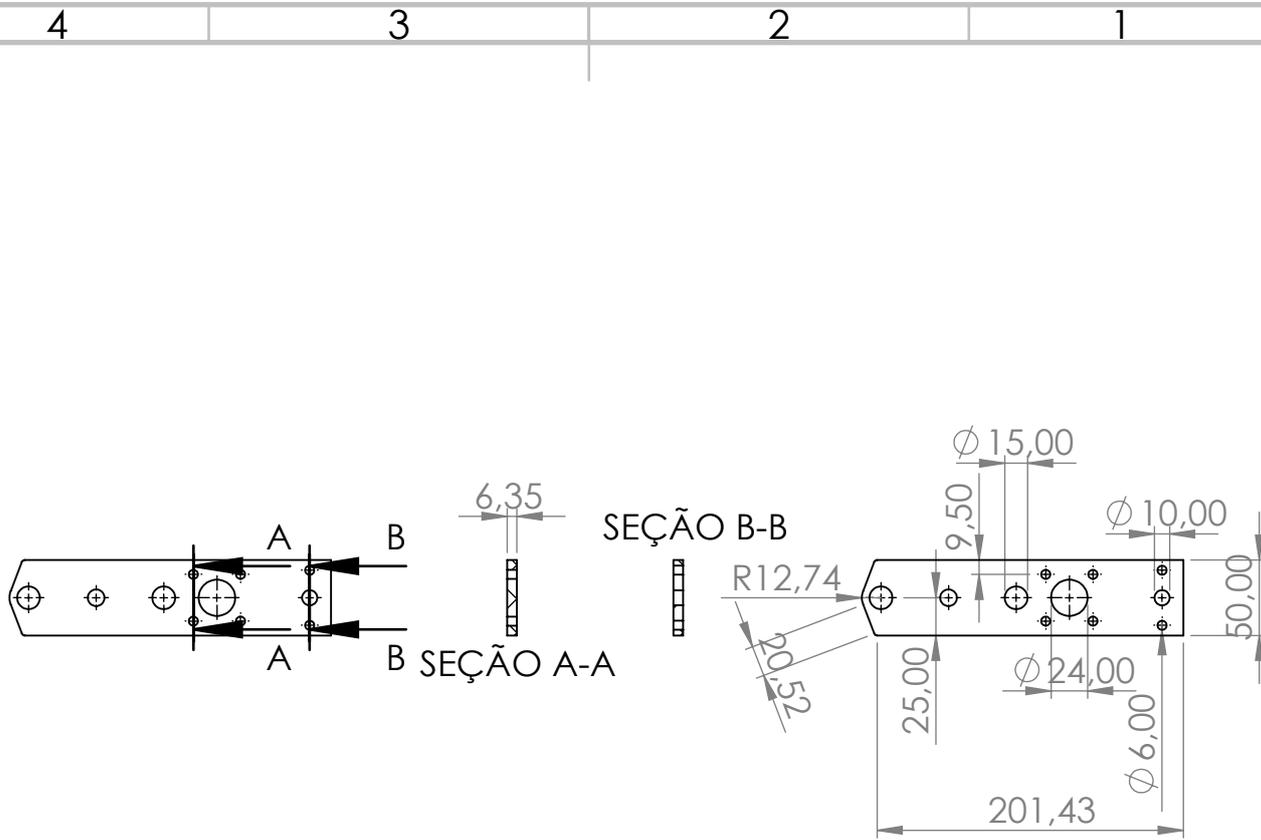
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO: Base Principal Elo Parte Superior			
DESEN.		VERIF.		APROV.		MANUF.		QUALID.	
MATERIAL:		DES. Nº		PESO:		ESCALA:1:5		FOLHA 1 DE 1	
A4									

F
E
D
C
B
A

F
E
D
C
B
A

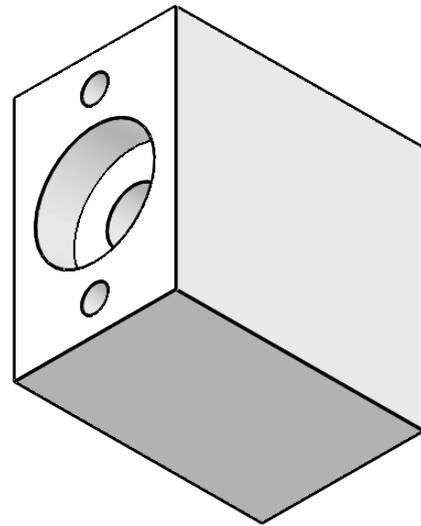
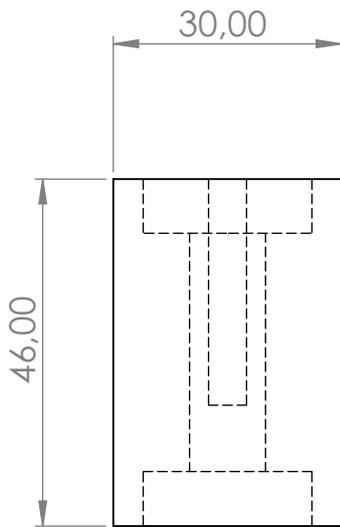
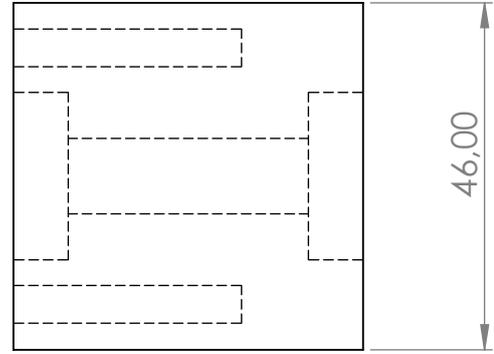
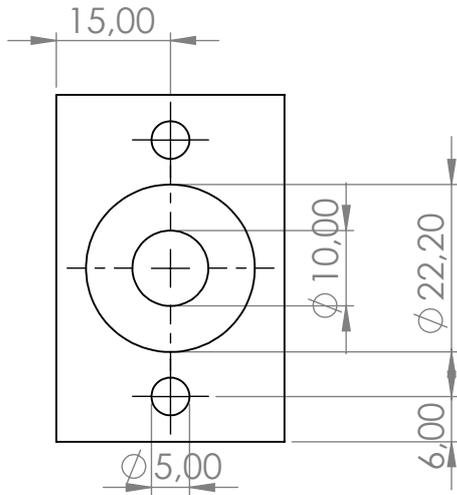
4 3 2 1

4 3 2 1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO		
					TÍTULO: Base Principal Elo 1						
					DES. Nº					A4	
					ESCALA: 1:5					FOLHA 1 DE 1	

	NOME	ASSINATURA	DATA	
DESEN.				
VERIF.				
APROV.				
MANUF				
QUALID				
			MATERIAL:	
			PESO:	



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA	
DESEN.				
VERIF.				
APROV.				
MANUF				
QUALID				

TÍTULO:

Base rolamentos
elo 2

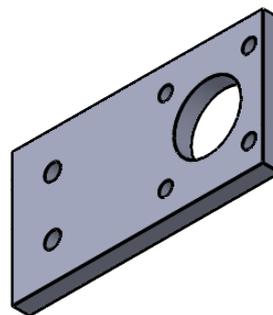
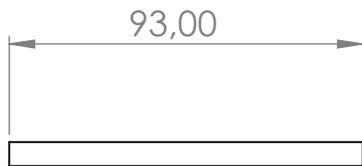
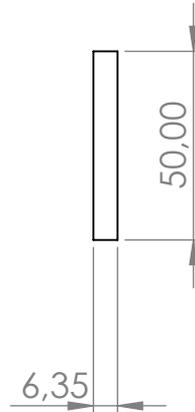
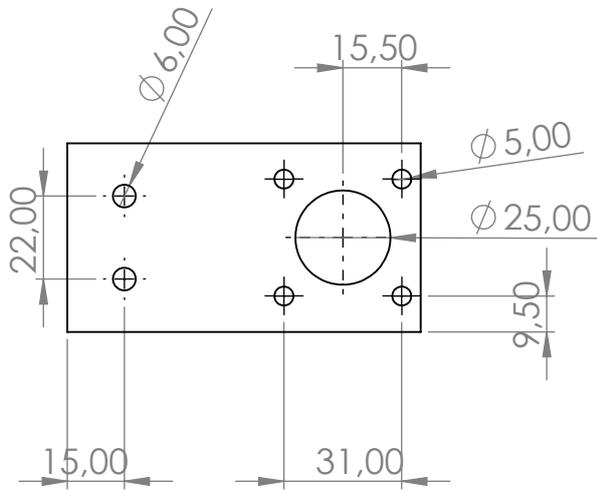
DES. Nº

A4

PESO:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

TÍTULO:

Base de apoio
Nema 17

MATERIAL:

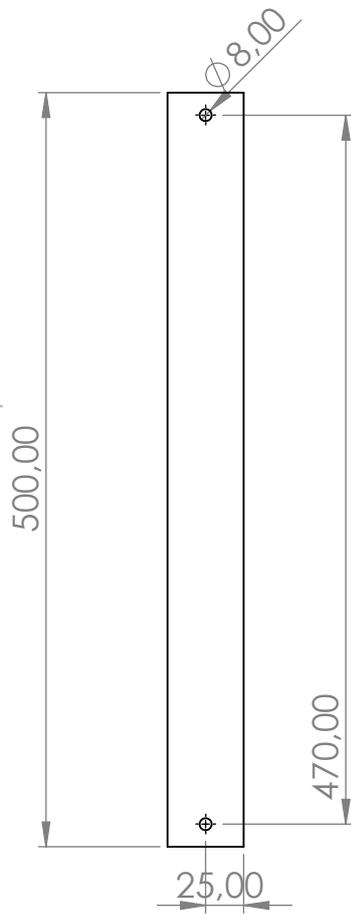
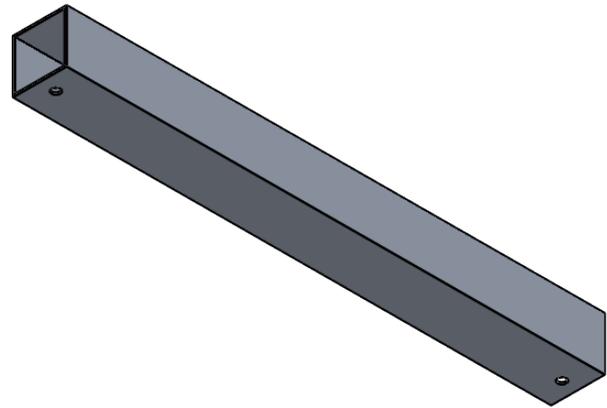
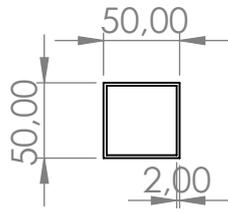
DES. Nº

A4

PESO:

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

MATERIAL:

DES. Nº

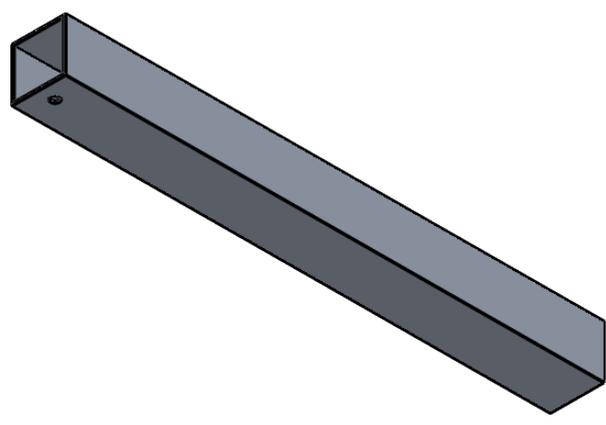
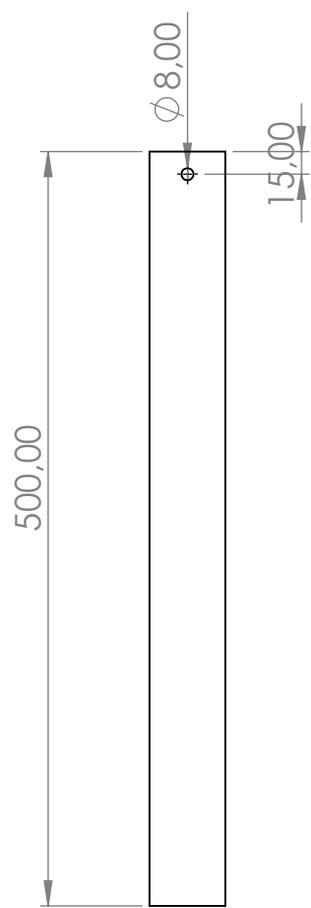
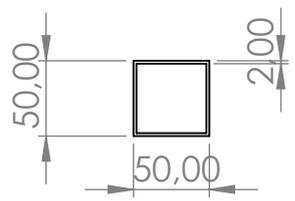
Elo1

A4

PESO:

ESCALA:1:5

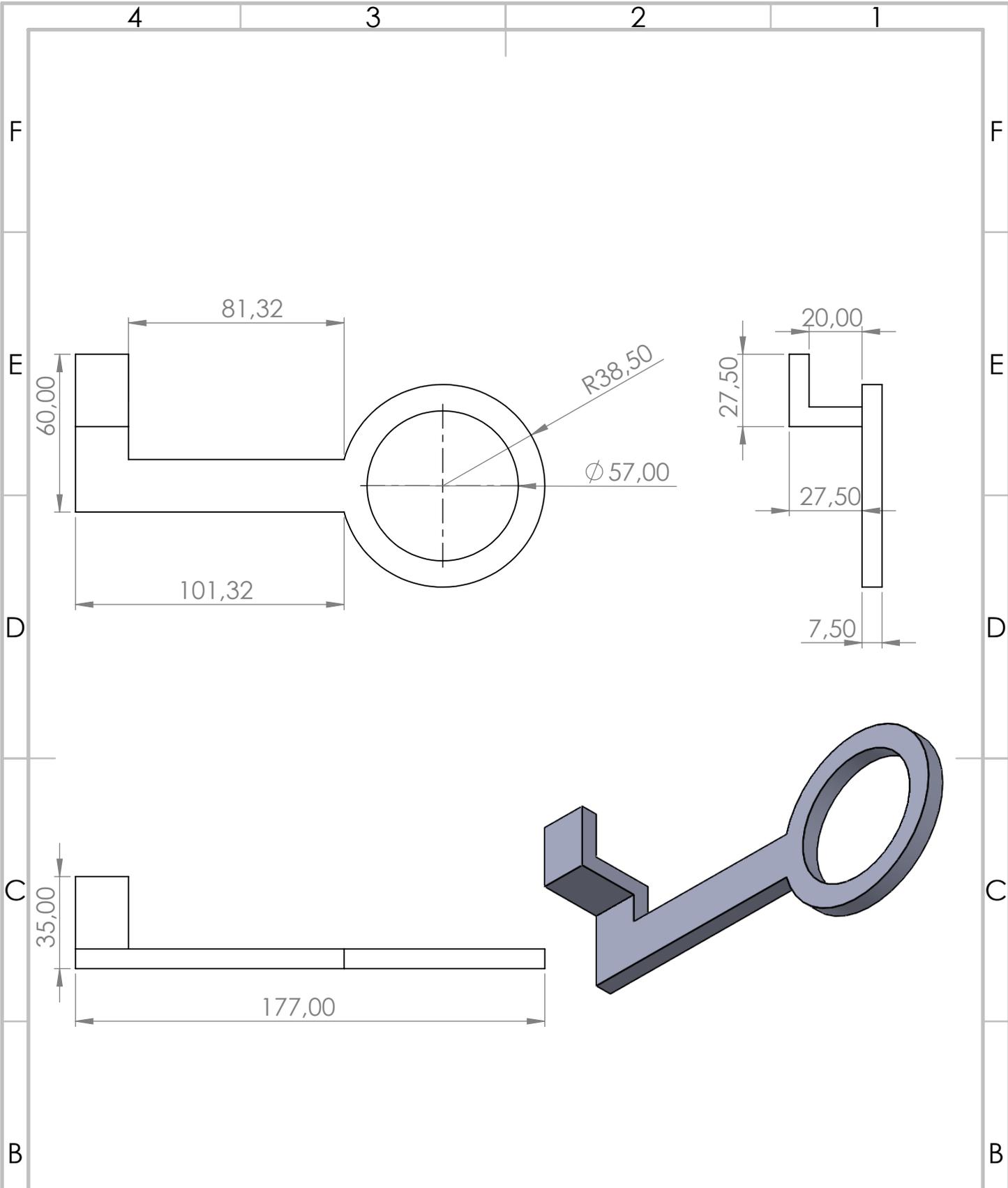
FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DESEN.									
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				PESO:		ESCALA:1:5		FOLHA 1 DE 1	

Elo 2

A4



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.					
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID.					

TÍTULO:

DES. Nº

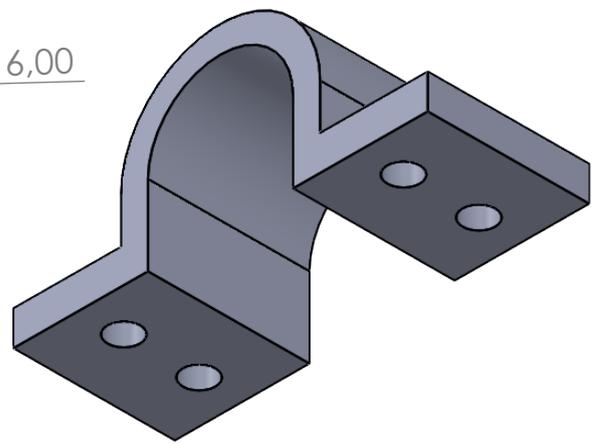
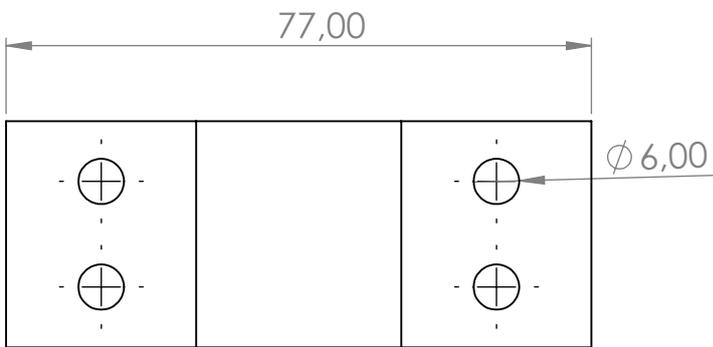
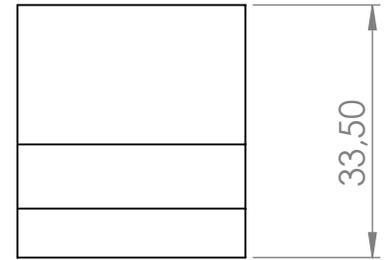
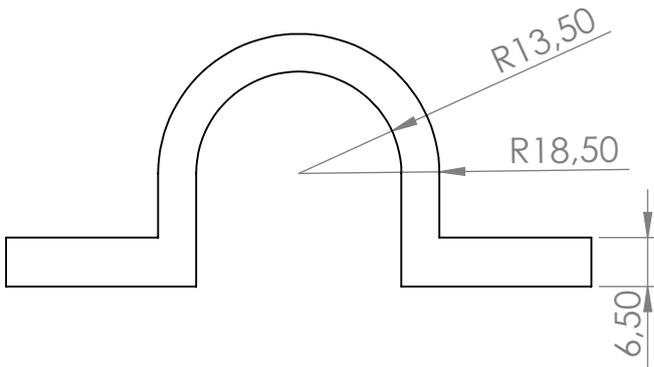
Apoio Inferior

A4

PESO:

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.					
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID.					
				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:

DES. Nº

Abraçadeira Fixação Vista

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

Anexos

ANEXO A – Documentos de consultas técnicas

A.1 Driver A4988

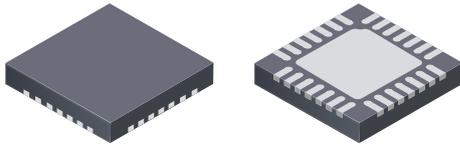
DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Features and Benefits

- Low $R_{DS(ON)}$ outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full, $1/2$, $1/4$, $1/8$, and $1/16$

Package:

28-contact QFN
with exposed thermal pad
5 mm × 5 mm × 0.90 mm
(ET package)



Approximate size

Description

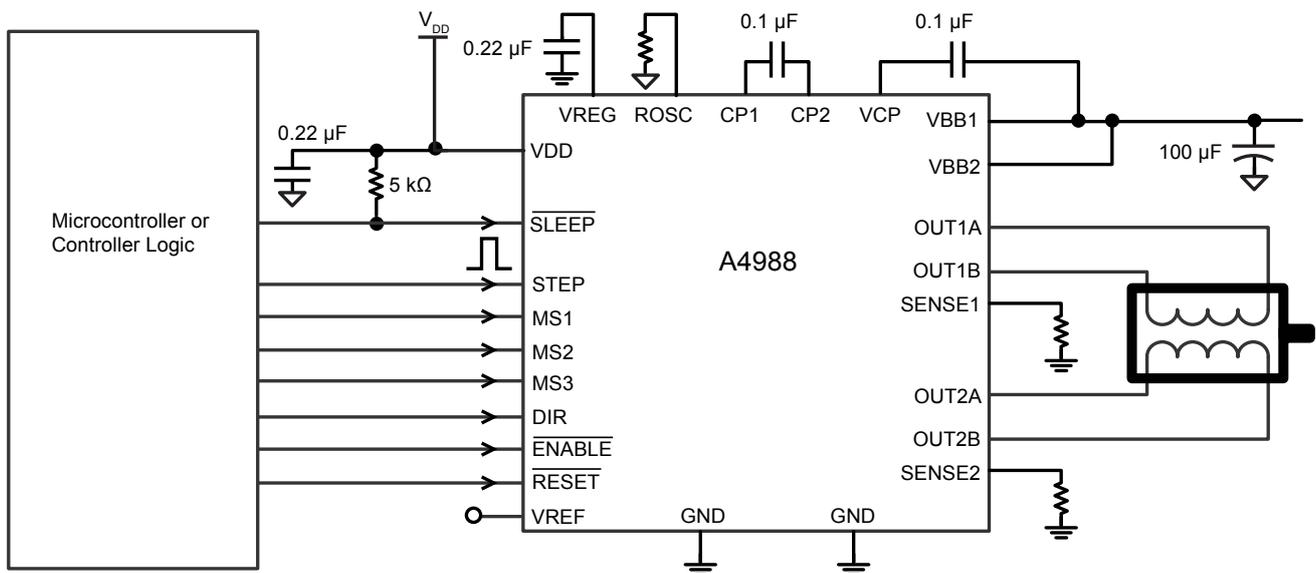
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and ± 2 A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

Continued on the next page...

Typical Application Diagram



A4988

DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Description (continued)

Internal synchronous rectification control circuitry is provided to improve power dissipation during PWM operation. Internal circuit protection includes: thermal shutdown with hysteresis, undervoltage lockout (UVLO), and crossover-current protection. Special power-on sequencing is not required.

The A4988 is supplied in a surface mount QFN package (ES), 5 mm × 5 mm, with a nominal overall package height of 0.90 mm and an exposed pad for enhanced thermal dissipation. It is lead (Pb) free (suffix -T), with 100% matte tin plated leadframes.

Selection Guide

Part Number	Package	Packing
A4988SETTR-T	28-contact QFN with exposed thermal pad	1500 pieces per 7-in. reel

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	V_{BB}		35	V
Output Current	I_{OUT}		±2	A
Logic Input Voltage	V_{IN}		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	V_{DD}		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	V_{SENSE}		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	V_{REF}		5.5	V
Operating Ambient Temperature	T_A	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-55 to 150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS¹ at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{BB} = 35\text{ V}$ (unless otherwise noted)

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. ²	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V_{BB}	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V_{DD}	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R_{DSON}	Source Driver, $I_{OUT} = -1.5\text{ A}$	–	320	430	m Ω
		Sink Driver, $I_{OUT} = 1.5\text{ A}$	–	320	430	m Ω
Body Diode Forward Voltage	V_F	Source Diode, $I_F = -1.5\text{ A}$	–	–	1.2	V
		Sink Diode, $I_F = 1.5\text{ A}$	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I_{BB}	$f_{PWM} < 50\text{ kHz}$	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I_{DD}	$f_{PWM} < 50\text{ kHz}$	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	$V_{IN(1)}$		$V_{DD} \times 0.7$	–	–	V
	$V_{IN(0)}$		–	–	$V_{DD} \times 0.3$	V
Logic Input Current	$I_{IN(1)}$	$V_{IN} = V_{DD} \times 0.7$	–20	<1.0	20	μA
	$I_{IN(0)}$	$V_{IN} = V_{DD} \times 0.3$	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R_{MS1}	MS1 pin	–	100	–	k Ω
	R_{MS2}	MS2 pin	–	50	–	k Ω
	R_{MS3}	MS3 pin	–	100	–	k Ω
Logic Input Hysteresis	$V_{HYS(IN)}$	As a % of V_{DD}	5	11	19	%
Blank Time	t_{BLANK}		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t_{OFF}	OSC = VDD or GND	20	30	40	μs
		$R_{OSC} = 25\text{ k}\Omega$	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V_{REF}		0	–	4	V
Reference Input Current	I_{REF}		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error ³	err_I	$V_{REF} = 2\text{ V}$, $\%I_{TRIPMAX} = 38.27\%$	–	–	± 15	%
		$V_{REF} = 2\text{ V}$, $\%I_{TRIPMAX} = 70.71\%$	–	–	± 5	%
		$V_{REF} = 2\text{ V}$, $\%I_{TRIPMAX} = 100.00\%$	–	–	± 5	%
Crossover Dead Time	t_{DT}		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold ⁴	I_{OCPST}		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T_{TSD}		–	165	–	$^\circ\text{C}$
Thermal Shutdown Hysteresis	T_{TSDHYS}		–	15	–	$^\circ\text{C}$
VDD Undervoltage Lockout	V_{DDUVLO}	V_{DD} rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	$V_{DDUVLOHYS}$		–	90	–	mV

¹For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

²Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

³ $V_{ERR} = [(V_{REF}/8) - V_{SENSE}] / (V_{REF}/8)$.

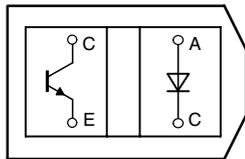
⁴Overcurrent protection (OCP) is tested at $T_A = 25^\circ\text{C}$ in a restricted range and guaranteed by characterization.

A.2 Sensor óptico reflexivo TCRT5000

Reflective Optical Sensor with Transistor Output



19156_2



Top view

19156_1

FEATURES

- Package type: leaded
- Detector type: phototransistor
- Dimensions (L x W x H in mm): 10.2 x 5.8 x 7
- Peak operating distance: 2.5 mm
- Operating range within > 20 % relative collector current: 0.2 mm to 15 mm
- Typical output current under test: $I_C = 1$ mA
- Daylight blocking filter
- Emitter wavelength: 950 nm
- Lead (Pb)-free soldering released
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC



RoHS COMPLIANT

DESCRIPTION

The TCRT5000 and TCRT5000L are reflective sensors which include an infrared emitter and phototransistor in a leaded package which blocks visible light. The package includes two mounting clips. TCRT5000L is the long lead version.

APPLICATIONS

- Position sensor for shaft encoder
- Detection of reflective material such as paper, IBM cards, magnetic tapes etc.
- Limit switch for mechanical motions in VCR
- General purpose - wherever the space is limited

PRODUCT SUMMARY

PART NUMBER	DISTANCE FOR MAXIMUM CTR _{rel} (1) (mm)	DISTANCE RANGE FOR RELATIVE I _{out} > 20 % (mm)	TYPICAL OUTPUT CURRENT UNDER TEST (2) (mA)	DAYLIGHT BLOCKING FILTER INTEGRATED
TCRT5000	2.5	0.2 to 15	1	Yes
TCRT5000L	2.5	0.2 to 15	1	Yes

Notes

(1) CTR: current transfere ratio, I_{out}/I_{in}

(2) Conditions like in table basic characteristics/sensors

ORDERING INFORMATION

ORDERING CODE	PACKAGING	VOLUME (1)	REMARKS
TCRT5000	Tube	MOQ: 4500 pcs, 50 pcs/tube	3.5 mm lead length
TCRT5000L	Tube	MOQ: 2400 pcs, 48 pcs/tube	15 mm lead length

Note

(1) MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (1)

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT (EMITTER)				
Reverse voltage		V_R	5	V
Forward current		I_F	60	mA
Forward surge current	$t_p \leq 10 \mu s$	I_{FSM}	3	A
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$	P_V	100	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ\text{C}$

TCRT5000, TCRT5000L



Vishay Semiconductors

Reflective Optical Sensor with Transistor Output

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
OUTPUT (DETECTOR)				
Collector emitter voltage		V_{CEO}	70	V
Emitter collector voltage		V_{ECO}	5	V
Collector current		I_C	100	mA
Power dissipation	$T_{amb} \leq 55\text{ }^\circ\text{C}$	P_V	100	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ\text{C}$
SENSOR				
Total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	P_{tot}	200	mW
Ambient temperature range		T_{amb}	- 25 to + 85	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	- 25 to + 100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	2 mm from case, $t \leq 10\text{ s}$	T_{sd}	260	$^\circ\text{C}$

Note

(1) $T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

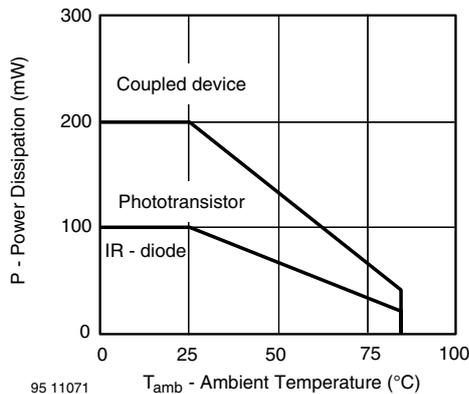


Fig. 1 - Power Dissipation Limit vs. Ambient Temperature

BASIC CHARACTERISTICS ⁽¹⁾						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT (EMITTER)						
Forward voltage	$I_F = 60\text{ mA}$	V_F		1.25	1.5	V
Junction capacitance	$V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_j		17		pF
Radiant intensity	$I_F = 60\text{ mA}$, $t_p = 20\text{ ms}$	I_e			21	mW/sr
Peak wavelength	$I_F = 100\text{ mA}$	λ_P	940			nm
Virtual source diameter	Method: 63 % encircled energy	d		2.1		mm
OUTPUT (DETECTOR)						
Collector emitter voltage	$I_C = 1\text{ mA}$	V_{CEO}	70			V
Emitter collector voltage	$I_e = 100\text{ }\mu\text{A}$	V_{ECO}	7			V
Collector dark current	$V_{CE} = 20\text{ V}$, $I_F = 0\text{ A}$, $E = 0\text{ lx}$	I_{CEO}		10	200	nA
SENSOR						
Collector current	$V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_F = 10\text{ mA}$, $D = 12\text{ mm}$	I_C ^{(2) (3)}	0.5	1	2.1	mA
Collector emitter saturation voltage	$I_F = 10\text{ mA}$, $I_C = 0.1\text{ mA}$, $D = 12\text{ mm}$	V_{CEsat} ^{(2) (3)}			0.4	V

Note

(1) $T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

(2) See figure 3

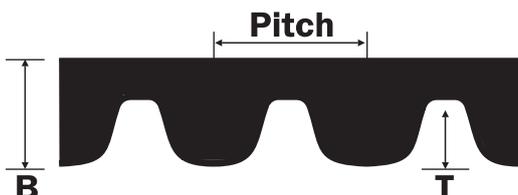
(3) Test surface: mirror (Mfr. Spindler a. Hoyer, Part No. 340005)

A.3 Correias

CORREIAS SINCRONIZADORAS / CORREAS SÍNCRONAS

PowerGrip™ GT™2

C.P. = Comprimento Primitivo / Longitud primitiva
Pitch = Passo / Paso



Ref.	Pitch (mm)	T (mm)	B(mm)
2MR	2	0,76	1,52
3MR	3	1,14	2,41
5MR	5	1,93	3,81
8MGT	8	3,28	5,59
14MGT	14	5,84	9,91

5MR-500-25

PowerGrip™ GT™2 (2MR / 3MR / 5MR) - Codificação / Codificación

5MR - Passo / Paso 5M

500 - Comprimento Primitivo / Longitud primitiva

25 - Largura da correia / Anchura de la correa (mm)

2800-8MGT-30

PowerGrip™ GT™2 (8MGT / 14MGT) - Codificação / Codificación

2800 - Comprimento Primitivo / Longitud primitiva

8MGT - Passo / Paso 5M

30 - Largura da correia / Anchura de la correa (mm)

2MR	
Cod. Largura Cod. Anchura	Largura da correia Anchura de la correa (mm)
4	4,0
6	6,0
9	9,0

3MR	
Cod. Largura Cod. Anchura	Largura da correia Anchura de la correa (mm)
6	6,0
9	9,0
15	15,0

5MR	
Cod. Largura Cod. Anchura	Largura da correia Anchura de la correa (mm)
9	9,0
15	15,0
25	25,0

8MGT	
Cod. Largura Cod. Anchura	Largura da correia Anchura de la correa (mm)
12	12,0
20	20,0
30	30,0
50	50,0
85	85,0

14MGT	
Cod. Largura Cod. Anchura	Largura da correia Anchura de la correa (mm)
40	40,0
55	55,0
85	85,0
115	115,0
170	170,0

Seção / sección - 2MR

REF. DA CORREIA	C.P. (mm)	Nº de dentes Nº de dientes	REF. DA CORREIA	C.P. (mm)	Nº de dentes Nº de dientes	REF. DA CORREIA	C.P. (mm)	Nº de dentes Nº de dientes
2MR-100	100	50	2MR-212	212	106	2MR-386	386	193
2MR-112	112	56	2MR-216	216	108	2MR-400	400	200
2MR-124	124	62	2MR-220	220	110	2MR-406	406	203
2MR-126	126	63	2MR-232	232	116	2MR-420	420	210
2MR-134	134	67	2MR-236	236	118	2MR-456	456	228
2MR-136	136	68	2MR-240	240	120	2MR-470	470	235
2MR-140	140	70	2MR-250	250	125	2MR-474	474	237
2MR-152	152	76	2MR-252	252	126	2MR-488	488	244
2MR-158	158	79	2MR-258	258	129	2MR-504	504	252
2MR-160	160	80	2MR-278	278	139	2MR-528	528	264
2MR-164	164	82	2MR-280	280	140	2MR-552	552	276
2MR-166	166	83	2MR-300	300	150	2MR-576	576	288
2MR-168	168	84	2MR-320	320	160	2MR-600	600	300
2MR-172	172	86	2MR-322	322	161	2MR-640	640	320
2MR-180	180	90	2MR-332	332	166	2MR-696	696	348
2MR-186	186	93	2MR-346	346	173	2MR-744	744	372
2MR-192	192	96	2MR-350	350	175	2MR-848	848	424
2MR-200	200	100	2MR-364	364	182	2MR-1164	1164	582
2MR-202	202	101	2MR-370	370	185			
2MR-210	210	105	2MR-380	380	190			

A.4 Motores de passo

FORMAS DE LIGAÇÃO

A Neoyama oferece motores de duas fases. Esses motores de passo podem ser de 4, 6 ou 8 fios. Motores de 4 fios são ligados somente em bipolar série, motores de 6 fios podem ser ligados em bipolar série ou unipolar e motores de 8 fios podem ser ligados em bipolar série, bipolar paralelo ou unipolar. Ligações em paralelo possibilitam alcance de maiores velocidades por conta da menor indutância nas bobinas. Em série, o torque em baixas velocidades é igual ou levemente superior ao paralelo, consumindo menos corrente. A ligação unipolar por utilizar somente metade da bobina, tem um torque de 30 a 50% menor do que as ligações anteriores.

TABELA DE SELEÇÃO

NEMA	MODELO	CONEXÃO		HOLDING TORQUE (kgf.cm)	CORRENTE (A/fase)	TENSÃO (V/fase)	RESISTÊNCIA (Ω/fase)	INDUTÂNCIA (mH/fase)
17	AK17/1.1F6LN1.8	Bipolar	Série	1,1	0,07	0,017	140	148
		Unipolar		0,77	0,1	0,012	37	37
23	AK23/4.6F6FL1.8	Bipolar	Série	4,6	0,7	7	10	24,8
		Unipolar		3,2	1	5	5	6,2
	AK23/7.0F8FN1.8	Bipolar	Série	7	1	5	2,4	9,2
		Paralelo			2	2,5	0,6	2,3
	Unipolar		4,9	1,4	3,5	1,2	2,3	
	AK23/15F6FN1.8	Bipolar	Série	15	2,1	4,2	2	8
		Unipolar		10,5	3	3	1	2
	AK23/21F8FN1.8	Bipolar	Série	21	2,8	3,36	1,2	11,2
Paralelo		5,6	1,68		0,3	2,6		
Unipolar		14,7	4	2,4	0,6	2,8		
34	AK34/32F6BB1.8	Bipolar	Série	32	2,4	8,2	3,36	20,96
		Unipolar		22,4	3,5	5,88	1,68	5,24
	AK34/42F8FN1.8	Bipolar	Série	42	2,94	4,7	0,4	14
		Paralelo			5,88	2,35	1,6	3,5
	Unipolar		29,4	4,2	3,36	0,8	3,5	
	AK34/52F4CN1.8	Bipolar	Série	52	5	3,75	0,75	6,4
	AK34/100F8FN1.8	Bipolar	Série	100	2,1	11,2	5,34	55,2
		Paralelo			4,2	5,6	1,36	13,8
Unipolar		70	3	8	2,67	13,8		

AK17/1.10F6LN1.8

ESPECIFICAÇÕES GERAIS

Especificação	Valor
Ângulo do passo	1,8°
Número de passos	200
Enrolamento	Bifilar
Temperatura de operação máx.	80°C
Temperatura ambiente	-10°C ~ 50°C
Resistência de isolamento	100VAC / 500VDC
Rigidez dielétrica	500VAC / 1min
Classe de isolamento	B
Esforço radial máximo	0,03mm - 400g de carga
Esforço axial máximo	0,03mm - 500g de carga
Detent torque	0,06gf.cm
Inércia rotórica	48g.cm ²
Quantidade de fios	6
Peso	0,22kg

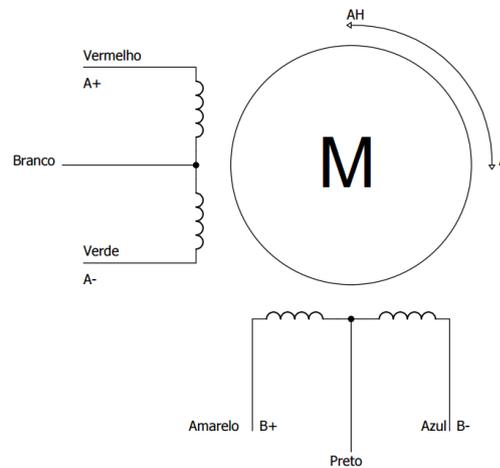
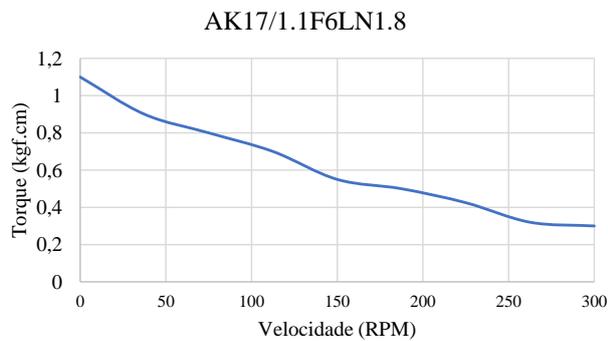
Bipolar Série	
Fio do motor	Terminal do driver
Vermelho	A+
Verde	A-
Amarelo	B+
Azul	B-
Branco / Preto	Isolado

Unipolar	
Fio do motor	Terminal do driver
Vermelho	A+
Verde	A-
Amarelo	B+
Azul	B-
Branco / Preto	Comum

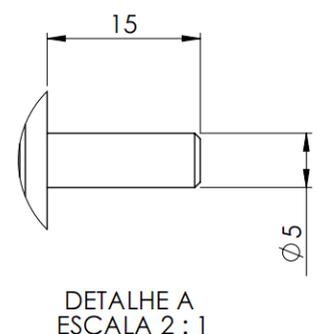
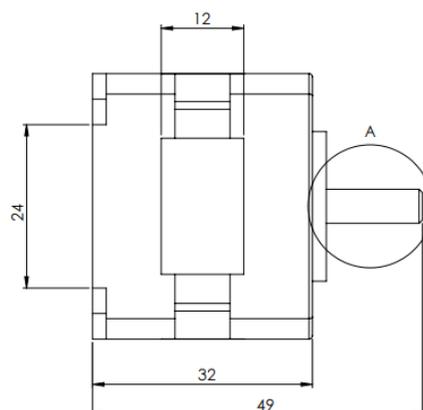
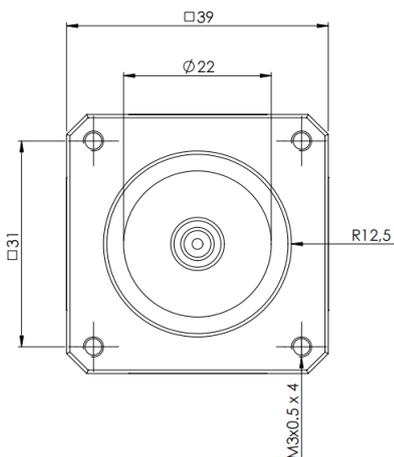
TABELA DE SELEÇÃO

NEMA	MODELO	CONEXÃO		HOLDING TORQUE (kgf.cm)	CORRENTE (A/fase)	TENSÃO (V/fase)	RESISTÊNCIA (Ω/fase)	INDUTÂNCIA (mH/fase)	PESO (kg)
17	AK17/1.1F6LN1.8	Bipolar	Série	1,1	0,07	0,017	140	148	0,22
		Unipolar		0,77	0,1	0,012	37	37	

INFORMAÇÕES TÉCNICAS



Ligação bipolar série ou unipolar



AK23/4.6F6FL1.8

ESPECIFICAÇÕES GERAIS

Especificação	Valor
Ângulo do passo	1,8°
Número de passos	200
Enrolamento	Bifilar
Temperatura de operação máx.	80°C
Temperatura ambiente	-10°C ~ 50°C
Resistência de isolamento	100VAC / 500VDC
Rigidez dielétrica	500VAC / 1min
Classe de isolamento	B
Esforço radial máximo	0,03mm - 400g de carga
Esforço axial máximo	0,03mm - 500g de carga
Detent torque	300gf.cm
Inércia rotórica	120g.cm ²
Quantidade de fios	6
Peso	0,42kg

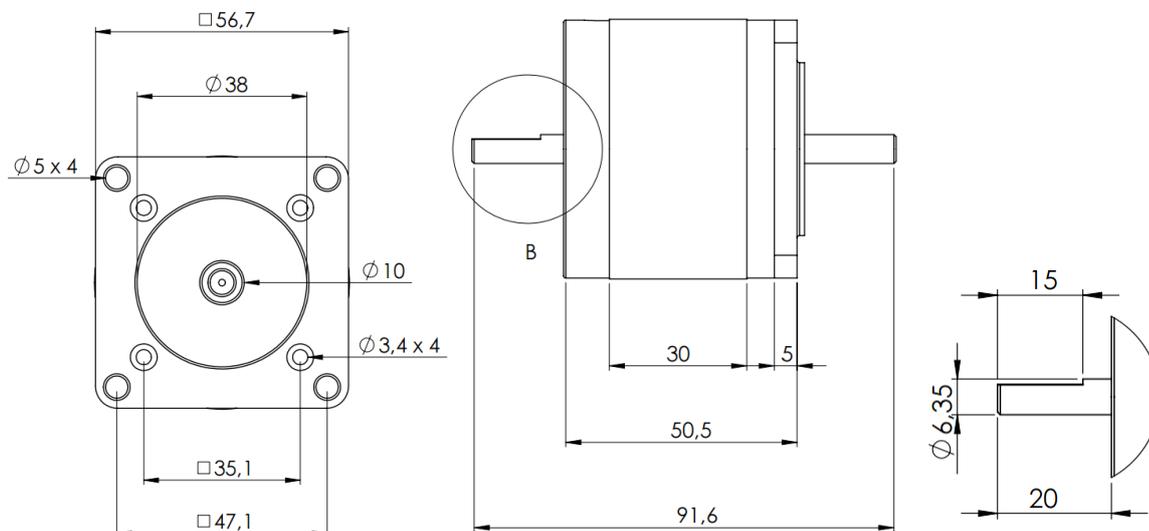
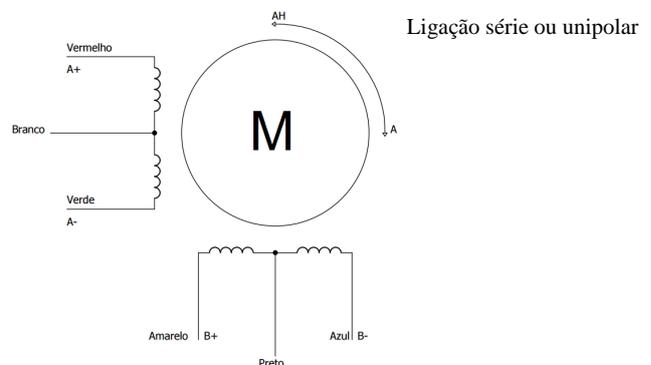
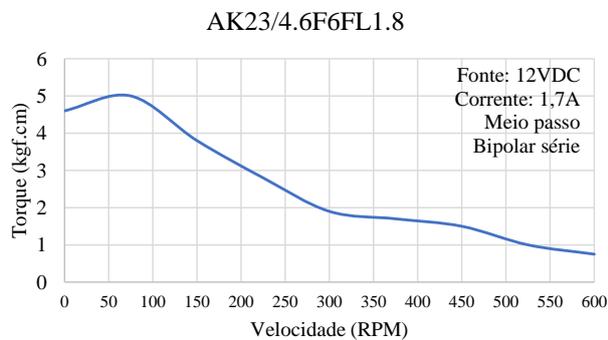
Bipolar Série	
Fio do motor	Terminal do driver
Vermelho	A+
Verde	A-
Amarelo	B+
Azul	B-
Branco / Preto	Isolados individualmente

Unipolar	
Fio do motor	Terminal do driver
Vermelho	A+
Verde	A-
Amarelo	B+
Azul	B-
Branco / Preto	Comum

TABELA DE SELEÇÃO

NEMA	MODELO	CONEXÃO		HOLDING TORQUE (kgf.cm)	CORRENTE (A/fase)	TENSÃO (V/fase)	RESISTÊNCIA (Ω/fase)	INDUTÂNCIA (mH/fase)	PESO (kg)
23	AK23/4.6F6FL1.8	Bipolar	Série	4,6	0,7	7	10	24,8	0,42
		Unipolar		3,2	1	5	5	6,2	

INFORMAÇÕES TÉCNICAS



A.5 Efetuador terminal - Garra

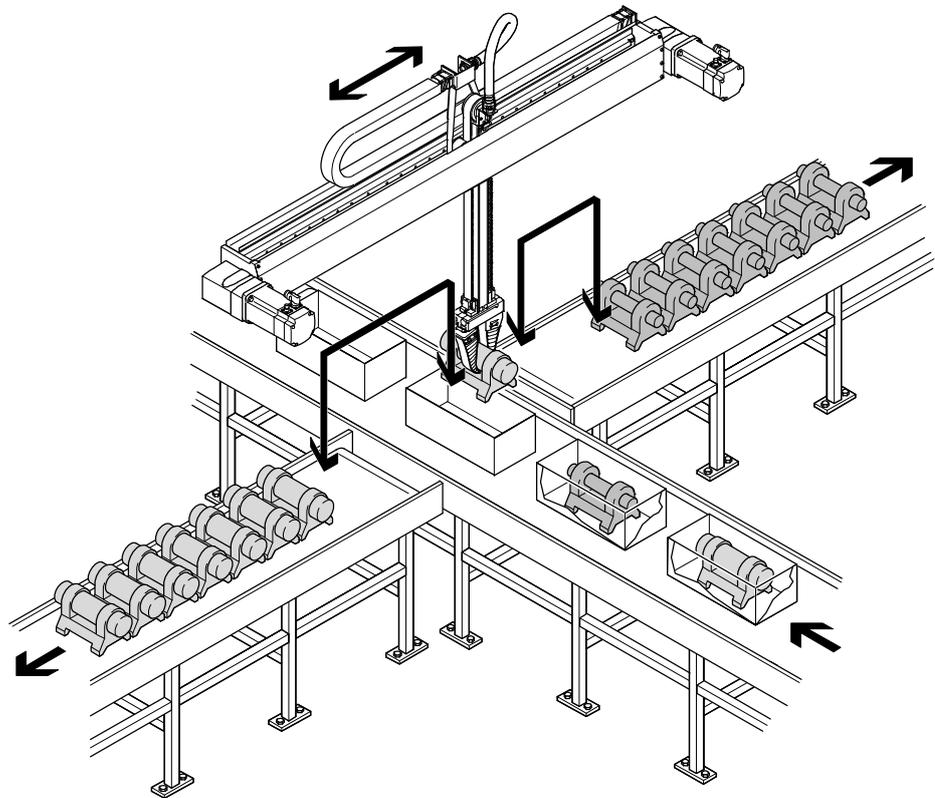
Adaptive gripper fingers DHAS

Features

Sample applications

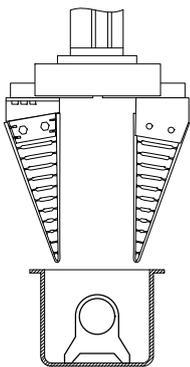
Transferring parts from tight packaging

- Different part diameters can be gripped in a form-fitting way with one gripper
- Gripping parts that are tightly packed with standard gripper jaws is difficult
- Thanks to the gripper fingers' pointed shape, they can be slid between the wall and the workpiece, even if the workpiece is off-centre



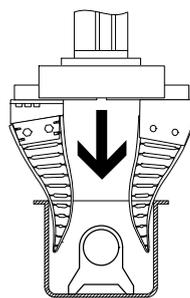
Step 1

Position the gripper fingers above the packaging



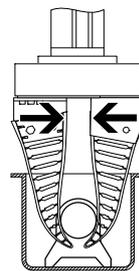
Step 2

Slide the gripper fingers into the packaging



Step 3

Wrap the fingers around the workpiece in a form-fitting way



Step 4

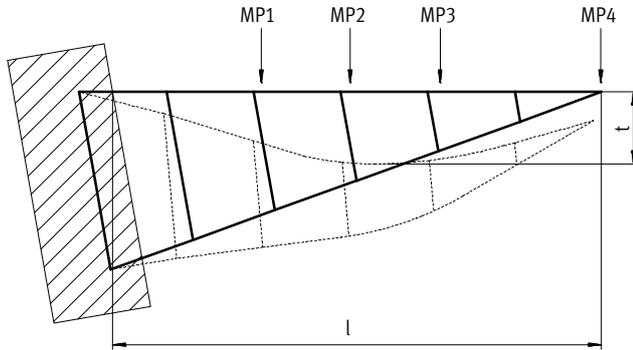
Lift the workpiece



Adaptive gripper fingers DHAS

Technical data

Indentation depth t as a function of gripping force F_G (per gripper finger) at 23°C



- MP1 Measuring point 1
- MP2 Measuring point 2
- MP3 Measuring point 3
- MP4 Measuring point 4
- l Total length
- t Indentation depth

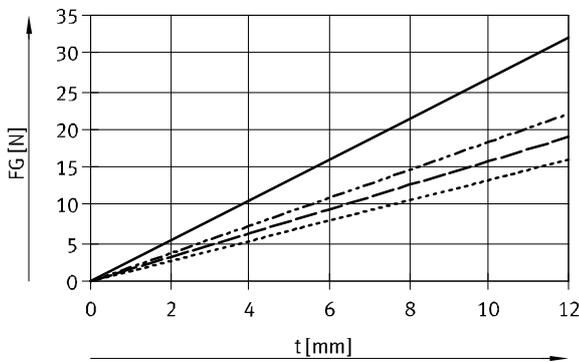
The values may differ under other ambient conditions (additional information on request).

Workpieces are best gripped in the middle of the gripper finger (MP2).

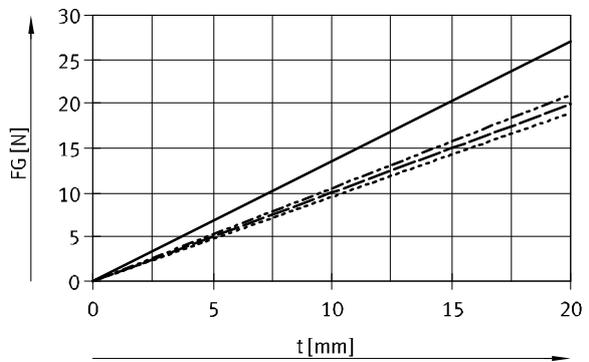
Size	l [mm]	MP1 [mm]	MP2 [mm]	MP3 [mm]	MP4 [mm]
60	50	15	25	35	50
80	80	30	40	50	80
120	115	47.5	57.5	67.5	115

Size	Indentation depth at MP2 [mm]
60	12
80	20
120	30

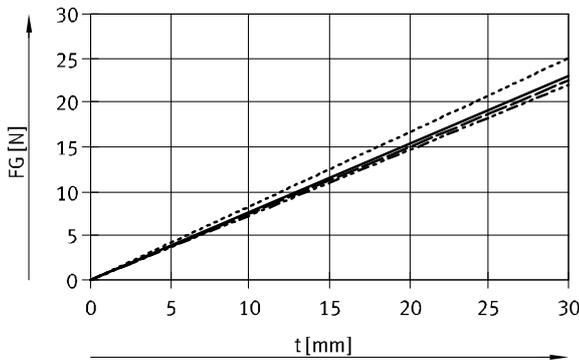
Size 60



Size 80



Size 120



- MP1
- - - MP2
- · - MP3
- · · MP4