

UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
CAMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO VINICIUS SARTORI LAMPUGNANI

ROBÓTICA APLICADA A PROCESSOS DE PRECISÃO

ERECHIM – RS

2020

BRUNO VINICIUS SARTORI LAMPUGNANI

ROBÓTICA APLICADA A PROCESSOS DE PRECISÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Camila Sampaio dos Reis

ERECHIM – RS

2020

BRUNO VINICIUS SARTORI LAMPUGNANI

ROBÓTICA APLICADA A PROCESSOS DE PRECISÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Erechim, 7 de Dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ma. Camila Sampaio dos Reis

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim

Profa. Dra. Simone Fátima Zanoello

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim

Dedico este trabalho aos meus pais, Cesar Nicolau Lampugnani e Neuza Maria Lampugnani, e a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram para a concretização desta etapa.

RESUMO

O trabalho visa introduzir a aplicabilidade de manipuladores robóticos, apresentando técnicas para o projeto, a modelagem e o desenvolvimento de um braço robótico com seis graus de liberdade. Para isso, foram utilizados *softwares* específicos para cada etapa, desde o projeto estrutural com auxílio do NX 12 da Siemens até a escrita e execução do algoritmo no MATLAB®. Os cálculos de torque realizados permitiram a definição dos atuadores, bem como com as características destes foi possível analisar conceitos relativos à precisão do movimento. Na modelagem do manipulador foi utilizada a notação de Denavit-Hartenberg, caracterizada como cinemática direta, a qual forneceu parâmetros para representar o modelo e permitiu a criação e adaptação do algoritmo para o controle e acionamento do mesmo. Além disso, foi possível simular um esboço do volume de trabalho do manipulador por meio de método numérico, o qual utiliza posições aleatórias para gerar pontos de alcance. Após o desenvolvimento, a validação do projeto se deu pelas simulações realizadas no *software* MATLAB® com o algoritmo proposto, no qual são fornecidos os ângulos das juntas e o manipulador executa o movimento do ponto atual ao próximo de acordo com a curva de velocidade selecionada. O protótipo foi confeccionado em impressora 3D e montado com uma configuração de quatro graus de liberdade, sendo possível realizar os testes experimentais. Dentre estes podem ser citados o teste de precisão, que apresentou resultados divergentes dos simulados, e o de repetibilidade, este com soluções aplicáveis em determinadas rotinas de trabalho.

Palavras-chave: Manipulador Robótico. Projeto 3D. Modelagem Cinemática. Algoritmo de Controle. Denavit-Hartenberg.

ABSTRACT

The work aims to introduce the applicability of robotic manipulators, presenting techniques for the design, modeling and development of a robotic arm with six degrees of freedom. For that, specific software was used for each stage, from the structural design with the aid of Siemens NX 12 to the writing and execution of the algorithm in MATLAB®. The torque calculations performed allowed the definition of the actuators, as well as with their characteristics it was possible to analyze concepts related to the precision of the movement. In the modeling of the manipulator, the Denavit-Hartenberg notation was used, characterized as direct kinematics, which provided parameters to represent the model and allowed the creation and adaptation of the algorithm for its control and activation. In addition, it was possible to simulate an outline of the manipulator's workspace using a numerical method, which uses random positions to generate reach points. After development, the validation of the project took place through the simulations performed in the MATLAB® software with the proposed algorithm, in which the angles of the joints are provided and the manipulator performs the movement from the current point to the next according to the selected speed curve. The prototype was made on a 3D printer and assembled with a four degree of freedom configuration, making it possible to carry out the experimental tests. Among these can be cited the precision test, which presented different results from the simulated ones, and the repeatability test, this with solutions applicable in certain work routines.

Keywords: Robotic Manipulator. 3D Design. Kinematic Modeling. Control Algorithm. Denavit-Hartenberg.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Robô Da Vinci Xi | 15 |
| Figura 2 – Tipos de juntas utilizadas em manipuladores robóticos: prismática (esquerda), rotacional (direita) e esférica (inferior) | 17 |
| Figura 3 – Estrutura de um robô cartesiano..... | 18 |
| Figura 4 – Estrutura de um robô cilíndrico..... | 18 |
| Figura 5 – Estrutura de um robô esférico | 19 |
| Figura 6 – Estrutura de um robô SCARA | 19 |
| Figura 7 – Estrutura de um robô articulado..... | 20 |
| Figura 8 – Comparação das articulações e dos movimentos de um braço robótico com os de um braço humano | 22 |
| Figura 9 – Relação de custo entre sistemas de acionamento hidráulicos e elétricos..... | 23 |
| Figura 10 – Estrutura interna de um motor de corrente contínua (CC)..... | 25 |
| Figura 11 – Estrutura interna de um motor sem escovas (brushless CC)..... | 26 |
| Figura 12 – Estrutura interna de um servomotor (esquerda) e exemplo de modelo..... | 27 |
| Figura 13 – Esquema simplificado de um sistema de malha fechada | 28 |
| Figura 14 – Modelo do ESP32 | 29 |
| Figura 15 – Manipulador com dois graus de liberdade | 33 |
| Figura 16 – Exemplo de redundância em resolução da cinemática inversa | 36 |
| Figura 17 – Relação entre precisão e repetibilidade em um manipulador..... | 39 |
| Figura 18 – Comparação entre diferentes modos de acionamento do manipulador..... | 40 |
| Figura 19 – Diagrama de forças do protótipo desenvolvido | 45 |
| Figura 20 – Servomotores SPT5535LV-320 (esquerda) e SPT4412LV-320 (direita)..... | 46 |
| Figura 21 – Representação de medidas e juntas do manipulador projetado..... | 47 |
| Figura 22 – Diagrama de blocos de malha aberta do manipulador | 49 |
| Figura 23 – Diagrama de blocos de malha fechada de um atuador..... | 49 |
| Figura 24 – Base do manipulador..... | 53 |
| Figura 25 – Braço do manipulador | 53 |
| Figura 26 – Antebraço do manipulador..... | 54 |
| Figura 27 – Conjunto do Punho e Garra do manipulador..... | 54 |
| Figura 28 – Renderização do manipulador vista de cima..... | 54 |
| Figura 29 – Volume de trabalho do manipulador simulado no <i>software</i> MATLAB® | 55 |
| Figura 30 – Representação do manipulador gerada pelo MATLAB® | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 – Curvas disponíveis para o acionamento dos servomotores..... | 57 |
| Figura 32 – Circunferência de maior raio do robô e coordenadas de pontos adjacentes | 58 |
| Figura 33 – Novo projeto do manipulador | 59 |
| Figura 34 – Aparência final do manipulador..... | 59 |
| Figura 35 – Distribuição dos pontos atingidos pela carga em ciclos..... | 60 |
| Figura 36 – Rotinas de teste do manipulador | 61 |
| Quadro 1 – Características dos atuais robôs industriais | 13 |
| Quadro 2 – Resultados comparativos entre as três técnicas cirúrgicas no tratamento do cancro do endométrio..... | 14 |
| Quadro 3 – Volumes de trabalho de diferentes modelos de robôs | 21 |
| Quadro 4 – Parâmetros genéricos de Denavit-Hartenberg | 35 |
| Quadro 5 – Erros de precisão e suas principais causas..... | 38 |
| Quadro 6 – Características do manipulador desenvolvido | 44 |
| Quadro 7 – Relação das forças e distâncias para o cálculo do torque..... | 45 |
| Quadro 8 – Principais especificações dos motores utilizados no projeto..... | 46 |
| Quadro 9 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô desenvolvido..... | 47 |
| Quadro 10 – Variância e desvio padrão da amostra | 60 |
| Quadro 11 - Informações quantitativas do teste cíclico | 62 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1. Objetivos | 11 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 2.1. Robótica aplicada | 12 |
| 2.1.1. Robótica aplicada na área industrial | 12 |
| 2.1.2. Robótica aplicada na área médica | 13 |
| 2.2. O manipulador robótico..... | 16 |
| 2.2.1. Tipos de manipuladores..... | 16 |
| 2.2.1.1. Robô cartesiano (TTT) | 17 |
| 2.2.1.2. Robô cilíndrico (RTT)..... | 18 |
| 2.2.1.3. Robô esférico (RRT) | 18 |
| 2.2.1.4. Robô SCARA (<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i> - RRT) | 19 |
| 2.2.1.5. Robô articulado (RRR)..... | 20 |
| 2.2.1.6. Volume de trabalho dos robôs | 20 |
| 2.2.2. Estrutura de um braço robótico | 22 |
| 2.2.2.1. Estrutura de sustentação | 22 |
| 2.2.2.2. Servoacionamento elétrico | 23 |
| 2.2.2.2.1. Motores de corrente contínua (CC) | 24 |
| 2.2.2.3. Sistema de transmissão..... | 27 |
| 2.2.3. Sistema controlador | 27 |
| 2.2.3.1. Microcontrolador | 28 |
| 2.2.3.1.1. Controle on-off | 29 |
| 2.2.3.1.2. Controle proporcional (P)..... | 30 |
| 2.2.3.1.3. Controle proporcional-integral (PI) e proporcional-derivativo (PD) | 30 |
| 2.2.3.1.4. Controle proporcional-integral-derivativo (PID)..... | 30 |
| 2.2.3.2. Algoritmo de controle..... | 31 |
| 2.3. Modelagem do sistema | 32 |
| 2.3.1. Cinemática | 32 |
| 2.3.1.1. Cinemática direta..... | 32 |
| 2.3.1.2. Notação de Denavit-Hartenberg | 33 |
| 2.3.1.3. Cinemática inversa | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.2. Parâmetros de precisão | 37 |
| 2.3.3. Geração e controle de trajetória | 39 |
| 2.4. Revisão de literatura | 40 |
| 3. METODOLOGIA..... | 43 |
| 3.1. Projeto da estrutura de sustentação..... | 43 |
| 3.1.1. Definição das características e função do robô | 43 |
| 3.1.2. Cálculo dos torques e definição dos atuadores | 44 |
| 3.1.3. Cálculo do volume de trabalho | 46 |
| 3.2. Modelagem e parametrização do manipulador | 47 |
| 3.2.1. Cálculo das matrizes de transformação | 48 |
| 3.2.2. Arranjo do sistema..... | 49 |
| 3.2.3. Algoritmo de controle e acionamento | 50 |
| 3.3. Hardware de controle..... | 50 |
| 3.4. Precisão dos atuadores | 50 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 4.1. Simulação | 52 |
| 4.1.1. Estrutura física do manipulador..... | 52 |
| 4.1.1.1. Composição do manipulador | 52 |
| 4.1.1.2. Volume de trabalho | 55 |
| 4.1.1.3. Validação dos parâmetros e estrutura | 56 |
| 4.1.2. Curvas de acionamento..... | 57 |
| 4.1.3. Precisão de movimentação | 57 |
| 4.2. Protótipo | 58 |
| 4.2.1. Estrutura final do manipulador | 58 |
| 4.2.2. Testes experimentais..... | 60 |
| 4.2.3. Precisão do manipulador implementado | 62 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 63 |
| 5.1. Aprimoramento do trabalho..... | 63 |
| REFERÊNCIAS | 65 |

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial no século XVIII, a indústria se modificou drasticamente. Foi um longo percurso até a introdução das linhas de montagens por Henry Ford em 1913 no setor automobilístico estadunidense. Ford a introduziu de forma simples, com esteiras e empregados dispostos organizadamente, logo se espalhou para diversas indústrias, inclusive de outros setores, que viram nas linhas a eficiência e rapidez para suas produções. (MATIAS, 2014).

Aos poucos, os trabalhadores viram seus cargos sendo ocupados por robôs industriais, muito mais eficientes, aumentando muito a produtividade e rapidez em termos de lotes, sem esquecer na queda de erros humanos durante a produção. (MATIAS, 2014).

O Brasil ainda se vê atrasado no que diz respeito ao uso de robôs em instalações da indústria. Em 2017, a média de instalação era de 1,5 mil novos robôs por ano, demonstrando um volume baixo se comparado a países desenvolvidos. A Coreia do Sul, por exemplo, possui mais de 500 robôs para cada 10 mil trabalhadores, enquanto o Brasil possui em torno de 10 robôs para o mesmo grupo, demonstrando novamente o grande abismo em que nos encontramos em relação à robótica industrial. (ESTADÃO, 2017).

O que se tem de certeza é que a robótica industrial é, devido aos mais variados fatores, um setor em crescimento exponencial. Além disso, é visto para o futuro do setor a simplificação da programação, operação e manutenção dos robôs, tudo isso aliado ao aumento da conectividade e ao avanço da inteligência artificial.

A elaboração do trabalho inicia com a definição das características do manipulador – dimensões, carga suportada, graus de liberdade – e seu projeto estrutural, de acordo com a função a qual irá realizar. Com isso é possível efetuar os cálculos relativos ao torque em cada junta e definir o modelo de acionamento que pode ser utilizado. Visto sua aplicação, é interessante definir o volume de trabalho com o qual o manipulador pode interagir, o que permite um melhor gerenciamento e delimitação das áreas para sua instalação.

A modelagem e a parametrização do manipulador são realizadas de acordo com métodos de estudo da cinemática, nos quais são delimitadas as variáveis de interesse e são desenvolvidas equações a partir disso. Na sequência é sintetizada a lógica do sistema e o algoritmo para o controle é desenvolvido, sendo, logo, o conjunto simulado em *software* específico.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver um manipulador robótico para a manipulação de objetos, desde o projeto estrutural até a modelagem cinemática e implementação do protótipo, assim como realizar a análise da precisão do conjunto, ou seja, o comportamento do sistema quando envolvidos aspectos que influenciam na resolução de posicionamento, tais como atrito mecânico e limitações elétricas dos atuadores.

Para alcançar o objetivo geral, são delimitados os objetivos específicos necessários para tal:

- a) realizar uma pesquisa bibliográfica a fim de adquirir conhecimento sobre a área, como também saber o que já foi realizado na mesma;
- b) realizar um estudo e modelagem de diferentes técnicas para o controle de precisão do robô;
- c) projetar um sistema robótico em 3D conforme o necessário;
- d) desenvolver uma interface intuitiva para controle de posição angular do sistema desenvolvido;
- e) definir operações a serem realizadas pelo braço e os materiais necessários para sua implementação;
- f) realizar simulações para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido;
- g) implementar o protótipo confeccionado;
- h) realizar os testes experimentais e fazer suas análises.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados assuntos relativos à robótica, abordando desde suas aplicações, tipos de manipuladores, concepção de uma estrutura robótica, sistemas controladores, técnicas de controle e noções para modelagem cinemática e geração de trajetória.

2.1. Robótica aplicada

Segundo Santos e Gorgulho Júnior (2015), as últimas três décadas do século passado foram de fundamental importância para o desenvolvimento da robótica, a qual se reflete nos robôs disponíveis atualmente. Sendo assim, várias são as áreas que vêm aderindo aos recursos robóticos. Dentre elas se destacam os segmentos industriais de fabricação e manipulação, acabando por serem pioneiros em algumas práticas visto suas necessidades emergentes e, mais recentemente, a área médica, com avanços significativos nos âmbitos de tecnologia e precisão de tais equipamentos. A seguir são exemplificadas as principais aplicações dessas áreas que fazem uso da robótica.

2.1.1. Robótica aplicada na área industrial

De acordo com Rosário (2010), o crescimento da tecnologia vinculada à robótica trouxe grandes benefícios no setor industrial, desde sua aparição na década de 60 e principalmente a partir de 1976, com a sua popularização devido ao uso da microeletrônica. Tais benefícios se resumem a aumento de produtividade, melhoria na qualidade final do produto e redução de despesas com pessoal, os quais são, indubitavelmente, mais exigentes em vários aspectos como quanto à qualidade do ambiente de trabalho e questões contratuais empresa-empregado.

O atual estado de desenvolvimento dos robôs industriais se dá principalmente por tarefas que envolvem o controle de posicionamento e movimentação de objetos. Várias são as melhorias que vêm sendo feitas nesses equipamentos ao longo dos anos, tais como o aumento da capacidade de controle lógico e a ampliação dos tipos de comunicação, incluindo conexões seriais e redes *ethernet*. Visto isso, os robôs atuais acumulam algumas características e especificações técnicas relevantes, como está exposto no Quadro 1. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Quadro 1 – Características dos atuais robôs industriais

| Característica | Especificação |
|-----------------------|--|
| Repetibilidade | Décimos de milímetro |
| Velocidade | Até 5 m/s |
| Aceleração | Até 25 m/s ² |
| Carga admissível | Até centenas de kg |
| Relação peso/carga | Em torno de 30 a 40 |
| Número de eixos | 6 (tipicamente) |
| Comunicação | Profibus, Ethernet, canais seriais (RS 232, 485) |
| Capacidade de E/S | Similares a um CLP para sinais analógicos e digitais |

Fonte: SANTOS, 2015.

Ainda de acordo com Santos e Gorgulho Júnior (2015), as tarefas realizadas pelos robôs industriais podem ser classificadas em três tipos de naturezas básicas: a movimentação, a medição e a manipulação.

Na movimentação, destacam-se operações de embalagem, classificação e manuseio de peças e tarefas de carga e descarga, incluindo a paletização. Isso demonstra a capacidade de trabalho e a ampla gama de opções atribuíveis a esses tipos de equipamento. A medição se caracteriza pela inspeção de objetos, podendo o robô, por exemplo, analisar superfícies e detectar falhas no processo produtivo utilizando, para isso, sensores e *encoders* específicos para tais finalidades. Por fim, a manipulação envolve outros processos bem delimitados que podem ser executados pelo aparelho, tais como soldagem de materiais, pintura, processos de furação e fresagem, cortes a laser e montagem de peças. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Um fator que deve ser levado em consideração ao adquirir um equipamento deste nível é o custo envolvido. O preço de um robô é alto se julgado isoladamente, porém, quando analisado junto com outros fatores, como a posterior economia devido à substituição de funcionários e ao aumento da taxa de produção, o investimento se torna plausível dentro de um tempo de retorno, sendo esse tempo variável de acordo com o tipo de indústria e a aplicação do equipamento. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

2.1.2. Robótica aplicada na área médica

De acordo com Galeano (2016), a robótica inserida na área médica não se aplica exclusivamente no âmbito cirúrgico, como também está presente na robótica assistencial, de

reabilitação e no ramo não-cirúrgico, relativo a diagnósticos e treinamento do profissional. Dentre esses, os braços robóticos se destacam no campo assistencial e no cirúrgico.

Na robótica assistencial, o objetivo é dar suporte a pessoas com deficiência, limitações de movimentação ou em situação enferma, podendo um braço alcançar um objeto inacessível ou distante, assim como substituir algum membro no caso de próteses biônicas. Já a robótica cirúrgica se refere à aplicação dos robôs nas diferentes técnicas dessa área, sendo comandados no próprio local ou à distância por um cirurgião qualificado, a fim de realizar o procedimento com mais qualidade, rapidez e segurança, permitindo, também, a recuperação do paciente em um tempo mais curto. (GALEANO, 2016).

O Quadro 2 apresenta uma comparação, obtida após um estudo, entre três técnicas cirúrgicas utilizadas no tratamento do cancro do endométrio (câncer que inicia no revestimento do útero), sendo elas: a laparotomia (cirurgia com corte/abertura da cavidade abdominal), a laparoscopia (cirurgia minimamente invasiva baseada na inserção de aparelhos através de pequenas incisões, tendo como auxílio câmeras em suas extremidades) e a cirurgia robótica. A partir disso, é possível notar as vantagens do uso de robôs nessas operações, principalmente no período pós-operatório. (ANJOS, 2017).

Quadro 2 – Resultados comparativos entre as três técnicas cirúrgicas no tratamento do cancro do endométrio

| | Laparotomia | Laparoscopia | Robótica |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| Tempo operatório | ↓ (79-130 min.) | ↑↑ (204 min.) | ↑ (177 min.) |
| Tempo de hospitalização | ↑ (3-4,4 dias) | ↓ (1,2-3 dias) | ↓↓ (1 dia) |
| Perdas hepáticas | ↑ (200-241mL) | ↓ (100-250mL) | ↓↓ (100-105mL) |
| Complicações pós-operatórias | ↑ | ↓ | ↓ |
| Dor | ↑ | ↓ | ↓ |
| Custos farmacêuticos | ↑ | ↓ | ↓ |
| Tempo de recuperação | ↑ (52 dias) | ↓ (31,6 dias) | ↓↓ (24,1 dias) |
| Tempo para retorno ao trabalho | ↑ | ↓ | ↓↓ |

Legenda: ↓ (inferior), ↓↓ (muito inferior), ↑ (superior), ↑↑ (muito superior).

Fonte: ANJOS, 2017, modificado.

Segundo Sabater-Navarro et al. (2013), o robô, quando inserido na área médica cirúrgica, representa uma mudança radical quanto ao trabalho desenvolvido pelo cirurgião, assim como uma readaptação dos outros profissionais envolvidos na operação. Essa mudança requer uma troca de conceitos sobre o ambiente cirúrgico, no qual haverá a parceria médico-robô ao invés de ambos realizarem o procedimento de forma individual.

Nesse âmbito, robôs como o Da Vinci da Intuitive Surgical são pioneiros nesta integração dentro de uma sala cirúrgica, estando, além disso, em constante evolução com o intuito de aumentar a sua eficiência de trabalho e ergonomia, permitindo a ampliação da gama de procedimentos realizáveis pelos mesmos. A Figura 1 apresenta o robô Da Vinci Xi, uma das mais avançadas ferramentas para a realização de cirurgias minimamente invasivas da atualidade. (SABATER-NAVARRO et al., 2013).

Figura 1 – Robô Da Vinci Xi



Fonte: Intuitive Surgical, 2020.

2.2. O manipulador robótico

A fim de entender como se dá o funcionamento de todo o conjunto do robô, é necessário conhecer os principais tipos e as partes que compõem o sistema. Dentre elas é possível citar a estrutura, os componentes, os modos de acionamento, o princípio de funcionamento e as técnicas de controle. A seguir são apresentados esses grupos e suas subdivisões.

2.2.1. Tipos de manipuladores

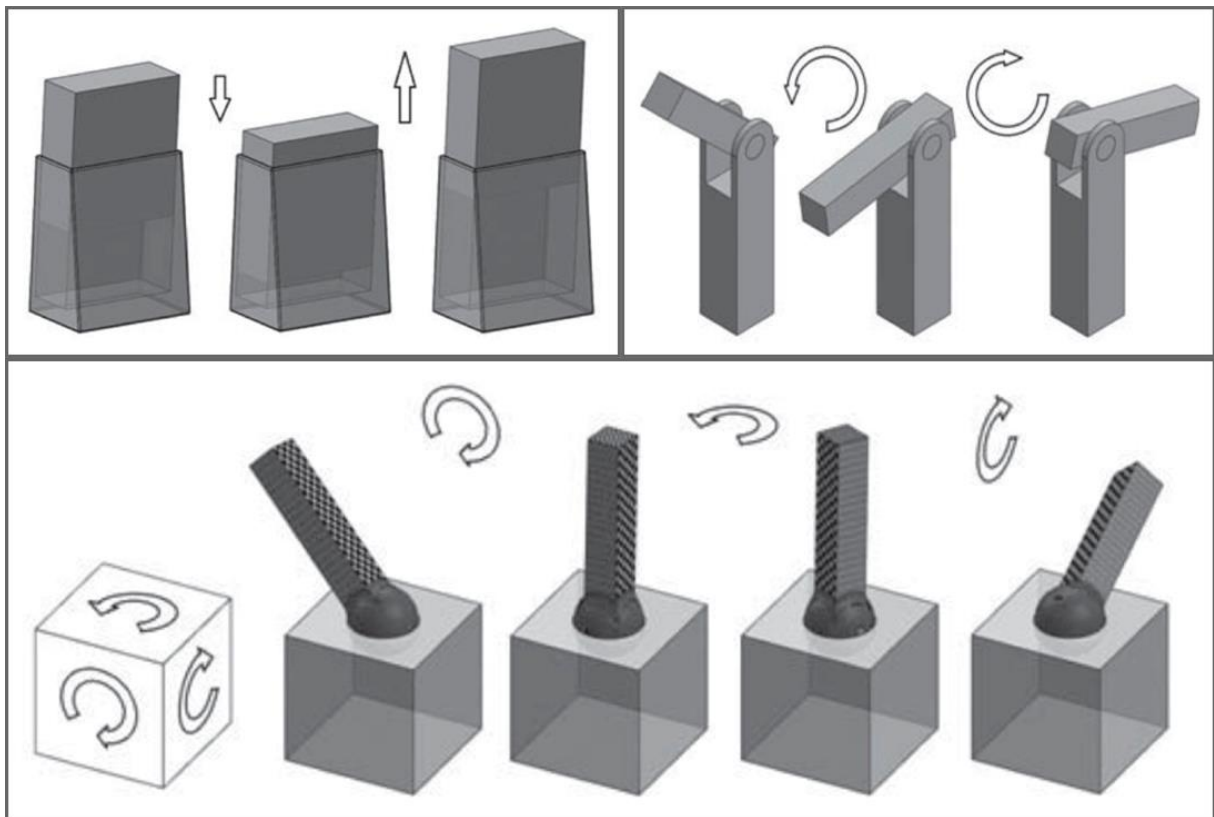
Para ter uma visão geral do funcionamento dos manipuladores robóticos, serão apresentados os principais modelos disponíveis no mercado atualmente. Essa classificação se dá usualmente de acordo com o tipo de junta utilizada, podendo ser a prismática, a rotacional ou a esférica, determinando também as funções predominantes em cada um desses modelos. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

As juntas prismáticas são também conhecidas como juntas lineares ou deslizantes, sendo seu movimento em linha reta. Podem assumir um curso telescópico, como é o caso de macacos hidráulicos, ou ao longo de um trilho, como um cabeçote de uma impressora. Esse tipo de junta apresenta um grau de liberdade, visto sua movimentação limitada a uma dimensão (linha). (SANTOS, F.; WATANABE; CARRARA, 2006; SANTOS, W.; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

As juntas rotacionais ou juntas de revolução são caracterizadas pelo movimento em torno de um eixo de rotação, sendo esse eixo paralelo ou perpendicular ao elo diretamente ligado à junta, proporcionando um movimento do tipo giro no próprio eixo ou de dobradiça, respectivamente. Esse modelo possui um grau de liberdade pela capacidade ou de percorrer uma linha circular imaginária ou de girar no próprio eixo. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Já as juntas esféricas podem ser definidas como um arranjo de três juntas rotacionais, possibilitando três diferentes movimentações, logo, três graus de liberdade. Isso se dá pois é possível percorrer uma área, além de rotacionar no próprio eixo com elas. A Figura 2 relaciona as três variedades de juntas supracitadas. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Figura 2 – Tipos de juntas utilizadas em manipuladores robóticos: prismática (esquerda), rotacional (direita) e esférica (inferior)



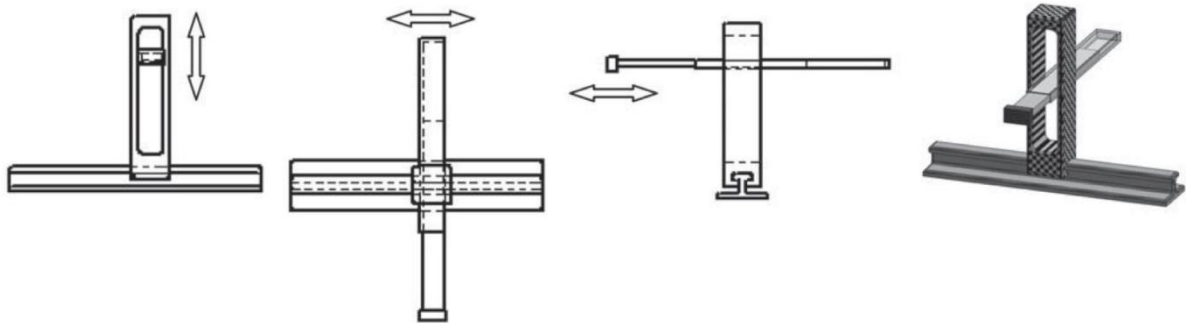
Fonte: SANTOS, 2015.

Dentre os tipos de manipuladores mencionados anteriormente, estão resumidamente descritos abaixo os seguintes modelos: cartesiano, cilíndrico, esférico, SCARA e articulado. É interessante definir o termo rigidez mecânica, de acordo com Carrara (2015, p. 39), como “a capacidade do braço robótico de resistir ao movimento causado por uma força ou torque na extremidade do punho”, a fim de compreender essa característica individual em cada modelo. Na sequência são apresentados os modelos robóticos supracitados.

2.2.1.1. Robô cartesiano (TTT)

Nessa classe de manipulador são utilizadas três juntas prismáticas, obtendo um volume de trabalho cúbico, sendo assim aplicado principalmente em sistemas de armazenagem. Devido à ortogonalidade, esse modelo também apresenta uma boa rigidez mecânica, ao mesmo passo que possui uma habilidade de posicionamento limitada pela ausência de controle angular. A Figura 3 ilustra esse modelo de robô. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Figura 3 – Estrutura de um robô cartesiano

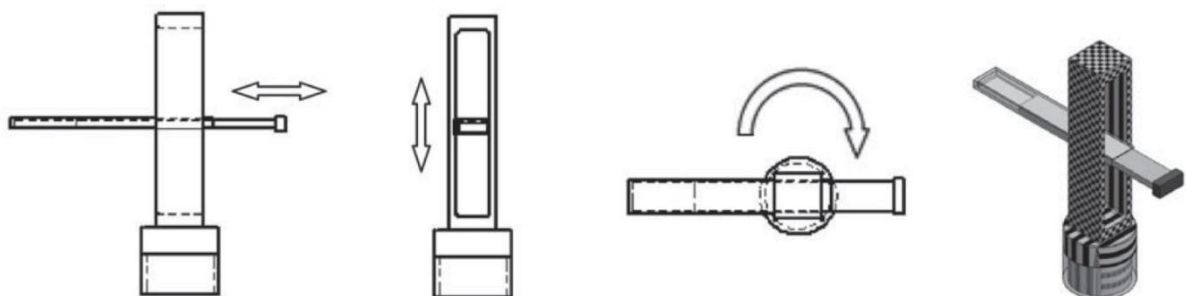


Fonte: SANTOS, 2015, adaptado.

2.2.1.2. Robô cilíndrico (RTT)

Esse modelo difere do anterior pelo fato de que a junta prismática fixada na base é substituída por uma junta rotacional, totalizando três graus de liberdade. A partir disso, é possível trabalhar com um ângulo, resultando em um volume de trabalho do tipo casco cilíndrico. Essa configuração possui uma rigidez mecânica satisfatória, apesar de ter um posicionamento horizontal limitado, visto sua posição fixa na base, e é aplicado em funções de movimentação de objetos/estruturas, como carga e descarga. A Figura 4 apresenta um robô desse modelo. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Figura 4 – Estrutura de um robô cilíndrico



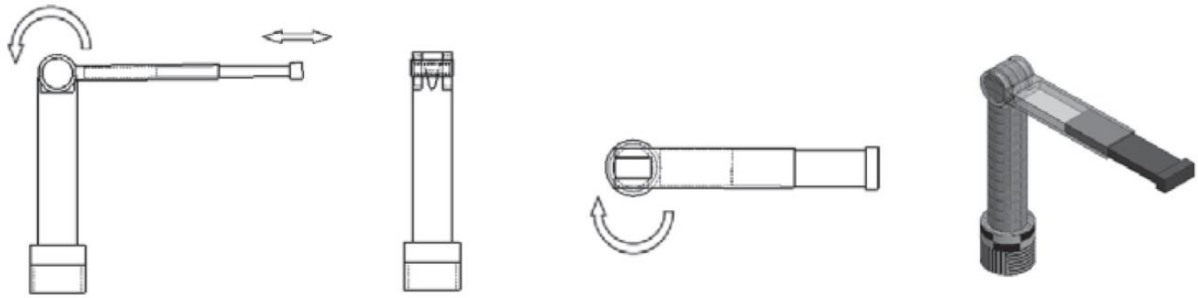
Fonte: SANTOS, 2015, adaptado.

2.2.1.3. Robô esférico (RRT)

Denominado RRT, esse tipo possui duas juntas rotativas e uma junta linear no seu membro terminal. Dessa forma, o robô possui três graus de liberdade e é capaz de trabalhar em

um volume no formato de um casco esférico. Mesmo apresentando uma rigidez mecânica e resolução de trabalho menores do que os modelos anteriores, é amplamente utilizado nas áreas de fundição, usinagem e manuseio de materiais em geral. A Figura 5 demonstra um robô esférico. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Figura 5 – Estrutura de um robô esférico

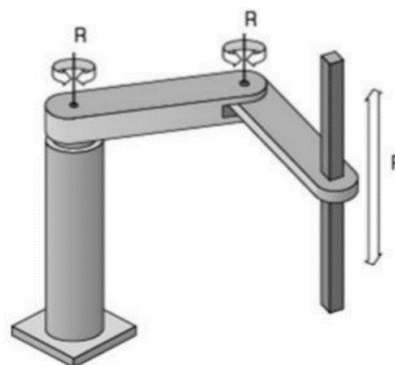


Fonte: SANTOS, 2015, adaptado.

2.2.1.4. Robô SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm - RRT*)

Também denominado RRT, esse modelo possui as mesmas juntas do anterior, porém arrançadas de forma diferente. As duas juntas rotativas possuem eixos verticais paralelos (não concêntricos), ao passo que a junta linear, também com movimento paralelo aos eixos, está localizada na extremidade do robô. Esse arranjo possibilita um maior volume de trabalho, assim como alta velocidade de trabalho e ótima resolução. Sua aplicação se dá no manuseio de objetos, inspeção de linha de produção e embalagem, montagem de circuitos eletrônicos, dentre outras. A Figura 6 ilustra este modelo. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015; SILVEIRA, 2019).

Figura 6 – Estrutura de um robô SCARA

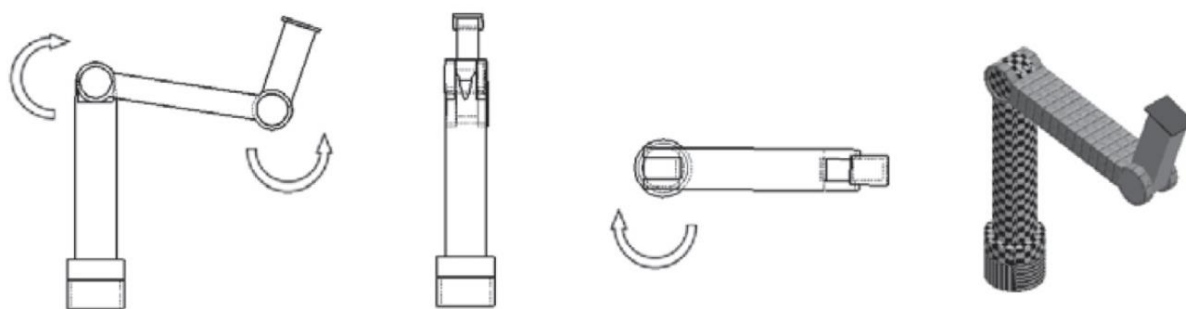


Fonte: ROSÁRIO, 2005.

2.2.1.5. Robô articulado (RRR)

Demandando um controle de posicionamento mais complexo, os robôs articulados possuem três juntas rotativas na sua configuração mais básica com três graus de liberdade. Diante disso, a rigidez mecânica é prejudicada, tal como a resolução se torna variável dentro do volume de trabalho. Por outro lado, a flexibilidade de posicionamento é superior aos outros modelos, possibilitando sua implementação em ambientes de manipulação, medição, carregamento e funções de corte e soldagem de materiais. A estrutura desse modelo é demonstrada na Figura 7. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015; SILVEIRA, 2019).

Figura 7 – Estrutura de um robô articulado



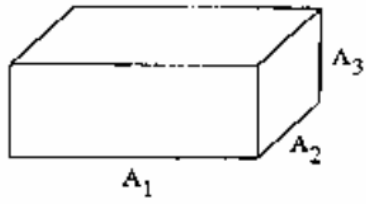
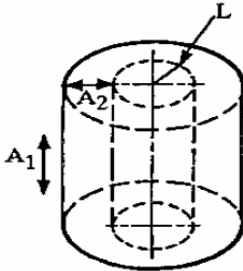
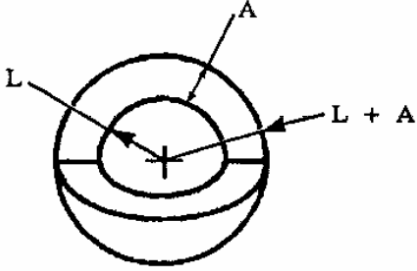
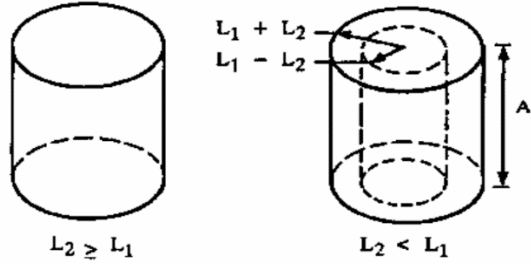
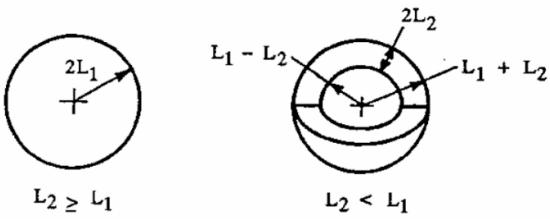
Fonte: SANTOS, 2015, adaptado.

2.2.1.6. Volume de trabalho dos robôs

A fim de comparar um importante parâmetro na especificação destes robôs, o Quadro 3 traz uma relação da área de trabalho dos manipuladores citados anteriormente. Isso é relevante pois cada ambiente de trabalho demanda diferentes posições e variados deslocamentos do manipulador. As ilustrações dos volumes desconsideram o volume do próprio manipulador a fim de facilitar o entendimento. As medidas “L” são os tamanhos dos elos de cada robô.

Outra forma de obter o volume de trabalho (*workspace*) de um manipulador é utilizando recursos computacionais, nos quais é possível submeter uma grande quantidade de informação e utilizar métodos numéricos para a resolução, uma vez que equipamentos mais complexos – com mais graus de liberdade – podem gerar processos com muitas variáveis para a aplicação de uma resolução analítica.

Quadro 3 – Volumes de trabalho de diferentes modelos de robôs

| Modelo | Volume de trabalho | Representação |
|------------|---|--|
| Cartesiano | $A_1 A_2 A_3$ |  |
| Cilíndrico | $\pi A_1 ((L + A_2)^2 - L^2)$ |  |
| Esférico | $\frac{4\pi}{3} ((L + A)^3 - L^3)$ |  |
| SCARA | <p>Para $L_1 > L_2$:</p> $\pi A ((L_1 + L_2)^2 - (L_1 - L_2)^2)$ <p>Para $L_1 \leq L_2$:</p> $\pi A (L_1 + L_2)^2$ |  |
| Articulado | <p>Para $L_1 > L_2$:</p> $\frac{4\pi}{3} ((L_1 + L_2)^3 - (L_1 - L_2)^3)$ <p>Para $L_1 \leq L_2$:</p> $\frac{4\pi}{3} (L_1 + L_2)^3$ |  |

Fonte: SANTOS, 2003-2004.

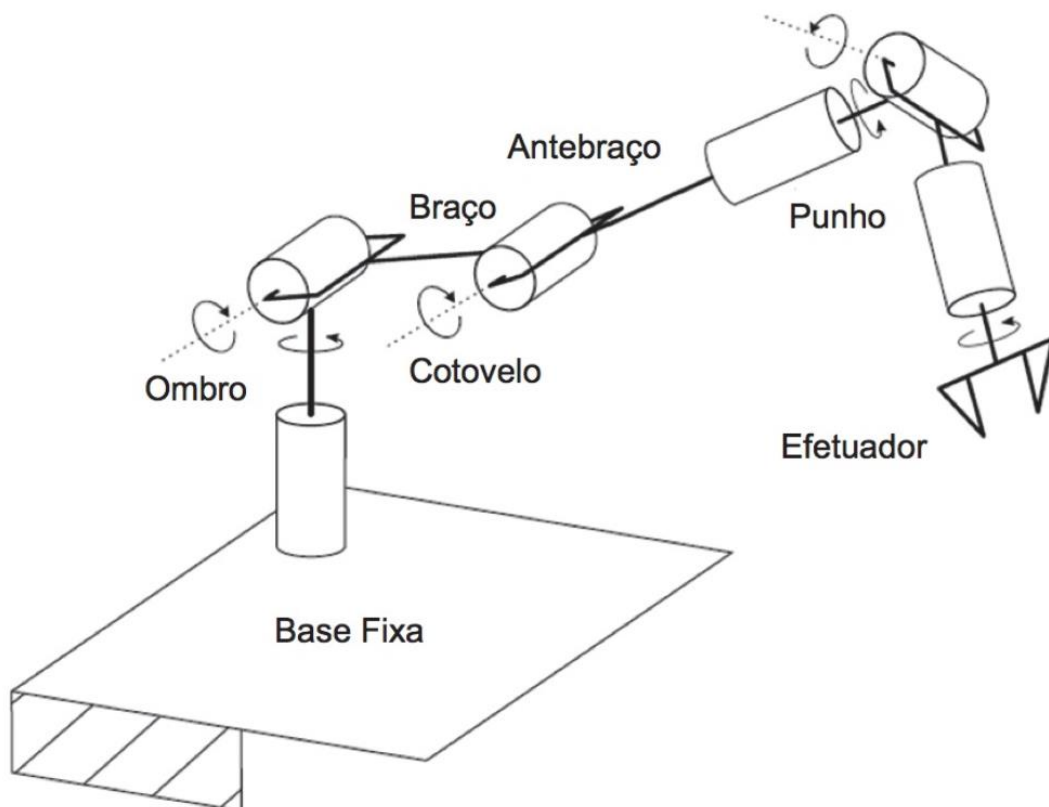
2.2.2. Estrutura de um braço robótico

A partir do que foi visto, esse capítulo tratará a respeito da estrutura de um braço articulado, modelo foco do trabalho. Dessa forma, serão abordadas suas características construtivas, incluindo a base, os elos, as juntas, os atuadores ou motores elétricos utilizáveis para a movimentação, os componentes auxiliares como sensores e os materiais que podem ser utilizados para a concepção do equipamento.

2.2.2.1. Estrutura de sustentação

Tendo o modelo de braço articulado como parâmetro é pertinente estabelecer uma comparação entre este e um braço humano, no que diz respeito aos graus de liberdade, visto suas semelhanças. Para tal, a Figura 8 faz um paralelo entre eles, relacionando as articulações e os movimentos em um braço robótico com seis graus de liberdade.

Figura 8 – Comparação das articulações e dos movimentos de um braço robótico com os de um braço humano



Fonte: SANTOS, 2015.

Conforme Santos e Gorgulho Júnior (2015), em relação às partes, os elos de um braço são as estruturas rígidas, que estão entre duas juntas, como exemplo o braço e o antebraço, de acordo com a figura acima. Uma junta tem a função de fazer a ligação entre dois elos e proporcionar o movimento atribuído a ela, seja linear, rotacional ou esférico (vide capítulo anterior), funcionando, assim, como a articulação do ombro, cotovelo ou punho, por exemplo.

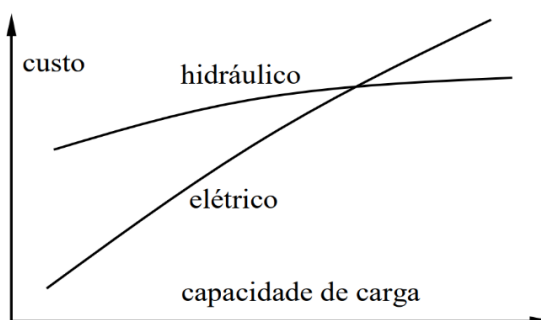
Na extremidade do manipulador, o efetuator é qualquer dispositivo que seja utilizado para a execução da atividade a qual o robô está encarregado, podendo ser desde uma garra para pegar objetos, uma ferramenta de corte ou solda ou até mesmo um instrumento com câmera utilizado em cirurgias robóticas minimamente invasivas. No outro extremo, o braço é fixado em uma base, seja ela fixa como o chão ou uma parede ou móvel como uma bancada com rodas. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

2.2.2.2. Servoacionamento elétrico

Diferentemente dos sistemas hidráulicos e pneumáticos, os sistemas de acionamento elétricos são empregados em robôs de menor porte, uma vez que não viabilizam muita velocidade ou potência se comparado aos outros. Em contrapartida, esse modelo de acionamento alcança uma precisão superior, sendo ainda maior se combinado com transmissões redutoras para aumentar o torque. (CARRARA, 2015).

O conjugado – torque – de um motor elétrico é proporcional ao seu custo, assim como ao seu tamanho e, como citado antes, é possível realizar um acoplamento de transmissão redutora para minimizar a despesa de acordo com a proposta de uso: mais velocidade ou mais força. Nos sistemas hidráulicos, o custo também cresce de acordo com o torque, porém de uma forma mais lenta, validando suas aplicações em atividades as quais demandem maior esforço. A Figura 9 apresenta uma relação entre os dois tipos de acionamento. (CARRARA, 2015).

Figura 9 – Relação de custo entre sistemas de acionamento hidráulicos e elétricos



Fonte: CARRARA, 2015.

Para a compreensão do funcionamento desses dispositivos é relevante a diferenciação de um sistema de malha aberta e um sistema de malha fechada, dado que os diferentes tipos de atuadores utilizam essa característica de forma distinta.

Em um sistema de malha aberta, não há medições na saída do sistema, logo, não há uma análise do comportamento obtido pelo sistema de controle. A partir disso, quaisquer outros sinais, também denominados perturbações, são somados à saída desse sistema e causam erros. No caso dos robôs, esses erros se traduzem em falhas de posicionamento e perda de precisão e as perturbações normalmente ocorrem devido aos acoplamentos dinâmicos e variações inerciais. (MARIANO et al., 2013).

Por outro lado, nos sistemas com realimentação ou de malha fechada, o sinal de saída é comparado a um valor pré-definido, resultando em um erro. Diante disso, o controlador efetuará o ajuste necessário por meio de algoritmo específico a fim de reduzir esse erro a zero. Isso se faz possível com a utilização, no caso dos robôs, de sensores de posição e angulares, que identificam se a posição final está de acordo com o desejado. (CARRARA, 2015).

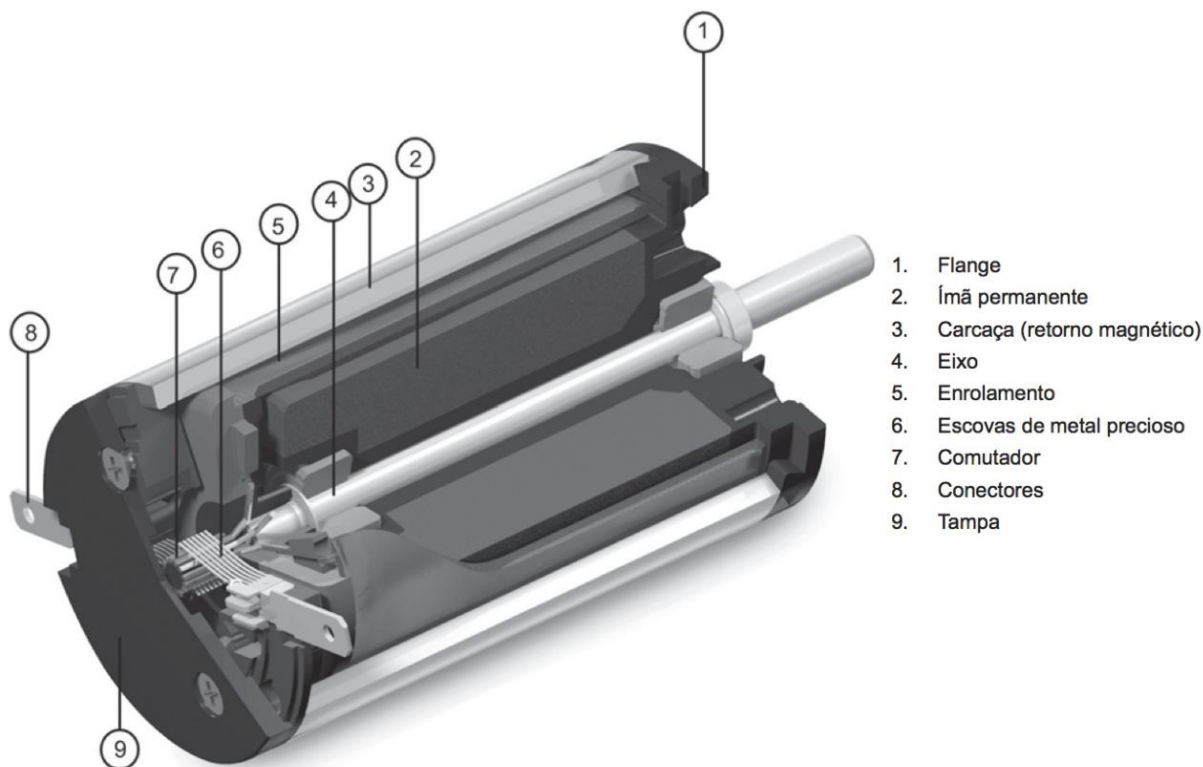
Dentre os principais tipos de servoposicionadores está o motor de corrente contínua. A seguir, serão abordados os principais conceitos sobre esse modelo, apontando suas características, aplicações, vantagens e desvantagens.

2.2.2.2.1. Motores de corrente contínua (CC)

Segundo Santos e Gorgulho Júnior (2015), os motores de corrente contínua (CC) foram a primeira escolha aplicada à área da robótica em substituição aos acionamentos hidráulicos. Nessa categoria, técnicas foram aprimoradas com o passar dos anos e diferentes tipos construtivos são encontrados atualmente, sendo os modelos mais comuns com Núcleo de Ferro (Iron Cored) e Sem Escovas (Brushless).

No motor com núcleo de ferro é possível classificar duas partes principais, sendo elas: o estator contendo um campo magnético e o rotor com as bobinas montadas nas ranhuras do núcleo de ferro. Para que seja levada a corrente para as bobinas, esse motor conta com um comutador e escovas ligadas aos conectores de energia. Dessa forma, é o modelo mais comum utilizado atualmente e sua estrutura interna está representada na Figura 10. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Figura 10 – Estrutura interna de um motor de corrente contínua (CC)

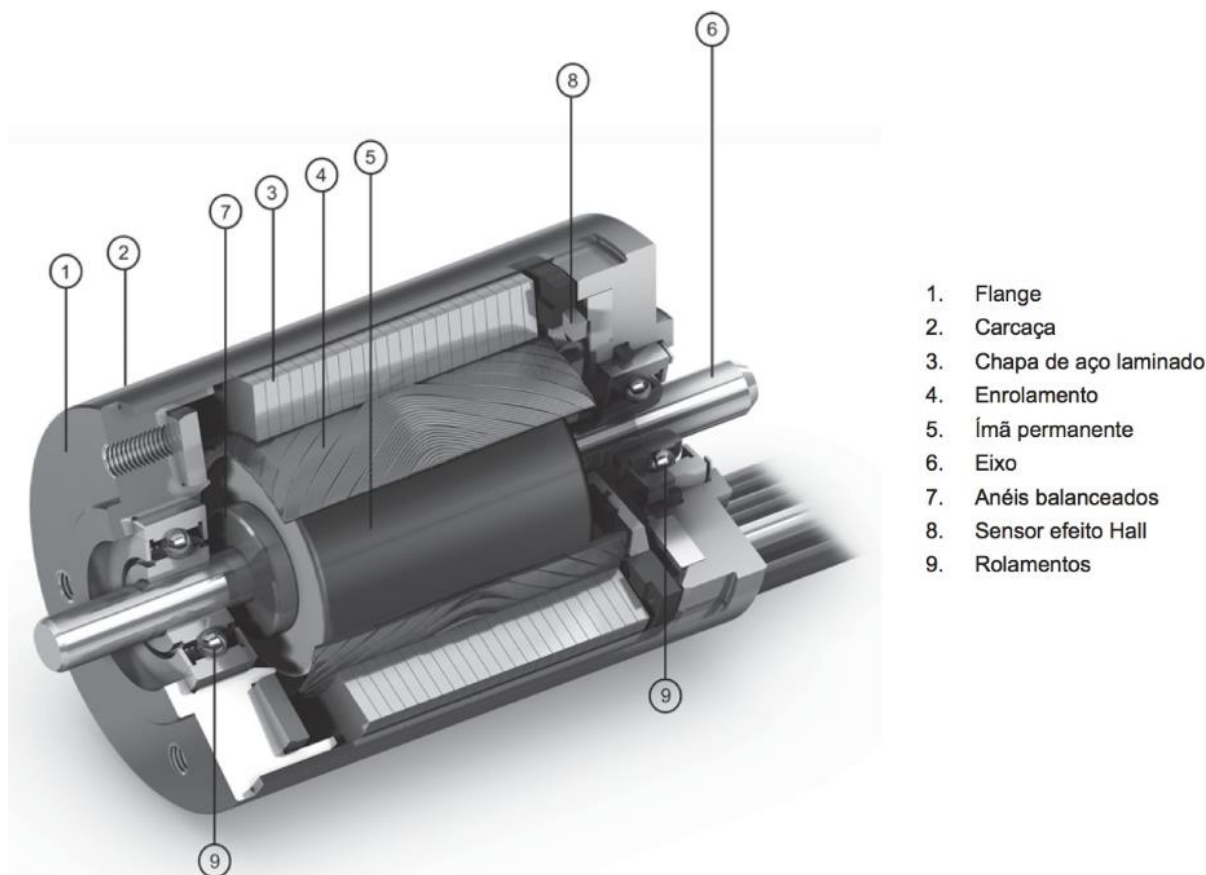


Fonte: SANTOS, 2015.

Ao contrário do modelo anterior, em um motor do tipo sem escovas o núcleo de ferro é montado no estator do equipamento juntamente com as bobinas, trazendo um conjunto de ímãs permanentes em seu rotor, como apresenta a Figura 11. Dessa forma, um problema pertinente nos motores com núcleo de ferro – a dissipação do calor gerado pela circulação da corrente nos enrolamentos – é reduzido significativamente visto sua localização na carcaça e não mais no rotor da máquina. (CARRARA, 2015; SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Posto isso, um motor sem escovas é capaz de obter uma relação potência de saída por tamanho mais interessante, dado que questões como dilatação térmica, deformações estruturais e erros geométricos não têm mais influência como no outro modelo. Nessa linha, outro ponto de vantagem é a ausência do comutador e das escovas, como o próprio nome pressupõe, transferindo a função desses agora para o sistema de comutação eletrônica. Isso torna o motor mais seguro e amplia as condições e os ambientes nos quais pode operar, uma vez que a manutenção é reduzida substancialmente. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Figura 11 – Estrutura interna de um motor sem escovas (brushless CC)



Fonte: SANTOS, 2015.

Inserido em um ramo específico dos motores de corrente contínua, o servomotor é formado por um motor CC, um conjunto de engrenagens redutoras de velocidade e um sensor de posição, considerando seu regime de trabalho em malha fechada. Dessa maneira, esses equipamentos possuem características próprias, das quais se destacam a ótima relação de torque final por tamanho e a facilidade de controle, uma vez que a regulação angular é feita por um sinal digital do tipo PWM (Pulse Width Modulation). (CARRARA, 2015).

Na área da robótica, a aplicação desse modelo de motor é constante em consequência dessas vantagens. Em sua estrutura interna é possível encontrar além do motor e das engrenagens, um circuito de controle, o qual é responsável pela análise do sinal de entrada e posterior determinação da posição angular do eixo final. A Figura 12 apresenta as estruturas internas de um servomotor e como exemplo o modelo LF-20mg da Power HD, componente disponível atualmente no mercado capaz de fornecer um torque de 20kg.cm. (UNESP, 2013).

Figura 12 – Estrutura interna de um servomotor (esquerda) e exemplo de modelo comercial (direita)



Fonte: UNESP, 2013.

2.2.2.3. Sistema de transmissão

Um aspecto importante na aplicação dos atuadores é a questão da transmissão de força, podendo ser direta ou indireta. Na transmissão direta, o rotor do motor é acoplado imediatamente à junta, sem intermediários. Por outro lado, na transmissão indireta existe o uso de algum tipo de acoplamento para realizar a transferência do torque para a junta. Como exemplo de acopladores estão as correias, as polias, as rodas dentadas e os parafusos sem-fim. (SANTOS, 2003-2004).

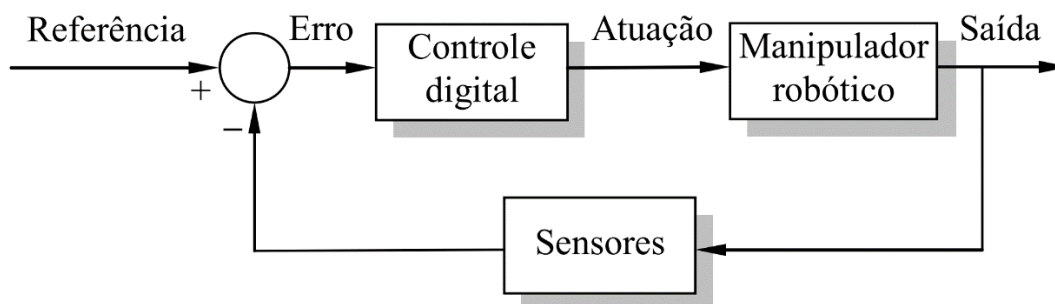
Apesar de o modelo indireto apresentar vantagens como o aumento do torque em detrimento da velocidade, é relevante analisar alguns efeitos indesejados no desempenho do conjunto, dado que folgas nas engrenagens e escorregamento do sistema de polias podem afetar a eficiência geral do sistema. Quanto ao sistema direto, o seu uso acontece principalmente na primeira junta do motor com a base, levando em consideração que a força necessária nessa ligação é maior e conseqüentemente o tamanho e peso do motor aumenta, limitando sua colocação nas próximas juntas. (CARRARA, 2015; SANTOS, 2003-2004).

2.2.3. Sistema controlador

De acordo com Carrara (2015, p. 30), “o sistema de controle de qualquer robô é realizado por meio de um sistema de ‘software’ e ‘hardware’”. Este sistema processa os sinais de entrada e converte estes sinais em uma ação ao qual foi programado.” Dessa forma, o circuito

controlador utiliza a referência que lhe foi dada (comando) para definir o que é necessário realizar e, se for o caso, o sinal da malha fechada (leitura dos sensores), a fim de comparar ambos e executar a rotina para reduzir os possíveis erros a zero. A Figura 13 esquematiza de forma simplificada um sistema de malha fechada.

Figura 13 – Esquema simplificado de um sistema de malha fechada



Fonte: CARRARA, 2015.

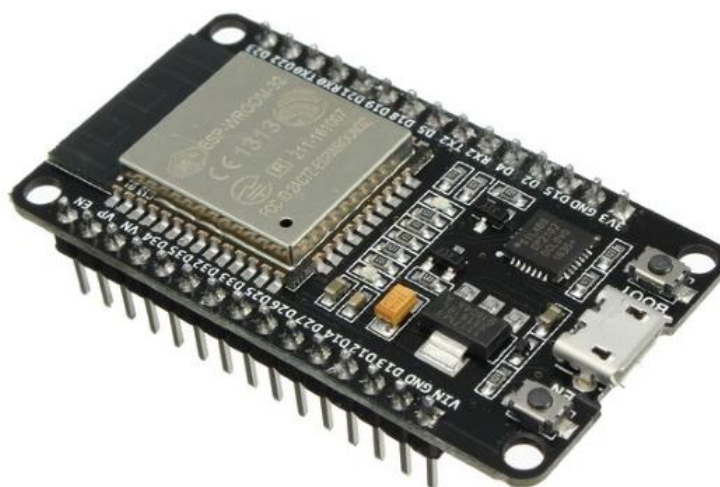
A interface de controle homem-máquina geralmente é feita por meio de um teclado, joystick, ou mesmo um teach box, dispositivo próprio para programação e acompanhamento de processos do robô. Na sequência são apresentados alguns pontos essenciais para a realização do controle de um braço robótico microcontrolado. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

2.2.3.1. Microcontrolador

Ocupando a posição central no quesito de controle, o microcontrolador é o componente responsável pelo constante comando e monitoração das juntas e dos sensores, respectivamente. Esse *hardware* se vale dos sinais de referência recebidos e dos sinais da malha fechada para fazer o ajuste necessário e atuar sobre os motores, a fim de atingir a posição desejada com o manipulador. (SANTOS, 2003-2004).

Um exemplo de microcontrolador é o ESP32. Seu funcionamento ocorre da mesma forma como na plataforma Arduino, bem como utiliza a mesma interface/*software* para a programação, porém com outros *drivers* e especificações mais arrojadas. A Figura 14 apresenta um modelo do ESP32.

Figura 14 – Modelo do ESP32



Fonte: Espressif Systems, 2020.

Para que as funções sejam executadas, o microcontrolador possui em seu algoritmo algum tipo de função de controle, sendo que as mais comuns são os controles on-off, proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID). Neste tópico, será assumido que $u(t)$ é a saída do sistema (variável controlada) e $e(t)$ é a diferença entre a saída desejada e a saída real apresentada pelo sistema, correspondendo ao erro atuante apresentado na Figura 16. (SANTOS, 2003-2004; OGATA, 2010).

2.2.3.1.1. Controle on-off

Em um sistema de controle on-off, também chamado de controle de duas posições, o elemento atuante possui apenas dois estados, geralmente o ligado (on) e o desligado (off). Seu uso é bastante empregado em controles domésticos e industriais, uma vez que é de fácil implementação e baixo custo. (OGATA, 2010).

Seu funcionamento é baseado em permanecer no valor máximo ou mínimo de acordo com o sinal de erro, se este é positivo ou negativo. Dessa forma, é possível assumir que

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$

no qual U_1 e U_2 são constantes, além de que U_2 é muitas vezes igual a zero ou mesmo igual a $-U_1$. Por fim, um ponto interessante nesse sistema é a definição de uma área de transição entre a primeira e a segunda condição, isso evita que determinados sistemas comutem entre ambos de forma intermitente ou descontrolada. (OGATA, 2010).

2.2.3.1.2. Controle proporcional (P)

Já em um controle do tipo proporcional (P), a saída é representada pelo produto do erro $e(t)$ com uma constante K_p , também conhecida como ganho proporcional. Assim, a saída é representada por

$$u(t) = K_p e(t),$$

sendo que este ganho proporcional é frequentemente um amplificador com ganho ajustável. (OGATA, 2010).

Quando o controle é puramente proporcional, um erro estacionário (erro de offset) é gerado. Isso ocorre devido à correlação entre a saída e o erro, na qual aquela é proporcional a este, dessa forma sempre que houver uma saída diferente de zero, haverá um erro diferente de zero. (OGATA, 2010).

2.2.3.1.3. Controle proporcional-integral (PI) e proporcional-derivativo (PD)

Acompanhando o conceito anterior, os controles proporcional-integral (PI) e proporcional-derivativo (PD) adicionam em sua configuração um termo integrador e um derivativo, respectivamente, com seus devidos ganhos. Posto isso, esses termos aparecem em cada uma das equações da saída, como é apresentado abaixo, em ordem. (OGATA, 2010).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

No modelo proporcional-integral, a falha do sistema anterior é corrigida, uma vez que sua ação é proporcional à magnitude do erro, assim, o erro existente no sistema é reduzido consideravelmente e de uma forma mais rápida. Por outro lado, o controlador proporcional-derivativo possui uma ação que é proporcional à velocidade de variação do erro, isso resulta na aceleração do tempo de resposta bem como na melhoria da estabilidade do sistema, apresentando uma correção antecipada do erro. (OGATA, 2010).

2.2.3.1.4. Controle proporcional-integral-derivativo (PID)

Combinando as três formas de controle, é obtido o controle proporcional-integral-derivativo, ou simplesmente PID. Este modelo agrega as vantagens individuais de cada um dos

tipos anteriores, ou seja, um controle que reduz o erro a zero e com a velocidade desejada. A seguir é apresentada a equação da saída de um sistema desse tipo. (OGATA, 2010).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

2.2.3.2. Algoritmo de controle

Em um contexto geral, no que tange aos métodos de programação, é possível planejar os movimentos de um manipulador de duas maneiras. A primeira se refere ao método direto, no qual há a necessidade de interagir diretamente com o robô de tal forma que, conforme o braço é movimentado, a trajetória deste é gravada para que seja executada de forma automática posteriormente, tendo, logicamente, uma programação do controlador para tal aquisição de dados. (ROSÁRIO, 2005; SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Como alternativa, tem-se o método indireto. Neste processo, a linguagem é escrita em um dispositivo separado do manipulador, de forma off-line. Dessa forma, algumas vantagens podem ser citadas, que vão desde não ser necessário interromper uma linha de produção por conta da reprogramação de uma máquina até questões de segurança, eliminando possíveis acidentes com a movimentação de robôs com dimensões maiores, como é preciso no primeiro caso. (ROSÁRIO, 2005; SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Comercialmente, robôs utilizam algumas linguagens de alto nível desenvolvidas para facilitar de certa forma a programação dos equipamentos. Porém, a partir do momento em que o manipulador é construído desde o começo, assim como seus comandos, é necessário trabalhar com algumas linguagens de mais baixo nível, como é o caso do C++, ou mesmo programas gráficos, como o MATLAB®. (SANTOS, F.; WATANABE; CARRARA, 2006; SANTOS, W.; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

De acordo com Rosário (2005), os níveis de programação ainda podem ser divididos em quatro níveis de entendimento, sendo o nível de junta, nível de manipulador, nível de objeto e nível de objetivo. No nível de junta, cada uma destas necessita de uma ordem individual para que a posição final do robô possa ser alcançada. Já no nível de manipulador é preciso informar apenas a posição final do manipulador, sendo que nesse caso as posições das juntas são encontradas por meio do modelo geométrico inverso do robô.

No nível de objeto, se faz necessário unicamente a posição do objeto, o qual deve estar dentro do volume de trabalho do robô, sendo para isso necessário também um modelo matemático que represente tal volume. Por fim, no nível de objetivo, as informações são

passadas ao manipulador em alto nível, como exemplo a frase “Montar as peças A e B”, envolvendo todo um conjunto de dados relativos ao volume de trabalho e ao posicionamento das peças já incluídos no código fonte. (ROSÁRIO, 2005).

2.3. Modelagem do sistema

Ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento no campo da modelagem permitiu a implantação dos cálculos em dispositivos microprocessados dentro das indústrias, promovendo, com isso, diversas melhorias tanto na velocidade como na qualidade dos processos. (SANTOS; GORGULHO JÚNIOR, 2015).

Neste capítulo, serão abordados alguns conceitos clássicos na modelagem de sistemas robóticos, tais como cinemática, parâmetros para análise de precisão e técnicas para controle de trajetórias.

2.3.1. Cinemática

Conforme Carrara (2015, p. 51), “a cinemática trata do estudo dos movimentos dos robôs sem considerar as causas que lhes dão origem. Por sua vez, a dinâmica é o estudo do movimento levando-se em conta as forças e torques que os causam.” Dessa forma, para abordar sobre os movimentos, é necessária a aplicação de técnicas a fim de representar uma dada posição do braço no tempo.

Dos tipos de manipuladores disponíveis, os modelos articulados possuem uma cinemática mais complexa se comparada aos outros, visto suas juntas do tipo rotacional. Mesmo assim, se faz necessária a análise de cada tipo de robô de forma individual, considerando suas dimensões, tipos de juntas, graus de liberdade e planos de movimentação. (CARRARA, 2015).

A seguir, são tratadas algumas das técnicas de modelagem para sistemas robóticos, dentre elas a cinemática direta, o modelo de Denavit-Hartenberg e a cinemática inversa.

2.3.1.1. Cinemática direta

O conceito base da cinemática direta, também conhecido como modelo geométrico, é o fornecimento das variáveis de junta, ou seja, o ângulo ou deslocamento de cada uma, de modo a obter o posicionamento final do órgão terminal do braço em coordenadas cartesianas. A partir disso, a implementação da cinemática direta se resume na determinação das relações que

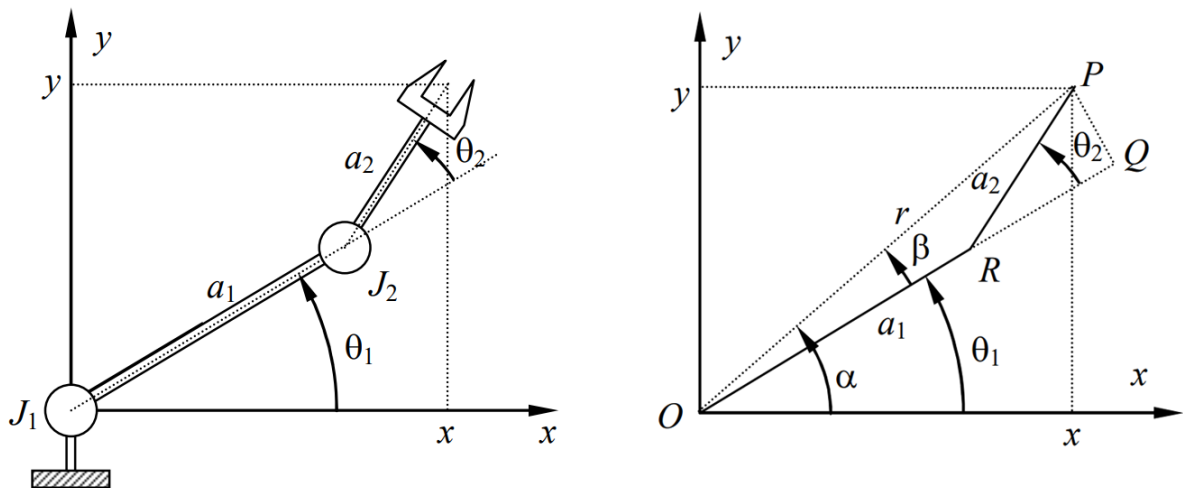
representam um ponto no espaço cartesiano em função da configuração das juntas. (CARRARA, 2015; SANTOS, 2003-2004).

Para exemplificação, a Figura 15 apresenta um manipulador – com dois graus de liberdade, para facilitar o entendimento – com o intuito de deduzir as equações da cinemática direta que regem seu comportamento. Por se tratar de um modelo menos complexo, algumas poucas relações trigonométricas são necessárias para a representação de ambas as coordenadas x e y . Considerando o comprimento dos elos como a_1 e a_2 , da mesma forma que o ângulo entre o primeiro elo e o eixo x como θ_1 e o ângulo entre o segundo elo e a projeção do primeiro como θ_2 , são obtidas as seguintes equações: (CARRARA, 2015).

$$x = a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = a_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

Figura 15 – Manipulador com dois graus de liberdade



Fonte: CARRARA, 2015, adaptado.

2.3.1.2. Notação de Denavit-Hartenberg

Segundo Denavit (1955 apud ROSÁRIO, 2005, p. 202), “a notação de Denavit-Hartenberg é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com n graus de liberdade.” Sendo assim, esse modelo permite utilizar um conjunto de equações nas quais a cinemática de uma junta é descrita em relação à outra, culminando na relação em que as coordenadas do elemento terminal estão diretamente associadas à origem, no caso à base do robô, tornando-se um método passível de ser utilizado em programas de geração de trajetória. (CARRARA, 2015; ROSÁRIO, 2005).

Neste modelo, há quatro parâmetros que devem ser preenchidos para cada relação de junta, são eles: o ângulo de rotação da junta (θ), o deslocamento da junta (d), o comprimento do elo (a) e o ângulo de torção da junta (α). Tais parâmetros são utilizados para o preenchimento de um quadro e caracterizam única e exclusivamente o manipulador analisado. Para a obtenção desses dados, é necessário seguir alguns passos padrões dessa metodologia, os quais são descritos abaixo: (CARRARA, 2015, ROSÁRIO, 2005; SANTOS, 2003-2004).

Passo 1: Traçar os eixos das juntas, sejam elas prismáticas ou rotacionais;

Passo 2: Fixar um sistema de coordenadas cartesianas (j_i) em cada junta do manipulador (neste tópico serão atribuídos os eixos x_i e z_i), tendo como restrição que o eixo x_i seja perpendicular ao eixo z_i e ao eixo z_{i-1} . Na base do robô, o eixo z_0 deverá ser definido de forma paralela ao eixo da junta, assim como seu eixo normal x_0 . Já no órgão terminal, deverão ser fixadas as mesmas coordenadas atribuídas à junta anterior;

Passo 3: Encontrar o ângulo de rotação da junta (θ). Para isso, é necessário rotacionar o eixo x_i em torno do eixo z_i até aquele ficar paralelo com o eixo x_{i+1} . Para juntas prismáticas, esse valor de ângulo é fixo, visto que não rotacionam, ao passo que para juntas rotacionais esse ângulo será uma variável na matriz de transformação;

Passo 4: Determinar o deslocamento da junta (d). Para tal, é necessário transladar, ao longo do eixo z_i , a junta j_i de sua posição até a intersecção dos eixos z_i e x_{i+1} , sendo, assim, obtido o tamanho do deslocamento dessa junta. Nas juntas rotacionais, esse deslocamento é fixo, enquanto que em juntas prismáticas essa medida acaba sendo uma variável, uma vez que o elo pode aumentar ou diminuir de tamanho;

Passo 5: Definir o comprimento do elo (a). Do mesmo modo como foi realizado o passo anterior, nesta etapa é preciso transladar não mais a junta j_i , mas sim a junta j_{i+1} ao longo do eixo x_{i+1} até a intersecção dos eixos z_i e x_{i+1} . O comprimento do elo é a própria distância a qual a junta se deslocou;

Passo 6: Estabelecer o ângulo de torção da junta (α). Para encontrar esse ângulo, é necessário rotacionar o eixo z_i em torno do eixo x_{i+1} até aquele estar paralelo com o eixo z_{i+1} , sendo importante ajustar o sinal do ângulo de acordo com a regra da mão direita, na qual se o giro for no sentido horário, o ângulo será positivo, do contrário, o ângulo será negativo.

Passo 7: Montar o quadro dos parâmetros de Denavit-Hartenberg. Na sequência, o Quadro 4 demonstra uma relação genérica desses parâmetros.

Quadro 4 – Parâmetros genéricos de Denavit-Hartenberg

| Elos | Ângulo de rotação | Deslocamento da junta | Comprimento do elo | Ângulo de torção da junta | Variável da junta |
|------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|
| 1 | θ_1 | d_1 | a_1 | α_1 | θ_1 ou d_1 |
| 2 | θ_2 | d_2 | a_2 | α_2 | θ_2 ou d_2 |
| 3 | θ_3 | d_3 | a_3 | α_3 | θ_3 ou d_3 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| N | θ_n | d_n | a_n | α_n | θ_n ou d_n |

Fonte: CARRARA, 2015, adaptado.

Na sequência do desenvolvimento é necessário montar as matrizes de transformação, as quais são representadas pela equação geral de rotação e translação apresentada em seguida. (CARRARA, 2015; SANTOS, 2003-2004).

$${}^1A_n = {}^1A_2 * {}^2A_3 * \dots * {}^nA_{n+1} \quad (1)$$

$${}^1A_n = [R_z(\theta_1) * T_z(d_1) * T_x(a_1) * R_x(\alpha_1)] * \dots * [R_z(\theta_n) * T_z(d_n) * T_x(a_n) * R_x(\alpha_n)]$$

Cada uma das matrizes de rotação e translação – R_z , T_z , T_x e R_x – possui sua estrutura própria e estão expostas abaixo já substituídas na equação da junta individual. As matrizes T_z e T_x podem ser multiplicadas de forma independente, sem alterar o resultado final. (CARRARA, 2015, ROSÁRIO, 2005; SANTOS, 2003-2004).

$${}^iA_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\text{sen}(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^iA_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i) \text{sen}(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \text{sen}(\alpha_i) & a_i \text{sen}(\theta_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

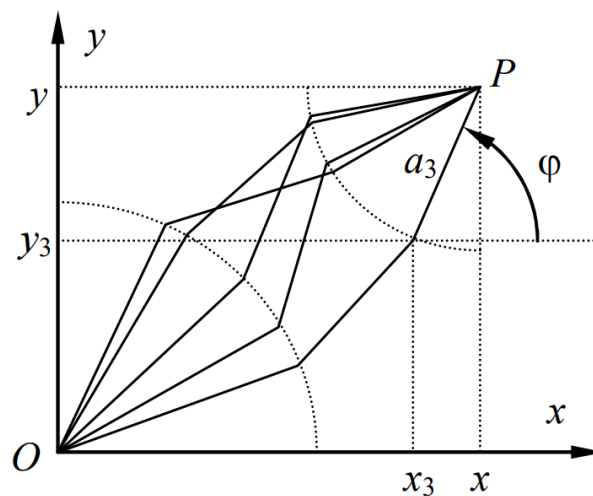
Feitos os cálculos das matrizes, cada uma delas terá uma variável, sendo no total três em um manipulador com três graus de liberdade, quatro em um com quatro graus de liberdade, e assim por diante. Essas variáveis permitem o controle do braço tal como na cinemática direta (uma vez que a notação de Denavit-Hartenberg é um caso particular dela), na qual são fornecidos os valores de ângulo e deslocamento para que o braço alcance uma coordenada

cartesiana de interesse. Os três primeiros valores da quarta coluna são as coordenadas x , y e z , nessa ordem, da extremidade do sistema, ou seja, as coordenadas da ferramenta. (CARRARA, 2015; SANTOS, 2003-2004).

2.3.1.3. Cinemática inversa

Por outro lado, a cinemática inversa vai pelo caminho contrário ao anterior, posto que é fornecida a posição da ferramenta terminal no espaço e, a partir disso, é necessário calcular os ângulos ou deslocamentos de cada junta para alcançar tal posição. É importante ressaltar, no entanto, que em nem todos os sistemas é possível aplicar esse modelo de resolução, visto que podem haver infinitas configurações de ângulos para um mesmo ponto-alvo no espaço. A Figura 16 explicita um desses casos. (CARRARA, 2015; SANTOS, 2003-2004).

Figura 16 – Exemplo de redundância em resolução da cinemática inversa



Fonte: CARRARA, 2015.

Uma maneira de solucionar esta questão é informando ao sistema algum dado já conhecido, ou ao menos inferido. No caso da ilustração, foi assumido um valor definido de ângulo entre a_3 e o eixo x , equiparando o número de equações e incógnitas do sistema. (CARRARA, 2015).

Utilizando o mesmo modelo da Figura 18, é possível aplicar a lei dos cossenos para estabelecer uma relação entre as medidas e isolar o ângulo θ_2 , sendo a primeira variável a ser encontrada: (CARRARA, 2015).

$$r^2 = x^2 + y^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_2)$$

$$x^2 + y^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_2)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}$$

$$\theta_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right)$$

A partir disso, o ângulo restante θ_1 pode ser encontrado pela aplicação da tangente da diferença entre ângulos, no qual são expressas as tangentes do ângulo α e do ângulo, é aplicada a identidade trigonométrica da tangente da diferença de dois arcos e a equação é simplificada, como está apresentado abaixo: (CARRARA, 2015).

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{y}{x}$$

$$\text{tg}(\beta) = \frac{a_2 \text{sen}(\theta_2)}{a_1 + a_2 \cos(\theta_2)}$$

$$\text{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\text{tg}(\alpha) - \text{tg}(\beta)}{1 + \text{tg}(\alpha) * \text{tg}(\beta)}$$

$$\text{tg}(\alpha - \beta) = \text{tg}(\theta_1) = \frac{\frac{y}{x} - \frac{a_2 \text{sen}(\theta_2)}{a_1 + a_2 \cos(\theta_2)}}{1 + \frac{y}{x} * \frac{a_2 \text{sen}(\theta_2)}{a_1 + a_2 \cos(\theta_2)}}$$

$$\text{tg}(\theta_1) = \frac{y(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - x a_2 \text{sen}(\theta_2)}{x(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - y a_2 \text{sen}(\theta_2)}$$

$$\theta_1 = \text{arctg}\left(\frac{y(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - x a_2 \text{sen}(\theta_2)}{x(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - y a_2 \text{sen}(\theta_2)}\right)$$

2.3.2. Parâmetros de precisão

Para compreender melhor a precisão dos manipuladores, em vários aspectos, é preciso considerar os principais erros associados a essa característica. Para Saramago (1993), esses erros estão vinculados a algumas causas, que vão desde variações nos cálculos da modelagem até questões de fabricação de componentes, como é apresentado no Quadro 5 a seguir.

Quadro 5 – Erros de precisão e suas principais causas

| Erros | Principais causas |
|----------------|--|
| Geométricos | Imprecisões devido à fabricação |
| Operacionais | Engrenagens, folgas, atritos e variações inerciais |
| Ambientais | Temperatura, umidade e ruídos elétricos |
| Computacionais | Aproximações e linearidades |
| De medidas | Resolução e não linearidades de encoders |
| De aplicação | Instalação inadequada |

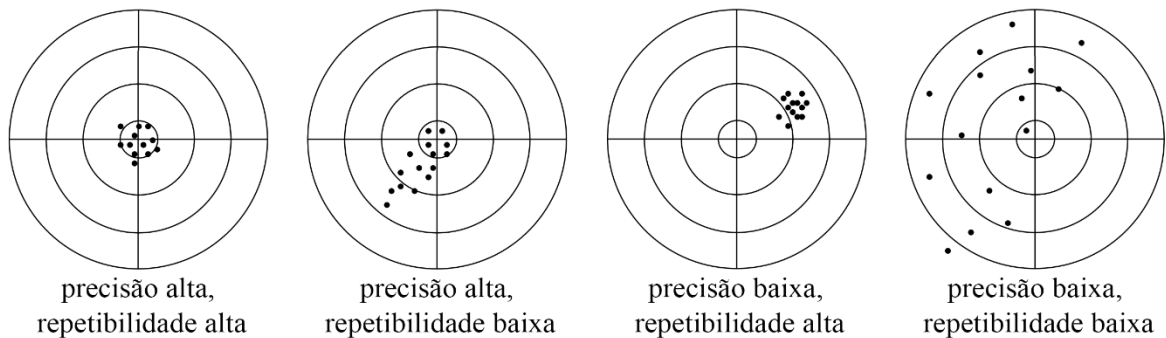
Fonte: SARAMAGO, 1993.

Complementando o conceito dos parâmetros, concepções são estabelecidas sobre alguns pontos que caracterizam o sistema como um todo, dentre as quais estão: (CARRARA, 2015; SARAMAGO, 1993).

- a) precisão estática, representando o quão próximo o órgão terminal alcançou o ponto realmente programado;
- b) precisão dinâmica, a qual leva em consideração o erro existente entre a trajetória programada e a trajetória apresentada pelo braço;
- c) repetibilidade, sendo definida como a capacidade de um manipulador atingir o mesmo posicionamento nas n vezes que lhe for solicitado, ponderando tanto a posição espacial fixa como também a trajetória realizada;
- d) resolução (precisão), descrevendo a mínima alteração incremental possível nas coordenadas do órgão terminal, de acordo com a mínima variação das variáveis de junta. A Figura 17 relaciona os conceitos de precisão e repetibilidade;
- e) sensibilidade, que indica o quanto o manipulador é susceptível às influências do sistema, tais como quantidade de carga e localização do órgão terminal em dado instante;
- f) estabilidade, mantendo uma relação intrínseca com a sensibilidade, indica o tempo necessário para um manipulador atingir uma determinada posição com uma dada precisão. Esta característica é observada na curva de controle do sistema, após o período transitório;
- g) reversibilidade, a qual também diz respeito à capacidade de posicionamento correto do órgão terminal na coordenada programada, diferindo da repetibilidade apenas por considerar sempre a mesma trajetória para chegar ao ponto requerido;

- h) e velocidade de movimento, indicando a habilidade de percorrer uma certa distância em um dado tempo. Em geral, esta característica é antagônica à estabilidade, visto que quanto maior a velocidade solicitada, maior serão as oscilações provocadas na estrutura, aumentando o tempo de amortecimento da curva de controle.

Figura 17 – Relação entre precisão e repetibilidade em um manipulador



Fonte: CARRARA, 2015, adaptado.

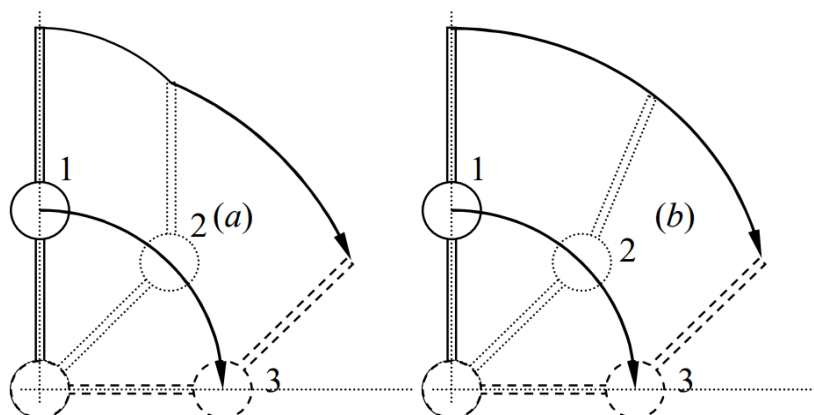
2.3.3. Geração e controle de trajetória

Segundo Carrara (2015), o controle de processo e trajetória pode ser feito de três formas, sendo por sequência fixa, por repetição ou com realimentação externa. A programação por sequência fixa é utilizada em processos repetitivos e que se resumem em uma única tarefa, ou pequenas variações desta. Sua aplicação se dá, por exemplo, em atividades de separação de produtos em esteiras e mecanismos do tipo pega-e-põe.

Na programação por repetição, caracterizada pela aplicação em processos cíclicos, é possível diferenciar dois modos de operação: controle por trajetória ponto-a-ponto (PTP) e controle por trajetória contínua (CP). No controle PTP, os pontos da trajetória seguidos pelo braço são armazenados na memória do controlador durante a programação do mesmo, não havendo uma trajetória calculada entre eles. (CARRARA, 2015).

É relevante caracterizar duas variações do controle PTP, em que na primeira todas as juntas são articuladas com a velocidade máxima, provocando uma diferença no tempo em que cada junta leva para chegar em sua posição, no caso de os ângulos de movimento serem diferentes entre elas. Já na segunda variação, a velocidade é ajustada para que, em um mesmo movimento, todas as juntas completem o movimento no mesmo instante, provocando uma trajetória e um movimento mais suaves em geral. A diferença entre os dois modos de execução é representada na Figura 18. (CARRARA, 2015).

Figura 18 – Comparação entre diferentes modos de acionamento do manipulador



Fonte: CARRARA, 2015.

No controle por trajetória contínua (CP) é possível escolher o comportamento dessa trajetória dentre alguns modos como uma reta, um arco ou uma curva suavizada, por exemplo. Neste caso, o controlador calcula pontos intermediários entre dois ou mais pontos fornecidos, de acordo com o seu algoritmo, e coordena o manipulador conforme tais pontos calculados. (CARRARA, 2015).

O controle com realimentação diz respeito à forma de obtenção de dados por parte dos equipamentos, sendo que ocorre um compartilhamento de informações no processo produtivo no qual estão inseridos. Dessa forma, esse modelo é aplicado em ambientes com várias máquinas e robôs operando em conjunto, tornando-se necessária essa troca de informações para o correto funcionamento e posicionamento dos equipamentos ao longo do processo. (CARRARA, 2015).

2.4. Revisão de literatura

Santos, Watanabe e Carrara (2006) desenvolveram um protótipo de braço robótico com dois graus de liberdade utilizando conceitos da cinemática inversa, transformações de translação, rotação e escala e ferramentas de validação como o MATLAB®. Tal projeto foi baseado em linguagem de programação C e teve como objetivo a utilização como material didático e educacional, sendo capaz de escrever em diferentes tamanhos e variados ângulos.

Com a finalidade de auxiliar no aprendizado de alunos de graduação em engenharia, Carvalho et al. [201-] projetaram um sistema de controle PID integrado a um algoritmo genético. Para a montagem do protótipo foi utilizado um kit educacional LEGO® modelo

Mindstorms, no qual todo o *hardware* já está incluído, o que torna o processo mais rápido pela não necessidade desses projetos de estrutura e circuito, além de permitir maior tempo para a modelagem da dinâmica e do controle PID.

De forma similar, Souza, Delgado e Cruz (2012) desenvolveram um braço robótico articulado com três juntas rotativas, juntamente com uma garra de dois dedos, porém tendo seu sistema implementado em um FPGA. No protótipo foram utilizados servomotores das marcas TowerPRO modelo MG995 e S90 e Hextronic modelo 5010 para o controle angular por PWM, este gerado a partir da combinação de um gerador de frequência para chegar à precisão necessária e contadores lógicos de incremento e decremento. Para o controle do conjunto foi utilizada a placa Digilent Basys.

Em seu artigo, Shah e Pandey (2018) apresentaram a proposta genérica de um braço robótico para classificação e separação de materiais. Tais robôs tem por característica utilizar sensores como câmeras, sensores táteis e sensores de cores. Para a parte de controle, foi sugerida uma plataforma Arduino com microcontrolador ATmega328P e como atuador podem ser utilizados servomotores DC ou AC. No órgão terminal podem ser adaptadas garras magnéticas, à vácuo ou de pressão, dependendo do setor no qual o robô está inserido.

Gregório et al. (2016) elaboraram um projeto de manipulador robótico com seis graus de liberdade para a manipulação de peças em ambiente industrial. Na proposta foram designados servomotores da Futaba modelo S3003, placa controladora Arduino com microprocessador ATmega328 e uma estrutura projetada no *software* AutoCAD® da Autodesk, para posterior fabricação em MDF. Sua ferramenta terminal é composta por uma garra de dois dedos que permite o manuseio dos objetos e peças.

A fim de fazer a inspeção em peças insertas em processos de usinagem, Khoury Junior et al. (2020) propuseram um braço robótico com sistema de visão artificial adaptado para acompanhar e mitigar perdas de peças por falhas em tal processo. No conjunto desenvolvido foram utilizados motores de passo juntamente com seus drivers para controle, uma placa Arduino Mega 2560 e uma placa Arduino UNO para receber as informações do computador – responsável pelo envio das instruções de movimentações – e uma câmera para a captura de imagens de inspeção, fechando a malha do sistema. A estrutura foi construída com tubos de alumínio visto as flexões e torções às quais estava submetida.

Por fim, outro trabalho foi proposto por Mariano et al. (2013), no qual foi desenvolvido um sistema de controle PID para um manipulador do tipo PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm), com seis graus de liberdade. Como interface de potência desse sistema de malha fechada foi utilizado um conversor CC-CC do tipo full-bridge, sendo projetado em

software específico (Proteus®) e após confeccionada a placa de circuito impresso com os devidos componentes. O protótipo utilizado foi o robô MA2000, equipamento disponível no local e que foi a motivação para o desenvolvimento do trabalho.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do manipulador robótico inclui as etapas de planejamento da estrutura, a definição da função do robô, os cálculos de torque para escolha dos motores, a definição do volume de trabalho (*workspace*), a modelagem e a parametrização do manipulador de acordo com suas características, assim como a proposta para o sistema de controle e a análise dos fatores relacionados à precisão final do braço.

3.1. Projeto da estrutura de sustentação

Neste capítulo é apresentada a elaboração do modelo em 3D da estrutura física do braço robótico, além da definição da função que o robô executará e consequentes cálculos relativos ao torque necessário para tal aplicação.

Para o desenvolvimento da estrutura em 3D foi utilizado o *software* NX® 12 da Siemens. Sua proposta parte desde o rascunho da geometria até a aparência final do robô, permitindo determinar o material que será utilizado em sua confecção e realizar simulações de movimento com ferramentas do próprio programa. Aliado a isso, é possível estabelecer uma conexão com a ferramenta Simulink do *software* MATLAB®, o que possibilita a simulação do algoritmo de controle do manipulador juntamente com o protótipo projetado.

3.1.1. Definição das características e função do robô

De acordo com Craig (2005), o número mínimo de juntas para que um manipulador considerado universal execute suas tarefas livremente é seis. Dessa forma, foi proposto o projeto de um manipulador com seis graus de liberdade e uma garra como ferramenta terminal. Assim, com o intuito de demonstrar como um manipulador se movimenta realizando atividades de manipulação de objetos, para a aplicação do robô serão consideradas cargas com até 250 gramas. Definições de torque serão apresentadas no capítulo seguinte.

Para sintetizar os aspectos do projeto, o Quadro 6 apresenta as características do modelo de braço robótico desenvolvido.

Quadro 6 – Características do manipulador desenvolvido

| Característica | Descrição |
|-----------------------|------------------------|
| Graus de liberdade | Seis (6) |
| Material da estrutura | PLA (Ácido Polilático) |
| Tipo de acionamento | Elétrico |
| Tipo das juntas | Rotativas (RRRRRR) |
| Modo de acionamento | Direto / Sem redução |
| Ferramenta terminal | Garra para manipulação |
| Capacidade de carga | 250 gramas |

Fonte: AUTOR, 2020.

3.1.2. Cálculo dos torques e definição dos atuadores

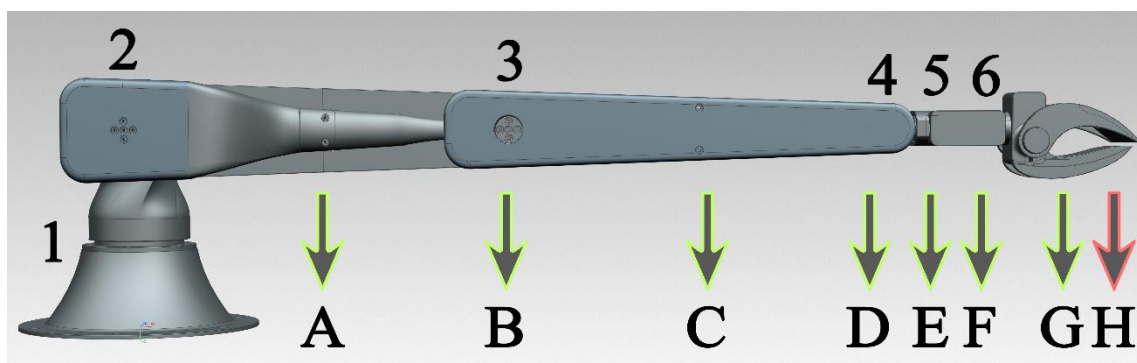
Uma vez definido o limite de carga do robô é possível criar o diagrama de forças da estrutura de acordo com o que foi projetado. A Figura 19 apresenta o diagrama de forças com base na estrutura do braço robótico, assim a numeração das juntas. Logo após, o Quadro 7 relaciona cada conjunto de força e distância para calcular o torque requerido nas juntas 2 e 3. Essa relação considera o torque máximo no momento estático e um fator de segurança de 1,25 aplicado aos torques finais. As distâncias utilizadas foram fornecidas pelo próprio *software* NX® 12 da Siemens e as massas dos servos foram ajustadas de acordo com os modelos escolhidos, que são apresentados em seguida.

Com estes valores, é possível definir os modelos de servomotores que podem ser utilizados. Na junta 2, como o torque total foi consideravelmente maior do que na junta 3, optou-se pela utilização de dois atuadores em vez de um. Dessa forma, foi escolhido o modelo SPT5535LV-320 da marca SPT. Esse servomotor possui um torque de 35 kg.cm, um ângulo de rotação de 300° e uma massa igual a 60 gramas. A Figura 20 (esquerda) apresenta esse modelo.

Para a junta 3, como o torque requerido ficou muito próximo ao torque fornecido pelo servomotor escolhido na junta 2, optou-se por utilizar o mesmo modelo da Figura 20 (esquerda) nessa junta, no entanto apenas um atuador. Nas juntas 4, 5 e 6, que fazem parte da ferramenta terminal, foi escolhido um servomotor de menor massa e torque, visto sua maior distância da base e menor necessidade de esforço, respectivamente. O modelo em questão é o SPT4412LV-320 da marca SPT, como está ilustrado na Figura 20 (direita), tendo como características um torque de 12 kg.cm, um ângulo de rotação de 300° e uma massa de 46 gramas.

Na junta de rotação do corpo – junta 1 – do robô foi definido um servomotor igual ao das primeiras juntas – Figura 20 (esquerda). Na sequência, o Quadro 8 apresenta as principais especificações dos motores.

Figura 19 – Diagrama de forças do protótipo desenvolvido



Fonte: AUTOR, 2020.

Quadro 7 – Relação das forças e distâncias para o cálculo do torque

| Letra | Peça | Massa (kg) | Distância ao centro da base (cm) | Torque na junta 2 (kg.cm) | Distância à junta 3 (cm) | Torque na junta 3 (kg.cm) |
|--|-----------------|------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| A | Braço | 0,280 | 12,557 | 3,516 | -- | -- |
| B | Servo 4 | 0,060 | 30,000 | 1,800 | -- | -- |
| C | Antebraço | 0,230 | 42,306 | 9,730 | 12,306 | 2,830 |
| D | Servo 5 | 0,046 | 60,000 | 2,760 | 30 | 1,380 |
| E | Garra - 2º grau | 0,030 | 65,949 | 1,978 | 35,949 | 1,078 |
| | Servo 6 | 0,046 | | 3,034 | | 1,653 |
| F | Garra - 3º grau | 0,030 | 65,201 | 1,956 | 35,201 | 1,056 |
| | Servo 7 | 0,046 | | 2,999 | | 1,619 |
| G | Garra | 0,085 | 75,026 | 6,377 | 45,026 | 3,827 |
| | Servo 8 | 0,046 | 73,180 | 3,366 | 43,180 | 1,986 |
| H | Carga | 0,250 | 77,000 | 19,250 | 47 | 11,750 |
| Torque total | | | | 56,767 | -- | 27,181 |
| Torque total com fator de segurança | | | | 70,959 | -- | 33,976 |

Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 20 – Servomotores SPT5535LV-320 (esquerda) e SPT4412LV-320 (direita)



Fonte: SPT Servos, 2018.

Quadro 8 – Principais especificações dos motores utilizados no projeto

| Característica | Descrição | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | SPT5535LV-320 | SPT4412LV-320 |
| Tensão | 4,8 ~ 6 V | 4,8 ~ 6 V |
| Corrente nominal | 1,4 A | 1 A |
| Corrente com eixo bloqueado | 3,5 A | 1,8 A |
| Ângulo de rotação | 0° ~ 300° | 0° ~ 300° |
| Frequência do sinal de controle | 330 Hz | 330 Hz |
| Tempo de ciclo | 20 ms | 20 ms |
| Tempo de pulso | 500 ~ 2500 us | 500 ~ 2500 us |
| Massa | 60 gramas | 46 gramas |
| Torque nominal | 29 kg.cm em 4,8 V 35 kg.cm em 6 V | 10 kg.cm em 4,8 V 12 kg.cm em 6 V |

Fonte: AUTOR, 2020.

3.1.3. Cálculo do volume de trabalho

Um conceito importante na análise das características de um manipulador é o seu volume de trabalho. Uma vez conhecido esse aspecto é possível determinar em quais locais o braço pode operar e quais movimentos é possível realizar em tal espaço. Para isso, foi utilizado o *software* MATLAB® para gerar um gráfico em 3D com pontos onde o manipulador é capaz de alcançar. (ABDOLMALAKI, 2017; GOYAL; SETHI, 2010; ZAR; LIN; WIN, 2019).

Para a geração desses pontos foram utilizados os parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô e o método de Monte Carlo, o qual utiliza intervalos aleatórios entre os valores mínimos e máximos dos ângulos de cada junta para mapear possíveis pontos do elemento terminal do manipulador. Além disso, quando é adotado uma quantidade expressiva de exemplos o gráfico tende a ficar mais sólido, representando de forma mais precisa o volume real.

3.2. Modelagem e parametrização do manipulador

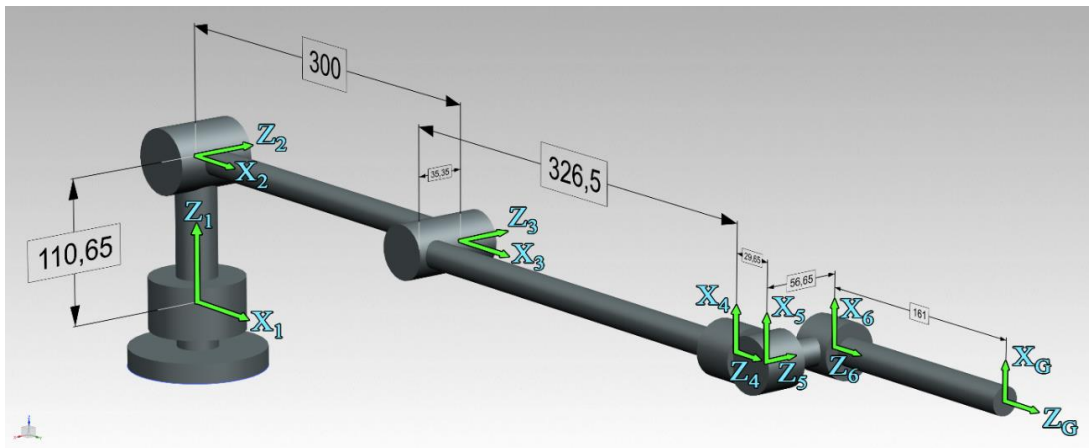
De acordo com as características e graus de liberdade do manipulador desenvolvido, optou-se pela aplicação da notação de Denavit-Hartenberg na parametrização do mesmo, uma vez que representa plenamente o modelo. A partir disso, foi montado o Quadro 9 com os parâmetros obtidos conforme os passos descritos no capítulo 2.3.1.2, o qual é exposto a seguir. A Figura 24 apresenta o modelo desenvolvido no *software NX*® 12 que contém as medidas de cada elo, bem como a numeração das juntas que auxiliaram na parametrização do robô.

Quadro 9 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô desenvolvido

| Junta | θ | d (mm) | a (mm) | α | Variação angular |
|-------|------------|--------|--------|-------------|------------------------------------|
| 1 | θ_1 | 110,65 | 0 | -90° | $-150^\circ \sim 150^\circ$ (300°) |
| 2 | θ_2 | 0 | 300 | 0° | $-200^\circ \sim 20^\circ$ (220°) |
| 3 | θ_3 | -35,35 | 0 | 90° | $-60^\circ \sim 240^\circ$ (180°) |
| 4 | θ_4 | 356,15 | 0 | 90° | $-150^\circ \sim 150^\circ$ (300°) |
| 5 | θ_5 | -56,65 | 0 | -90° | $-90^\circ \sim 90^\circ$ (180°) |
| 6 | θ_6 | 161 | 0 | 0° | $-150^\circ \sim 150^\circ$ (300°) |

Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 21 – Representação de medidas e juntas do manipulador projetado (em mm)



Fonte: AUTOR, 2020.

3.2.1. Cálculo das matrizes de transformação

A partir do Quadro 7 foi possível calcular as matrizes de transformação de cada elo/junta do sistema utilizando a equação (2), como é exposto na sequência.

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\text{sen}(\theta_1) & 0 \\ \text{sen}(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 110,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 & 300\cos(\theta_2) \\ \text{sen}(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 300\text{sen}(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \text{sen}(\theta_3) & 0 \\ \text{sen}(\theta_3) & 0 & -\cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -35,35 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \text{sen}(\theta_4) & 0 \\ \text{sen}(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 356,15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & -\text{sen}(\theta_5) & 0 \\ \text{sen}(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -56,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^6A_G = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\text{sen}(\theta_6) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 161 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

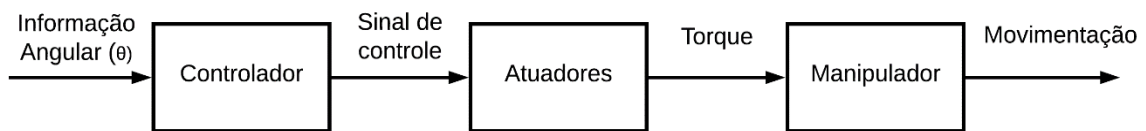
Com as matrizes definidas é possível aplicar a equação (1) para fazer o produto de todas elas e referenciar a garra à base do manipulador. Dessa maneira, a matriz de transformação final é gerada e a partir dela é possível determinar o ponto espacial da ferramenta de acordo com os ângulos fornecidos para as juntas. A seguir é apresentada apenas uma representação dessa matriz (3), visto que possui um tamanho considerável uma vez que se trata de um manipulador com seis graus de liberdade.

$${}^1A_G = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2.2. Arranjo do sistema

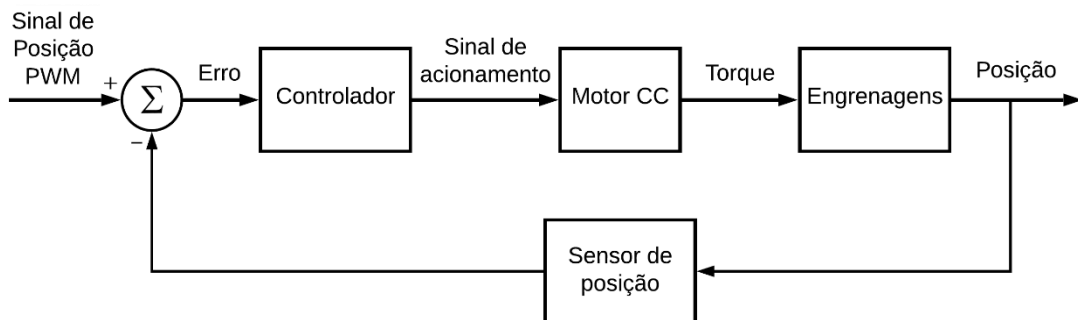
Para a definição dos comandos e análises do sistema como um todo foi necessário compreender os passos e os subsistemas que o constituem. A partir disso, foi elaborado o diagrama de blocos do manipulador e um exemplo de diagrama de blocos de um atuador, os quais estão apresentados nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22 – Diagrama de blocos de malha aberta do manipulador



Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 23 – Diagrama de blocos de malha fechada de um atuador



Fonte: AUTOR, 2020.

Pela análise dos diagramas foi possível desenvolver um algoritmo para executar o acionamento do manipulador em malha aberta e considerando a característica de malha fechada interna de cada servomotor.

3.2.3. Algoritmo de controle e acionamento

Visto as características do projeto quanto ao tipo de atuadores utilizados (servomotores com controle angular por sinal PWM), para executar o controle do manipulador foi definida uma relação de tempo por ciclo/comando para cada junta. Essa definição permite incluir uma limitação na velocidade do conjunto, visto que as velocidades angulares nominais dos atuadores podem causar um esforço excessivo na estrutura do manipulador e gerar picos de corrente. Por sua vez, essa relação representa o ganho K de cada planta, ou seja, o ganho de cada atuador.

Adotando essa forma de acionamento é possível criar uma trajetória suave pelo fato de todas as juntas finalizarem o giro ao mesmo tempo, caracterizando um controle por trajetória ponto-a-ponto (PTP) com velocidades ajustadas, como apresentado no capítulo 2.3.3. Esse método foi simulado juntamente com o modelo da Figura 21.

3.3. *Hardware* de controle

Visto a quantidade de portas PWM necessárias para o controle individual de cada servo motor, foi escolhido o microcontrolador ESP32 para a etapa de controle e execução do algoritmo. A partir disso, é possível montar em bancada o circuito necessário para o envio dos sinais de controle e de potência.

3.4. Precisão dos atuadores

Como todo sistema mecânico, a precisão final do manipulador está sujeita às variações causadas por questões como atrito, flexão da estrutura, folgas nas engrenagens ou mesmo qualidade dos equipamentos. Ainda nesse contexto, é possível citar as limitações elétricas presentes nos atuadores, em particular nos utilizados para este projeto, os quais são servomotores que apresentam uma variação determinada entre o ângulo atual e o ângulo adjacente. Dessa forma, o erro absoluto é tão maior quanto a distância da origem do sistema (eixo do atuador).

Visto isso, foi possível calcular o erro máximo do robô quando é considerado que seus elos estão paralelos, ou seja, quando a ferramenta possui a distância máxima em relação à base. Para tal, foi modificado o algoritmo de geração do volume de trabalho a fim de manter os parâmetros do manipulador, porém gerar apenas a circunferência máxima com seu eixo na

primeira junta. Junto a isso também foi considerada a configuração elétrica do motor, que admite dois mil pontos de ângulo igualmente distribuídos ao longo dos 300° de rotação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da proposta de projeto estrutural, dos cálculos e algoritmos desenvolvidos para o controle/acionamento e das simulações feitas por ambos os *softwares* utilizados, além de validar os parâmetros da cinemática encontrados. Junto a isso, é apresentado o protótipo final, suas modificações quanto à estrutura projetada e os testes experimentais com suas análises.

4.1. Simulação

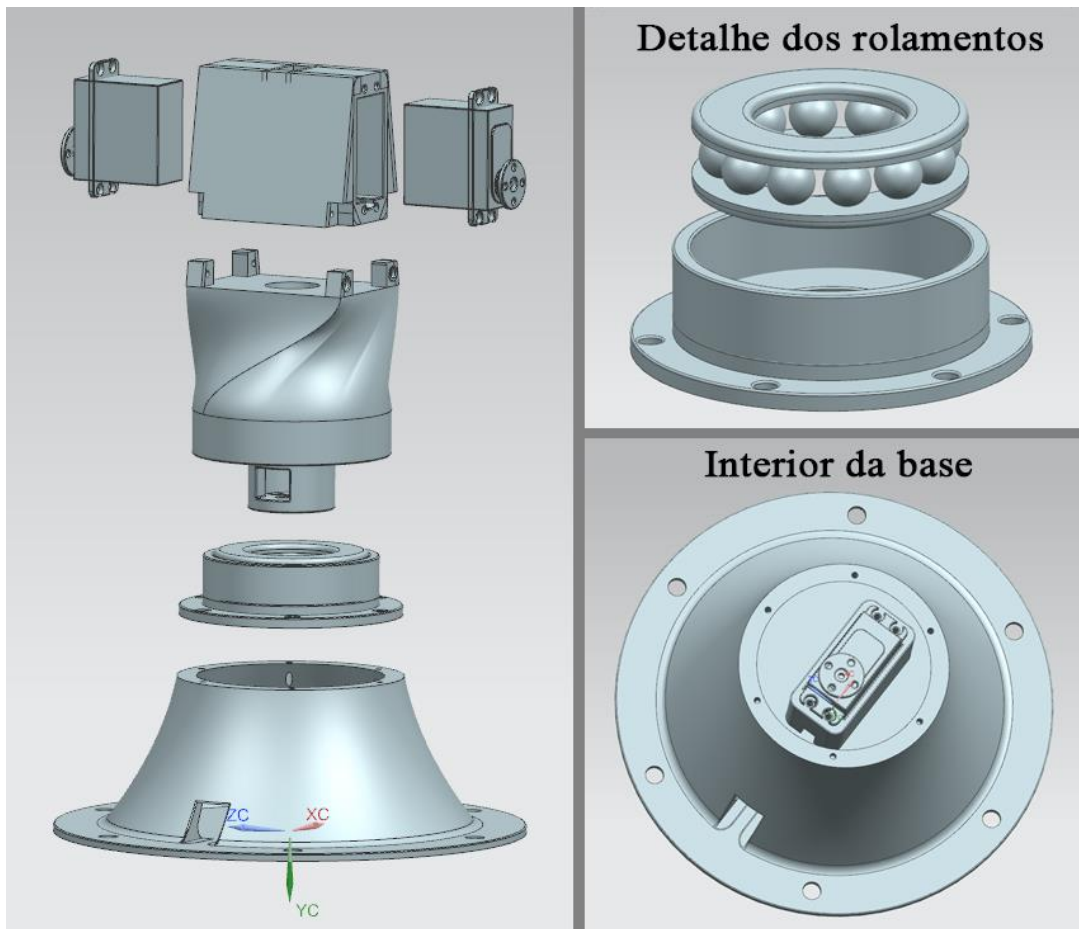
4.1.1. Estrutura física do manipulador

Na sequência estão expostas as partes que compõem o robô desenvolvido, assim como a demonstração do seu volume de trabalho simulado por *software*.

4.1.1.1. Composição do manipulador

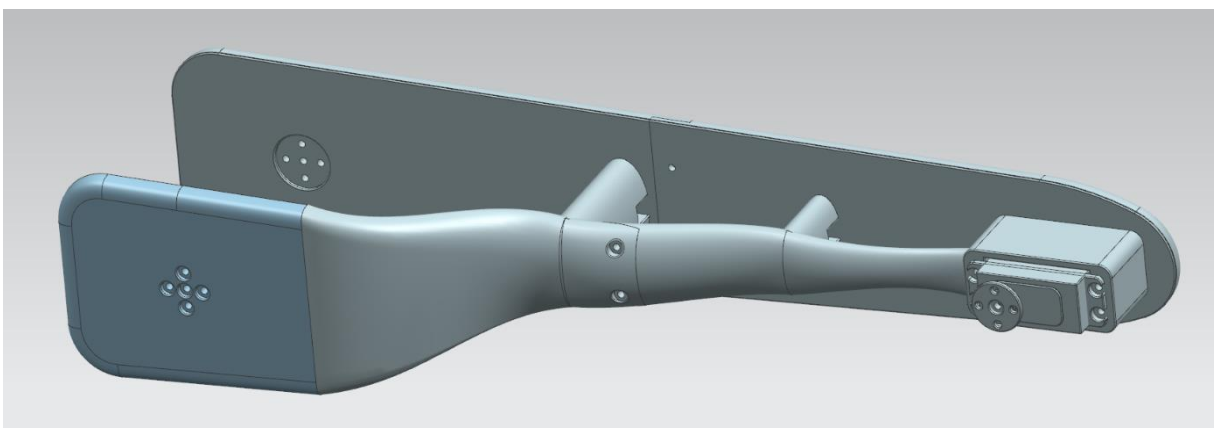
O robô desenvolvido, como definido no capítulo 3.1, apresenta partes que remetem ao braço humano. Nesse sentido, estão demonstrados abaixo os seus elementos constituintes, sendo eles: vista explodida da Base (Figura 24); Braço (Figura 25); Antebraço (Figura 26); conjunto do Punho e Garra (Figura 27). A Figura 28 apresenta uma renderização do modelo visto de cima.

Figura 24 – Base do manipulador



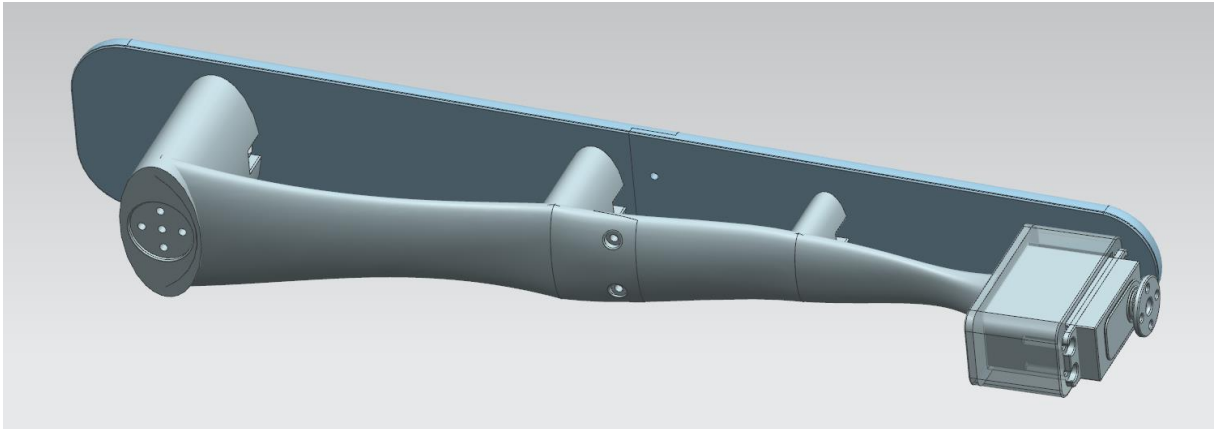
Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 25 – Braço do manipulador



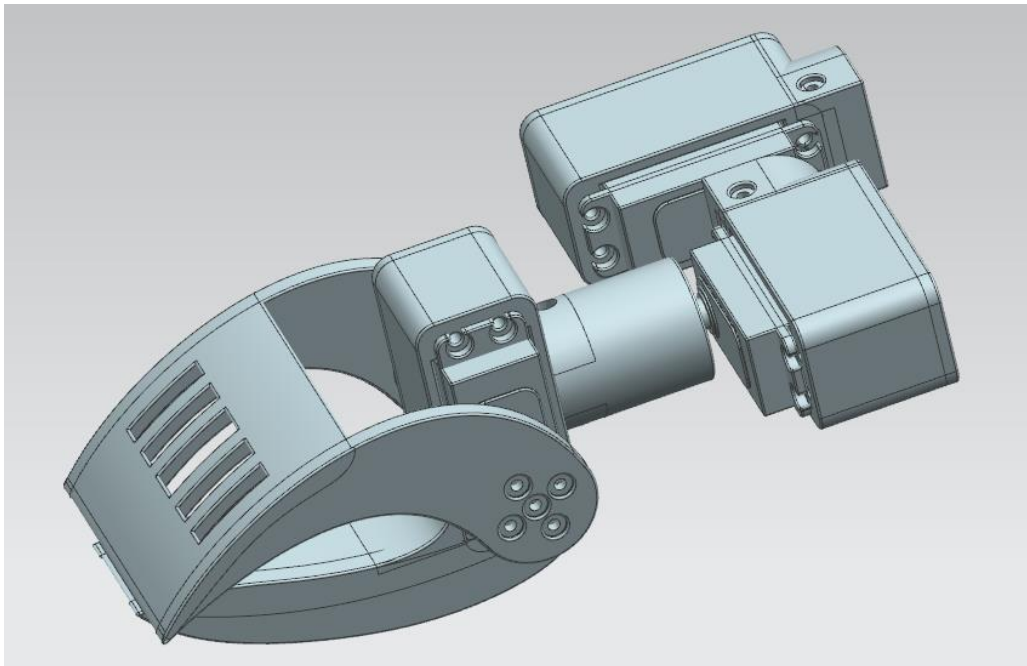
Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 26 – Antebraço do manipulador



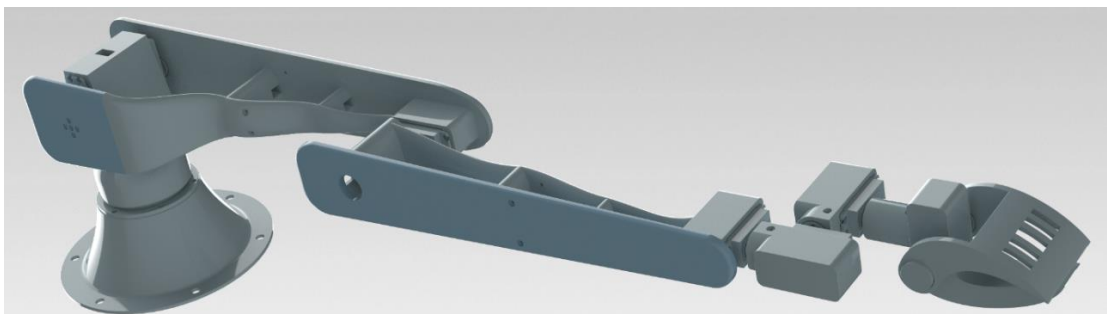
Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 27 – Conjunto do Punho e Garra do manipulador



Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 28 – Renderização do manipulador vista de cima



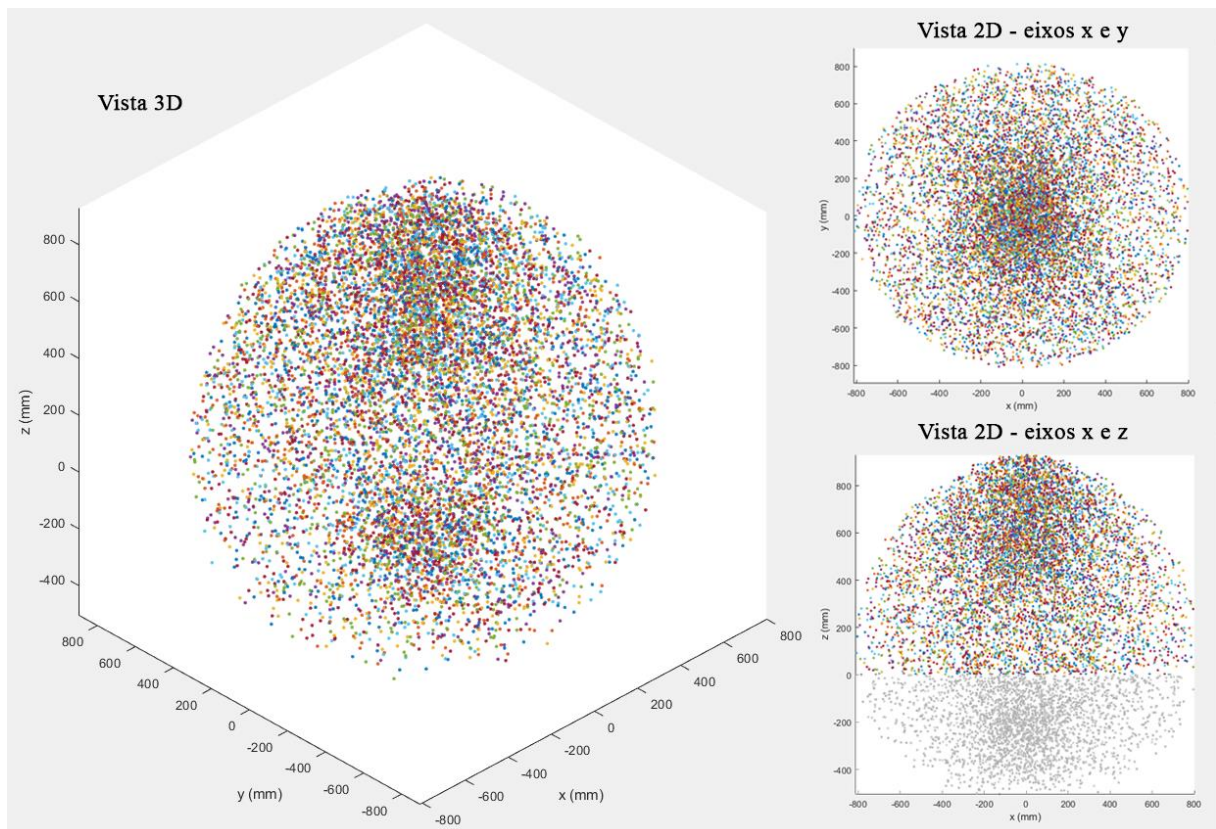
Fonte: AUTOR, 2020.

4.1.1.2. Volume de trabalho

De acordo com a simulação feita no *software* MATLAB®, foi gerado o gráfico do volume de trabalho com dez mil pontos de alcance. É possível verificar que o manipulador atinge praticamente todo o espaço interno da esfera, com exceção do seu centro, onde está a base do manipulador. Com isso, também é importante salientar que a base do robô estará fixada em um plano, o que limita o volume apenas à parte positiva do eixo z, aproximando seu formato à uma meia esfera.

Para a geração do gráfico foi utilizado um algoritmo para o cálculo da matriz de transformação final do manipulador (equação 5). A Figura 29 apresenta três vistas do volume de trabalho simulado, estando na última a parte negativa do gráfico ofuscada para melhor visualização do volume válido, como comentado.

Figura 29 – Volume de trabalho do manipulador simulado no *software* MATLAB®

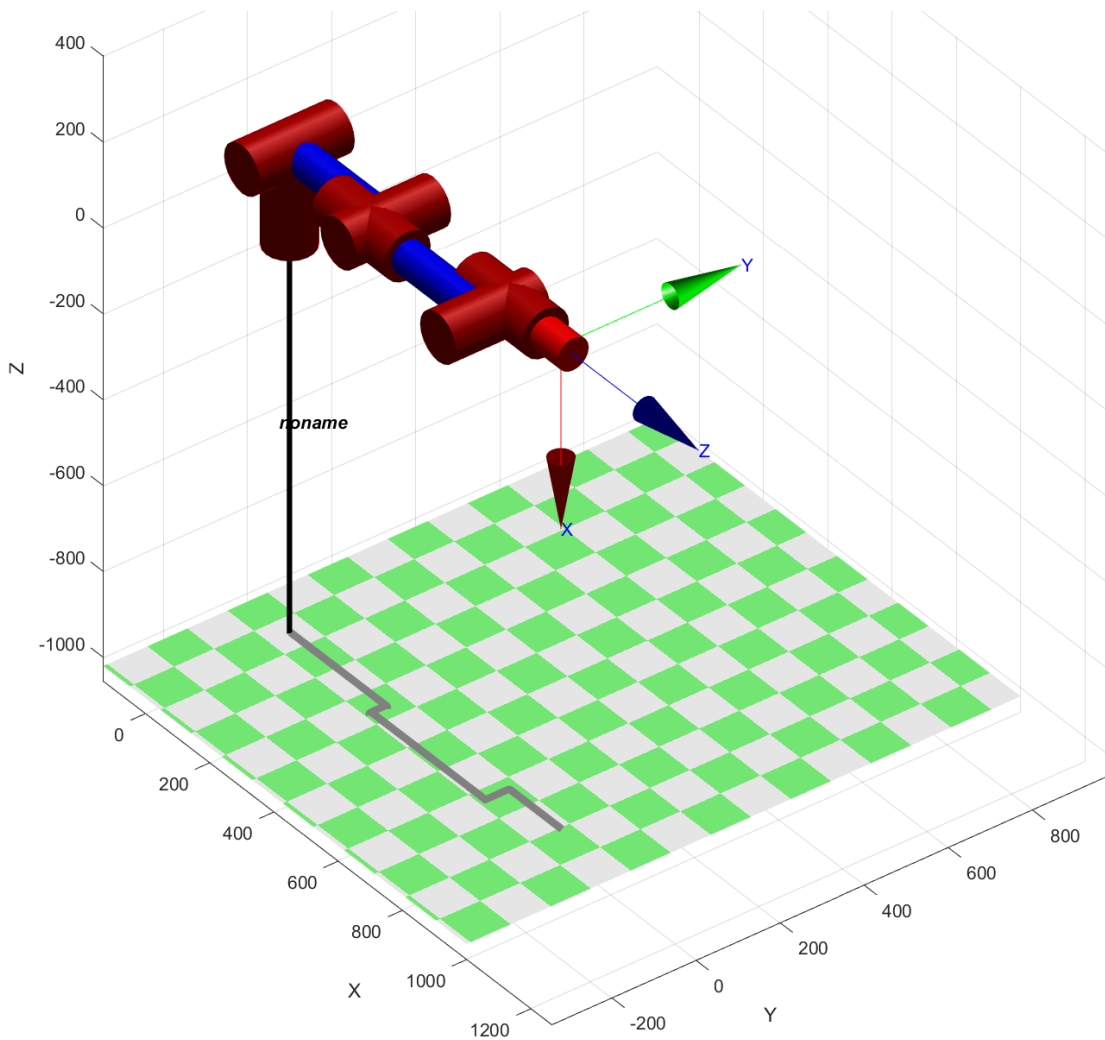


Fonte: AUTOR, 2020.

4.1.1.3. Validação dos parâmetros e estrutura

Com os parâmetros de Denavit-Hartenberg preenchidos, foi possível utilizar uma ferramenta no *software* MATLAB® para simular o modelo. Essa ferramenta é um toolbox desenvolvido pelo professor norte-americano Peter Corke, na qual são inseridos os parâmetros do manipulador e é criada uma representação deste, como mostra a Figura 30, podendo também ser manipulada para gerar uma movimentação em três dimensões. Além disso, essa ferramenta valida a representação da Figura 24 bem como as informações do Quadro 9.

Figura 30 – Representação do manipulador gerada pelo MATLAB®

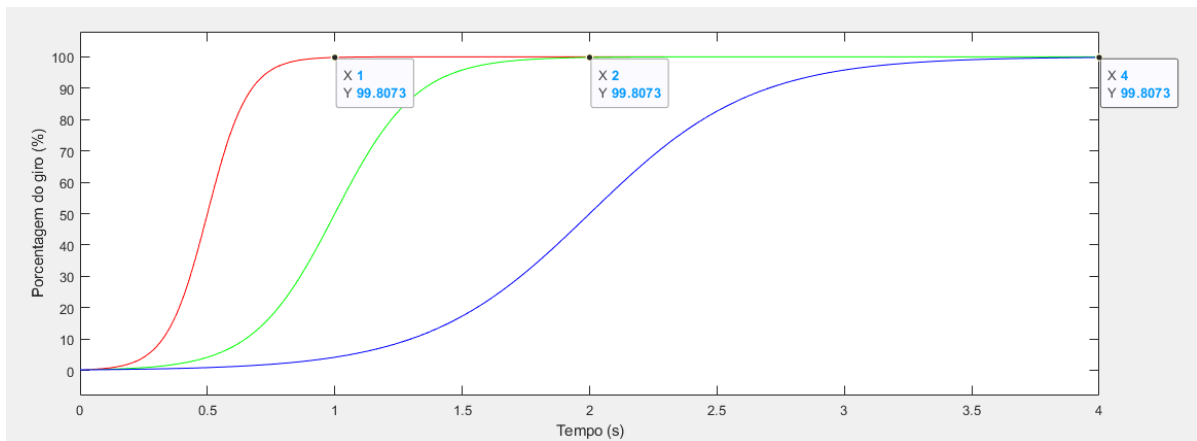


Fonte: AUTOR, 2020.

4.1.2. Curvas de acionamento

Para representar o acionamento dos atuadores, foi gerado um gráfico no *software* MATLAB® com três curvas, sendo que a azul representa a menor velocidade (V1 – 4 seg/ciclo), a verde representa a velocidade normal (V2 – 2 seg/ciclo) e a vermelha representa a maior velocidade (V3 – 1 seg/ciclo), esta disponível apenas para as três juntas do punho, visto que possuem um momento de inércia menor quando comparadas às outras juntas. É importante comentar que os valores finais de cada curva, em seu tempo, são definidos em 100% no algoritmo, mitigando erros computacionais de que possam surgir a partir disso. A Figura 31 apresenta as curvas geradas.

Figura 31 – Curvas disponíveis para o acionamento dos servomotores

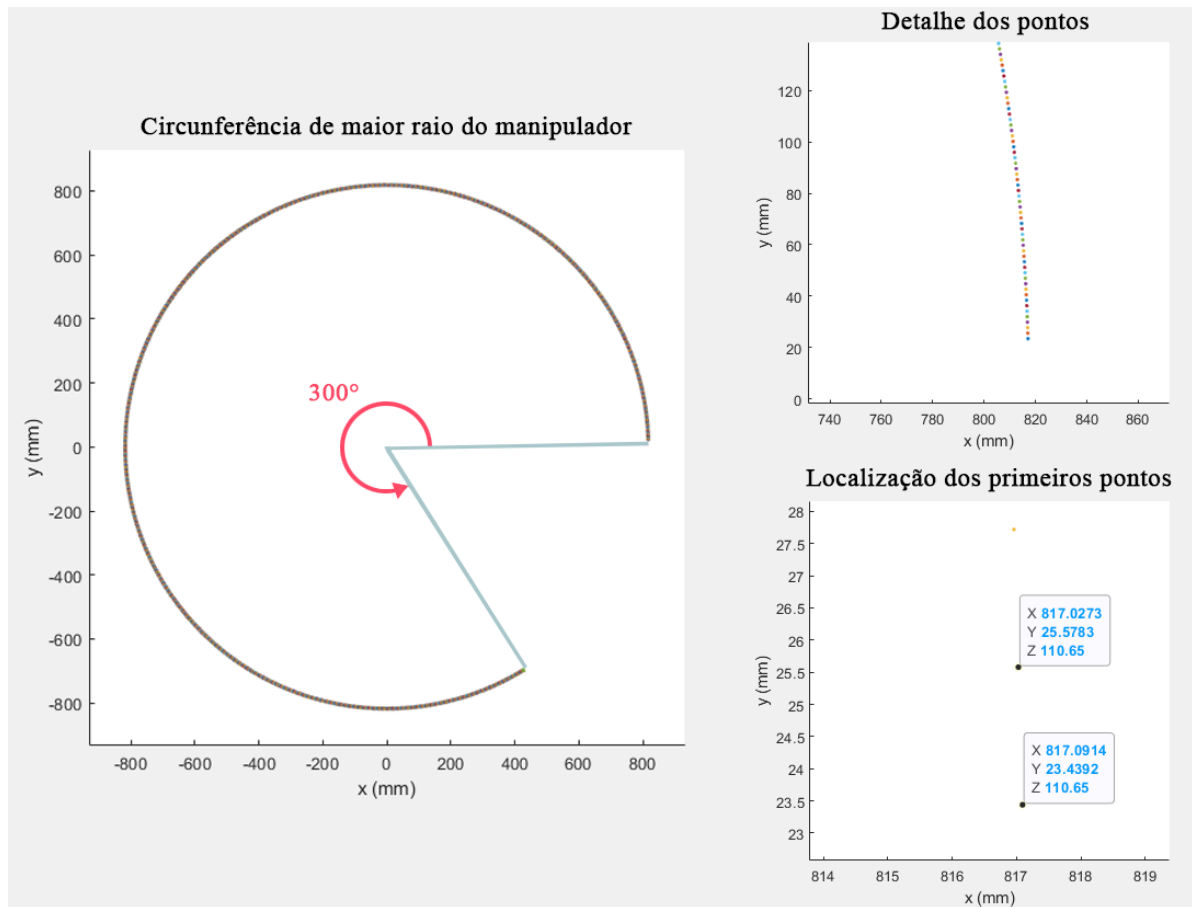


Fonte: AUTOR, 2020.

4.1.3. Precisão de movimentação

A Figura 32 apresenta a circunferência com 300° gerada no *software* MATLAB®, bem como os primeiros pontos em detalhe e suas coordenadas. Com esses dados, é possível determinar que a distância entre cada ponto, com o manipulador esticado (817 mm), é de aproximadamente 2,14 mm.

Figura 32 – Circunferência de maior raio do robô e coordenadas de pontos adjacentes



Fonte: AUTOR, 2020.

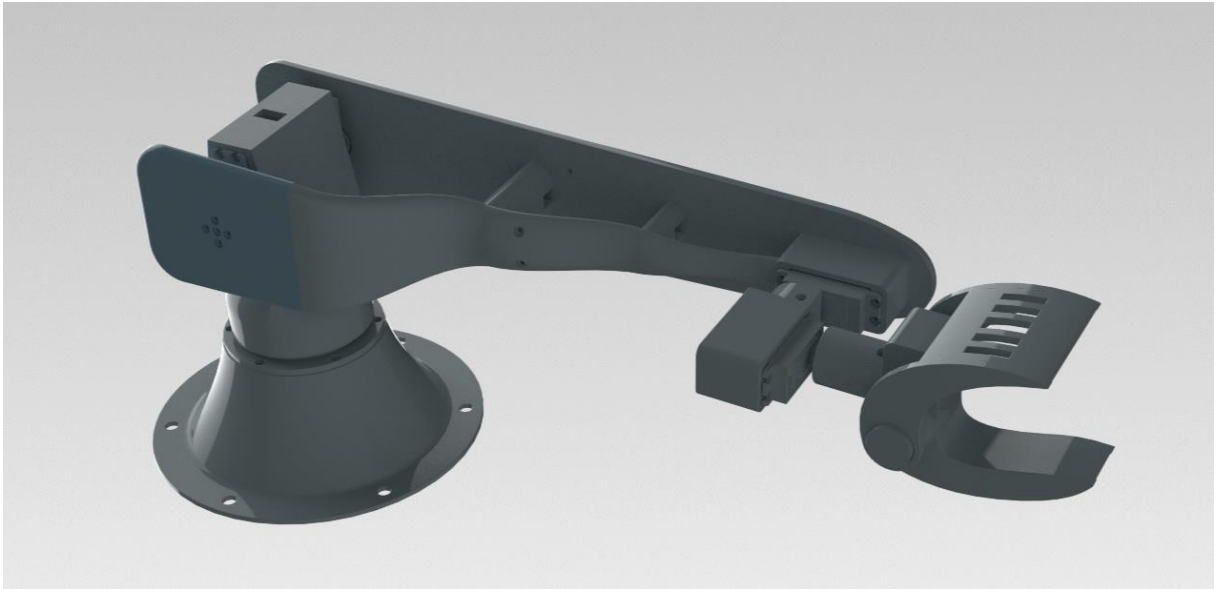
4.2. Protótipo

4.2.1. Estrutura final do manipulador

A estrutura final do braço, modificada, é resultado de testes de acionamento os quais revelaram a insuficiência de torque na junta 3, ainda que previamente estipulado um fator de segurança para os cálculos. Dessa forma, foram removidos o antebraço e uma junta de rotação do punho, a fim de que a garra permanecesse voltada para a frente do manipulador e fosse capaz de realizar os movimentos desejados. O novo projeto do robô é apresentado na Figura 33 e a aparência final do robô está representada na Figura 34 abaixo.

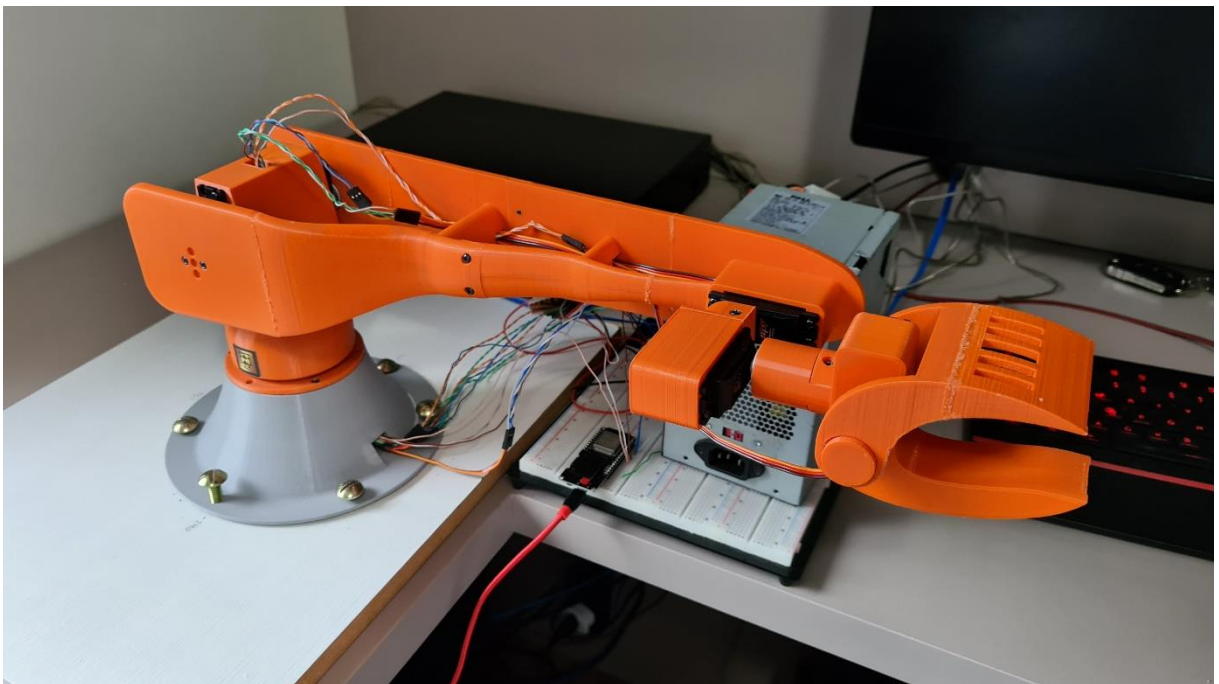
Para o controle, foi implementado o microcontrolador ESP32 em bancada (*proto board*) e os fios arranjados de forma a não interferir no movimento do manipulador.

Figura 33 – Novo projeto do manipulador



Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 34 – Aparência final do manipulador



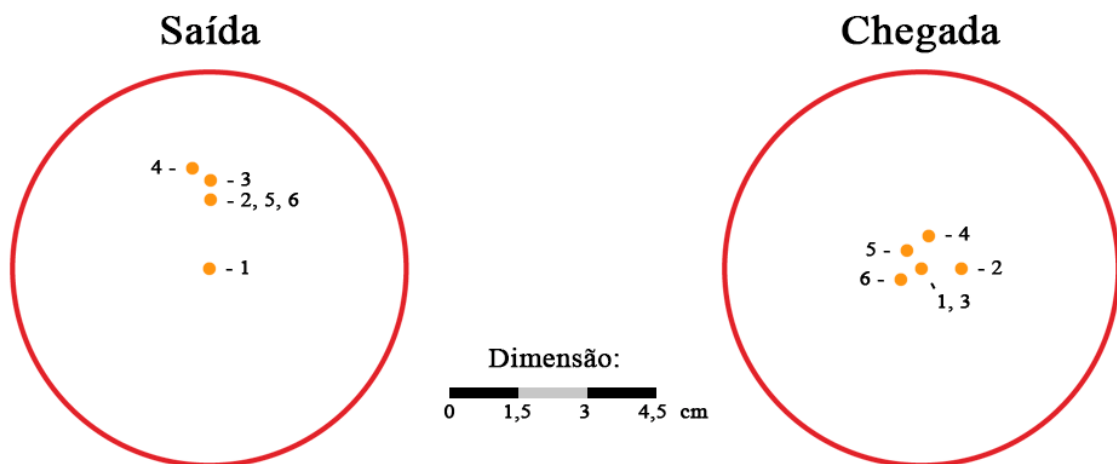
Fonte: AUTOR, 2020.

4.2.2. Testes experimentais

Para a realização dos testes experimentais, foi necessária a escrita do algoritmo para exercer o controle e estabelecer uma interface homem/máquina. Dessa forma, foi utilizada a interface de escrita do Arduino para o algoritmo, o qual inclui a curva de acionamento linear e suave, e o Monitor Serial dessa mesma interface para o envio de informações, fazendo assim o controle manual e o acionamento das rotinas do manipulador.

Os testes experimentais foram realizados em duas etapas. Na primeira foram avaliadas a precisão estática e a repetibilidade do protótipo quando com uma carga de 250 gramas. A movimentação foi realizada com o robô atingindo três pontos espaciais durante cada ciclo, sendo o primeiro e o terceiro ponto a saída e a chegada do objeto, respectivamente. A Figura 35 apresenta os pontos obtidos pelo centro da carga utilizada.

Figura 35 – Distribuição dos pontos atingidos pela carga em ciclos



Fonte: AUTOR, 2020.

A partir disso, é possível calcular a variância e o desvio padrão da amostra com base na distância de cada ponto ao ponto do primeiro ciclo, admitindo este como a referência. Os valores estão expostos no Quadro 10 a seguir.

Quadro 10 – Variância e desvio padrão da amostra

| | Saída | Chegada |
|------------------------------|--------------|----------------|
| Variância (cm ²) | 0,49 | 0,088 |
| Desvio padrão (cm) | 0,7 | 0,296 |

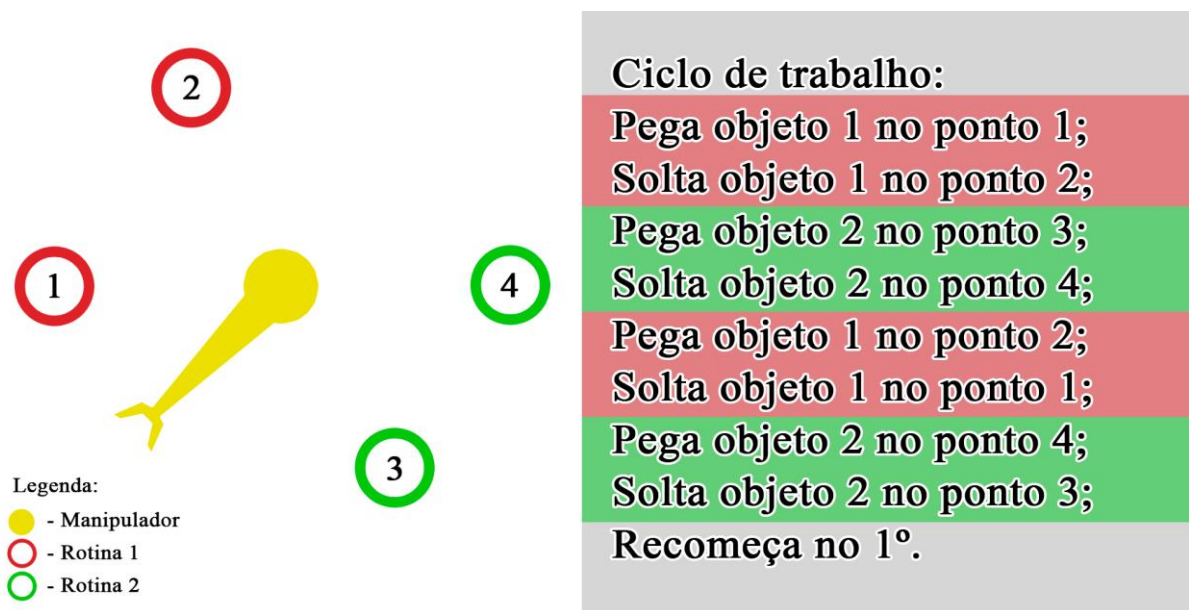
Fonte: AUTOR, 2020.

De acordo com a regra empírica do desvio padrão, 68% das amostras estão no intervalo entre (média – desvio) e (média + desvio), nesse caso 0,675 e 2,075 para a saída e 0,004 e 0,596 para a chegada. Sendo assim, 83,3% das amostras da saída e 66,6% das amostras da chegada estão nos seus respectivos intervalos, estabelecendo uma boa precisão e repetibilidade em ambos os pontos. É importante salientar que a abertura da garra permite uma margem de trabalho para o manipulador.

Na segunda etapa, o manipulador foi testado em duas rotinas ponto-a-ponto cíclicas intercaladas, tendo cada uma o seu objeto. O objetivo desse teste foi fazer a análise do erro cumulativo de posição do mesmo objeto na sua rotina, uma vez que a partir do segundo ciclo o objeto está em uma posição com os erros cumulativos das posições anteriores.

A rotina de trabalho está demonstrada e descrita na Figura 36, na qual os anéis vermelhos e verdes representam as posições da primeira e da segunda rotina, respectivamente.

Figura 36 – Rotinas de teste do manipulador



Fonte: AUTOR, 2020.

Conforme o decorrer do processo, foram percebidas pequenas variações das posições dos objetos em ambas as rotinas. Com isso, foi definido um *offset* na junta 1 na quinta e na oitava etapas do ciclo, ambos de 5 graus para compensar a folga mecânica nas engrenagens do servo. O quadro 11 traz o tempo que os objetos permaneceram em cada rotina antes de escapar e quantos ciclos estes realizaram, no qual o tempo de cada ciclo é de 55 segundos.

Quadro 11 - Informações quantitativas do teste cíclico

| | Rotina 1 | Rotina 2 |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| Tempo no processo | 26 minutos | 12 minutos |
| Ciclos realizados | 28 ciclos | 13 ciclos |

Fonte: AUTOR, 2020.

Dessas informações é possível inferir que erros de posicionamento ainda se mostram presentes, mesmo que atenuados significativamente pelo *offset*, sem o qual os objetos escapavam antes do quinto ciclo. Sendo assim, ajustes finos em tal parâmetro são passíveis de serem adotados a fim de aprimorar a acurácia do manipulador.

4.2.3. Precisão do manipulador implementado

Ao contrário do simulado, o manipulador implementado apresentou dificuldades e erros quando submetido a pequenas variações de ângulo. No caso desse trabalho, a principal causa ficou por conta dos erros operacionais do sistema, dentre os quais estão folgas nas engrenagens dos servomotores e variações inerciais, assim como possíveis erros de medidas devido à resolução do *encoder* presente nestes servomotores.

Desse modo foram realizados testes de incremento unitário no manipulador, o qual apresentou uma folga de ± 1 grau ou ± 7 microssegundos de pulso em torno do ponto atual, sendo necessário no mínimo essa variação angular para resultar em um movimento na ferramenta do manipulador implementado, o que representa um total de 1,6 cm na extremidade do braço quando esticado.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou conceitos sobre aplicações, características, desenvolvimento e modelagem de manipuladores robóticos. Junto a isso, expôs uma metodologia para o projeto, a modelagem e a simulação de um braço robótico com seis graus de liberdade, no qual foi aplicado o modelo de cinemática direta de Denavit-Hartenberg.

A partir dos cálculos de torque foi possível definir os atuadores para o manipulador, assim como foi possível gerar uma representação no *software* MATLAB® de acordo com os parâmetros e medidas do projeto. As curvas de acionamento demonstraram ser uma ótima forma de controle, uma vez que distribuem o torque dos motores ao longo da trajetória e diminuem movimentos bruscos, também contribuindo para gerar uma trajetória suave.

Por meio das simulações foi possível analisar os movimentos e definir limites angulares para os mesmos. O volume de trabalho do manipulador foi simulado por método numérico e apresentou um resultado de grande utilidade para expressar seu alcance e flexibilidade. O erro relativo à precisão dos atuadores foi simulado de acordo com as características destes e foi caracterizado como milimétrico, no entanto deve ser analisado de acordo com a função que o manipulador efetuará.

Ao final foram realizados os testes experimentais no manipulador de 4 graus implementado, avaliando sua precisão e capacidade de repetibilidade, além da comparação com a simulação. Com isso, foi possível demonstrar erros advindos principalmente de folgas nas engrenagens dos acionadores utilizados.

De um modo geral, esse trabalho apresentou uma metodologia de pesquisa, desenvolvimento e implementação que pode ser utilizada como base para outros projetos da mesma área, atuando como uma sistemática de elaboração de outros manipuladores. Além disso, é possível aplicar o protótipo em rotinas de repetibilidade de forma suficiente a depender das características destas.

5.1. Aprimoramento do trabalho

Por questões de usabilidade do manipulador, é de grande interesse a elaboração e implementação da cinemática inversa no protótipo, uma vez que na aplicação prática o ponto de interesse é a posição e a orientação final do efetuador, parâmetros os quais são utilizados para determinar as variáveis de junta do manipulador.

Na parte de hardware, são possíveis o projeto e a implementação de uma unidade de controle e alimentação para o manipulador, unificando esses dois pontos em uma mesma placa. Além disso, é passível de projeto qualquer adaptação necessária à interface computador/manipulador. Nessa sequência é também proposto o arranjo da comunicação lógica entre o *software* MATLAB® e o manipulador por meio de blocos lógicos.

REFERÊNCIAS

ABDOLMALAKI, Reza Y. **Development of Direct Kinematics and *Workspace* Representation for Smokie Robot Manipulator & the Barret WAM.** 2017.

ANJOS, Marina M. dos. **Cirurgia minimamente invasiva no tratamento do cancro do endométrio.** Coimbra, 2017.

CARRARA, Valdemir. **INTRODUÇÃO À ROBÓTICA INDUSTRIAL.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2015.

CARVALHO, Felipe C. T. de et al. **PROJETO DE CONSTRUÇÃO E CONTROLE PID DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PARA AUXILIO NA APRENDIZAGEM DE ALUNOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA.** São João del-Rei, [201-].

CRAIG, John J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control.** 3 ed. Nova Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.

ESPRESSIF SYSTEMS CO. **ESP32.** Shanghai, 2020.

ESTADÃO. **Indústria instala 1,5 mil robôs por ano.** Época Negócios, 2017. Disponível em: < <https://epocanegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2017/08/epoca-negocios-industria-instala-15-mil-robos-por-ano.html>>. Acesso em: 21 mai. 2020.

GALEANO, Diego. **Robótica Médica.** Assunção, 2016.

GOYAL, Khushdeep; SETHI, Davinder. **AN ANALYTICAL MATHOD TO FIND *WORKSPACE* OF A ROBOTIC MANIPULATOR.** Bangladesh: Journal of Mechanical Engineering, 2010. Tehran: 5th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), 2017.

GREGÓRIO, Bruna Q. et al. **Estudo e Projeto de Manipulador Robótico Microcontrolado com Seis Graus de Liberdade.** Garça, 2016.

KHOURY JUNIOR, J. K. et al. **BRAÇO ROBÓTICO PARA POSICIONAMENTO DE UM SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL PARA MONITORAR DESGASTE DE FLANCO DA FERRAMENTA DE USINAGEM DE UM TORNO CONVENCIONAL.** Viçosa: The Journal of Engineering and Exact Sciences, 2020.

MARIANO, Daniel T. G et al. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA PARA UM BRAÇO ROBÓTICO DO TIPO PUMA.** Uberlândia, 2013.

MATIAS, Átila. **Fordismo**. Brasil Escola, 2014. Disponível em:

<<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/fordismo.htm>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ROSÁRIO, João M. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

ROSÁRIO, João M. **Robótica Industrial I: modelagem, utilização e programação**. São Paulo: Baraúna, 2010.

SABATER-NAVARRO, Jose M. et al. **ROBOTICA MEDICA – Notas prácticas para el aprendizaje de la robótica en bioingeniería**. Elche: CYTED, 2013.

SANTOS, Flávia M. dos; WATANABE, Émerson T.; CARRARA, Valdemir. **ESTUDO DA CINEMÁTICA INVERSA APLICADA NUM BRAÇO ROBÓTICO**. São José dos Campos, 2006.

SANTOS, Vítor M. F. **Robótica Industrial**. Aveiro, 2003-2004.

SANTOS, Winderson E. dos; GORGULHO JÚNIOR, José H. C. **Robótica industrial: Fundamentos, Tecnologias, Programação e Simulação**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

SARAMAGO, Marcos A. P. **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Calibração e Medida de precisão para Robôs Industriais**. Campinas, 1993.

SHAH, R.; PANDEY A. B. **Concept for Automated Sorting Robotic Arm**. Vadodara: Elsevier, 2018.

SILVEIRA, Cristiano B. **Os 6 Principais Tipos de Robôs Industriais**. [S.l.], ago. 2019. Disponível em: < <https://www.citisystems.com.br/tipos-de-robos>>. Acesso em: 18 abr. 2020.

SOUZA, Geovane M.; DELGADO, Martha X. T.; CRUZ, Tiago X. **CONTRUÇÃO DE UM BRAÇO ROBÓTICO CONTROLADO A PARTIR DE UM FPGA**. Ilhéus, 2012.

UNESP. **Servo Motor**. São Paulo, 2013. Disponível em: < <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula-4---servo-motor-13-03-2013-final.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ZAR, Thu; LIN, Phywo W.; WIN, Su Y. **Workspace Analysis of Two-link Planar Manipulator**. [S.l.]: International Journal of Science and Engineering Applications, 2019.