

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ

GUILHERME DA SILVA

**MODELO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA REABILITAÇÃO DE MEMBROS
SUPERIORES**

Itajaí
2018

GUILHERME DA SILVA

**MODELO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA REABILITAÇÃO DE MEMBROS
SUPERIORES**

Trabalho de Iniciação Científica solicitado para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico pelo Curso Superior de Engenharia Mecânica da Escola do Mar, Ciência e Tecnologia pela Universidade do Vale do Itajaí.
Orientador (a): Dr. Alejandro Rafael Garcia Ramirez.

Itajaí
2018



UNIVALI

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ

FOLHA DE APROVAÇÃO


TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ
ESCOLA DO MAR, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA I MECÂNICA


GUILHERME DA SILVA
MODELO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA REABILITAÇÃO DOS MEMBROS SUPERIORES

Trabalho de Iniciação Científica e Tecnológica apresentado ao Curso de
Engenharia Mecânica, para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

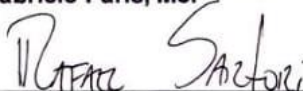
Aprovado na data da defesa.



Prof. Alejandro Rafael Garcia Ramirez, Dr.
(Orientador)
EMCT



Prof. Fabrício Páris, Me.
EMCT



Prof. Rafael Sartori, Me.
EMCT

Itajaí, 05 de Dezembro de 2018.

ESCOLA DO MAR, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Rua Uruguai, 458 - Centro - Itajaí - SC - CEP 88302-202 - Caixa Postal 360 - Fone: (47) 3341 7541 - Fax: (47) 3341 7715
www.univali.br

Dedico este trabalho aos meus pais Aldir e Josiane, que fizeram o sonho de faculdade se tornar possível e à minha esposa Manoela pelo seu amor e por todo apoio constante para que eu pudesse alcançar meu objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo.

Aos meus pais que não mediram esforços para me ajudar.

Agradeço a minha esposa pelo total apoio.

A todos da minha família que de alguma forma contribuíram com minha graduação.

Agradeço meu orientador Dr. Alejandro, pelo auxílio e por toda ajuda.

Aos meus colegas de faculdade, em especial à Thaysa, Gustavo e Osnildo.

A Rede de Reabilitação Lucy Montoro, por ter dado a oportunidade da pesquisa de campo.

*“Tu guardarás em perfeita paz aquele cujo propósito está firme, porque em ti
confia.”
(Isaías 26-3)*

RESUMO

SILVA, Guilherme da. Modelo de um braço robótico para reabilitação de membros superiores. Itajaí, 2018. 78f. Trabalho de Iniciação Científica e Tecnológica (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola do Mar Ciência e Tecnologia, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2018.

A utilização de robôs está sendo cada vez mais inserido para auxiliar, não só nas indústrias, mas também em conjunto com a medicina em aplicações como cirurgias e reabilitação física de pessoas. A reabilitação física de pessoas conta com a necessidade e a disponibilidade de profissionais na área de fisioterapia, que aplicam sessões de diversos tipos de exercícios repetitivos e exaustivos no paciente, com isso a implementação de tecnologias robóticas vem melhorando muito os resultados dos pacientes e também ajudando os profissionais na recuperação dos membros afetados, uma vez que os robôs para reabilitação são projetados para se ter um melhor ganho de resultado, já que os equipamentos podem aplicar diversos tipos de exercícios com mais precisão e também geram um aumento de sessões de fisioterapia significativa se comparado com o método convencional. Esse trabalho teve como objetivo modelar um braço robótico em menor escala para reabilitação de membros superiores que atenda aos requisitos levantados durante a pesquisa, para isso foi identificado modelos de equipamentos já desenvolvidos para reabilitação de membros superiores, determinando com base um modelo que sirva como referência para o projeto. Por fim, com auxílio de softwares foi desenvolvido o projeto assim como aplicação cinemática, e então foi efetuado os testes dos movimentos em software Matlab.

Palavras-chave: Robótica. Fisioterapia. Reabilitação.

ABSTRACT

SILVA, Guilherme da. *Modelo de um braço robótico para reabilitação de membros superiores*. Itajaí, 2018. 78f. Trabalho de Iniciação Científica e Tecnológica (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola do Mar Ciência e Tecnologia, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2018.

The usage of robots is increasing in the environment in which we live, not only in the industries worldwide, but also in conjunction with medicine in applications such as surgeries and physical rehabilitation. Physical rehabilitation of people depends on the need and the availability of professionals in the area of physiotherapy, who provides sessions of various types of repetitive and exhaustive exercises for the patient. However, the implementation of robotic technologies has greatly improved patient outcomes and helps in the recovery of affected limbs, since rehabilitation robots are designed to have a better outcome gain, seeing as the equipment can apply several types of exercises with more precision and generate a significant increase in physical therapy sessions if compared to the conventional method. This work aims to develop the project of a robotic arm for rehabilitation of upper limbs that meets the requirements raised during the research, to identify models of equipment already developed for rehabilitation of upper limbs and determine a model that serves as reference for the project. Then, with the help of specific softwares, develop the project as well as its programming perform the structural analysis and system movement.

Keywords: Robotics. Physiotherapy. Rehabilitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Robô industrial.	20
Figura 2 - Conexão entre a junta e os elos	20
Figura 3 - Graus de liberdade do braço humano.....	22
Figura 4 - Exemplos de geometrias dos robôs industriais	23
Figura 5 - Volume de trabalho em diferentes anatomias	24
Figura 6 - Representação de um vetor no espaço	25
Figura 7 - Eixos de representação	26
Figura 8 - Representação de um referencial em relação a origem.....	27
Figura 9 - Translação Pura.....	28
Figura 10 - Coordenadas referente a uma rotação	29
Figura 11 - Representação de Denavit-Hartenberg.....	30
Figura 12 - População brasileira com tipos de incapacidades	34
Figura 13 - (a) representação dos eixos; (b) representação dos planos.	37
Figura 14 - (a) Extensão do membro; (b) Flexão do Membro; (c) adução.....	37
Figura 15 - Movimento de Abdução	38
Figura 16 - Amplitude dos movimentos de flexão e extensão horizontal.....	38
Figura 17 - Amplitude de rotação no eixo longitudinal.....	39
Figura 18 - Articulações do Ombro.....	40
Figura 19 - Movimento de flexão e extensão do cotovelo	41
Figura 20 - Articulações do cotovelo	42
Figura 21 - Eixos de referência do punho	43
Figura 22 - Amplitude de movimento do punho.....	43
Figura 23 - Movimento de circundução do punho.	44
Figura 24 - Articulações do punho.....	44
Figura 25 - InMotion 2	45
Figura 26 - Resultado gráfico de paciente com AVC: (a) primeira sessão; (b) seis semanas após a primeira sessão.....	46
Figura 27 - ArmeoPower	47
Figura 28 - Relatório final de cada sessão	47
Figura 29 - ArmeoSpring	48
Figura 30 - Interface MATLAB.....	49
Figura 31 - Interface Autodesk Inventor	50
Figura 32 - Malhas em uma análise de elementos finitos	51
Figura 33 - Modelo do braço robótico para reabilitação de membros superiores.....	55
Figura 34 - Detalhe da estrutura.....	56
Figura 35 - Motor de passo NEMA-17 – Driver A4988	57
Figura 36 - Representação D-H	58
Figura 37 - Posição no Software Inventor	60
Figura 38 - Definição e dimensões do Braço robótico.....	61

Figura 39 - Modelo do braço robótico no software MatLab	61
Figura 40 - Movimentos gerados.....	62
Figura 41 - Primeira movimentação definida.....	63
Figura 42 - Função trajetória3m	64
Figura 43 - Gráficos da Trajetória.....	64
Figura 44 - Gráfico do terceiro movimento	65
Figura 45 - Trajetória dos movimentos analisados.....	66
Figura 46 - Equipamento InMotion	71
Figura 47 - Código referente aos movimentos	77
Figura 48 - Trajetória3m	77
Figura 49 - Plotagem dos Gráficos.....	78
Figura 50 - Movimentos realizados	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de agravo em pacientes vítimas de causas externas.....	32
Tabela 2 - Membros afetados por causas externas	33
Tabela 3 - Parâmetros D-H	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVC - Acidente Vascular Cerebral
AVE - Acidente Vascular Encefálico
CAD - *Computer Aided Design*
CAE - *Computer Aided Engineering*
CAT - Comitê de Ajudas Técnicas
FEA - Análise de Elementos Finitos
GDL - Graus de liberdade
ISO - *International Organization for Standardization*
MIT - *Massachusetts Institute of Technology*
SCARA - *Selective Compliance Assembly Robot Arm*
TA - Tecnologia Assistiva
TO - Terapeuta Ocupacional
TICT - Trabalho de Iniciação Científica e Tecnológica
UNIVALI - Universidade do Vale do Itajaí

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Problematização.....	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Justificativa.....	17
 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Robôs.....	18
2.1.1 Componentes de um sistema robótico	18
2.1.2 Tipos de articulações.....	20
2.1.3 Graus de Liberdade.....	22
2.1.4 Geometria do robô	23
2.1.5 Volume de trabalho	24
2.2 Cinemática	25
2.2.1 Matriz de transformação.....	27
2.2.2 Cinemática direta	29
2.2.3 Cinemática inversa.....	31
2.3 Medicina de reabilitação.....	32
2.3.1 Reabilitação de membros superiores com auxílio de robôs	35
2.4 Movimento dos membros superiores	36
2.4.1 Ombro	36
2.4.1.1 Flexão-Extensão e adução.....	37
2.4.1.2 Abdução	38
2.4.1.3 Flexão e extensão horizontal.....	38
2.4.1.4 Rotação no eixo longitudinal	39
2.4.2 Cotovelo	41
2.4.2.1 Pronação-Supinação e Flexão-extensão.....	41
2.4.3 Punho	42
2.4.3.1 Abdução-Adução e Flexão-Extensão	43
2.4.3.2 Circundução	44
2.5 Projetos similares para reabilitação de membros superiores	45
2.5.1 InMotion.....	45
2.5.2 ArmeoPower.....	46
2.5.3 ArmeoSpring	48
2.6 Análise de funcionamento	48

2.6.1 Modos de Programação	48
2.6.2 CAD.....	49
2.6.3 CAE	50
3 METODOLOGIA	52
3.1 Parâmetros de projetos	52
4 DESENVOLVIMENTO	54
4.1 obstáculos e adaptações.....	54
4.2 modelo do braço robótico	54
4.3 modelagem cinemática.....	57
4.4 Análise de movimentos e trajetória em software matlab	60
4.4.1 Planejamento de Trajetória	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

O emprego de robôs na medicina vem tornando-se cada vez mais recomendado, tendo como a utilização em diversas situações como: cirurgias robóticas, laparoscopia robotizada, nano robôs em auxílio de microcirurgias, e também na fisioterapia de reabilitação. Algumas razões são que os robôs possuem precisão, velocidade, repetições sem fadiga, tempo de operação, dentre outros motivos que favorecem não só os profissionais mais também os pacientes que de alguma forma necessitam do tratamento da fisioterapia neurológica (LISBOA, 2010).

A fisioterapia neurológica tem como objetivo o tratamento e a diminuição dos sintomas de alterações neurológicas, que compreendam ou não problemas motores. Ela atua na restauração de funções, tais como a coordenação motora, o equilíbrio, a força e os movimentos (BASSANI, 2016). A possibilidade de reversão ou minimização de sequelas neurológicas se deve ao fato de que o cérebro possui a neuroplasticidade, ou seja, a capacidade de se reorganizar e ativar outras áreas e conexões entre neurônios quando devidamente estimulado (MARQUES, 2016). Em outras palavras, o cérebro pode estabelecer novos caminhos para emitir os comandos de uma determinada função. Com base nisto, várias técnicas foram desenvolvidas para tratamento e reabilitação de pacientes que tenham sofrido alguma sequela neurológica.

A fisioterapia de reabilitação se aplica a várias situações, dentre as mais conhecidas que necessitam da intervenção da fisioterapia estão as doenças crônicas, sequelas neurológicas, acidentes de trânsito e de trabalho, doenças cardiovasculares. Desta forma a implementação de estruturas robóticas podem atuar junto com a fisioterapia, ajudando e facilitando o profissional a aplicar os exercícios necessários para a recuperação do paciente (NUNES, 2012).

É neste contexto que a terapia assistida por robô surge como uma alternativa interessante, visto que a tecnologia está cada vez mais acessível e presente na sociedade. Relevante porque um equipamento robótico tanto pode monitorar quanto executar um movimento, ou executar exatamente o mesmo padrão de movimentos várias vezes com boa precisão e com resultados significativos em relação às técnicas de fisioterapia convencionais (TROPEA et al., 2013).

Um dos modelos existentes no mercado é o MIT-Manus, apresenta dois graus de liberdade, permitindo a movimentação de ombro, cotovelo e punho. O sistema conta com terapias passiva, ativo-assistiva e ativo resistiva. O equipamento orienta os pacientes a manipular sistema e realizar tarefas como atingir alvos e contornar figuras, orientadas por sons e imagem (TEIXEIRA et al., 2011).

A presente proposta visa o projeto de um braço robótico para reabilitação de membro superior, tendo como base do estudo modelos já existentes no mercado. Será desenvolvido o projeto virtual, projeto de hardware, software e a análise de funcionamento do protótipo, comparando com o modelo escolhido como referência para o desenvolvimento do trabalho.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Existem no mercado diversos tipos de robôs e tecnologias para auxiliar na recuperação dos membros do corpo humano, através de exercícios com o auxílio de terapeutas ocupacionais, contudo, um dos grandes problemas que pode se observar nessa área é o custo elevado dos equipamentos e a falta de investimentos na área de pesquisa, para que novas ideias sejam criadas com o intuito de desenvolver outros equipamentos e até mesmo otimizar os já existentes.

Baseado nessa questão, pode-se definir a pergunta de pesquisa deste trabalho como sendo: Quais métodos podem ser executados para que, escolhendo um modelo como referência já desenvolvido no mercado, possa se projetar um modelo de equipamento para reabilitação de membros superiores?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Modelar um braço robótico para reabilitação de membros superiores mediante parâmetros definidos, para aplicação em fisioterapia neurológica na recuperação de pacientes com deficiência de movimentação de membro superior.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Pesquisar projetos similares e a reabilitação robótica no país;
- b) Determinar um modelo que sirva como referência para o projeto segundo a sua complexidade e funcionalidade;
- c) Modelar o braço robótico em escala reduzida utilizando software CAD;
- d) Definir o hardware compatível com o projeto;
- e) Elaborar simulação de movimentos com software MATALAB;
- f) Analisar e apresentar os resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de um braço robótico direcionado à fisioterapia de reabilitação, beneficia às pessoas que necessitam de recuperação com eficiência e rapidez, contribuindo também com os profissionais da área como terapeutas ocupacionais, que aplicam sessões de exercícios repetitivos e exaustivos nos pacientes (NUNES, 2012).

Com o aumento da população e evolução da tecnologia, tem-se o aumento de pacientes com percas de movimento, devido aos acidentes de trânsito, de trabalho e doenças que vem surgindo com o passar do tempo (TROPEA et al., 2013).

Com isso, a implementação de meios robóticos para reabilitação é de extrema importância para que se possa obter ganhos mais rápidos nos pacientes e ajudar ou auxiliar os profissionais de forma a aumentar as sessões de tratamento e repetitividade das atividades envolvidas na recuperação motora.

Portanto, o trabalho proposto permitiu que o acadêmico aplicasse os conhecimentos e habilidades adquiridos durante o curso de Engenharia Mecânica, nesta área, associando a pesquisa à várias disciplinas estudadas, como Robótica, Controle de Sistemas, Elementos de Máquinas, Desenho Mecânico, dentre outras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a base teórica necessária para o desenvolvimento do TICT, Trabalho de Iniciação Científica e Tecnológica, com base na literatura para poder fundamentar o projeto proposto.

Esta fundamentação teórica aborda os conceitos básicos de robótica, a classificação dos robôs e exemplos da utilização da robótica em equipamentos para reabilitação do corpo humano, assim como suas características e diferenças. O intuito final é poder escolher um modelo, já existente no mercado, que melhor se adeque para ser utilizado como base no desenvolvimento do projeto.

2.1 ROBÔS

Conforme a norma ISO (*International Organization for Standardization* – Organização internacional de Normalização) 8373:2012, que concede definições e características de dispositivos robóticos em ambientes industriais e não industriais, um robô pode ser definido como um “Mecanismo atuador programável em dois ou mais eixos, com um grau de autonomia, movendo-se dentro do seu ambiente, para executar tarefas pretendidas”.

Também, segundo Groover et al. (1988, p. 06): “Um robô industrial é um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programadas para realização de uma variedade de tarefas”.

Para uma melhor compreensão do que realmente é um robô, pode-se comparar ele com um guindaste, em que a maior diferença entre eles é que o guindaste é controlado por uma pessoa que altera sua posição acionando os atuadores. Já o robô é controlado por um computador que executa um determinado programa (NIKU, 2013).

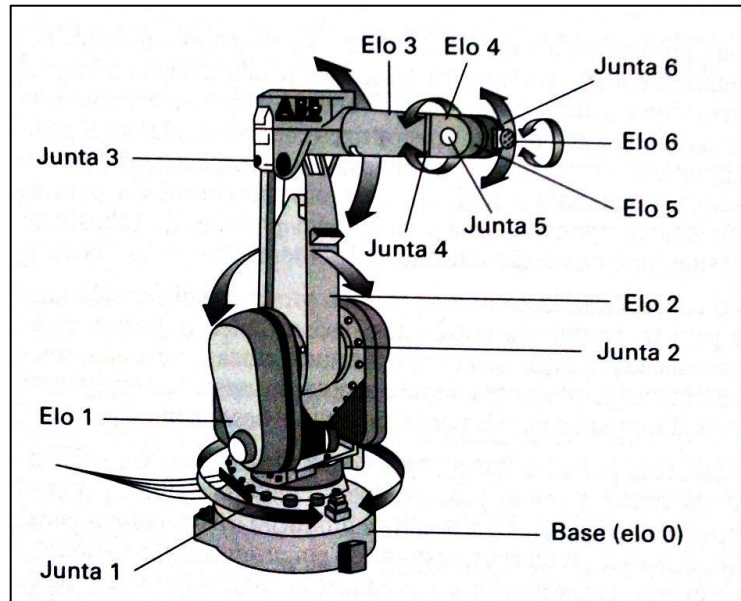
2.1.1 Componentes de um sistema robótico

Para Niku (2013), um sistema robótico é formado por vários elementos como, manipulador, atuador final, atuadores, sensores, controlador, processador e software.

- Manipulador: é a parte estrutural do robô, formada por elos e juntas;
- Atuador final: em geral é usado para manipular objetos. É a última articulação do robô;
- Atuadores: os atuadores podem ser comparados com “músculos” e são responsáveis pela movimentação dos elos. Pode-se citar como exemplo atuadores elétricos, hidráulicos e pneumáticos;
- Sensores: os sensores são responsáveis por registrar as condições internas do robô, como também seu posicionamento no ambiente de trabalho.
- Controlador: o controlador é responsável por monitorar os movimentos do robô através de dados de um computador. Controla os atuadores, e os movimentos conforme dados dos sensores;
- Processador: comparado com o cérebro humano, o processador analisa quais os movimentos necessários para a atividade do robô e então calcula qual a velocidade e aceleração de movimentação das articulações para que o robô se mova até o destino programado;
- Software: responsável por operar o processador e em outros casos auxilia na montagem e manuseio do equipamento.

Na Figura 1 pode-se observar um robô industrial, com a estrutura detalhada. O mesmo consiste em elementos estruturais (elos), e juntas que podem ser denominadas de articulações, e são responsáveis pela ligação dos elos (ROMANO, 2002).

Figura 1 - Robô industrial.



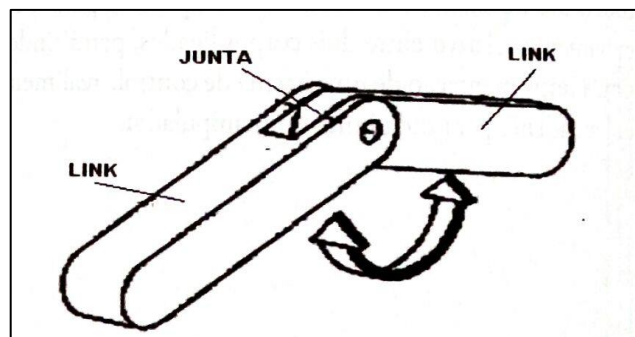
Fonte: Romano (2002).

Um robô manipulador possui geralmente uma base fixa e o primeiro elo ou ligamento está fixo a esta base. Dessa forma, a quantidade de movimentos que o robô realiza depende do número de elos e juntas que o mesmo possui (NIKU, 2013).

2.1.2 Tipos de articulações

O braço do robô é constituído de juntas e elos (Link), como mostrado na Figura 2, onde a junta interliga dois elos, permitindo assim realizar os movimentos do robô (ROSÁRIO, 2010).

Figura 2 - Conexão entre a junta e os elos

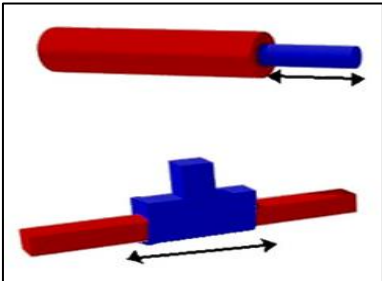
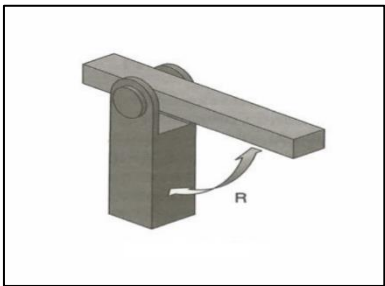
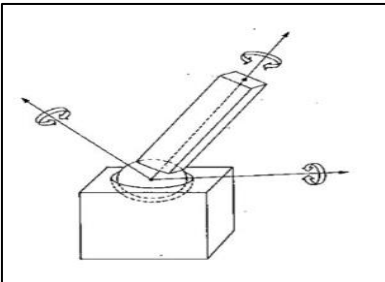


Fonte: Rosário (2010).

As juntas, permitem que o robô execute tarefas variadas, o qual está relacionado diretamente com graus de liberdade. Por grau de liberdade (GDL) se

entende os movimentos independentes que o robô consegue realizar (NIKU, 2013). O robô ilustrado na Figura 1 representa um manipulador com 6 GDL. Por sua vez, os movimentos das juntas podem ser classificados em prismáticos, rotativos ou esféricos, descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das juntas

Tipos de Juntas	Imagem	Definição
Prismáticas		<p>Composto por dois elementos alinhados, onde o movimento entre os vínculos é linear.</p>
Rotativas		<p>Os dois vínculos são unidos por uma dobradiça, permitindo o movimento de rotação entre os elos.</p>
Esféricas		<p>De forma a reproduzir o movimento do pulso humano, as juntas esféricas permitem movimentação nos três eixos. Por possuir vários graus de liberdade se torna difícil o seu controle.</p>

Fonte: Adaptado de Rosário (2010), Niku (2013).

2.1.3 Graus de Liberdade

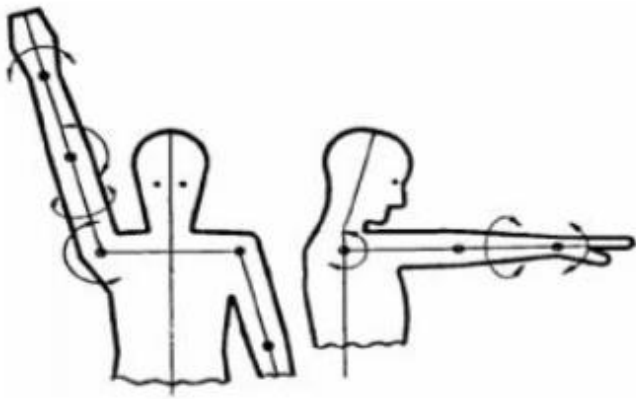
Para poder localizar um ponto no espaço é necessário identificar três coordenadas afim de saber exatamente onde o ponto se encontra, da mesma forma se compararmos com um robô com três GDL, pode ser posicionado em qualquer lugar do espaço de trabalho. Porém para que um robô possa manipular um objeto, precisa-se definir a sua localização, mas também sua orientação no espaço, com isso se faz necessário definir, no mínimo, seis informações para que o robô possa manipular esse objeto como desejado. Portanto para que o robô possa mover livremente um determinado objeto é necessário que este possua seis graus de liberdade (NIKU, 2013).

O número de juntas está geralmente associado à quantidade de graus de liberdade. Porém, como mencionado anteriormente, os graus de liberdade são os movimentos independentes que o robô pode realizar. Segundo Rosário (2010), o robô industrial usualmente tem entre 4 e 6 GDL.

Já o braço humano possui três articulações como mostra a Figura 3: o ombro, cotovelo e pulso e, ao todo, o braço tem 7 graus de liberdade. Isto porque o ombro pode realizar movimentos em três eixos, assim como o pulso, e o cotovelo apenas contém um grau de liberdade, permitindo o movimento de flexionar e estender.

Figura 3 - Graus de liberdade do braço humano

JUNTA	TIPO	GRAUS DE LIBERDADE (GDL)
Ombro	Esférica	3
Cotovelo	Rotacional	1
Pulso	Esférica	3

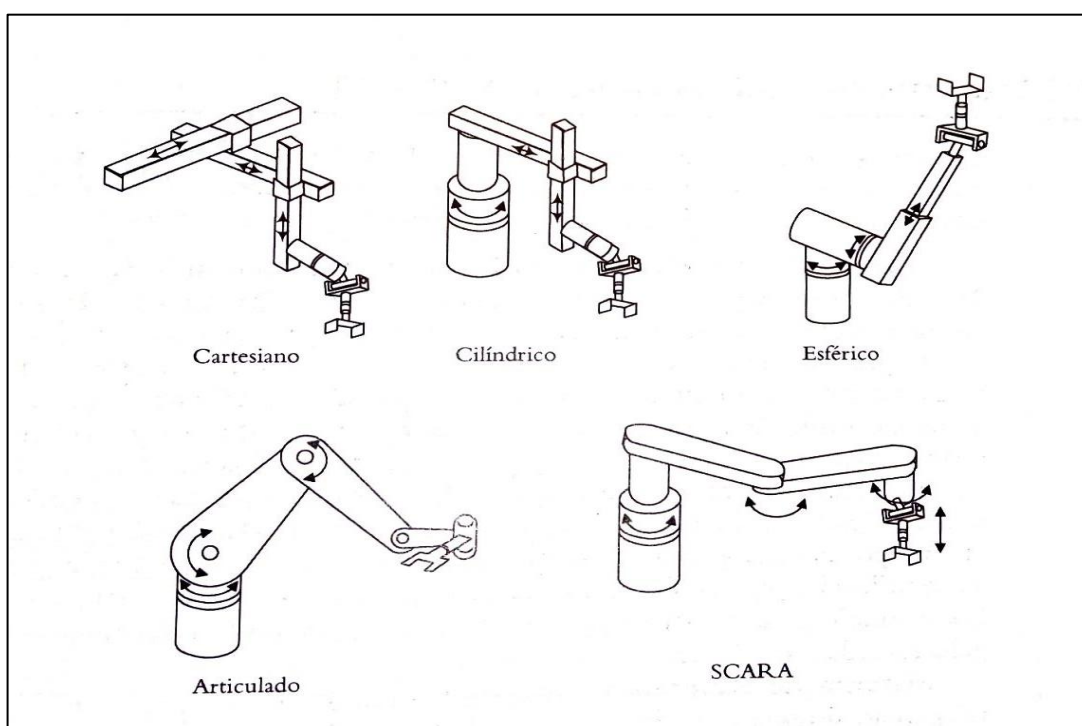


Fonte: Adaptado de Brasil, (2005).

2.1.4 Geometria do robô

Segundo Rosário (2010), há várias maneiras de classificar os robôs levando em conta alguns critérios, dentre eles a geometria do robô. Combinações entre elos e juntas geram configurações diferentes entre os robôs, que geralmente são definidas como: coordenadas cartesianas, cilíndricas, esféricas, articulado vertical e o SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Exemplos de geometrias dos robôs industriais



Fonte: Adaptado de Niku (2013).

Esse tipo de classificação se dá por uma sequência de três letras com base nos tipos de juntas do robô, sendo juntas de rotação ou revolução denominado pela letra R e as juntas prismáticas pela letra P, começando pela junta mais próxima da base. Por exemplo, um robô com 3 articulações prismáticas e 3 rotacionais é denominado por 3P3R (ROSÁRIO, 2010).

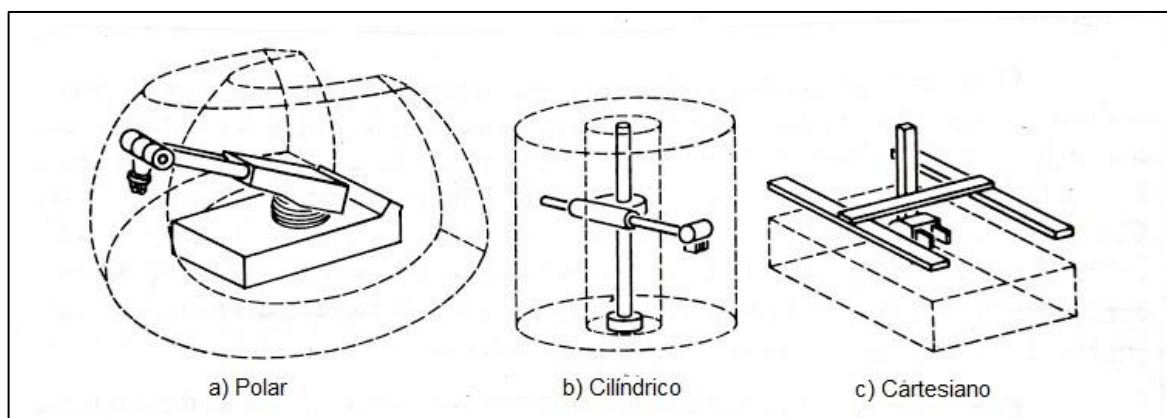
- Robô de coordenadas cartesiana: são compostos por três articulações deslizantes (3P). Permite somente movimentos lineares, horizontais e verticais.

- Robô de coordenada cilíndrica: constituído por uma junta de revolução e duas deslizantes (RPP), capaz de combinar movimentos lineares e rotacionais, podendo alcançar uma área de trabalho maior do que os de coordenada cartesiana.
- Robô de coordenada esférica: possui duas juntas de revolução e uma prismática (P2R), seu controle é mais complicado devido as juntas de rotação e às características dinâmicas desse robô.
- Robô articulado: possui movimentos e juntas comparados com o braço humano. Em particular, possui três juntas de rotação (3R) e sua área de trabalho é maior comparado com os outros sistemas, porém seu controle apresenta maior complexidade.
- SCARA: muito usado para operações de montagem. O robô SCARA tem duas juntas de revolução e uma prismática (RRP). Usualmente é situada mais uma articulação rotativa na extremidade.

2.1.5 Volume de trabalho

Segundo Niku (2013), o espaço de trabalho de um robô é descrito como sendo o volume (ou área) em que o robô pode manipular seu efetuator final. Esse espaço depende da configuração do robô do tamanho de seus componentes e os limites das articulações. Para melhor entendimento a Figura 5 ilustra, em linhas tracejadas, o volume de trabalho de três manipuladores com diferentes de configurações cinemáticas.

Figura 5 - Volume de trabalho em diferentes anatomias



Fonte: Adaptado de Groover et al. (1988).

Para seleção de um robô, é crucial realizar um estudo que determina os movimentos necessários que o mesmo deve realizar conforme aplicação desejada, conhecendo assim seu espaço de trabalho, para que o robô alcance todos os pontos desejados.

2.2 CINEMÁTICA

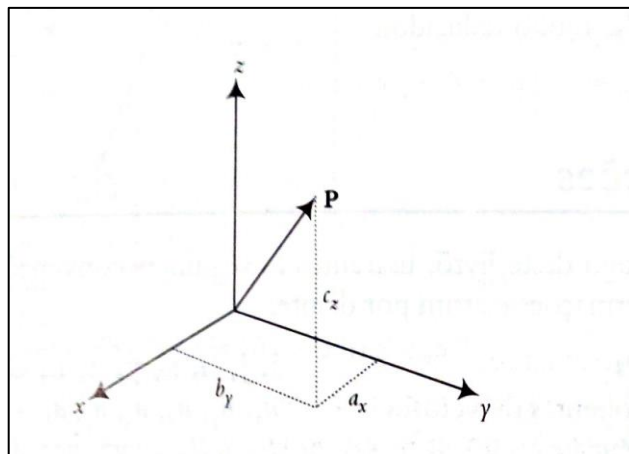
Um manipulador tem como objetivo posicionar e orientar o efetuador final fixado em sua extremidade, onde o tipo do efetuador depende do trabalho desejado, como uma garra por exemplo. A cinemática pode ser definida como o estudo dos movimentos do manipulador, afim de controlar a posição e trajetória da extremidade do robô, usando técnicas matemáticas para análise de posição (GROOVER,1988). Dessa forma, o modelo cinemático considera apenas a posição, a velocidade, a aceleração e suas derivadas (NIKU, 2013).

Os robôs funcionam como mecanismos de malha aberta e por isso é necessário fazer uma medição continua dos parâmetros de articulação e elos, para que a extremidade do robô e sua posição cinemática possam ser conhecidas (NIKU,2013).

A representação de um vetor no espaço que inicia na origem até um ponto P , como mostra a Figura 6, pode ser definido pela equação (1) como:

$$\mathbf{P} = a_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + c_z \mathbf{k} \quad (1)$$

Figura 6 - Representação de um vetor no espaço



Fonte: Niku, (2013).

No entanto para representar os elementos cinemáticos do robô, escreve-se as componentes do vetor em forma matricial, como na Equação 2:

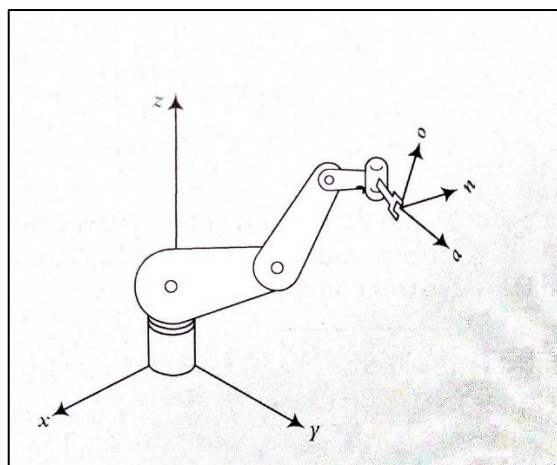
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_x \\ b_y \\ c_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Adiciona-se ainda um vetor de escala w como na equação 3, onde P_x , P_y e P_z divididos por w são transformados em a_x , b_y e c_z . Se w for maior ou menor que 1 então o tamanho do vetor varia, porém se w for igual à 1 as componentes do vetor permanecem a mesma.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

Um robô manipulador pode conter várias juntas, então, se faz necessário representar mais de um sistema de coordenadas, por exemplo, para um referencial fixo, e outro na extremidade a ser analisada. Niku (2013), define que para o referencial fixo $F_{x,y,z}$ usa-se os eixos x, y e z , e outro conjunto de referência n, o e a para representar o referencial móvel $F_{n,o,a}$, ilustrado na Figura 7 (NIKU, 2013). As letras n, o e a referem-se as palavras normal, orientação e abordagem.

Figura 7 - Eixos de representação

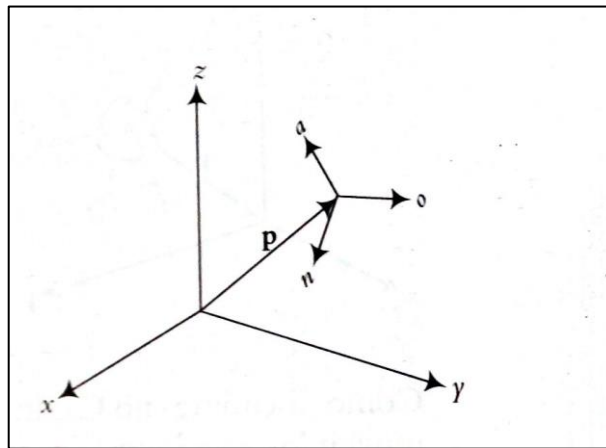


Fonte: Niku, (2013).

Em um manipulador pode haver diversos tipos de graus de liberdade, onde há necessidade de cada um possuir um sistema de referência em relação ao sistema de referência fixo. Para descrever de forma matricial esta relação, Figura 8, o sistema de referência é dado por um vetor que liga a origem da referência até a origem do referencial (ROSÁRIO, 2005; NIKU, 2013). Portanto a representação matricial se dá pela equação (4):

$$F = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Figura 8 - Representação de um referencial em relação a origem



Fonte: Niku, (2013).

Nota-se que o ultimo vetor, vetor de escala w tem valor igual a 1, e representa a localização do ponto P em relação ao sistema de referência fixo.

2.2.1 Matriz de transformação

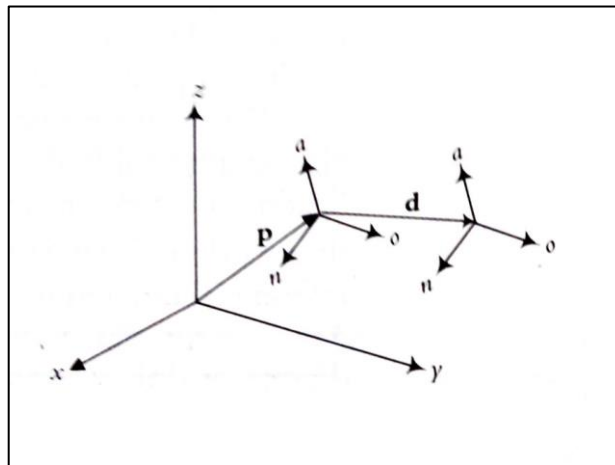
Uma transformação ocorre quando há movimento de um referencial no espaço em relação ao eixo fixo. Rosário (2010), explica que a posição e orientação do efetuador final em relação ao eixo fixo, pode ser expresso por uma matriz que relaciona as coordenadas de ambos sistemas de referência chamada matriz de transformação.

Segundo Niku (2013), as transformações podem ser das formas a seguir: translação pura, rotação pura em torno do eixo fixo e a combinação entre eles.

Em uma transação pura, o referencial do efetuador final do robô não altera, o que muda é a localização da origem do referencial em relação a referência fixa x, y e z como na Figura 9, de forma que a localização final pode ser encontrada com a adição da mudança de posição, dando origem a matriz de transformação T :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

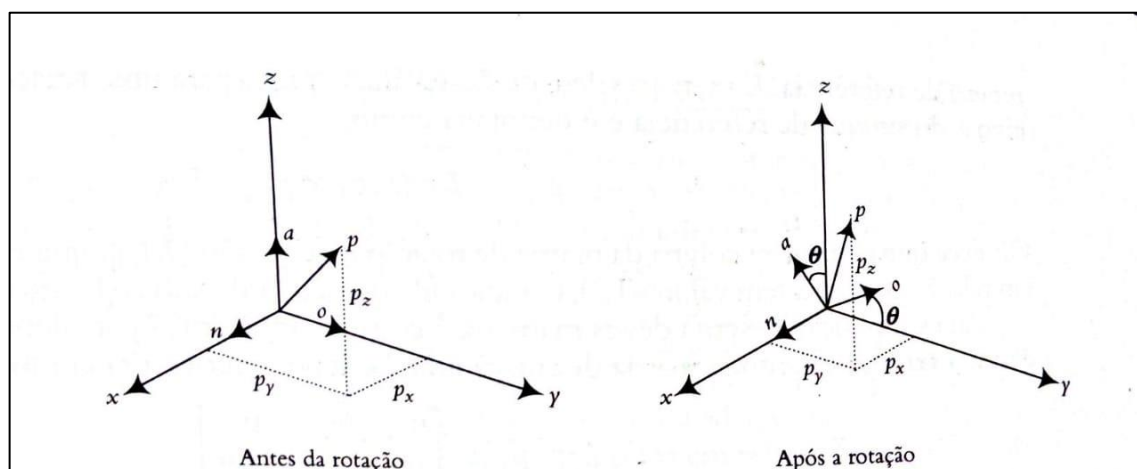
Figura 9 - Translação Pura



Fonte: Niku, (2013).

Para as rotações, além da movimentação em relação ao referencial fixo, também existe a mudança no referencial móvel $F_{n,o,a}$. Isso requer um cálculo mais demorado para cada eixo de rotação x, y e z , levando em conta os ângulos de deslocamento, como visto na Figura 10.

Figura 10 - Coordenadas referente a uma rotação



Fonte: Niku, (2013).

2.2.2 Cinemática direta

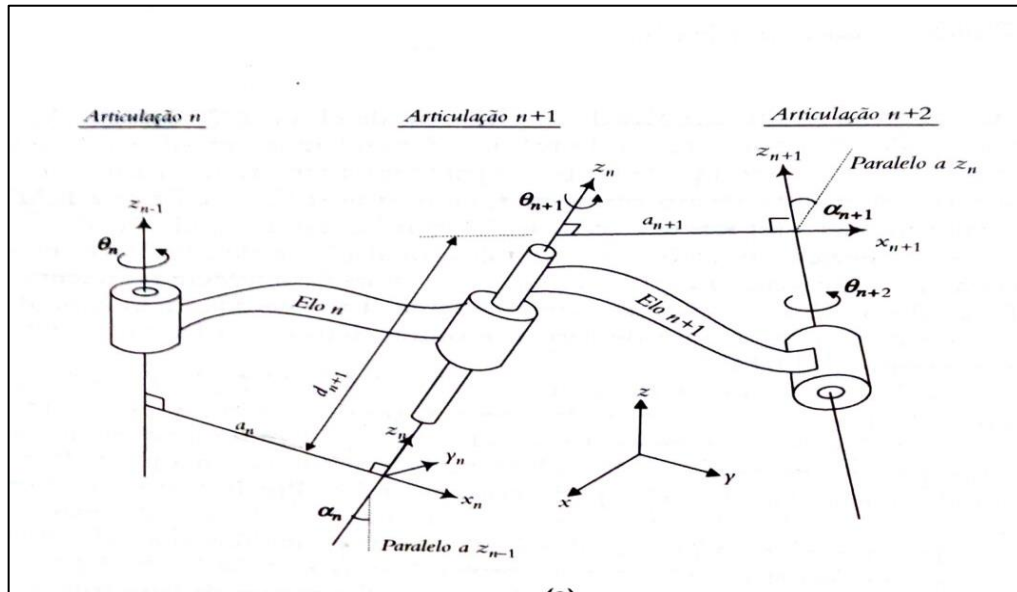
Niku (2013), explica que a análise de cinemática direta ocorre quando a configuração do robô é conhecida, juntamente com os comprimentos de elos e ângulos entre eles, ou seja, cada variável articulada do robô é conhecida.

Com isso, a posição do efetuador final, pode ser descrito através do produto das transformações de cada junta do manipulador, onde esse produto é referente as combinações de rotação e translação do sistema. Portanto, na cinemática direta, deve-se resolver um conjunto de equações que são relacionados com o tipo de robô, assim, substituindo as variáveis conhecidas nas equações, pode-se calcular a posição e orientação do manipulador (GROOVER, 1988; NIKU, 2013).

Porém há uma forma de calcular e modelar os elos e articulações através da representação de Denavit-Hartenberg. Esse modelo pode ser usado para qualquer configuração de robô e combinações de juntas e elos. Esse método consiste em combinar as articulações, começando da base com a primeira, e depois sucessivamente até a última articulação, e no final obter uma matriz de transformação total do robô (NIKU, 2013).

A Figura 11, mostra dois elos e três articulações, onde podem girar como transladar, atribuindo um valor de n para a primeira articulação, então $n + 1$ para segunda e $n + 2$ para a terceira articulação, a mesma notação será usada para os elos, começando em n e assim sucessivamente.

Figura 11 - Representação de Denavit-Hartenberg



Fonte: Niku, (2010).

Cada articulação recebe um sistema de referência, então para cada uma seguinte deve-se atribuir os eixos x e z conforme a descrição abaixo e o eixo y e pode ser definido pelo sistema de coordenada global (NIKU, 2013; ROSÁRIO, 2010).

- Para representar o eixo z em cada articulação, tem-se a seguinte regra: se a articulação for uma rotação, então o eixo z está na direção da rotação e se for prismático o eixo está na direção do movimento. Em cada articulação, leva-se em consideração a articulação anterior;

- O eixo x é a normal entre o eixo z e $z - 1$, se os eixos z e $z - 1$ se interceptarem o eixo x pode ser colocando ao longo de uma linha perpendicular ao plano formado pelos dois eixos.

Além disso, deve-se obter os parâmetros d , a , α e θ . Onde:

- d_n : é a distância da origem do referencial $n - 1$ até à intersecção de $z_n - 1$ com x_n seguindo $z_n - 1$. É variável se a junta n é prismática.;

- a_n : é a distância desde a intersecção de $z_n - 1$ com x_n , à origem do referencial n , seguindo x_n ;

- α_n : é o ângulo entre $z_n - 1$ e z_n , seguindo x_n ;

- θ_n : é o ângulo entre $x_n - 1$ e x_n seguindo $z_n - 1$. É variável se n é rotativa.

Deve-se colocar as referências em todas as articulações seguindo as regras citadas acima, sendo assim, cada junta gera uma matriz homogenia da sua movimentação, essa matriz pode ser visualizada na Equação 6, onde n é referente a junta analisada. (NIKU, 2013).

$$A_n = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A transformação total entre a base e o manipulador final, se dá a partir da equação 7, em que o resultado é a multiplicação de cada matriz de transformação A_n , e o resultado apresenta a posição do elemento terminal do robô em relação a base (NIKU, 2013).

$$T_H^R = T_1^R T_2^1 T_3^2 \dots T_n^{n-1} = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \quad (7)$$

2.2.3 Cinemática inversa

Para Niku (2013), a cinemática inversa consiste em conhecer os comprimentos de elos e ângulos das articulações, para que se possa colocar a “mão” do robô no local desejado, portanto, ao contrário da cinemática direta onde são substituídos os valores conhecidos do robô nas equações, deve-se encontrar o inverso dessas equações para descobrir as variáveis das juntas em relação a sua posição e orientação.

Na Cinemática inversa existem vários ângulos em conjuntos com as equações, o que fica difícil de se resolver cada ângulo individualmente. Para isso deve-se multiplicar a Equação 7 por uma matriz individual A_n^{-1} , o que permite encontrar os senos e cossenos dos ângulos envolvidos.

Em uma matriz T , sua inversa é denominada de T^{-1} , visto na Equação 8.

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & -p * n \\ n_y & o_y & a_y & -p * o \\ n_z & o_z & a_z & -p * a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em que $p * n$, $p * o$ e $p * a$ são produtos internos de vetores referentes a n, o, a e p . No entanto há outras maneiras de se resolver o problema de cinemática inversa que não são citados neste trabalho, isso cabe ao projetista a decidir dependendo do tipo de manipulador.

2.3 MEDICINA DE REABILITAÇÃO

Através de uma pesquisa realizada no Centro de Reabilitação Municipal de Uberlândia-MG, de janeiro a julho de 2005, puderam avaliar os principais fatores que levam as pessoas ao centro de reabilitação. A pesquisa levou em conta pessoas com lesões por causas externas, como: acidentes de trabalho, acidente de trânsito, agressões, quedas, acidentes domésticos e outros. Foram analisados 285 pacientes, e chegaram à conclusão que a maioria das lesões foi causada por acidentes de trabalho, com predominância nas fraturas, conforme Tabela 1 (LEMOS; JORGE; RIBEIRO, 2013).

Tabela 1 - Tipo de agravo em pacientes vítimas de causas externas

Tipo de agravo	Diagnóstico clínico													
	Fratura		Entorse/ contusão		Luxação		Lesão tendão/ lig./ menisco		Lesão de nervo		Outros		Total N=285	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Acidentes de trabalho	13	7,1	1	2,6	-	-	6	17,1	1	8,3	6	60,0	27	9,5
Acidentes de trânsito	65	35,5	8	21,1	4	15,5	2	5,7	1	8,3	3	30,0	83	29,1
Agressões	2	1,1	1	2,6	-	-	2	5,7	-	-	-	-	5	1,8
Quedas	90	49,2	14	36,8	12	46,1	4	11,4	3	25,0	1	10,0	124	43,5
Acidentes domésticos	8	4,4	-	-	-	-	4	11,4	3	25,0	-	-	15	5,3
Outros	5	2,7	14	36,8	10	38,4	17	48,6	4	33,3	-	-	31	10,9
Total N=304*	183	100,0	38	100,0	26	100,0	35	100,0	12	100,0	10	100,0	285	100,0

Fonte: Lemos; Jorge; Ribeiro, (2013).

Além disso, se pode fazer o levantamento dos membros afetados, o qual os membros superiores foram os mais lesionados, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Membros afetados por causas externas

Segmento corporal acometido	N	%
Membros superiores		
Articulação radiocárpica/radioulnar	43	14,2
Articulação glenoumeral	24	7,9
Falanges da mão	27	7,9
Ossos do carpo	20	6,6
Articulação do cotovelo	18	5,9
Rádio	18	5,9
Úmero	9	3,0
Subtotal	156	51,4
Membros inferiores		
Articulação tibiofemoral	40	13,2
Articulação talocrural	38	12,6
Tíbia	18	6,0
Ossos do tarso	17	5,6
Fêmur	9	3,0
Fíbula	8	2,6
Falanges do pé	2	0,7
Calcâneo	1	0,3
Subtotal	133	44,0
Cabeça e tronco		
Coluna (cervical, torácica e lombar)	5	1,9
Escápula	3	1,0
Quadril	3	1,0
Crânio	2	0,7
Subtotal	13	4,6
Total*	302	100,0

Fonte: Lemos; Jorge; Ribeiro, (2013).

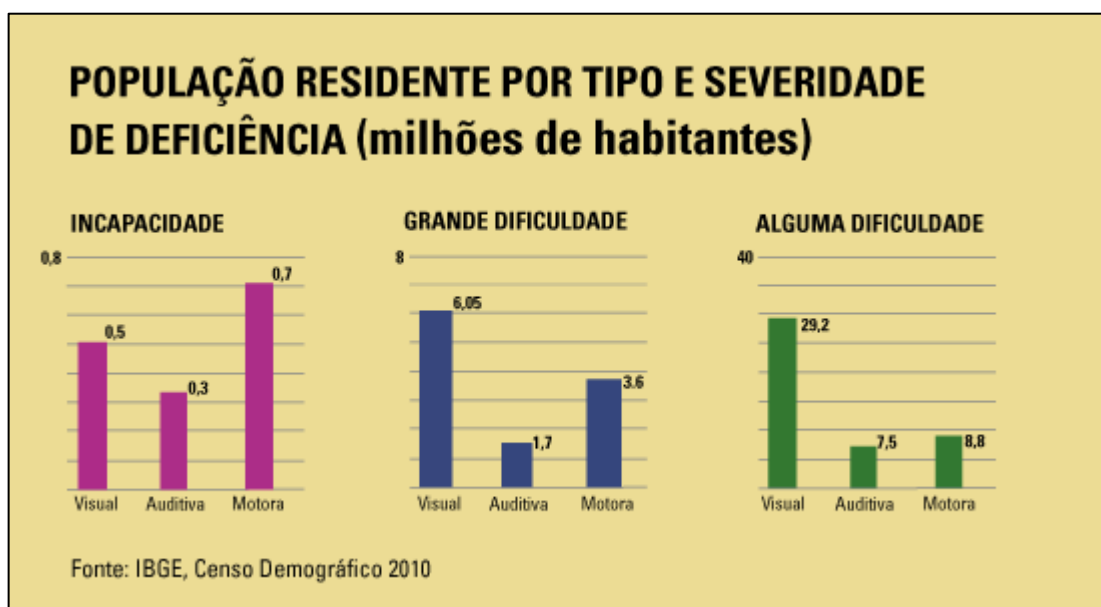
De acordo com o questionário respondido na entrevista de campo, Apêndice A, na Rede de Reabilitação Lucy Montoro, as principais causas que provocam incapacidades e limitações no dia a dia das pessoas, e que acarretam em consequências funcionais neurológicas são: AVC (Acidente Vascular Cerebral), Lesão Medular e Paralisia Cerebral, o que gera uma deficiência motora.

Segundo o Ministério da Saúde, o AVC é considerado uma das maiores causas de morte e incapacidade no mundo (SAÚDE, 2017). Pessoas que sobrevivem ao AVC, podem apresentar sequelas como incapacidade funcional, défices dos sentidos e

cognição e também dependência no dia a dia por afetar a função motora e paralisia dos músculos. Quando há perda de movimentos nos membros superiores e inferiores do corpo humano, é chamado de hemiparesia (GONÇALVES; SIQUEIRA, 2013).

Estatísticas sobre quantidade de pessoas que necessitam de reabilitação são quase inexistentes, contudo segundo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no último Censo Demográfico de 2010, cerca de 23,9 % da população brasileira portava algum tipo de deficiência entre deficiência visual, auditiva e motora. Na Figura 12 pode-se observar a distribuição entre as doenças e suas respectivas quantidades, (Censo Demográfico, 2010).

Figura 12 - População brasileira com tipos de incapacidades



Fonte: IBGE, Censo Demográfico (2010).

De acordo com o Comitê de Ajudas Técnicas (CAT), Tecnologia Assistiva é definida como:

[...] “é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social” (SARTORETTO; BERSCH, 2017).

Já o Instituto de Tecnologia de Medicina Física e Reabilitação Rede Lucy Montoro, define Reabilitação como:

[...] “processo inicial, integrado e interdisciplinar, desenvolvido por uma equipe multiprofissional e coordenado pelo médico fisiatra. Tem como objetivo atingir o potencial cognitivo e motor máximo do paciente, com o melhor nível de independência possível, além de orientar os cuidados mais adequados para sua condição de saúde” (MONTORO, 2018).

Portanto, pode-se diferenciar a Tecnologia Assistiva de Medicina de Reabilitação, tendo em vista que a TA pode ser entendida como um recurso do usuário, enquanto na reabilitação as tecnologia e equipamentos visam facilitar as atividades dos profissionais nas avaliações dos pacientes. Equipamentos que são usados na reabilitação de atividades específicas, com intuito de melhorar a força muscular, a amplitude dos movimentos e restauração motora do paciente (BERSCH, 2017).

Ainda que o processo de reabilitação integre diversos membros do corpo, este trabalho será endereçado apenas para reabilitação de membros superiores, que é o tema proposto.

2.3.1 Reabilitação de membros superiores com auxílio de robôs

Segundo Padovani et al. (2013), “estima-se que 45 a 75% dos adultos que sofreram um Acidente Vascular Encefálico (AVE) têm dificuldade de utilizar o membro superior (MS) hemiparético nas atividades de vida diária na fase crônica”.

Ainda que há diversas maneiras de tratamento e recuperação de membros superiores com a fisioterapia convencional, segundo questionário respondido no Anexo A, a implementação da tecnologia robótica para auxiliar na recuperação dos pacientes, tem sido cada vez mais utilizada na reabilitação, contribuindo não só com os pacientes mais principalmente com os profissionais da área, como os Terapeutas Ocupacionais (TO), auxiliando na avaliação dos pacientes e podendo identificar o local com maior perda de movimentos, para obter melhores ganhos e otimizar resultados.

É importante mencionar que os equipamentos são projetados para obter melhores resultados em menor tempo. Com isso, os robôs podem ser caracterizados pela amplitude de movimento que pode exercer sobre o paciente, como exercícios de movimento ativo, passivo, ativo-assistido e ativo-resistivo (KALLINE, 2014).

- Ativo: quando o paciente consegue realizar os movimentos com contrações muscular;
- Passivo: quando o paciente não consegue realizar o movimento, e então, o robô efetua o exercício afim de reabilitar os músculos;
- Ativo-assistido: o paciente realiza o movimento, porém com uma pequena ajuda do aparelho;
- Ativo-resistivo: realizado em exercícios de fortalecimento, quando o robô realiza uma força inversa ao movimento do paciente.

Entretanto, é valido lembrar que equipamentos como estes usados na reabilitação de pessoas, devem ser projetados com base nas movimentações dos membros em questão para garantir a segurança e conforto do paciente. Como o projeto visa a reabilitação de membros superiores, será tratado somente as movimentações de ombro, cotovelo e punho.

2.4 MOVIMENTO DOS MEMBROS SUPERIORES

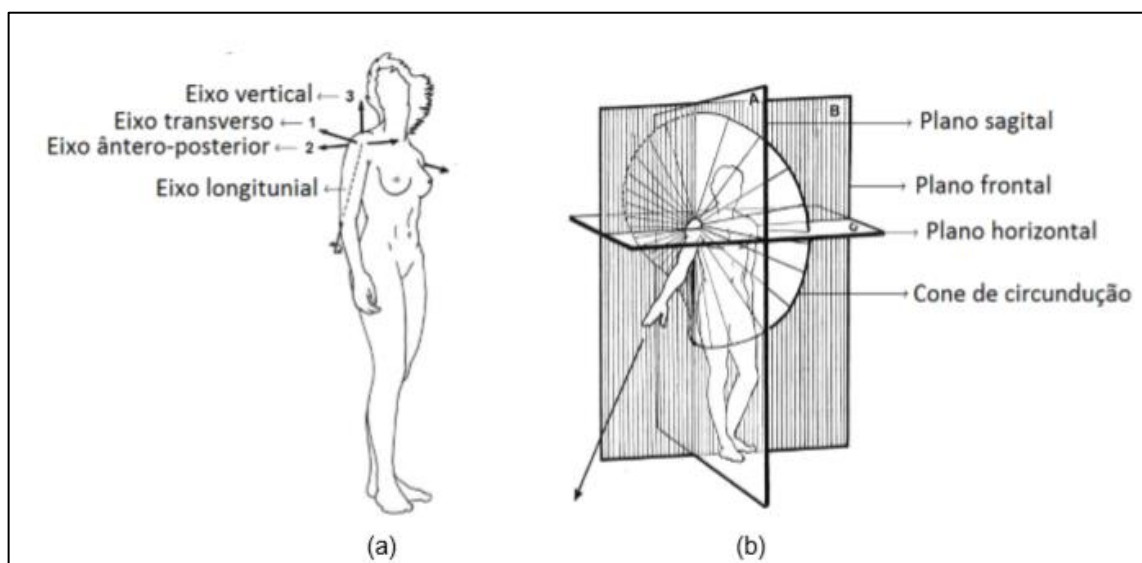
Esta parte do trabalho visa analisar e estudar os movimentos do braço humano, pois é indispensável esse critério para o desenvolvimento do projeto, já que este equipamento em primeiro lugar deve satisfazer confortavelmente o paciente, sem danificar suas articulações e movimentos que implicam no mesmo.

2.4.1 Ombro

O ombro é considerado a articulação mais complexa do corpo, permite movimentação nos três eixos, podendo ser comparado com uma articulação esférica.

Para se ter uma referência dos movimentos e ajudar no entendimento, a Figura 13, mostra os planos e eixos de referência do membro (NUNES, 2012).

Figura 13 - (a) representação dos eixos; (b) representação dos planos.



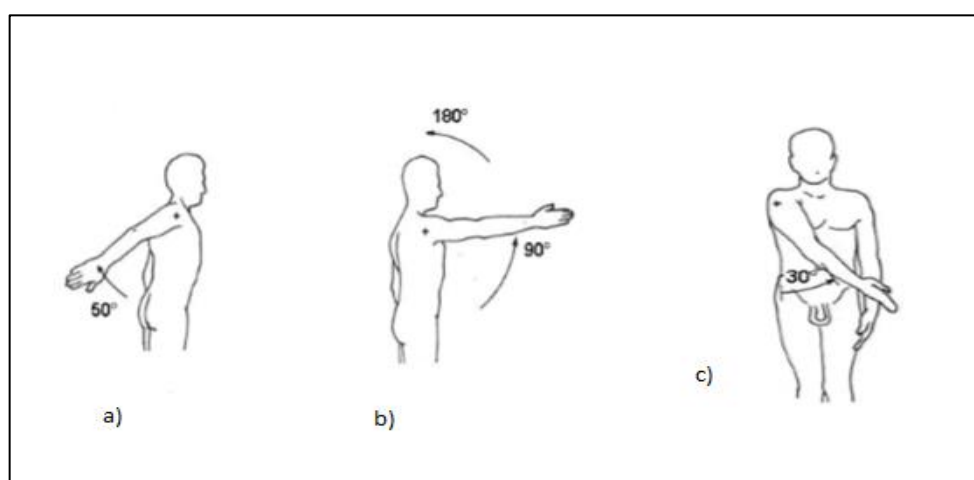
Fonte: Nunes, (2012).

2.4.1.1 Flexão-Extensão e adução

Permite deslocamento do braço em torno do eixo transverso com movimento no plano sagital. A amplitude de extensão do braço varia de 45° a 50° em relação a posição inicial, deslocando o braço para trás, Figura 14a.

Na flexão o braço se direciona para frente do corpo, podendo chegar a uma amplitude de 180° , como ilustrado na Figura 14b.

Figura 14 - (a) Extensão do membro; (b) Flexão do Membro; (c) adução.



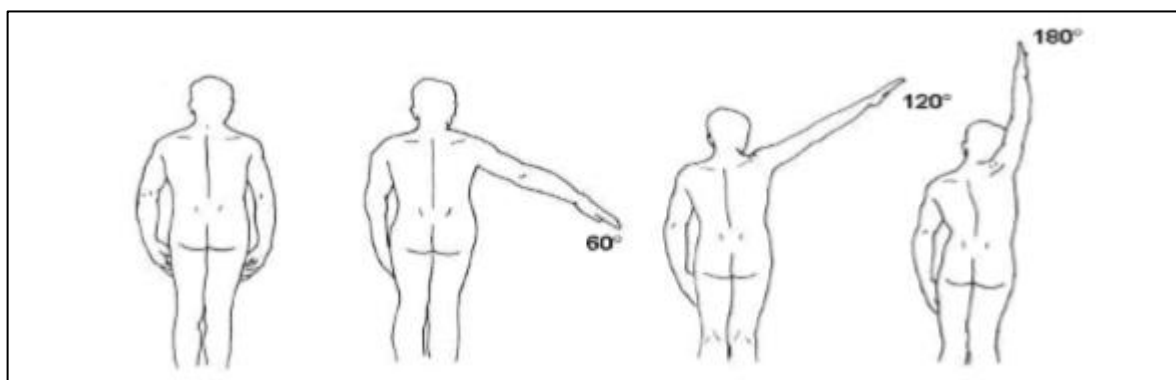
Fonte: Nunes, (2012).

A adução pode ser tratada como a aproximação do membro no plano de simetria do corpo. Sua amplitude na extensão está entre 30° a 45°, Figura 14c.

2.4.1.2 Abdução

O movimento ocorre no plano frontal em torno do eixo ântero-posterior, podendo chegar a uma amplitude de 180°, visto na Figura 15.

Figura 15 - Movimento de Abdução

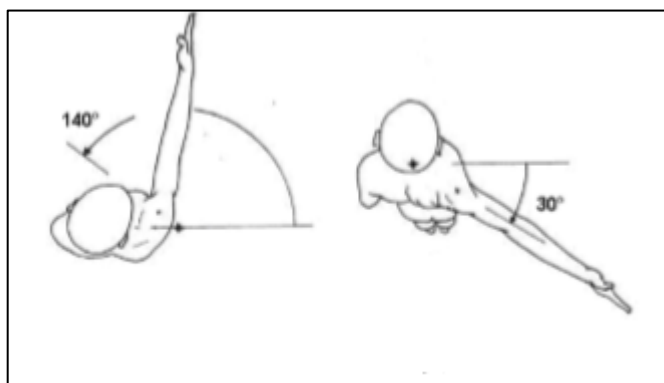


Fonte: Adaptado de Nunes, (2012).

2.4.1.3 Flexão e extensão horizontal

Os movimentos ocorrem no plano horizontal, tendo como orientação o eixo vertical. Quando o movimento é para frente do corpo, pode chegar a uma amplitude de 140°, e para trás entre 30° a 40°, Figura 16.

Figura 16 - Amplitude dos movimentos de flexão e extensão horizontal

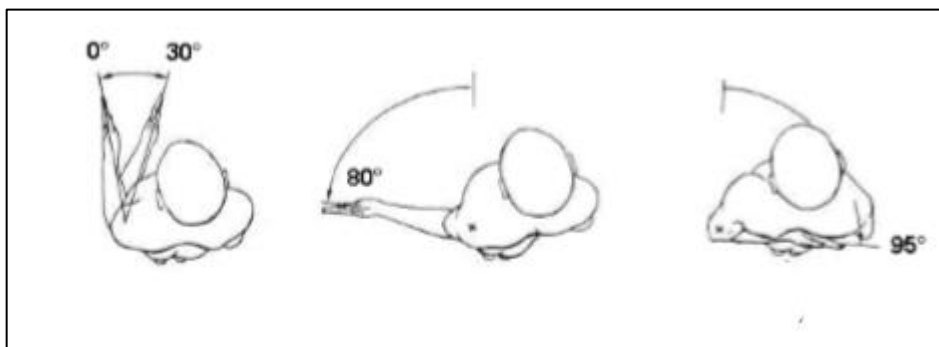


Fonte: Adaptado de Nunes, (2012).

2.4.1.4 Rotação no eixo longitudinal

Permite rotação em torno do eixo longitudinal. Com o cotovelo posicionado a 90° no plano sagital, o membro pode rotacionar para lateral chegando a uma amplitude de 80° e também uma rotação medial com amplitude de 95° , Figura 17.

Figura 17 - Amplitude de rotação no eixo longitudinal

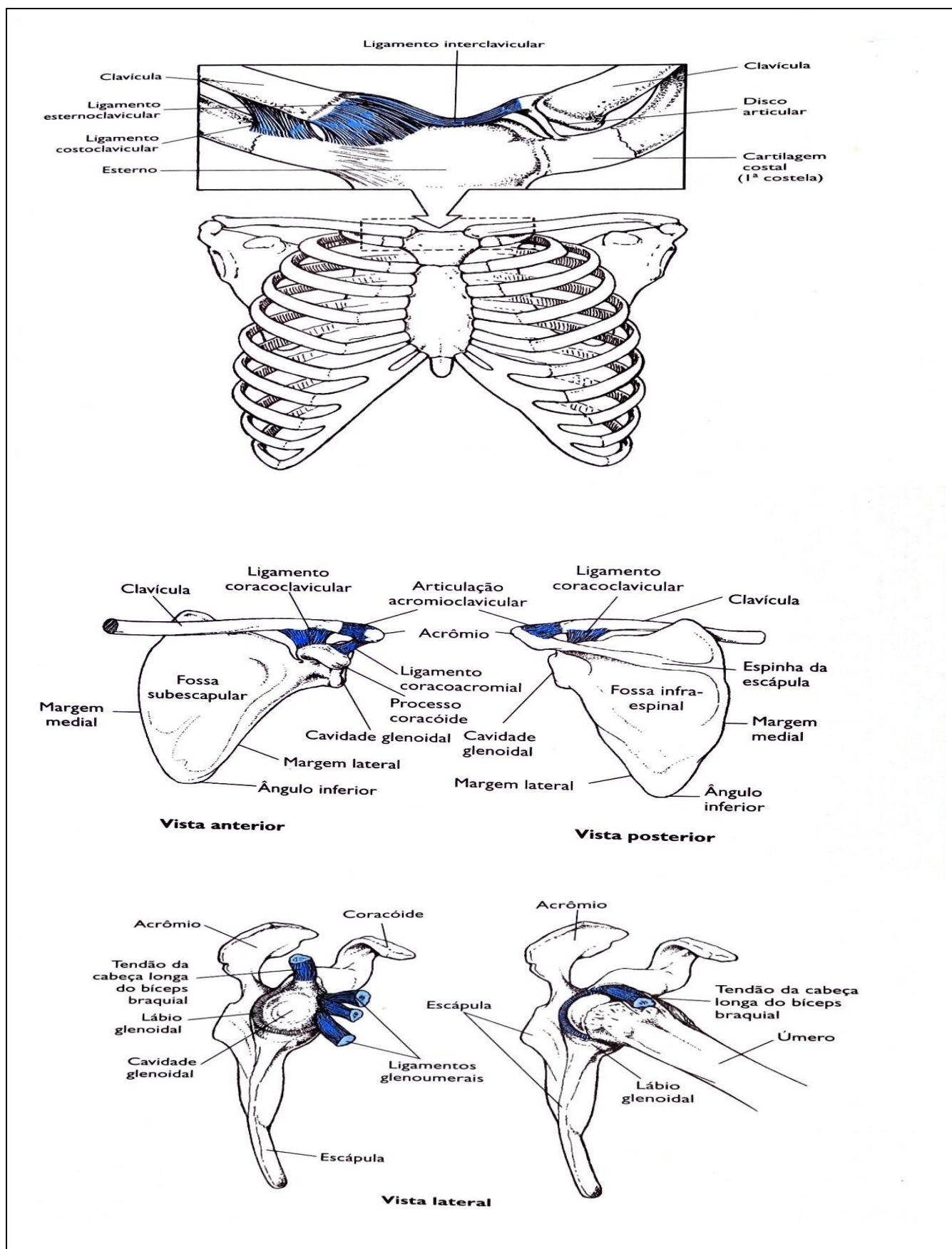


Fonte: Adaptado de Nunes, (2012).

As articulações responsáveis pelo movimento do ombro são nomeadas de: articulação glenoumeral, esternoclavicular, acromioclavicular, coracoclavicular e escapulotorácia (HALL, 2009).

- Articulação esternoclavicular: é uma articulação esferoide, no qual é permitido rotação em movimentos como elevar os braços (flexão ou abdução do ombro), (Figura 18a);
- Articulação acromioclavicular: localizada entre o acrômio da escápula e a região acromial, realiza um pequeno movimento de rotação com o levantar do braço (Figura 18b);
- Articulação coracoclavicular: permite poucos movimentos, e em alguns casos é considerado como parte da articulação acromioclavicular (Figura 18c);
- Articulação glenoumeral: apresenta o maior número de movimentos como, flexão, extensão, abdução, adução e rotação (Figura 18c);
- Articulação escapulotorácia: permite movimento tanto no plano sagital como no plano frontal em relação ao tronco, por exemplo, ao levantar uma mala do chão.

Figura 18 - Articulações do Ombro



Fonte: Adaptado de Hall (2009).

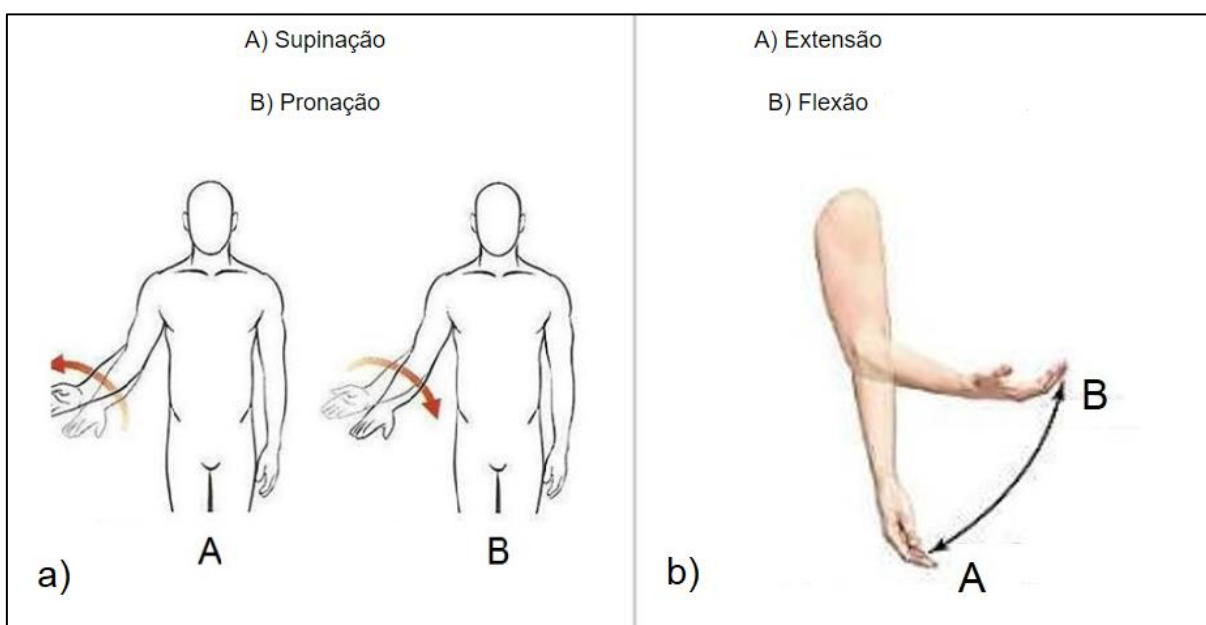
2.4.2 Cotovelo

O cotovelo possui dois graus de liberdade, possibilitando movimentos como; flexão e extensão, pronação e supinação (CANETA, 2016).

2.4.2.1 Pronação-Supinação e Flexão-extensão

Pronação e supinação é o movimento de rotação do cotovelo, deixando a palma da mão virada para cima ou para baixo, Figura 19a.

Figura 19 - Movimento de flexão e extensão do cotovelo



Fonte: Adaptado de Caneta (2016).

A flexão pode ser definida com a aproximação da mão ao ombro, e a extensão como movimento contrário, como mostrado na Figura 19b, com amplitude flexão máxima de 145°.

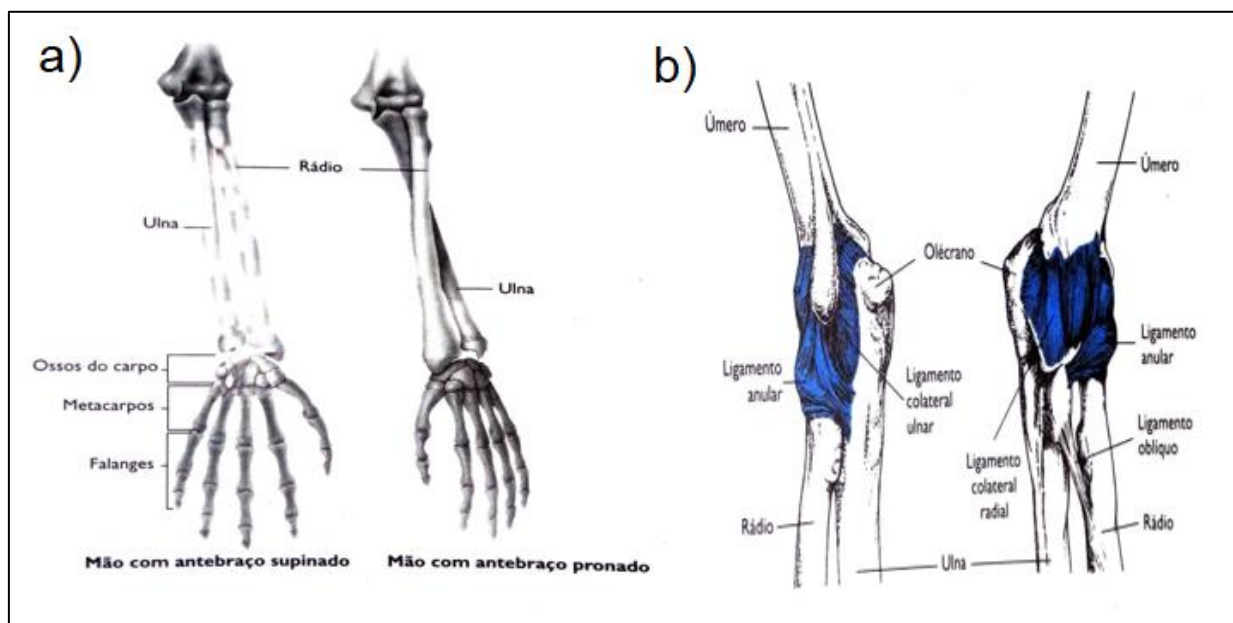
Já as articulações responsáveis pelos movimentos do cotovelo, de acordo com Hall (2009) são: Articulação umeroulnar, Articulação umerorradial e Articulação radioulnar proximal.

- Articulação umeroulnar: articulação tipo dobradiça, suas principais movimentações são flexão e extensão, (Figura 20b);

- Articulação umerorradial: localizada na lateral da umeroulnar, pode ser classificada como uma pequena articulação deslizante (Figura 20b);

Articulação radioulnar proximal: articulação do tipo pivô, localizada entre a cabeça do rádio e à incisura radial da ulna (Figura 20a).

Figura 20 - Articulações do cotovelo

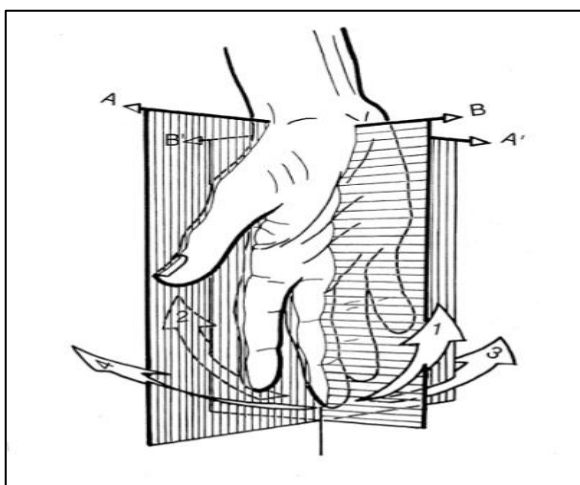


Fonte: Adaptado de Hall (2009).

2.4.3 Punho

O punho tem dois graus de liberdade e pode realizar movimentos nos planos sagital e frontal e também movimento de rotação (HALL, 2009). Para analisar os movimentos do punho é necessário definir algumas orientações como na Figura 21, onde o eixo AA' pertence ao plano frontal, o eixo BB' ao plano antero-posterior (KAPANDJI, 2000).

Figura 21 - Eixos de referência do punho

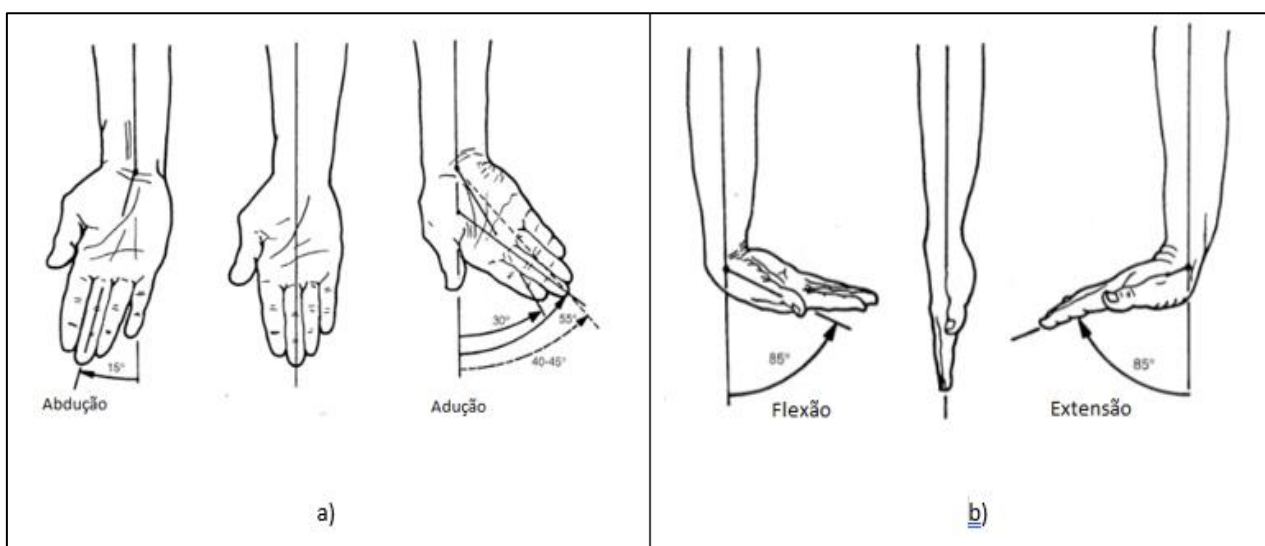


Fonte: Adaptado de Kapandji (2000).

2.4.3.1 Abdução-Adução e Flexão-Extensão

O Movimento de abdução e adução, Figura 22a, ocorre no eixo ântero-posterior no plano frontal. A abdução pode ser vista na, e tem limite de 15°. Já a amplitude de movimento da adução pode ser diferente dependendo do referencial como mostrado na Figura 22a, (KAPANDJI, 2000).

Figura 22 - Amplitude de movimento do punho



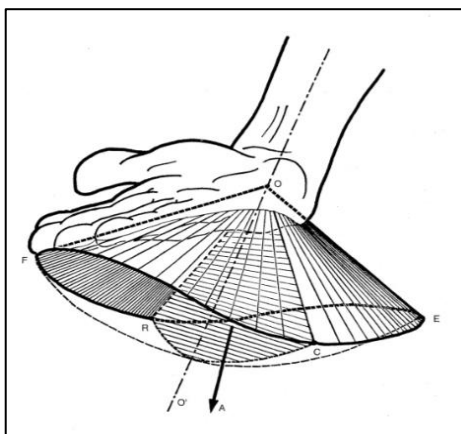
Fonte: Adaptado de Kapandji, (2000)

A flexão possui uma amplitude máxima de 85°, na extensão o movimento é o contrário e também tem amplitude máxima de 85°, Figura 22b.

2.4.3.2 Circundução

O movimento de circundução do punho, se dá através da combinação dos movimentos de Flexão-Extensão e Abdução-Adução. Esse movimento descreve uma superfície cônica no espaço como na Figura 23 (KAPANDJI, 2000).

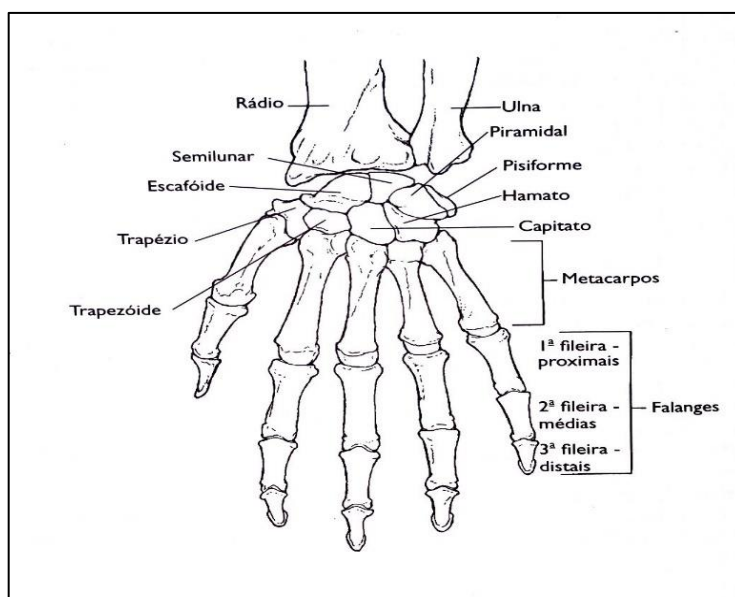
Figura 23 - Movimento de circundução do punho.



Fonte: Adaptado de Kapandji, (2000)

O Punho é composto pelas articulações radiocarpal e intercarpal. O maior movimento é dado pela articulação radiocarpal, como: flexão, extensão, hiperextensão, abdução e adução. As articulações ficam localizadas entre o Rádio e os primeiros ossos da mão, Figura 24 (HALL, 2009).

Figura 24 - Articulações do punho



Fonte: Hall, (2009).

2.5 PROJETOS SIMILARES PARA REABILITAÇÃO DE MEMBROS SUPERIORES

Neste capítulo são apresentados alguns modelos existentes no mercado, para a escolha do modelo a ser seguido no desenvolvimento do trabalho. Serão citados somente exemplos de equipamentos que interage um membro por vez, ou seja, equipamentos unilaterais.

2.5.1 InMotion

InMotion, Figura 25, foi desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology* – Instituto de Tecnologia de Massachusetts) é um equipamento que vem sendo cada vez mais utilizado na reabilitação assistida por robôs. Está entre o mais pesquisado para reabilitação neurológica de membros superiores, sendo capaz de permitir uma eficiente terapia sensório-motor exclusiva para cada paciente (BIONIK, 2018).

Figura 25 - InMotion 2



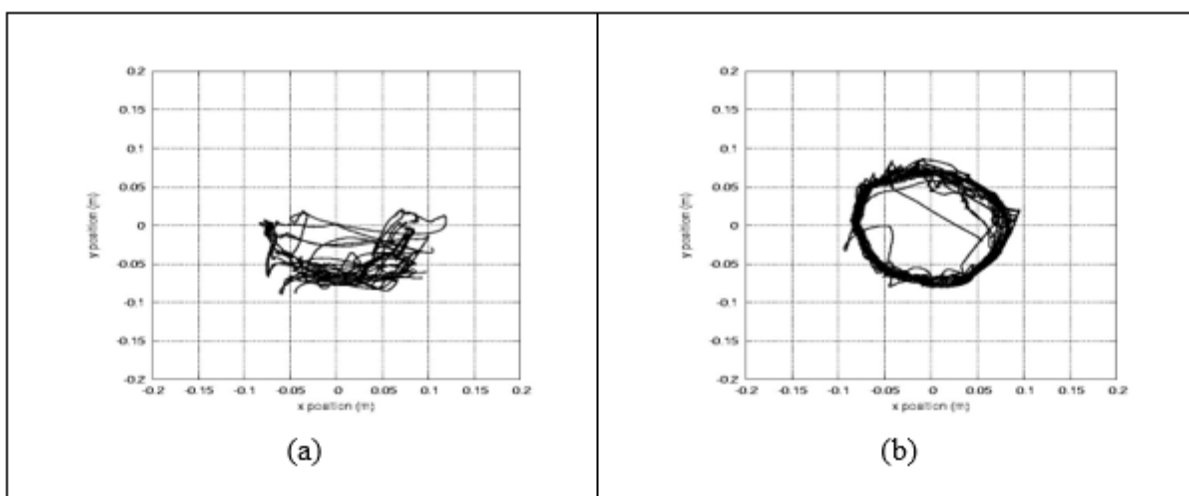
Fonte: Autor (2018).

O braço robótico conta com dois graus de liberdade, podendo fazer movimentos como: Abdução e adução do ombro, flexão e extensão do cotovelo e punho (Apêndice A, 2018). O InMotion permite de 400 a 1000 repetições por sessão, e tem foco na

melhora da amplitude dos movimentos, coordenação, força, velocidade de movimento e suavidade (BIONIK, 2018).

O robô conta com um software interativo, que permite que o médico personalize o tipo de tratamento mais adequado para cada paciente, os quais interagem com o software de modo a realizar os movimentos imposto pela máquina. O equipamento conta com exercícios de movimento passivo, ativo e ativo-resistivo, tendo como referência a pessoa. Com isso, o software gera um relatório ao final de cada sessão, permitindo que os profissionais consigam realizar uma melhor interpretação dos movimentos em estudo. A Figura 26, ilustra o gráfico de amostras circulares de um paciente com AVC na primeira sessão de tratamento e após seis semanas de terapia com o InMotion (BIONIK, 2018).

Figura 26 - Resultado gráfico de paciente com AVC: (a) primeira sessão; (b) seis semanas após a primeira sessão

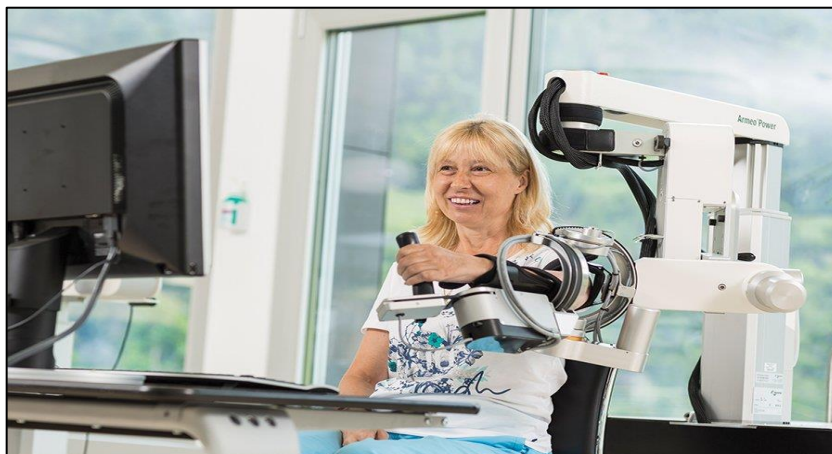


Fonte: Adaptado de Bionik (2018).

2.5.2 ArmeoPower

Sendo o primeiro exoesqueleto de braço robótico para terapia de braço e mão, o ArmeoPower, apresentado na Figura 27, foi desenvolvido para um estágio inicial de reabilitação, sendo capaz de realizar exercícios com grande quantidade de repetições. O robô, com auxílio de sensores, ajuda o paciente a realizar em um movimento, mesmo quando o mesmo não consegue executá-lo sozinho, sendo assim, conta com movimento ativo e passivo (HOCOMA, 2018).

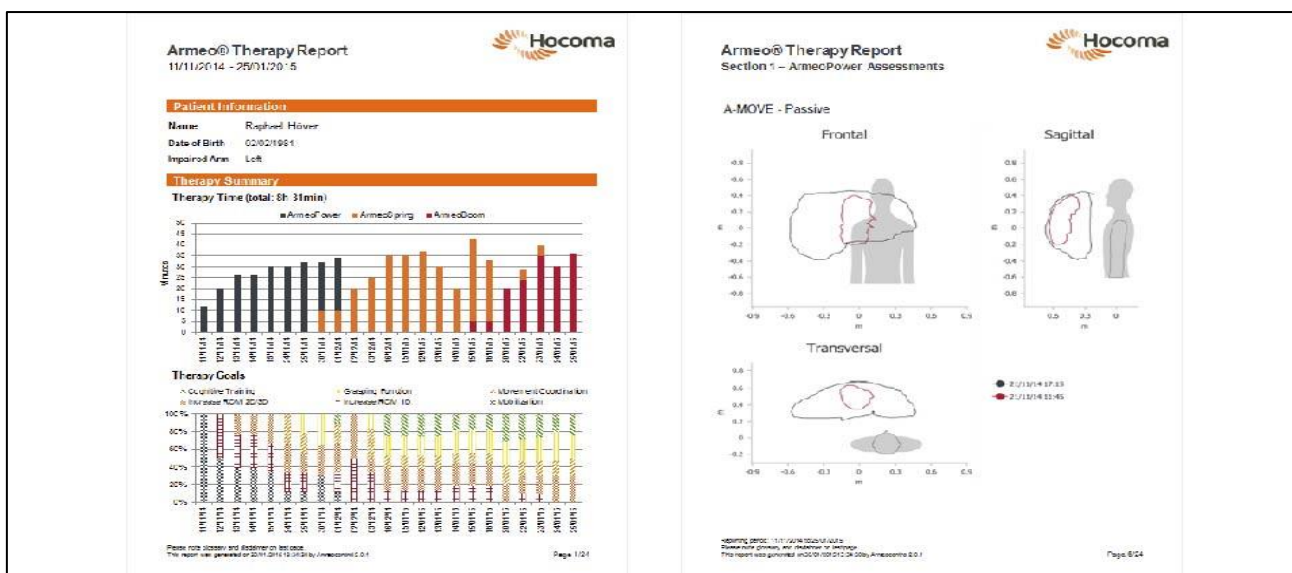
Figura 27 - ArmeoPower



Fonte: Hocoma (2018).

O equipamento possui um amplo espaço de trabalho, por possuir seis graus de liberdade, e vem integrado com software com uma grande quantidade de exercícios que interagem com o paciente durante a sessão de terapia. O software gera resultados gráficos, como ilustrado na Figura 28, para se ter melhor análise do comportamento dos membros, podendo assim avaliar o ganho da pessoa durante a terapia.

Figura 28 - Relatório final de cada sessão



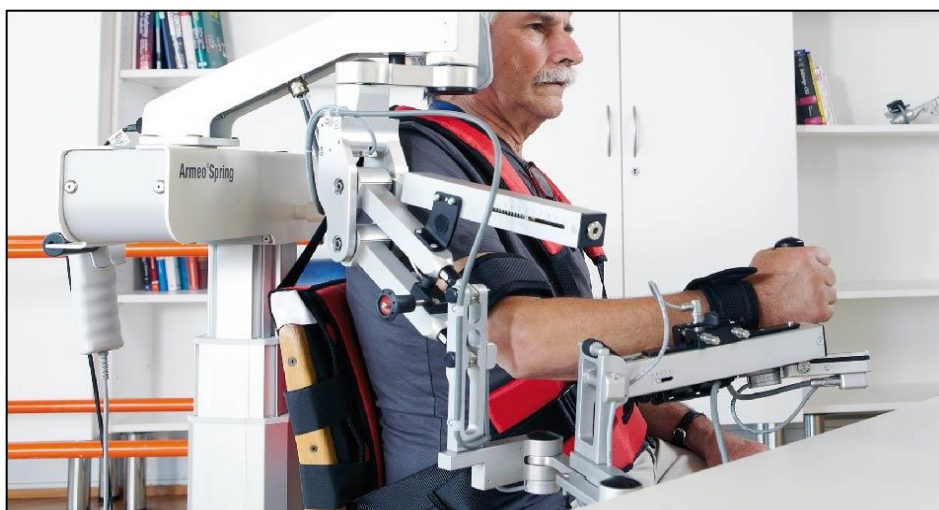
Fonte: Hocoma (2018).

2.5.3 ArmeoSpring

Desenvolvido para pacientes que já tenham funções motoras remanescentes que necessitam de aprimoramento para obter novos movimentos, o ArmeoSpring, apresentado na Figura 29, conta com uma interface voltada para jogos que estimulam os pacientes a desenvolver os movimentos do braço e punho. Conta com seis graus de liberdade e um amplo espaço de trabalho (HOCOMA, 2018).

Com exoesqueleto ajustável, suporta todo o peso do braço do paciente, e contém sensores de ângulos que, através de software, geram relatórios de ganhos.

Figura 29 - ArmeoSpring



Fonte: Hocoma (2018).

2.6 ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO

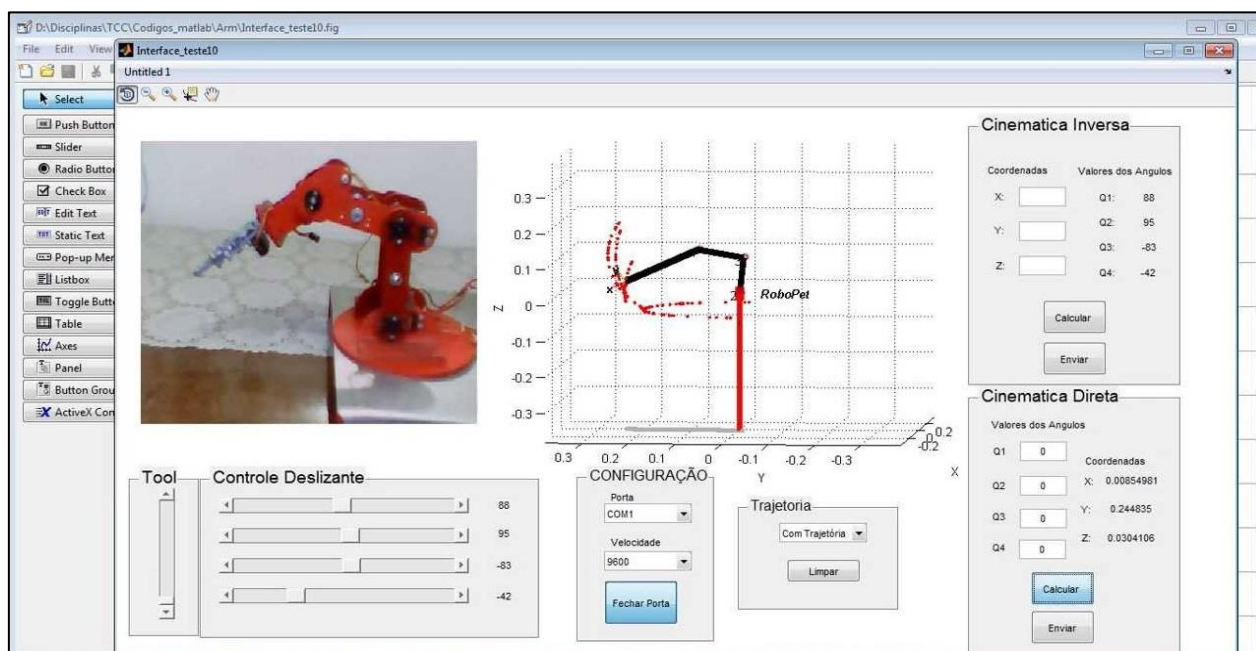
Há diversas formas para se fazer a análise de funcionamento e capacidade do robô e avaliar sua estrutura física. Um dos meios mais utilizados atualmente é com auxílio de softwares, que possibilita fazer testes e análises sem a necessidade de se ter fisicamente um modelo.

2.6.1 Modos de Programação

Niku (2013), deixa claro que existem vários modos de se programar um robô como: Configuração Física, Ensino, Acompanhamento Contínuo e Modo Software. A escolha para a programação depende do tipo e grau de sofisticação do robô.

Este projeto irá utilizar o Modo Software com auxílio da ferramenta MATLAB, visto na Figura 30. Este modo é considerado o mais sofisticado e são utilizados controladores para controlar os movimentos do robô (NIKU, 2013).

Figura 30 - Interface MATLAB



Fonte: Cinemática... (2013).

2.6.2 CAD

Softwares CAD (*Computer Aided Design* – Projeto Auxiliado por Computador), são utilizados para auxiliar na criação, modificação e otimização de projetos 3D, substituindo o processo manual para automatizado. Uma das grandes áreas de atuação são os processos de engenharia, auxiliando desde a criação do projeto até a montagem do produto, incluindo detalhamentos de peças, materiais utilizados, tolerância, seus efeitos físicos e químicos e capacidade de renderização e simulação do projeto com parâmetros realísticos. Uma das grandes vantagens dos softwares CAD, está na liberdade de visualização e suas representações gráficas (LEÃO, 2016).

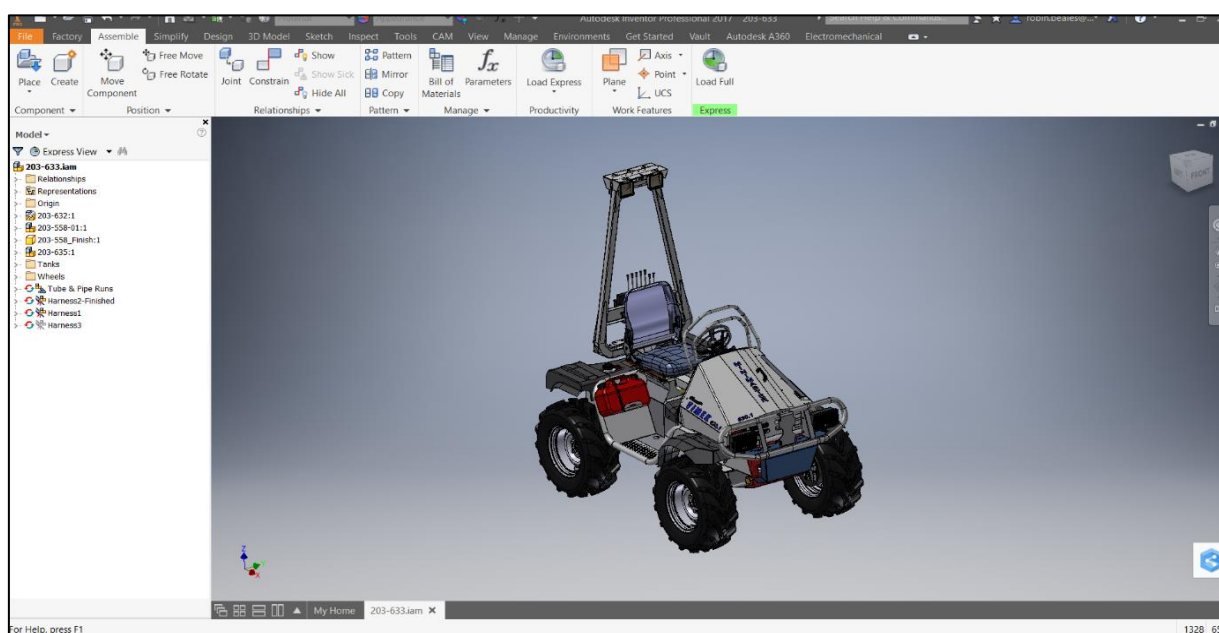
De acordo com Siemens (2018), alguns benefícios do CAD são:

- Acelerar o processo de design;
- Alcance de maior precisão, reduzindo os erros de projeto;

- Obter documentação mais rápido de lista de materiais, dimensões, entre outros;
- Maior produtividade, e qualidade.

Um exemplo de software CAD muito utilizado é o Autodesk Inventor (Figura 31), desenvolvido pela companhia Autodesk, é um software paramétrico que permite criar e modelar protótipos 3D.

Figura 31 - Interface Autodesk Inventor



Fonte: Machine (2018).

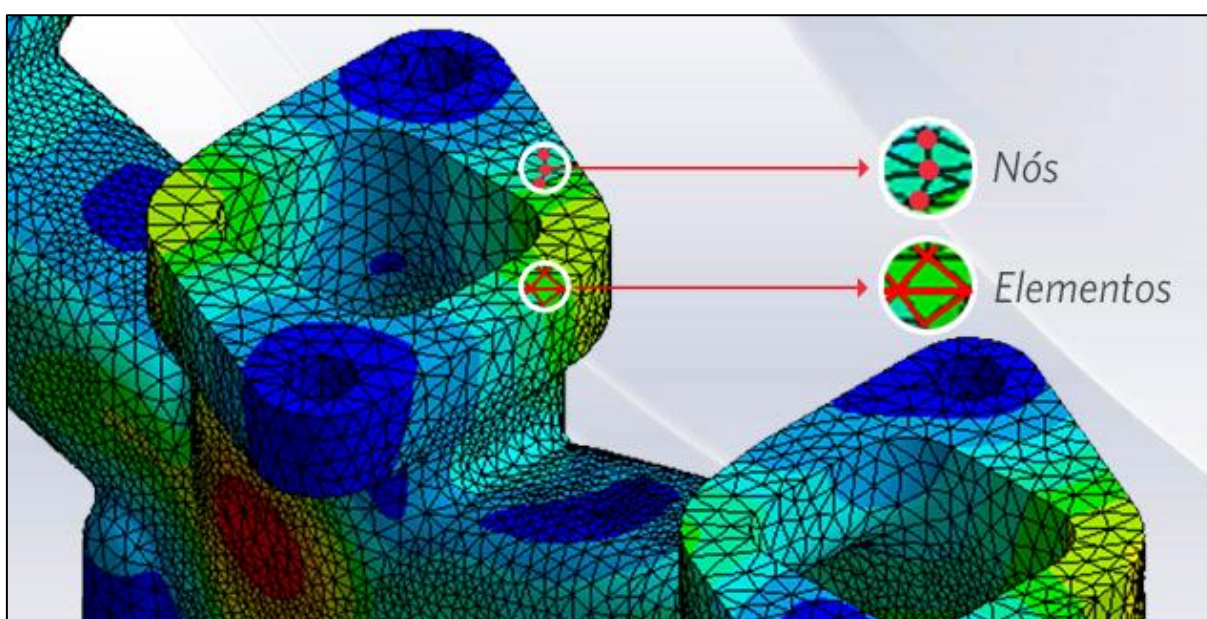
2.6.3 CAE

A ferramenta CAE (Computer Aided Engineering – Engenharia Auxiliada por Computador), é utilizada para estudos de projetos através de cálculos matemáticos, capaz de analisar diversas variáveis de um projeto como por exemplo: robustez do produto, desempenho de componentes e comportamento da estrutura. Os parâmetros utilizados nas simulações geralmente são baseados no ambiente de trabalho em que o projeto irá operar (TECHOPEDIA, 2018).

Um exemplo da utilização do software CAE é a análise por elementos finitos (FEA), que visa melhorar a qualidade do produto, e diminuir os erros de engenharia

analisando pontos de tensão na peça. A peça submetida a esforços é dividida em pequenas partes chamadas de elementos, onde são conectados entre si pelos chamados nós (Figura 32). O conjunto dos elementos e dos nós são chamados de malha. A divisão da estrutura em várias partes permite resolver e analisar problemas mais complexos, portanto, quando menor a malha mais preciso será o resultado da análise, e consequentemente mais preciso também, a localização dos pontos de tensão da peça (MIRLISENNA, 2016).

Figura 32 - Malhas em uma análise de elementos finitos



Fonte: Mirlisenna (2016).

Com isso, se faz necessário o conhecimento nos softwares citados acima para poder programar e fazer testes do projeto proposto, já que este não visa construir um modelo físico.

3 METODOLOGIA

Visto que o embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho já foi realizado na primeira etapa, é apresentado nesse capítulo, uma metodologia padrão com uma sequência de medidas a ser seguida para que se possa atingir o objetivo geral e os objetivos específicos do projeto, que foram apresentados no início do trabalho.

3.1 PARAMETROS DE PROJETOS

Com os modelos citados acima, foi elaborado o Quadro 2 para comparar os exemplos citados anteriormente, considerando as principais variáveis como: Graus de liberdade, membros reabilitados e tipo de movimento.

Quadro 2 - Comparação dos equipamentos citados como exemplo

Modelo	GDL	Membros reabilitados	Tipo de Movimento
InMotion	2	Ombro, cotovelo e punho	Ativo; Passivo; Ativo-assistido e Ativo-resistivo
ArneoPower	6	Ombro cotovelo e punho	Ativo; Passivo
ArneoSpring	6	Ombro e cotovelo	Ativo

Fonte: Autor, (2018).

Neste trabalho será usado como modelo o equipamento InMotion, por conter somente dois graus de liberdade, facilitando a programação e consequentemente pelo tempo para desenvolvimento do projeto e também pela oportunidade de ter acesso ao equipamento em uma visita de campo na Rede de Reabilitação Lucy Montoro, mais detalhes em Anexo A.

Os passos a seguir definem a metodologia para o desenvolvimento do TICT II.

- I. Definir parâmetros do projeto: com base em dados obtidos na primeira parte do projeto, os parâmetros serão obtidos conforme o tipo de movimento que o robô será capaz de executar e graus de liberdade do mesmo.

- II. Definir os componentes da estrutura: com base nos parâmetros definidos, serão estabelecidos hardware, outros componentes que possam ser usados.
- III. Projetar o equipamento com auxílio do software CAD: através do software Autodesk Inventor, será desenvolvido um modelo de projeto 3D em menor escala.
- IV. Estabelecer interface de software e hardware: através da interface MATLAB, foi desenvolvido a programação do robô, assim como sua trajetória e movimentações.
- V. Efetuar testes: efetuar teste de movimentos em software MatLab.

Este projeto não tem como objetivo o desenvolvimento físico do braço robótico, assim sendo, não será feito teste com pacientes.

O cronograma a seguir foi utilizado no desenvolvimento do TICT II:

Quadro 3 - Cronograma

Objetivo	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Definir parâmetros do projeto						
Definir os componentes da estrutura						
Projetar o modelo com auxílio do software CAD						
Desenvolver código para gerar movimentos em MatLab						
Efetuar testes						

Fonte: Autor, (2018).

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados no decorrer do desenvolvimento final e os resultados obtidos, assim como as dificuldades e ajustes realizados.

Inicialmente, são apresentados o modelo virtual com os parâmetros escolhidos durante o desenvolvimento da pesquisa, logo após o estudo cinemático do braço robótico, seguido da programação da simulação de movimentos feito no software MATLAB, concluindo com a interpretação dos resultados obtidos.

4.1 OBSTÁCULOS E ADAPTAÇÕES

Inicialmente o objetivo do trabalho foi de projetar o braço robótico em software CAD com dimensões reais, apresentando análise estrutural e seus estudos cinemáticos, para que pudesse auxiliar pessoas que necessitam de reabilitação física dos membros superiores. Contudo, o desenvolvimento de um produto como este é fruto de anos de pesquisas, e necessita de conhecimentos não só de engenharia como também de especialistas da área de reabilitação física.

Sendo assim, foi decidido projetar e estudar um modelo em menor escala, não considerando, nesta etapa, a análise estrutural.

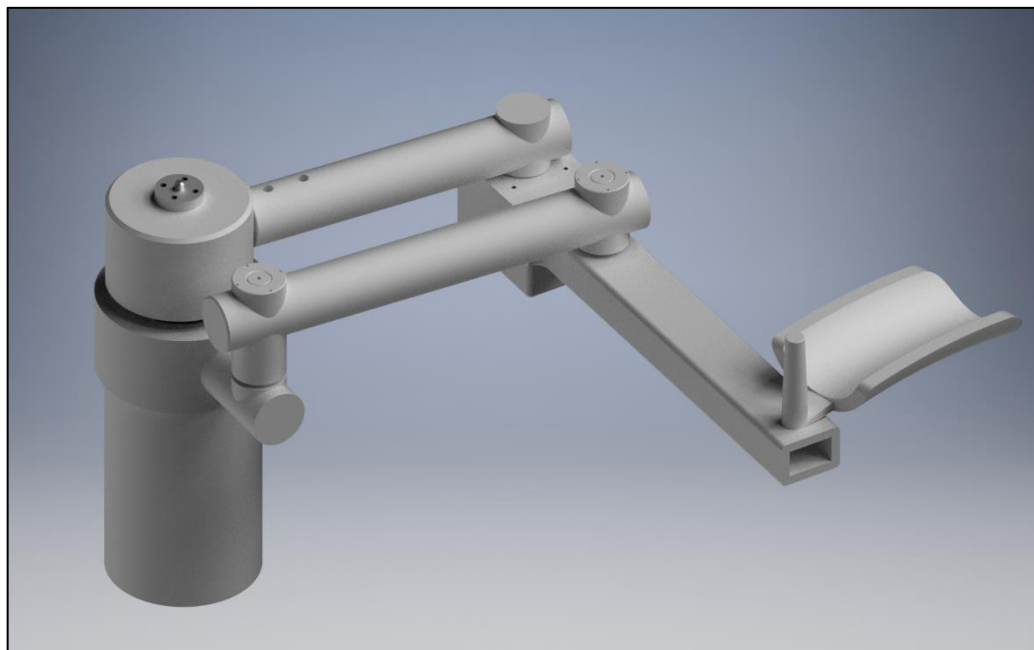
4.2 MODELO DO BRAÇO ROBÓTICO

As dimensões do protótipo foram definidas levando em conta o do tipo de movimentos que se deseja obter, o público que irá utilizar o mecanismo e as amplitudes de movimentos de cada articulação do membro, para que o equipamento não venha prejudicar o ganho do paciente.

O modelo proposto, foi criado com base nos parâmetros analisados na seção 3.1 e os objetivos desse trabalho. Como dito na seção anterior, o braço robótico foi projetado em menor escala, e com dimensões que podem ser utilizadas na impressora 3d disponível no laboratório de robótica da universidade. Porém, não é garantido o funcionamento perfeito da estrutura com as dimensões projetada, toda vez que a mesma não foi submetida a uma análise estrutural e dinâmica.

O braço robótico, ilustrado na Figura 33, foi desenvolvido com base no modelo escolhido durante a pesquisa. Se trata de uma estrutura simples com barras articulares, contendo 2 GDL. Para uma futura execução do modelo proposto, é necessário a utilização de dois motores para realizar os movimentos, utilização de acoplamentos e rolamentos para que o atrito entre as partes seja o menor possível.

Figura 33 - Modelo do braço robótico para reabilitação de membros superiores

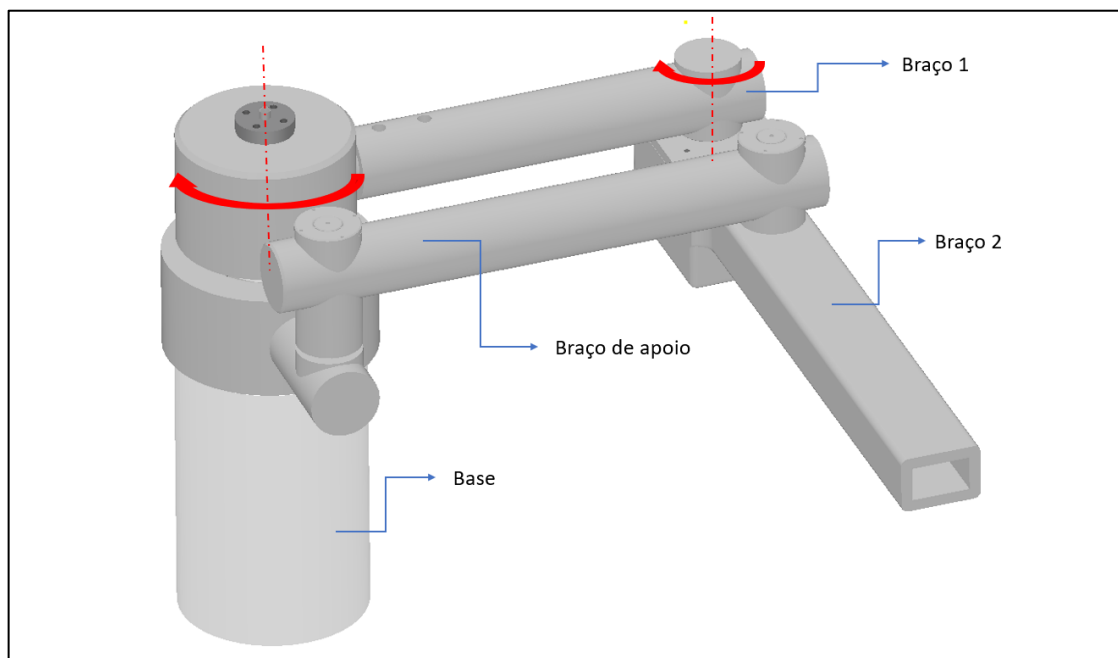


Fonte: Autor, (2018).

Na Figura 34, é possível observar as partes da estrutura, sem o apoio para o braço. O modelo possui uma base onde estão ligados os braços, e os movimentos são gerados a partir da ligação de duas barras principais, também chamados de elos, através das juntas de rotação, que em conjunto são responsáveis pela geração de movimentos planares do robô.

Apesar de que, não foi executado análise estrutural no sistema, é perceptível a necessidade de uma terceira barra de apoio devido ao momento gerado pelo peso do braço.

Figura 34 - Detalhe da estrutura



Fonte: Autor, (2018).

Para o acionamento dos elos foram definidos a utilização de dois motores de passo NEMA-17 modelo 42HS40-1704-13A, como mostra a Figura 35. A escolha foi feita pelos critérios de potência, precisão do motor e suas dimensões. Para o acionamento dos motores e seus respectivos drivers é sugerido o uso da plataforma de prototipagem de hardware Arduino. Se em um trabalho futuro houver a necessidade de modificação das dimensões do projeto, deve-se atentar para os hardwares citados acima, uma vez que a estrutura contém dimensões para acoplá-los.

Não foram definidos sensores para o projeto, visto que o braço robótico se encontra em fase inicial, deixando assim oportunidades para trabalhos complementares.

Figura 35 - Motor de passo NEMA-17 – Driver A4988



Fonte: Autor, (2018).

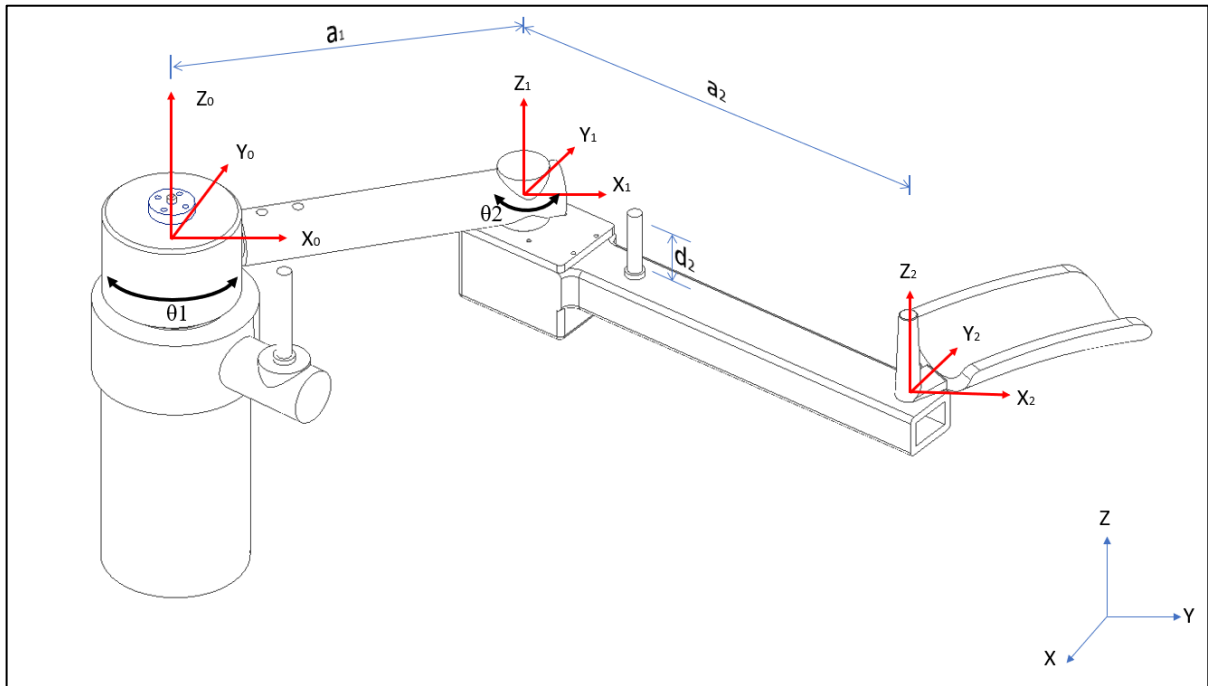
O motivo de se utilizar um motor que não contém redução é de que, além dos movimentos gerados através de um futuro software implementado, o braço robótico também deve receber movimentos realizados pelo paciente, sendo assim, os motores devem exercer a mínima resistência. Com isso, o braço robótico poderá atuar em modo passivo e ativo, como explicado na seção 2.3.1 desse trabalho.

4.3 MODELAGEM CINEMÁTICA

Nesse capítulo, será apresentado a modelagem cinemática direta do braço robótico, através da representação de Denavit-Hartenberg. E por fim, encontrar a matriz de transformação do robô que permite determinar a localização do elemento terminal.

Primeiramente, deve-se representar os sistemas de coordenadas do robô, e definir os parâmetros D-H. Os passos para se obter os parâmetros estão descritos na seção 2.2.2. A Figura 36 mostra as coordenadas definidas das duas juntas de rotações, o efetuator final e os parâmetros.

Figura 36 - Representação D-H



Fonte: Autor, (2018).

Em seguida, foi elaborada a Tabela 3 para facilitar a visualização dos parâmetros D-H, em que os valores representados são obtidos através do desenho mostrado na Figura 36.

Tabela 3 - Parâmetros D-H

i	θ	d (m)	a (m)	α
1	θ_1	0	0,195	0
2	θ_2	0.038	0,258	0

Fonte: Autor, (2018).

Nota-se que, como se trata de duas juntas de rotações os parâmetros θ_1 e θ_2 são variáveis, e das distancias a_1 , a_2 e d_2 foram obtidas no desenho CAD e a unidade está em metros. É importante lembrar que, se em projetos futuros houver necessidade de modificar o modelo CAD, essas variáveis deveram ser alteradas e atualizadas.

A matriz que representa o movimento de cada junta, através dos parâmetros encontrados podem ser apresentados através da Equação 6 na seção 2.2.2, sendo

assim, as equações 9 e 10, representam respectivamente a matriz homogênea de cada movimento.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0,195 * \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0,195 * \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0,25885 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0,25885 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0.038 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

A solução final que representa a matriz de transformação T da cinemática direta aplicada ao braço robótico, pode ser definida através do produto das matrizes apresentadas anteriormente, como mostra a Equação 11.

A multiplicação das matrizes foi feita com auxílio do software MatLab para facilitar o processo. As funções Seno e Cosseno foram expressas pelas letras S e C respectivamente, afim de diminuir o tamanho da equação.

$$T = \begin{bmatrix} C\theta_1 * C\theta_2 - S\theta_1 * S\theta_2 & -C\theta_2 * S\theta_1 - C\theta_1 * S\theta_2 & 0 & 0.258 * (C\theta_1 * C\theta_2 - S\theta_1 * S\theta_2) + 0.195 * C\theta_1 \\ C\theta_2 * S\theta_1 + C\theta_1 * S\theta_2 & C\theta_1 * C\theta_2 - S\theta_1 * S\theta_2 & 0 & 0.258 * (C\theta_2 * S\theta_1 + C\theta_1 * S\theta_2) + 0.195 * S\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0.038 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A Equação 11 permite encontrar a posição do elemento terminal do robô em relação a base.

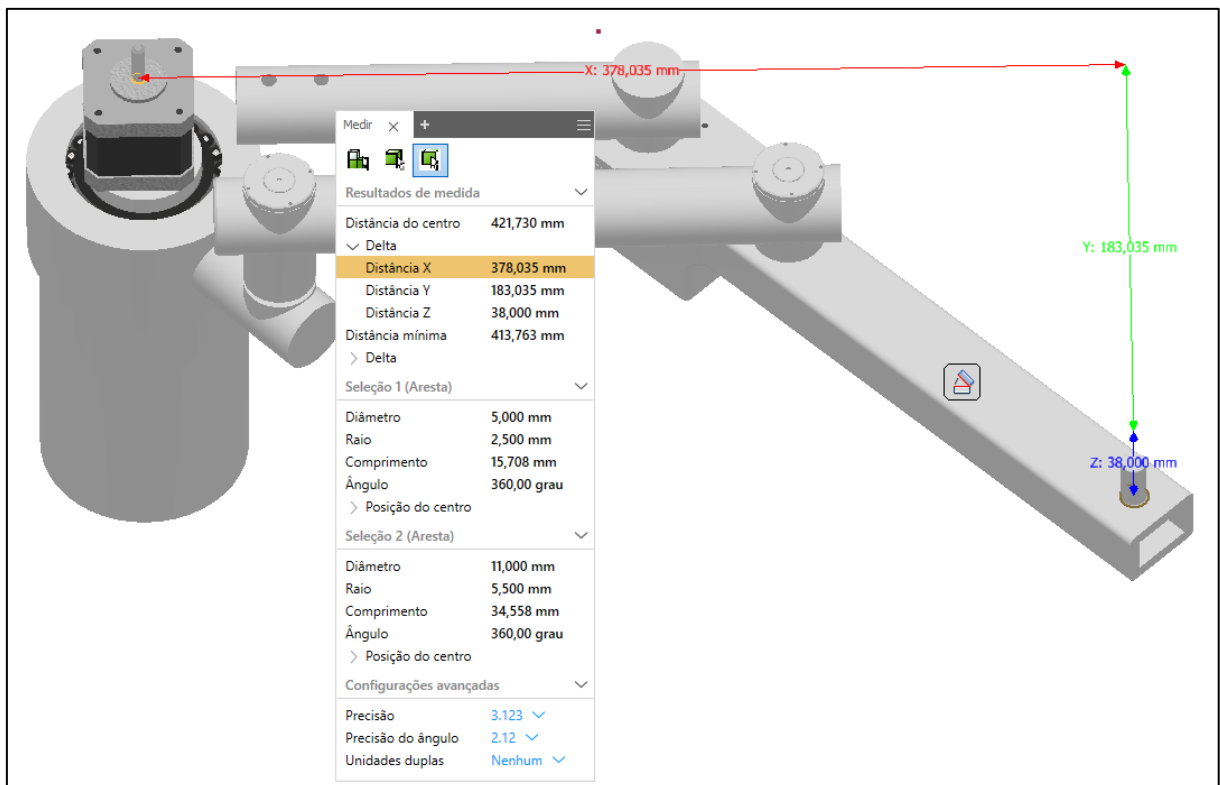
Para verificar o resultado da Equação 11, foi definido valores de rotação para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = -45^\circ$, e comparado os valores com a posição do modelo no software Inventor. A Equação 12 mostra a localização do final do robô.

$$A = \begin{bmatrix} 0.707107 & 0.707107 & 0 & 0.378035 \\ -0.707107 & 0.707107 & 0 & -0.183035 \\ 0 & 0 & 1 & -0.038 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A matriz 3x3 sublinhada em azul representa a orientação do elemento terminal do robô e a última coluna em verde representa a posição no plano cartesiano em metros, sendo $x=378,035\text{mm}$, $y=-183,035\text{mm}$ e $z=-38\text{mm}$.

A Figura 37 mostra a posição encontrada no software Inventor utilizando os ângulos definidos anteriormente.

Figura 37 - Posição no Software Inventor



Fonte: Autor, (2018).

A montagem das peças do modelo em CAD foi feita com os planos de origem invertidos, por esse motivo os valores Y e Z da posição final do robô estão com sinal contrário. Contudo, através da comparação, foi demonstrado a aplicabilidade da matriz de transformação T.

4.4 ANÁLISE DE MOVIMENTOS E TRAJETÓRIA EM SOFTWARE MATLAB

Nessa sessão será apresentado uma análise de movimentos e planejamento de trajetória do braço robótico. O estudo foi feito com auxílio do software MatLab utilizando a Toolbox 10.3 de Peter Corke, disponível gratuitamente em seu site.

Primeiramente foi definido em código as dimensões do robô e suas características, tendo como base os parâmetros D-H apresentados na Tabela 4. A Figura 38 mostra a definição de elos e juntas do braço robótico

Figura 38 - Definição e dimensões do Braço robótico

```

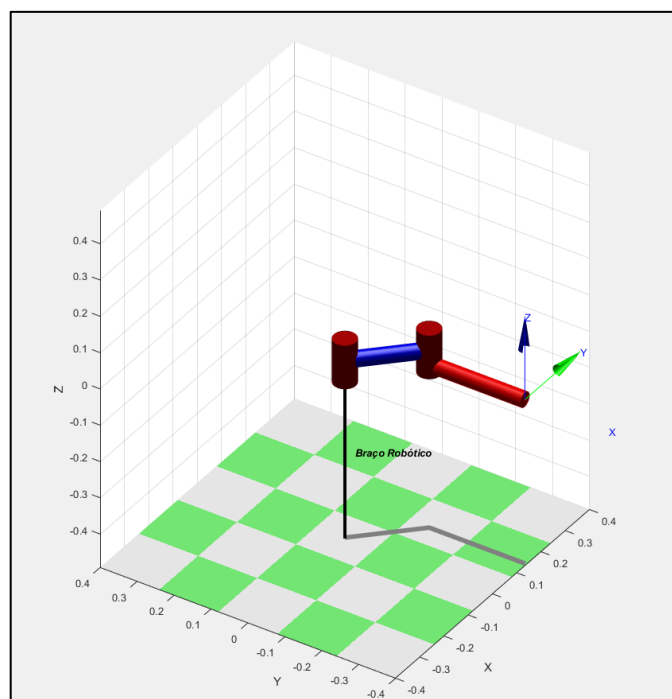
1 - close all
2
3 - L1 = Link('d', 0, 'a', 0.195, 'alpha', 0)
4 - L2 = Link('d', -0.038, 'a', 0.25885, 'alpha', 0)
5
6
7 - bot = SerialLink([L1 L2], 'name', 'Braço Robótico')
8 - bot.n

```

Fonte: Autor, (2018).

A definição através do código acima, gera um conjunto de elos e juntas que define o braço robótico estudado, como visto na Figura 39. Não foi inserido no modelo o apoio do braço robótico.

Figura 39 - Modelo do braço robótico no software MatLab



Fonte: Autor, (2018).

Em seguida, foi gerado alguns movimentos que o braço robótico permite executar. Devido a quantidade de movimentações possíveis, foi analisado somente 8 tipos demonstrativos, visto que, cada usuário realiza movimentos diferentes.

A Figura 40 mostrar as 8 movimentações criadas para análise do braço robótico.

Figura 40 - Movimentos gerados

```
N = 2;

[q1, qd1, qdd1, t]= trajetoria3m( [-pi/4, -pi/4 ], [ 0, -pi/1.5 ], N);
[q2, qd2, qdd2 ]= trajetoria3m( [ 0, -pi/1.5 ], [ -pi/4, -pi/5 ], N);
[q3, qd3, qdd3 ]= trajetoria3m( [-pi/4, -pi/5.0 ], [ -pi/4, 0 ], N);
[q4, qd4, qdd4 ]= trajetoria3m( [-pi/4, 0.0 ], [ -pi/6, -pi/2 ], N);
[q5, qd5, qdd5 ]= trajetoria3m( [-pi/6, -pi/2 ], [ pi/5, -pi/1.5 ], N);
[q6, qd6, qdd6 ]= trajetoria3m( [ pi/5, -pi/1.5 ], [ -pi/4, -pi/4 ], N);
[q7, qd7, qdd7 ]= trajetoria3m( [-pi/4, -pi/4 ], [ -pi/2, -pi/2 ], N);
[q8, qd8, qdd8 ]= trajetoria3m( [-pi/2, -pi/2 ], [ -pi/4, -pi/1.5 ], N);

% Plotando os movimentos no plano XYZ plot ([movimentos], alcance do plano, linha de movimentação do atudor final, vista)
figure(1)
bot.plot([q1'; q2'; q3'; q4'; q5'; q6'; q7'; q8'], 'reach', 0.4, 'trail', {'b', 'LineWidth', 2}, 'view', [-35 35]);
```

Fonte: Autor, (2018).

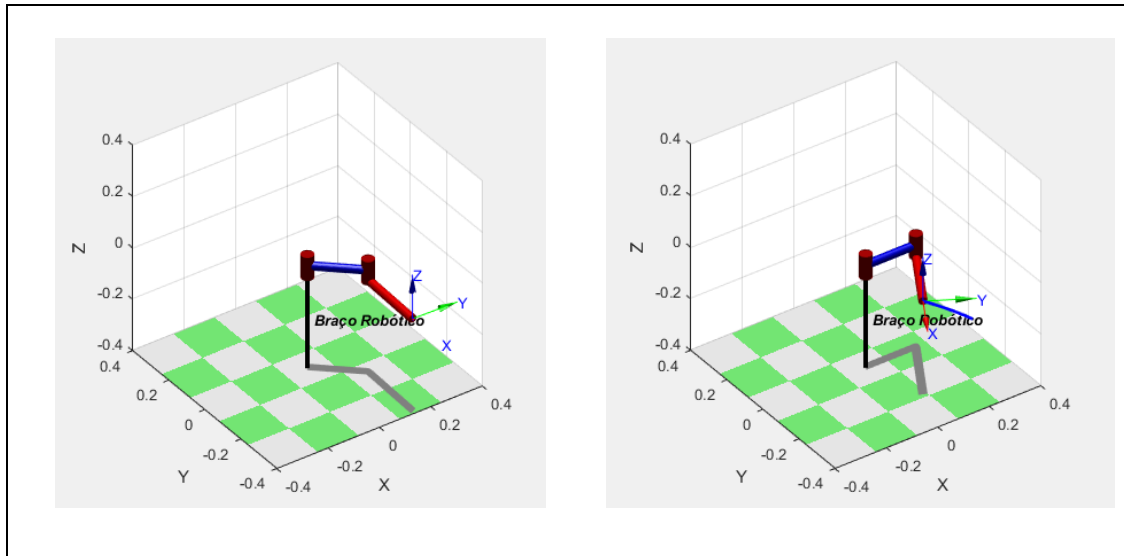
A função trajetoria3m foi criada para gerar a trajetória do manipulador final do robô, utilizando planejamento de trajetória por polinômios de terceira ordem. O código acima permite a geração de 8 movimentos que foi determinado durante o estudo, sendo assim, as variáveis que compõem o código são:

- N – é o número de interpolações que o software utiliza para executar o movimento, quanto maior o número mais preciso e lento fica a movimentação. Nesse caso, N foi definido e utilizado como tempo;
- q- através da função criada trajetoria3m, q é a representação da trajetória do movimento;
- qd- é a primeira derivada da trajetória, sendo assim, gera a velocidade da trajetória executada;
- qdd- é a segunda derivada da trajetória, responsável pela aceleração.

Essas variáveis são representadas a partir da equação de terceira ordem que será apresentada na explicação da geração de trajetória na próxima seção.

Para geração do movimento é necessário informar os ângulos inicial e final das juntas de rotações. A primeira movimentação foi definida como ponto inicial um ângulo de -45° para a primeira e segunda junta, e sua movimentação é em relação ao ponto seguinte, definido como 0° para a primeira junta e -120° para a segunda. O primeiro movimento realizado pelo robô pode ser visualizado na Figura 41.

Figura 41 - Primeira movimentação definida



Fonte: Autor, (2018).

Os movimentos seguintes seguem os mesmos padrões, sempre definindo uma posição inicial e final, sendo que a posição inicial do movimento sempre será igual a os ângulos finais do movimento anterior. As Figuras dos movimentos realizados no trabalho podem ser visualizadas no Apêndice B.

4.4.1 Planejamento de Trajetória

Para planejar e realizar a trajetória do braço robótico foi criada uma função no MatLab, definida como `tajetoria3m`, que tem como objetivo gerar e plotar o gráfico de posição, velocidade e aceleração de cada movimento com base em um polinômio de terceira ordem como mostrado no código da Figura 42. Para o planejamento é necessário que os ângulos iniciais sejam conhecidos e com a utilização da cinemática inversa os ângulos finais podem ser encontrados.

Figura 42 - Função trajetória3m

```

qd0 =zeros(length(qi)); qdf =zeros(length(qi)) ;|
t = [0: 0.1: tf];
Q = []; Qd = []; Qdd = [];

for i = 1: length (qi)
    % Coeficientes, segundo as equações 5.5 (Seed Niku)

    A = [1      tf      tf^2      tf^3;
          1      0      0      0;
          0      1      2*tf   3*tf^2;
          0      1      0      0];

    C =inv(A) * [qf(i)  qi(i)  qdf(i)  qd0(i)]';

    C0(i) = C(1); C1(i) = C(2); C2(i) = C(3); C3(i) = C(4);

    % Trajetória, segundo equações p.149 (Saeed Niku)
    q  = C0(i) + C1(i)*t + C2(i)*t.^2 + C3(i)*t.^3; %Posição
    qd = C1(i) + 2*C2(i)*t + 3*C3(i)*t.^2;         %Velocidade
    qdd= 2*C2(i) + 6*C3(i)*t;                       %Aceleração

    Q = [Q; q];
    Qd = [Qd; qd];
    Qdd = [Qdd; qdd];
end

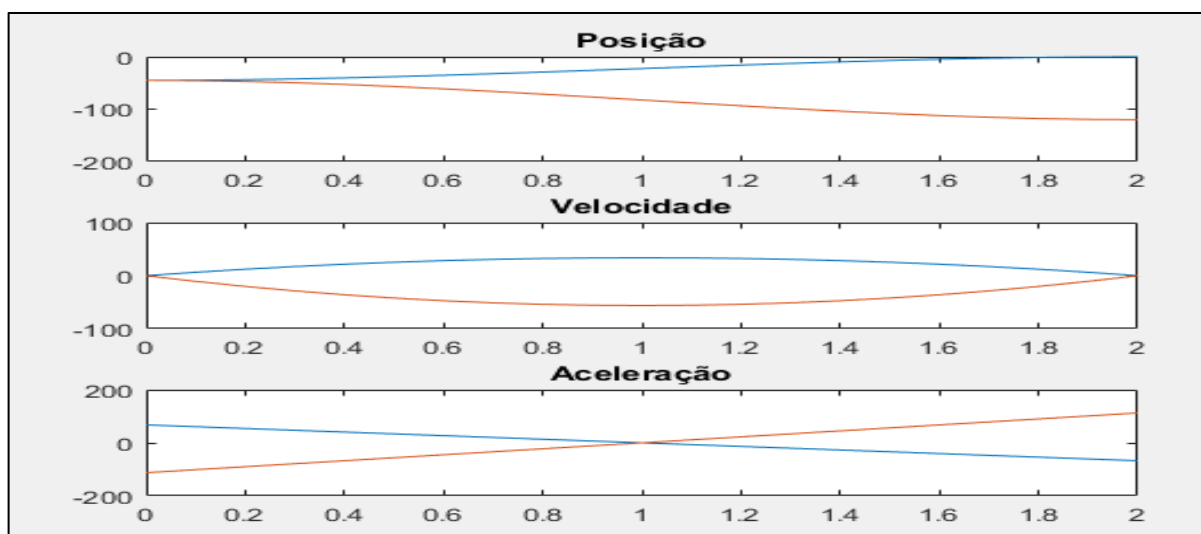
```

Fonte: Autor, (2018).

Utilizando a função acima em conjunto com os movimentos apresentados, gera-se o gráfico de posição, velocidade e aceleração dos oito movimentos. A função para plotar o gráfico pode ser visualizada no código completo no Apêndice B.

A Figura 43 mostra os gráficos referentes ao primeiro movimento. No eixo vertical podemos visualizar a angulação em graus e no eixo horizontal o tempo definido para cada movimento, que nesse projeto foi de 2 segundos.

Figura 43 - Gráficos da Trajetória



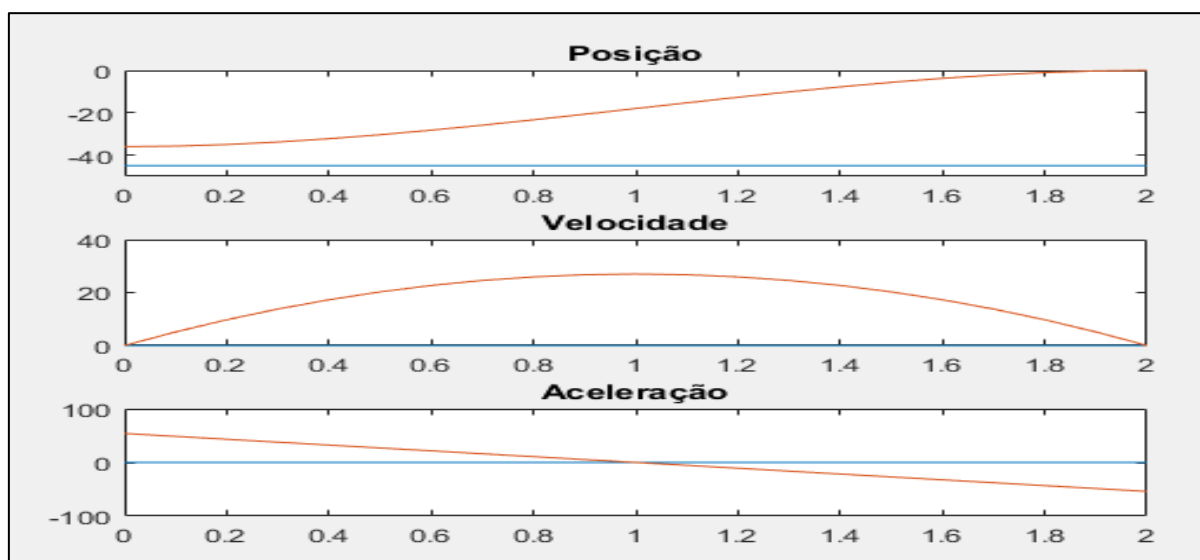
Fonte: Autor, (2018).

A linha em tom de azul representa a primeira junta e em laranja a segunda junta. Assim, pode-se analisar a movimentação referente a cada articulação, visto que as duas juntas iniciam em -45° e após dois segundos terminam a trajetória no ponto final descrito no código de movimento, em que a primeira junta foi direcionada para 0° e a segunda para -120° .

É visível que a velocidade do movimento é nula no início e final da trajetória já que o mesmo inicia em repouso e retorna para executar o próximo movimento. Nota-se que a aceleração no início do movimento e no final são de mesmo valor com sinais trocados, que indica uma aceleração e desaceleração da junta.

No caso do terceiro executado, visto na Figura ,44 é possível observar através do gráfico quando uma só junta se movimento, uma vez que a articulação que permanece na mesma posição tem velocidade e aceleração nula.

Figura 44 - Gráfico do terceiro movimento

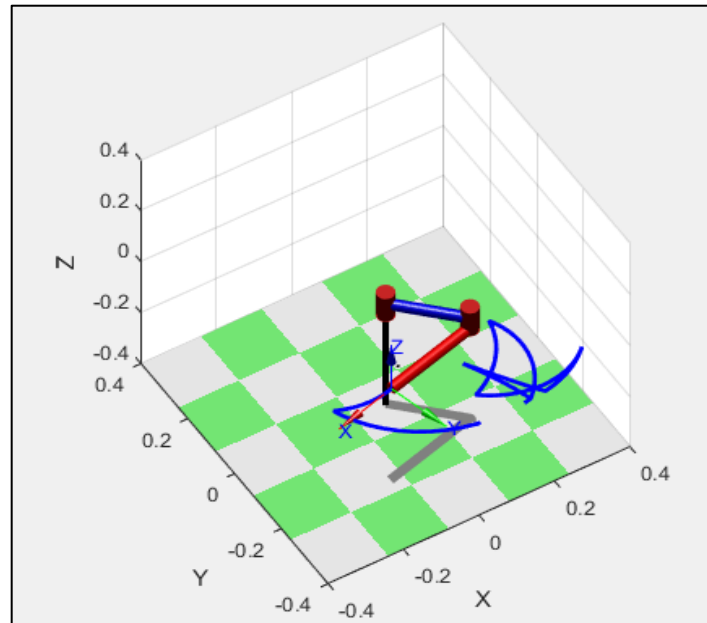


Fonte: Autor, (2018).

Através desses movimentos, foi possível demonstrar o comportamento do braço robótico admitindo alguns movimentos possíveis do modelo.

E por último, a demarcação da trajetória de todos os movimentos realizados durante o teste pode ser vista na Figura 45 em cor azul.

Figura 45 - Trajetória dos movimentos analisados



Fonte: Autor, (2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todo o desenvolvimento do trabalho foi concentrado em atender os objetivos proposto inicialmente, e atingir o objetivo geral de modelar um braço robótico para reabilitação do membro superior. Foi possível alcançar os objetivos com o auxílio de softwares e o laboratório de robótica disponível na universidade, assim sendo, foi desenvolvido um modelo em menor escala com dimensões compatíveis com a impressora 3D disponível no laboratório e também teve como foco principal a modelagem cinemática do robô com geração de movimentos e trajetórias.

Foi possível aplicar a cinemática direta através dos parâmetros Denavit-Hartenberg e gerar a equação para determinar a posição do elemento terminal do robô, e com o auxílio do software MatLab modelar alguns movimentos possíveis do braço robótico assim como sua trajetória. Os movimentos gerados para estudo são movimentos utilizados na reabilitação, uma vez que o robô e a amplitude das articulações do corpo permitem esses movimentos. É possível observar no Apêndice B que o 7º movimento gerado, parte de uma trajetória circular, pode ser comparado com os movimentos apresentados na Figura 26, referente ao equipamento InMotion.

Tratando-se de um trabalho de iniciação científica, os resultados foram satisfatórios, visto que, os equipamentos semelhantes que estão no mercado levaram em torno de 10 anos para serem desenvolvidos. Durante o desenvolvimento, foi necessário algum ajuste nos objetivos, como por exemplo, modelar um projeto em menor escala e sem análise estrutural, afim de poder focar melhor na modelagem cinemática e atender os prazos exigidos.

O desenvolvimento desse trabalho proporciona oportunidades de trabalhos futuros para melhoria e andamento do projeto, como, executar análise dinâmica e estrutural no modelo projetado, desenvolver o modelo físico para testes com software e hardware e elaborar uma interface computacional com possíveis exercícios e movimentos aplicados a fisioterapia do membro estudado.

REFERÊNCIAS

GONÇALVES, Barbosa Faria et al. ESTADO DA ARTE EM REABILITAÇÃO ROBÓTICA DE MEMBROS INFERIORES DE PESSOAS COM AVE. Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde. 2013. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=26032926009>> , Acesso em: 15 maio 2018.

BASSANI, Daniella. Fisioterapia Neurológica ou Neurofuncional, você sabe do que se trata? 2016. Disponível em: <<http://promovefisio.com.br/fisioterapia-neurologica/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

BERSH, Rita. Introdução à Tecnologia Assistiva. Porto Alegre 2017.

BIONIK (Eua). InMotion ARM™ Interactive Therapy System. Disponível em: <<http://bionikusa.com/healthcarereform/upper-extremity-rehabilitation/inmotion2-arm/>>. Acesso em: 16 maio 2018.

BRASIL, Alex N.. Tópicos Especiais em Robótica. 2005. Disponível em: <[file:///C:/Users/Pichau/OneDrive - UNIVALI/Faculdade/tcc/Artigos/04. braço mecânico \(1\).pdf](file:///C:/Users/Pichau/OneDrive%20-%20UNIVALI/Faculdade/tcc/Artigos/04.%20bra%C3%A7o%20mec%C3%A2nico%20(1).pdf)>. Acesso em: 28 maio 2018.

CALLEGARO, Aline Marian. Desenvolvimento de um equipamento computadorizado de movimentação passiva contínua para cotovelo e antebraço. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

CANETA, Anatomia Papel e. Movimentos do corpo humano. 2016. Disponível em: <<https://anatomia-papel-e-caneta.com/movimentos-do-corpo-humano/>>. Acesso em: 28 maio 2018.

CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/94/cd_2010_religioao_deficiencia.pdf. Acesso em: 15 maio 2018.

CINEMÁTICA kinematics Arm MATLAB toolbox robotic. São Paulo: Tarcísio Pinheiro, 2013. P&B. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=SM6bUesnXrM>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

GROOVER, Mikell P. et al. **Robótica: Tecnologia e Programação**. São Paulo: McGraw-hill, 1988. Tradução de: David Maurice Savatovsky.

HALL, Susan J.. Biomecânica Básica. 5. ed. Barueri-sp: Manoele, 2009.

HOCOMA (Suíça). Guiding the Initial Phases of Arm and Hand Function Recovery. Disponível em: <<https://www.hocoma.com/solutions/armeo-power/#product>>. Acesso em: 17 maio 2018.

KALLINE, Liena. Amplitude de movimento. 2014. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/296110/>>. Acesso em: 28 maio 2018.

KAPANDJI, A.i.. Fisiologia articular: membro superior. 5. ed. Paris: Maloine, 2000.

LEÃO, Lucas. Blog engenharia elétrica moderna. 2016. Disponível em: <<https://www.e3seriescenter.com/blog-engenharia-eletrica-moderna/cad-cae-e-cam-qual-a-diferenca>>. Acesso em: 28 maio 2018.

LISBOA, Bárbara Texeira. Robótica e Medicina. In: OLIMPIÁDA DE ROBÓTICA DO CAMPO DAS VERTENTES, 1., 2010, São João Del-rei. **Material de estudo**. Minas Gerais: Orsv, 2010. v.1, p. 1 - 3. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/orcv/materialdeestudo_roboticaemedicina.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

LIZANZA, Sergio. **Medicina de reabilitação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.a., 1995.

MACHINE, Man And. Autodesk Inventor. 2018. Disponível em: <<https://www.manandmachine.co.uk/product/autodesk-inventor/>>. Acesso em: 28 maio 2018.

MARQUES, José Roberto. O QUE É NEUROPLASTICIDADE? 2016. Disponível em: <<http://www.ibccoaching.com.br/portal/o-que-e-neuroplasticidade/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

MIRLISENNA, Giuseppe. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: O QUE É? 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 28 maio 2018

MONTORO, Rede Lucy. Perguntas Frequentes. 2018. Disponível em: <<http://www.redelucymontoro.org.br/site/perguntas-frequentes.html>>. Acesso em: 15 maio 2018.

NIKU, Saeed Benjamin. **Introdução à Robótica**: Análise, Controle, Aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. Tradução de: Sérgio Gilberto Taboada.

NUNES, Wilgo Moreira. Desenvolvimento de uma estrutura robótica atuada por cabos para reabilitação/recuperação dos movimentos do ombro humano. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-mg, 2012.

PADOVANI, Cauê et al. Application of the Fugl-Meyer Assessment (FMA) and the Wolf Motor Function Test (WMFT) in the recovery of upper limb function in patients after chronic stroke: a literature review. São Paulo: ., 2013.

RAPOSA, Alana. 1 Robótica Introdução a Robótica Robôs Manipuladores. 2015. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/3463602/>>. Acesso em: 17 maio 2018.

Robot-Mediated Treatments on Stroke Patients. Rehabilitation devices and systems. 2013; 1: 2168-2372.

ROMANO, Vitor Ferreira. Robótica industrial: aplicação na indústria de manufatura e de processos. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 202.

ROSÁRIO, João Maurício. Robótica industrial I: modelagem, utilização e programação. São Paulo: Baraúna Se Ltda, 2010.

ROSÁRIO, João Maurício. Princípios de mecatrônica. São Paulo: Pearson Education, 2005.

SARTORETTO, Mara Lúcia; BERSCH, Rita. **Assistiva:** tecnologia e educação. 2017. Disponível em: <<http://www.assistiva.com.br/tassistiva.html>>. Acesso em: 15 maio 2018.

SAÚDE, Ministério da. Acidente Vascular Cerebral - AVC. 2017. Disponível em: <<http://portalms.saude.gov.br/saude-de-a-z/acidente-vascular-cerebral-avc>>. Acesso em: 15 maio 2018.

SIEMENS. Computer-aided Design (CAD). 2018. Disponível em: <<https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>>. Acesso em: 28 maio 2018.

TECHOPEDIA. Computer-Aided Engineering (CAE). 2018. Disponível em: <<https://www.techopedia.com/definition/2066/computer-aided-engineering-cae>>. Acesso em: 28 maio 2018.

TEIXEIRA, Daniele Galvão et al. Perfil dos pacientes que fazem uso de oxigenoterapia domiciliar na cidade de Fortaleza/CE. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Victor_Hugo_Bastos/publication/279448571_Estimulacao_sensorial_plantar_como_proposta_fisioterapeutica_na_funcionalizacao_da_marcha_em_hemipareticos_cronicos_estudo_de_casos/links/5592e7c908ae5af2b0eb6311/Estimulacao-sensorial-plantar-como-proposta-fisioterapeutica-na-funcionalizacao-da-marcha-em-hemipareticos-cronicos-estudo-de-casos.pdf#page=33>. Acesso em: 29 nov. 2017.

TROPEA, P.; CESQUI, B.; MONACO, V.; ALIBONI, S.; POSTERARO, F.; MICERA, S. Effects of the Alternate Combination of "Error-Enhancing" and "Active Assistive"

Apêndice A. PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo foi realizada no dia 18/04/2018 na Rede de Reabilitação Lucy Montoro, na unidade de Morumbi, em São Paulo.

A visita e pesquisa de campo, foi realizada com o intuito de conhecer de uma melhor maneira o equipamento InMotion localizado na Rede de Reabilitação Lucy Montoro. A Rede possui sete unidades no estado de São Paulo, conta com o primeiro laboratório de robótica de reabilitação de membros superiores e inferiores da América Latina e totalmente gratuito pelo SUS.

Por meios de pesquisas foi possível agendar uma Visita Técnica na unidade de Morumbi-SP, onde se encontra a maior concentração de equipamentos robóticos para reabilitação Física e também o equipamento InMotion. Depois de conhecer a unidade formada por sete andares, fui recebido pela Terapeuta Ocupacional Vivian D.B. Vicente, o qual me explicou o funcionamento do equipamento em questão, foi feito vários testes como os aplicados em pacientes, para que eu pudesse conhecer o equipamento e seus funcionamentos.

A seguir pode-se ver algumas imagens do teste feito no equipamento InMotion:


Figura 46 - Equipamento InMotion





Fonte: Autor, (2018).

Após a Terapeuta demonstra o funcionamento do equipamento foi aplicado uma pesquisa de campo composta por um questionário, para agregar no desenvolvimento desse projeto.

	<p>TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA 9º PERÍODO</p> <p>PESQUISA DE CAMPO/ ENTREVISTA</p>
Local da Entrevista:	Rede de Reabilitação Lucy Montoro (São Paulo).
Autor:	Guilherme da Silva
Universidade:	Universidade do Vale do Itajaí
Curso:	Engenharia Mecânica
Coordenador:	Fabricio Paris
Título do TCC:	Projeto de um braço robótico para reabilitação de membros superiores.
Orientador:	Alejandro Rafael Garcia Ramirez

Entrevistado (a): Vivian Daniella Barboza Vicente

Cargo/ Função: Terapeuta Ocupacional

Formação: Terapia Ocupacional

1. OBJETIVO

O objetivo principal da entrevista é adquirir melhor conhecimento sobre equipamentos utilizados para reabilitação de membros superiores com melhor enfoque no equipamento InMotion, (MIT-Manus), para o desenvolvimento do trabalho de iniciação científica como requisito para formação em Engenharia Mecânica.

2. MÉTODO

Para desenvolver essa pesquisa, será feito uma visita técnica na Rede de reabilitação Lucy Montoro, mais especificamente na unidade de Morumbi-SP, onde se encontra o equipamento InMotion usado como referência para o desenvolvimento do trabalho. A entrevista será feita através de um questionário desenvolvido para melhor compreensão do tema.

3. QUESTIONÁRIO

a) Qual o público alvo e perfil dos usuários do InMotion?

Pacientes em processo de reabilitação na Rede, e acordo com a avaliação da equipe para definir indicação. Lesões como Acidente Vascular Cerebral, Lesão Medular, Paralisia Cerebral, etc...

b) Como está a tendência no mercado, tratando-se de investimentos e crescimento da aplicação do InMotion?

A tecnologia como um todo, tem sido recurso a cada dia mais utilizado na reabilitação, contribuindo para um melhor tratamento dos pacientes.

c) Qual o custo estimado do equipamento?

Não tenho esta informação.

d) Em síntese como funciona o equipamento?

Os sensores “percebem” o movimento que o paciente consegue realizar e como é o movimento. A partir daí cria-se a interação com o paciente proporcionando mais ou menos auxílio nos protocolos, que são selecionados pelo terapeuta.

e) Quais são as dimensões do InMotion?

1x1x1 metros.

f) Quantos tipos de movimentos diferentes permite realizar o robô?

O equipamento inMotion 2: movimentos de ombro (abdução e adução), cotovelo (flexão e extensão) e punho (flexão, extensão, desvio ulnar e radial), pronação e supinação antebraço, e flexão e extensão dedos.

g) Se compararmos o desenvolvimento dos pacientes quando não havia o equipamento e depois que a Rede Lucy Montoro o adquiriu, qual a porcentagem de ganho dos pacientes?

Não temos dados concretos em porcentagem. Mas o equipamento e a proposta dele contribuem de forma a acrescentar e completar o tratamento “convencional” otimizando resultados.

h) Como os pacientes reagem a essa tecnologia?

A maioria gosta da ideia de utilizar a tecnologia na reabilitação.

i) Como o equipamento ajuda os fisioterapeutas e profissionais da área?

Auxilia os terapeutas ocupacionais na avaliação do paciente, compreensão das necessidades em termos de ganho e aprimoramento dos movimentos de membros superiores. Acrescenta quantidade de repetições para cada movimento que precisa ser trabalhado, completando o trabalho feito na terapia ocupacional.

- j) Os profissionais necessitam de algum curso básico para a utilização do equipamento InMotion?**

Treinamento realizado quando dá início dos atendimentos com o equipamento, pela própria equipe que desenvolveu.

- k) Há alguma sugestão de otimização do equipamento, no sentido de torná-lo mais eficiente?**

Sem resposta.

- l) O paciente prefere a fisioterapia convencional sem a utilização de meios robóticos, ou com a implementação dessas tecnologias?**

A maioria com as tecnologias.

- m) Na sua opinião existe alguma barreira em inserir meios tecnológicos e robóticos para fisioterapia em pacientes?**

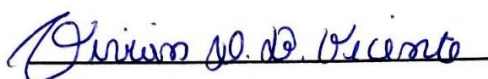
Não. Mas há cuidados a serem tomados, como permitir a acessibilidade do paciente para uso e melhor aproveitamento do recurso.

- n) Você conhece algum desenvolvimento Nacional similar? E, caso não conheça, na sua opinião, quais os entraves para desenvolver esse tipo de tecnologia no país?**

Não conheço. Falta de investimento no desenvolvimento de tecnologias para reabilitação.

- o) Gostaria de contribuir e deixar alguma opinião para o desenvolvimento deste trabalho?**

Sugestão: no Brasil, temos em sua maior parte terapeutas ocupacionais trabalhando com o InMotion. Assim, o objetivo é principalmente contribuir com a melhora dos movimentos de forma a ter funcionalidade e independência no dia a dia.



Vivian Daniela Barboza Vicente



Guilherme da Silva



Alejandro Rafael Garcia Ramirez

Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI



Prof. Fabricio Páris

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Escola do Mar, Ciência e Tecnologia

Portaria nº 163/2018

Fabricio Paris

Apêndice B. CODIGO MATLAB

O código e as funções utilizadas nesse trabalho podem ser visto nas Figuras abaixo.

Figura 47 - Código referente aos movimentos

```

1 - close all
2
3 - L1 = Link('d', 0, 'a', 0.195, 'alpha', 0)
4 - L2 = Link('d', -0.038, 'a', 0.25885, 'alpha', 0)
5
6
7 - bot = SerialLink([L1 L2], 'name', '.')
8 - bot.n
9
10
11 - N = 2;
12
13 - [q1, qd1, qdd1, t] = trajetoria3m( [-pi/4, -pi/4], [ 0, -pi/1.5], N);
14 - [q2, qd2, qdd2] = trajetoria3m( [ 0, -pi/1.5], [-pi/4, -pi/5], N);
15 - [q3, qd3, qdd3] = trajetoria3m( [-pi/4, -pi/5.0], [-pi/4, 0], N);
16 - [q4, qd4, qdd4] = trajetoria3m( [-pi/4, 0.0], [-pi/6, -pi/2], N);
17 - [q5, qd5, qdd5] = trajetoria3m( [-pi/6, -pi/2], [ pi/5, -pi/1.5], N);
18 - [q6, qd6, qdd6] = trajetoria3m( [ pi/5, -pi/1.5], [-pi/4, -pi/4], N);
19 - [q7, qd7, qdd7] = trajetoria3m( [-pi/4, -pi/4], [-pi/2, -pi/2], N);
20 - [q8, qd8, qdd8] = trajetoria3m( [-pi/2, -pi/2], [-pi/4, -pi/1.5], N);
21
22 % Plotando os movimentos no plano XYZ plot ([movimentos], alcance do plano, linha de movimentação do atuador final, vista)
23 figure(1)
24 bot.plot([q1; q2; q3; q4; q5; q6; q7; q8], 'reach', 0.4, 'trail', 'b', 'LineWidth', 2, 'view', [-35 35]);
25

```

Fonte: Autor, (2018).

Figura 48 - Trajetória3m

```

8 - close all
9
10 - qd0 = zeros(length(qi)); qdf = zeros(length(qi)) ;
11 - t = [0: 0.1: tf];
12 - Q = []; Qd = []; Qdd = [];
13
14 - for i = 1: length (qi)
15 % Coeficientes, segundo as equações 5.5 (Seed Niku)
16
17 - A = [1 tf tf^2 tf^3;
18 1 0 0 0;
19 0 1 2*tf 3*tf^2;
20 0 1 0 0];
21
22 - C = inv(A) * [qf(i) qi(i) qdf(i) qd0(i)]';
23
24 - C0(i) = C(1); C1(i) = C(2); C2(i) = C(3); C3(i) = C(4);
25
26 % Trajetória, segundo equações p.149 (Saeed Niku)
27 - q = C0(i) + C1(i)*t + C2(i)*t.^2 + C3(i)*t.^3; %Posição
28 - qd = C1(i) + 2*C2(i)*t + 3*C3(i)*t.^2; %Velocidade
29 - qdd = 2*C2(i) + 6*C3(i)*t; %Aceleração
30
31 - Q = [Q; q];
32 - Qd = [Qd; qd];
33 - Qdd = [Qdd; qdd];
34
35 - end
36

```

Fonte: Autor, (2018).

Figura 49 - Plotagem dos Gráficos

```

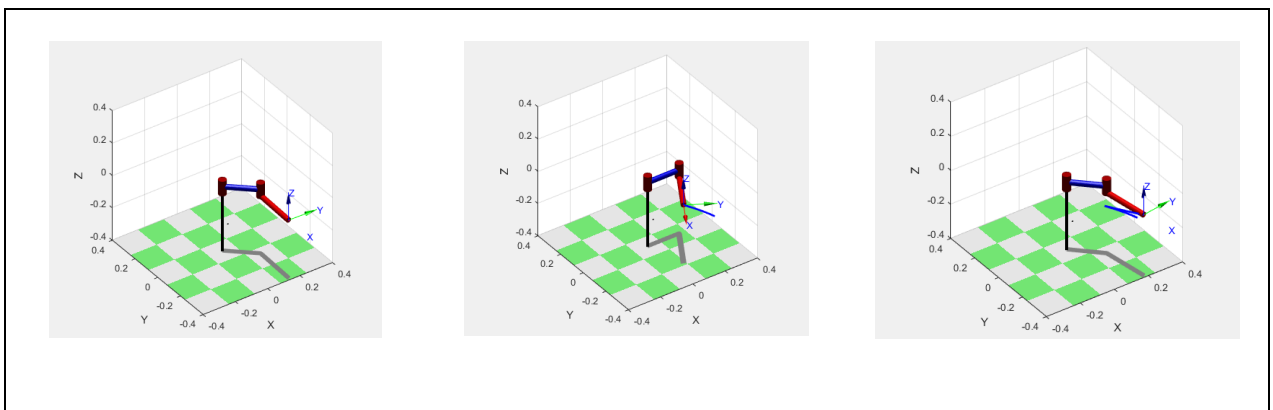
27 %plotar
28 - figure(2)
29 - subplot(3,1,1), plot(t, q1*180/pi), title 'Posição'
30 - subplot(3,1,2), plot(t, qd1*180/pi), title 'Velocidade'
31 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd1*180/pi), title 'Aceleração'
32
33 - figure(3)
34 - subplot(3,1,1), plot(t, q2*180/pi), title 'Posição'
35 - subplot(3,1,2), plot(t, qd2*180/pi), title 'Velocidade'
36 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd2*180/pi), title 'Aceleração'
37
38 - figure(4)
39 - subplot(3,1,1), plot(t, q3*180/pi), title 'Posição'
40 - subplot(3,1,2), plot(t, qd3*180/pi), title 'Velocidade'
41 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd3*180/pi), title 'Aceleração'
42
43 - figure(5)
44 - subplot(3,1,1), plot(t, q4*180/pi), title 'Posição'
45 - subplot(3,1,2), plot(t, qd4*180/pi), title 'Velocidade'
46 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd4*180/pi), title 'Aceleração'
47
48 - figure(6)
49 - subplot(3,1,1), plot(t, q5*180/pi), title 'Posição'
50 - subplot(3,1,2), plot(t, qd5*180/pi), title 'Velocidade'
51 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd5*180/pi), title 'Aceleração'
52
53 - figure(7)
54 - subplot(3,1,1), plot(t, q6*180/pi), title 'Posição'
55 - subplot(3,1,2), plot(t, qd6*180/pi), title 'Velocidade'
56 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd6*180/pi), title 'Aceleração'
57
58 - figure(8)
59 - subplot(3,1,1), plot(t, q7*180/pi), title 'Posição'
60 - subplot(3,1,2), plot(t, qd7*180/pi), title 'Velocidade'
61 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd7*180/pi), title 'Aceleração'
62
63 - figure(9)
64 - subplot(3,1,1), plot(t, q8*180/pi), title 'Posição'
65 - subplot(3,1,2), plot(t, qd8*180/pi), title 'Velocidade'
66 - subplot(3,1,3), plot(t, qdd8*180/pi), title 'Aceleração'
67

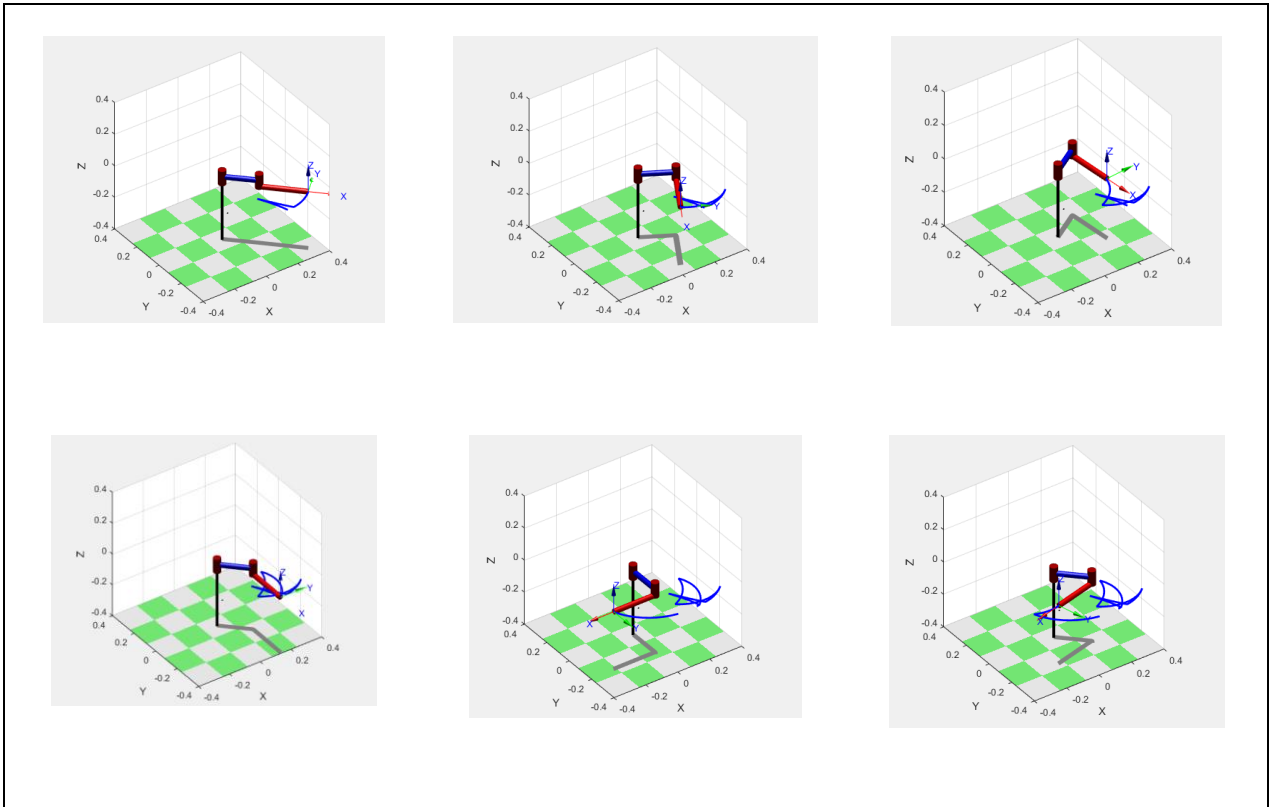
```

Fonte: Autor, (2018).

A seguir pode ser visualizado os movimentos plotados.

Figura 50 - Movimentos realizados





Fonte: Autor, (2018).