

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ANDRÉ LUÍS FERNANDES PEDRA

**CONSTRUÇÃO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM
CONTROLE DE POSIÇÃO VISANDO O APRENDIZADO EM
ROBÓTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

ANDRÉ LUÍS FERNANDES PEDRA

**CONSTRUÇÃO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM
CONTROLE DE POSIÇÃO VISANDO O APRENDIZADO EM
ROBÓTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel.

Orientadora: Prof^a.Dr^a.Carolina Ribeiro Rodrigues

Co-orientador: Prof^o.Dr.Danilo Hernane Spatti

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Construção de um Manipulador Robótico com Controle de Posição visando o aprendizado em robótica

por

Andre' Lu'is Fernandes Pedra

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 01/06/2018

Prof^a.Dr^a, Carolina Ribeiro Rodrigues
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^o.Dr Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^o.Dr Rodrigo Rodrigues Sumar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e compreensão e aos amigos pelo apoio, companheirismo e presença durante esta jornada, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, peça chave para a conclusão desta primeira etapa que se encerra em minha vida.

Logo, agradeço à todos os meus familiares. Em especial meus pais que sempre foram apoiadores do meu sonho profissional de dedicar minha vida àquilo que amo. Agradeço ao meu avô que sempre esteve presente, dando exemplos de perfeccionismo e persistência em tudo que me comprometo a fazer. Em seguida, agradeço à minha madrinha Vanda e meu padrinho Nivaldo que, sem os quais, nunca conseguiria chegar ao final dessa jornada.

Aos meus eternos amigos que carrego comigo, minha família que pude escolher, agradeço com imensidão pelos momentos de apoio, companheirismo e lealdade. Com orgulho, cito a família que a UTFPR me apresentou ao longo de 5 anos de muito estudo, noites sem dormir, festas, risos, choros e principalmente conquistas: Wesley Moreira, Giovana Lima, Thainara de Araújo, Luana Souza, Tayane Vidal, Gabriela Batista, Higor Trabuco, Pedro Zugaib, Bruno Dominato, Diego Villalba, Kelvin Lacerda, Ludmila Schaikoski, Tamires Priscila e Carolina Lourenço. Em especial, agradeço essa conquista à Dayani Quero da Silva, que se tornou uma pessoa especial na qual eu lembrarei por toda a vida.

Agradeço aos amigos de longa data que me apoiaram em todos os momentos que precisei. A verdadeira amizade persiste mesmo quando existem grandes barreiras como a distância, cito: Karen D'avilla, Mariana Camargo, Rafael Pedroso, Victor Cipelli, Leonan Tosta, Pedro Marcon, Afonso Filho e Tiago Belloto.

Por fim, agradeço à todos meus professores que tive a honra e oportunidade de trabalhar em conjunto. Em especial, agradeço àqueles que honram a profissão de professor e me inspiram em ser um profissional de sucesso: Maria Eugênia Dajer, Cristiano Marcos Agulhari, Emerson Ravazzi, Glaucia Bressan, Márcio Mendonça, Rodrigo Sumar e Danilo Spatti. Agradeço minha orientadora, Carolina Ribeiro Rodrigues, pela extrema paciência, confiança e dedicação em me guiar até o final da execução deste trabalho.

”A sabedoria oferece proteção, como o faz o dinheiro, mas a vantagem do conhecimento é esta: a sabedoria preserva a vida de quem a possui.”

(Eclesiastes 7:12)

RESUMO

PEDRA, André L. F.. Construção de um Manipulador Robótico com Controle de Posição visando o aprendizado em robótica. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

O presente trabalho descreve a construção de um manipulador robótico de três graus de liberdade assim como a implementação de um controle de posição utilizando referências de tensão dispostas em cada elo do manipulador. O modelo físico foi construído utilizando uma impressora 3D cartesiana por meio de plástico em deposição dispondo de motores de passo para cada grau de liberdade. Para controlar os movimentos do robô é utilizada lógica *Fuzzy*, considerando apenas dois graus de liberdade.

Palavras-chave: Controle inteligente, Lógica *Fuzzy*, Manipulador robótico, Robótica

ABSTRACT

PEDRA, André L. F. . 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

This work describes the construction of a three-degree freedom robot as well as the implementation of a position control using voltage references arranged at each link of the manipulator. The physical model was constructed using a Cartesian 3D printer by means of deposited plastic and mounted with pitch motors for each degree of freedom. To control the movements of the robot, *Fuzzy* logic is used, considering only two degrees of freedom.

Keywords: Robotics, *Fuzzy* Systems, Artificial Intelligence

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Robô industrial ABB IRB 1600.	17
FIGURA 2	– Sistemas de coordenadas robóticas	18
FIGURA 3	– Sistemas de coordenadas robóticas	19
FIGURA 4	– Nuvem de pontos manipulador 2-GDL genérico	19
FIGURA 5	– Braço Robótico Articulado com 2-GDL	21
FIGURA 6	– Logica <i>booleana</i> e lógica <i>Fuzzy</i>	23
FIGURA 7	– Função de Pertinência Triangular	24
FIGURA 8	– Função de Pertinência Trapezoidal	24
FIGURA 9	– Função de Pertinência Gaussiana	25
FIGURA 10	– Exemplo Cálculo de Centróide	26
FIGURA 11	– Diagrama de Funcionamento do Sistema	27
FIGURA 12	– Diagrama Construtivo Manipulador Robótico	29
FIGURA 13	– Modelo Real do Manipulador.....	30
FIGURA 14	– Primeira Condição de Posicionamento	31
FIGURA 15	– Segunda Condição de Posicionamento	33
FIGURA 16	– Espaço de Trabalho Real	34
FIGURA 17	– Esquema de Ligação	36
FIGURA 18	– Lógica de Acionamento da Articulação Inferior	37
FIGURA 19	– Lógica de Acionamento da Articulação Superior	38
FIGURA 20	– Esquemático de Ligação do <i>Driver</i> Motor de Passo A4988	39
FIGURA 21	– Ângulo Atual	41
FIGURA 22	– Erro de Posição	41
FIGURA 23	– Saída do Sistema.....	42
FIGURA 24	– Superfície de Controle para Articulação Inferior	43
FIGURA 25	– Ângulo Atual	43
FIGURA 26	– Erro de Posição	43
FIGURA 27	– Saída do Sistema.....	44
FIGURA 28	– Superfície de Controle para Articulação Inferior	45
FIGURA 29	– Teste de 20 Pontos de Alcance	46
FIGURA 30	– Vista Detalhada.....	48
FIGURA 31	– Vista Geral	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Tabela de Parâmetros D-H	21
TABELA 2	– Domínio de Abertura do Manipulador	30
TABELA 3	– Tabela de Especificações Técnicas	35
TABELA 4	– Sequência de Passo Único	36
TABELA 5	– Tabela Verdade <i>Microstepping</i>	40
TABELA 6	– Teste de Alcance de Pontos Aleatórios	47
TABELA 7	– Relação Ângulo de Abertura x Tensão Lida	52
TABELA 8	– Relação Ângulo de Abertura x Tensão Lida	54

LISTA DE SIGLAS

PID	Proporcional Integral Diferencial
P	Pristmático
R	Rotacionais
S	Esféricos
D-H	<i>Denavit-Hartenberg</i>
V_{DD}	Alimentação com Tensão Positiva
V_{MOT}	Alimentação do Motor
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 ROBÓTICA	15
2.1.1 Definição de Robô	16
2.1.2 Componentes de um Robô	16
2.1.3 Graus de Liberdade	17
2.1.4 Coordenadas Robóticas	17
2.1.5 Espaço de Trabalho	18
2.2 MODELO DENAVIT-HARTENBERG	20
2.2.1 Modelo D-H para Cinemática Direta	20
2.3 SISTEMAS FUZZY	23
2.3.1 Função de Pertinência	24
2.3.2 Fuzzificação	25
2.3.3 Inferência	25
2.3.4 Defuzzificação	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 ESTRUTURA DO ROBÔ	28
3.1.1 Primeiro Quadrante	31
3.1.2 Segundo Quadrante	32
3.1.3 Espaço de Trabalho Real	34
3.2 MOTORES	35
3.3 CONTROLE DO MANIPULADOR	36
3.3.1 Acionamento dos Motores	38
3.3.2 Leitura da Abertura das Articulações	40
3.3.3 Lógica fuzzy	41
4 RESULTADOS	46
5 CONCLUSÃO	49
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50
Apêndice A – RELAÇÃO DE ÂNGULO DE ABERTURA PARA ARTICULAÇÃO SUPERIOR	52
Apêndice B – RELAÇÃO DE ÂNGULO DE ABERTURA PARA ARTICULAÇÃO INFERIOR	54

1 INTRODUÇÃO

No decorrer dos séculos, houveram diversas evoluções nas tecnologias empregadas ao sistema de produção industrial, como por exemplo, o desenvolvimento da máquina à vapor por James Watt, em 1769. A contribuição de Watt é de extrema importância uma vez que impulsionou de modo significativo a automatização de processos industriais.

A presença de robôs dentro do cenário industrial desempenha um papel de destaque devido às suas várias vantagens em relação ao trabalho humano, como por exemplo, a eficiência e precisão na execução de tarefas repetitivas que exigem qualidade e agilidade. Ademais, na década de 50, robôs industriais começaram a ser utilizados para substituir o homem na realização de tarefas perigosas, diminuindo o riscos de acidentes. O uso de robôs industriais implica diretamente no aumento da produção e na padronização de produtos, uma vez que possuem força mecânica mantendo a precisão e resistência.

Carregamento de máquinas, montagem e manufatura, soldagem, pintura e transporte de materiais são alguns exemplos de aplicação da robótica na industrial (NIKU, 2010). Para a execução de uma determinada tarefa é necessário que haja um planejamento prévio de seu movimento através da análise do seu modelo cinemático. Tal modelo descreve matematicamente cada elo do robô para atingir um ponto no espaço.

Para garantir um bom uso da robótica na indústria, é necessário uma boa estratégia de controle. Durante a segunda metade do século passado diversas técnicas de controle foram desenvolvidas, tais como controle adaptativo, controle inteligente, controle robusto, controle multivariável. O controle clássico, como a sintonização PID (Proporcional Integral Diferencial) (NISE, 2002) é insuficiente para tratar de problemas não-lineares (KHALIL, 2013). Como alternativa pode-se aplicar técnicas de controle inteligente, sendo atualmente três abordagens mais utilizadas: controle por lógica *Fuzzy* (SILER; BUCKLEY, 2005), controle por redes neurais artificiais (SILVA et al., 2010) e controle por algoritmos genéticos (REZENDE, 2003).

Sistemas *Fuzzy* são técnicas computacionais que possuem a capacidade de tomar decisões utilizando base de regras (KASABOV, 1996). Possuem variáveis linguísticas baseadas

em operadores de regras, facilitando a interpretação e aplicação. São sistemas capazes de interpretar incertezas nas variáveis de entrada, tratando as informações de forma qualitativa (BILOBROVEC et al., 2004).

Os propósitos deste trabalho são construir um manipulador robótico a partir de uma impressora 3D cartesiana e realizar o controle de posição. Será utilizada uma estrutura de controle por meio de lógica *Fuzzy* para a movimentação dos motores, utilizando o *tollbox* disponibilizado pelo software *MatLab/Simulink* [®] (MANUAL, 1997).

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente implementação da robótica no âmbito industrial exige conhecimentos interdisciplinares, tais como engenharia mecânica, engenharia elétrica, engenharia de computação, sistemas de controle, sistemas inteligentes e engenharia eletrônica. Para suprir essa demanda e focalizando em um projeto multidisciplinar baseado na robótica, potencializa-se o desenvolvimento do presente trabalho acadêmico como forma de manter os futuros profissionais de engenharia conectados com a evolução do mercado industrial, agregando valor ao conhecimento e ao perfil profissional do estudante.

Entretanto, a tecnologia empregada em robótica na indústria permanece em um patamar elevado àqueles encontrados em universidades. O investimento em tecnologias avançadas se torna restrito para um ambiente acadêmico, uma vez que os equipamentos necessários possuem custos extremamente elevados. Visando a integração de alunos de engenharia à projetos de robótica, o desenvolvimento deste projeto de baixo custo e de menor complexidade pode ser aplicado ora em laboratórios de ensino, ora em projetos de pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho propõe a construção de um manipulador robótico com dois graus de liberdade e uma base giratória, compondo três graus de liberdade, assim como realizar o controle de suas articulações.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o propósito de alcançar os objetivos gerais, são definidos os objetivos específicos:

- Construir um manipulador robótico com três graus de liberdade, assim como sua base e

engrenagens, utilizando uma impressora 3D cartesiana;

- Realizar o acionamento de cada grau de liberdade separadamente;
- Controlar cada grau de liberdade utilizando técnicas de lógica de programação;
- Determinar a base de regras que será aplicada à lógica *Fuzzy* para controle de velocidade;
- Implementar a lógica *Fuzzy* para cada articulação do robô.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ROBÓTICA

A primeira aparição do termo robô se deu pelo escritor tcheco Karel Čapek em sua obra de ficção científica *Opilek* e, mais tarde em 1921, em sua peça teatral *Os Robôs Universais de Rossum*, onde a palavra *robot* na língua eslava foi adotada para humanos artificiais que tinham como objetivo o trabalho manual de tarefas a eles impostas.

O conceito de robótica foi inserido por Isaac Asimov e John Campbell, em 1940, no qual também foram propostas as três leis da robótica (PAGALLO, 2013):

- 1ª Lei: Um robô não poderá ferir um humano, ou por indecisão permitir que algum humano seja ferido;
- 2ª Lei: Um robô obedecerá às ordens dadas pelos humanos, com exceção se tal ordem conflite com a primeira lei;
- 3ª Lei: Um robô protegerá sua própria existência, até o instante que tal ação conflite com as duas primeiras leis.

Na literatura e no âmbito industrial, a robótica é resultado de constantes pesquisas e inovações conforme a necessidade de novas técnicas de produção e execução de tarefas de alta periculosidade.

Na década de 50, George Devol desenvolveu o primeiro robô programável com o intuito de aumentar a produtividade na indústria. Em paralelo, foram desenvolvidos manipuladores com vários graus de liberdade para manusear materiais nucleares (NIKU, 2010).

Atualmente a presença de robôs no ambiente industrial é indispensável e presente em grande parte do setor. A grande confiabilidade na execução de tarefas repetitivas justifica a massiva utilização de tal tecnologia com o intuito de aumentar a produtividade.

2.1.1 DEFINIÇÃO DE ROBÔ

Segundo a Norma ISO 8373 (SYSTEMS et al., 2012), um robô industrial é definido por um manipulador programável em pelo menos três eixos com vários graus de liberdade controlados automaticamente, reprogramável, multifuncional e possuindo base fixa ou móvel para utilização na automação industrial.

2.1.2 COMPONENTES DE UM ROBÔ

Segundo Niku, um robô industrial é construído através da integração dos seguintes elementos:

- 1 Manipulador ou explorador: Caracterizado com o corpo físico do robô industrial, possuindo as articulações, ligações e todos seus elementos estruturais (Figura 1).
- 2 Atuador final: Está presente na última articulação do robô e geralmente é responsável pela manipulação dos objetos, interação com outras máquinas ou execução de tarefas. Manipulador pneumático, maçarico de solda e pistola de pintura são alguns exemplos de atuadores finais mais presentes na indústria.
- 3 Atuadores: São responsáveis por realizar os movimentos de cada articulação do robô. Os atuadores são acionados diretamente pelo controlador e podem ser servomotores, motores de passo, atuadores hidráulicos e atuadores pneumáticos.
- 4 Sensores: Os sensores são o meio de comunicação do ambiente externo com o sistema de controle interno do robô. Possuem a finalidade de fornecer uma referência para que o sistema saiba a localização de cada articulação em seu espaço de trabalho.
- 5 Controlador: Responsável pelo gerenciamento de posição e tomada de decisão dos movimentos do robô. O controlador coordena os movimentos com base nas informações fornecidas pelos sensores e pelo computador no qual está conectado.
- 6 Processador: Calcula os movimentos de todas as articulações do robô e determina a velocidade de movimento das mesmas para atingir o local desejado.
- 7 Software: É a linguagem de programação empregada no controle de cada atuador. É responsável pela tomada de decisões de cada movimento do robô e a forma em que os movimentos serão executados.

Figura 1: Robô industrial ABB IRB 1600.



Fonte: <http://www.directindustry.com/pt/prod/abb-robotics/product-30265-169124.html>

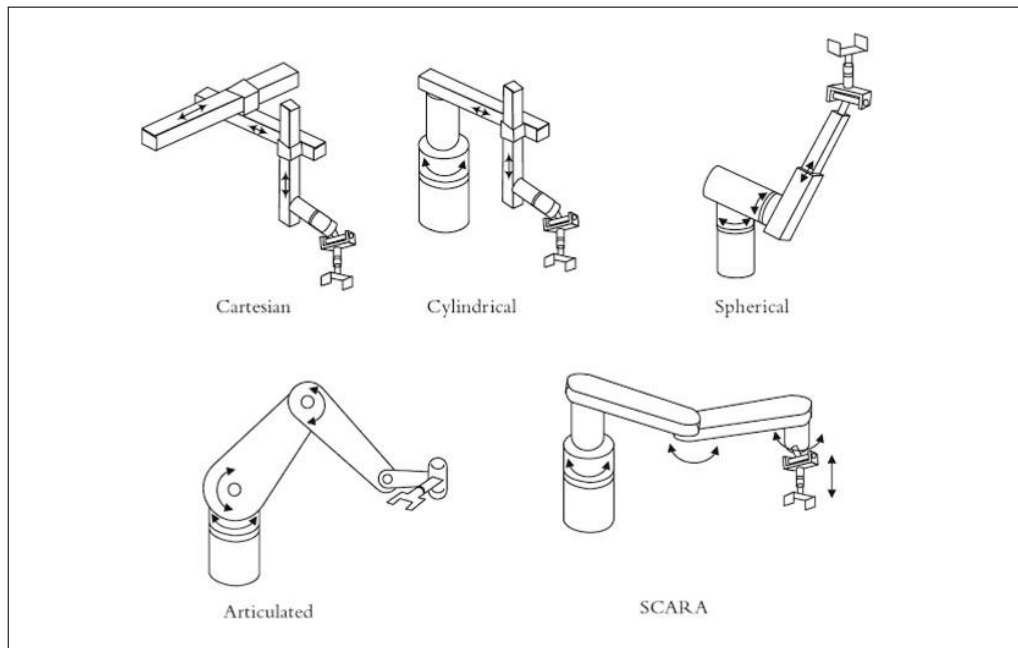
2.1.3 GRAUS DE LIBERDADE

A construção de um manipulador robótico se dá pelo conjunto de articulações conectados em cadeia. As articulações podem ser do tipo lineares, rotativas, deslizantes ou esféricas (NIKU, 2010), e a junção de cada articulação é chamada de elo. Por fim, cada elo é caracterizado como sendo um grau de liberdade no manipulador.

O conjunto de graus de liberdade define as possíveis configurações de cada articulação para alcançar um determinado ponto no espaço de trabalho disponível para o robô.

2.1.4 COORDENADAS ROBÓTICAS

Ainda segundo Niku (2010), existem alguns sistemas de coordenadas que descrevem o comportamento cinemático do robô. A construção física de cada articulação podem seguir 3 modelos, sendo: prismáticos (P), rotacionais (R) e esféricos (S). A combinação de um ou mais modelos define o sistema de coordenada robótica como mostra a Figura 2.

Figura 2: Sistemas de coordenadas robóticas

Fonte: Adaptado Niku (2010)

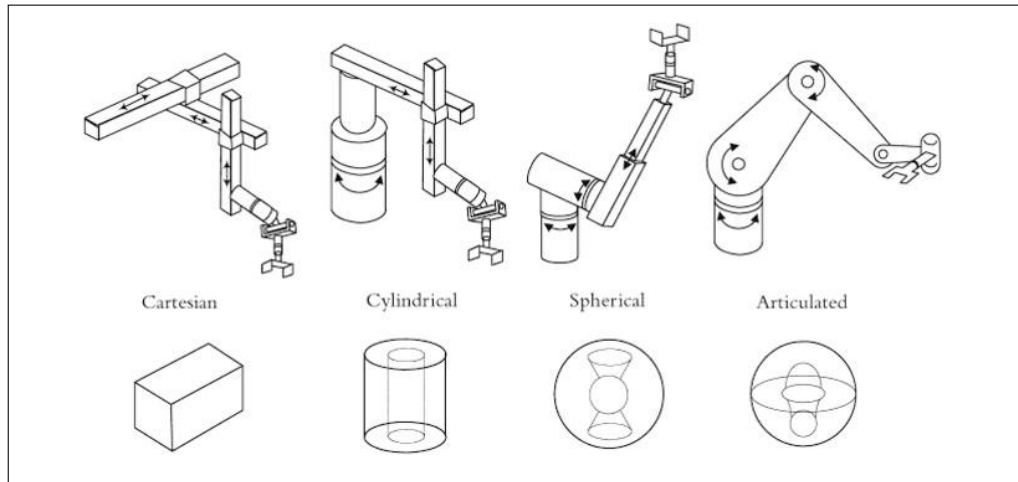
Dentre elas, a mais comumente utilizada no âmbito industrial é o Articulado/Antropomórfico, no qual todos os elos se movimentam por revolução, semelhante à um braço humano.

2.1.5 ESPAÇO DE TRABALHO

O espaço de trabalho é constituído por uma nuvem de pontos ao redor do robô, nos quais são alcançados pela última articulação variando as configurações das demais.

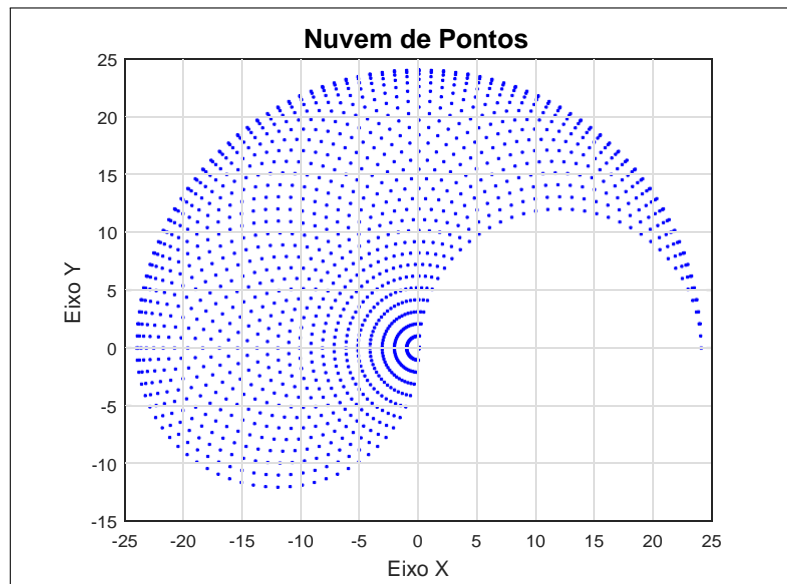
Matematicamente, o espaço de trabalho pode ser encontrado a partir das equações que descrevem o comportamento cinemático de cada elo do robô, assim como suas limitações pelos valores de domínio de cada articulação individual (ROSARIO, 2005).

O formato de cada espaço de trabalho é definido através da construção física de cada robô. A Figura 3 mostra o formato genérico para algumas configurações de manipuladores robóticos.

Figura 3: Sistemas de coordenadas robóticas

Fonte: Adaptado (NIKU, 2010)

Em ambiente de programação, o espaço de trabalho alcançável pelo manipulador é descrito através de uma nuvem de pontos, como mostrado na Figura 4. Esta, representa todos os pontos que a última articulação do manipulador consegue atingir dentro de seus domínios definidos por sua construção física (CORKE, 2011).

Figura 4: Nuvem de pontos manipulador 2-GDL genérico

Fonte: Autoria Própria

2.2 MODELO DENAVIT-HARTENBERG

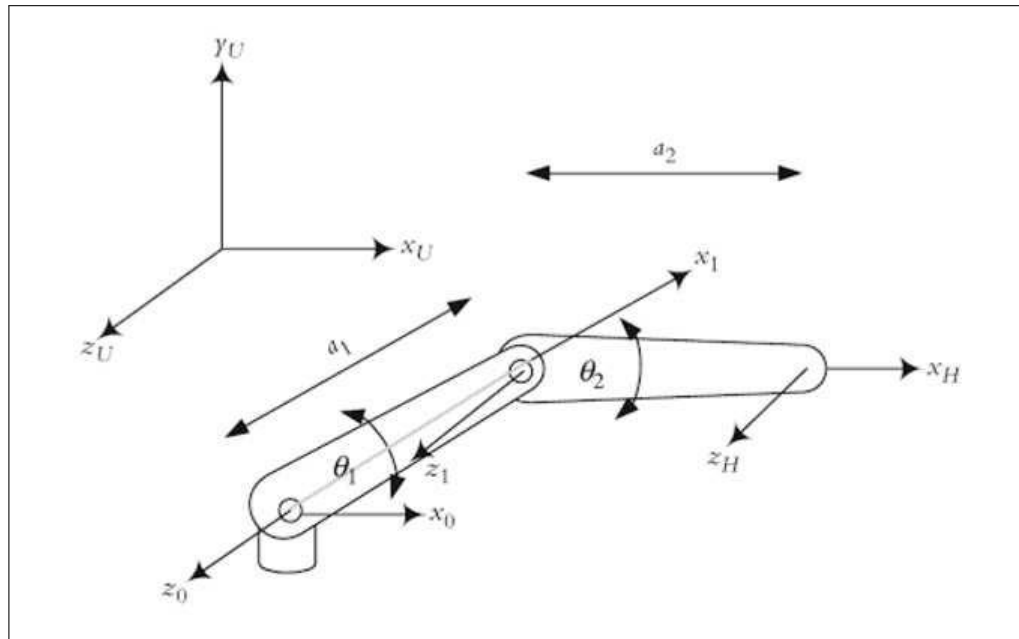
Desenvolvido por Jacques Denavit e Richard Hartenberg em 1955, o modelo *Denavit-Hartenberg* (D-H) é utilizado para representar matematicamente a cinemática de robôs articulados.

O modelo D-H possui uma forma de representação muito simples e pode ser utilizada em qualquer configuração de robô, independente de sua complexidade. Outra aplicação para o modelo D-H são as transformações em qualquer sistema de coordenadas, utilizando matrizes de rotação e translação para descrever os movimentos do manipulador. Ademais, o modelo D-H pode ser utilizado ainda em análises de movimento diferenciais e Jacobianos, análise dinâmica e análise de forças (CRAIG, 2005).

Para realizar a modelagem com base em *Denavit-Hartenberg* faz-se necessário atribuir para cada articulação do robô um sistema de referência local. Cada eixo sofrerá pelo menos uma operação de rotação e translação, com o objetivo de sair do primeiro eixo de referência e atingir a ponta da última articulação.

2.2.1 MODELO D-H PARA CINEMÁTICA DIRETA

Supondo um braço robótico articulado com 2-GDL como ilustrado na Figura 5, deseja-se definir um modelo D-H no qual represente sua cinemática de movimento.

Figura 5: Braço Robótico Articulado com 2-GDL

Fonte: Adaptado Niku (2010)

Definidos os eixos de referência (z_0, x_0) , (z_1, x_1) e (z_H, x_H) é necessário transformar de um sistema de referência para o próximo. Podemos escrever os parâmetros do modelo D-H em uma tabela.

Tabela 1: Tabela de Parâmetros D-H

#	θ	d	a	α
0-1	θ_1	0	a_1	0
1-H	θ_2	0	a_2	0

Para a transformação do eixo (z_0, x_0) para o eixo (z_1, x_1) serão realizados quatro movimentos:

1. Rotacionar o eixo z_0 até que o eixo x_0 esteja paralelo ao eixo x_1 .
2. Transladar o eixo x_0 em d unidades para que esteja no mesmo plano de x_1 .
3. Transladar ao longo do eixo x_0 a uma distância de a_1 .
4. Rotacionar em torno de x_1 para que os eixos z_0 e z_1 sejam paralelos.

A transformação de um eixo de referência n para $n+1$ pode ser descrita como uma pós-multiplicação das matrizes de movimento, como mostra a Equação 1.

$${}^nT_{n+1} = R_{ot}(z_0, \theta_n) x T_{rans}(0, 0, d_1) x T_{rans}(a_1, 0, 0) x R_{ot}(x, \theta_{n+1}) \quad (1)$$

Escrevendo as matrizes de cada transformação para o exemplo da Figura 5, temos

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^xT_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 & 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 & 0 & 0 & \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 & 0 \\ 0 & \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 & \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Adotando C para a representação da operação cosseno e S para operação seno, obtemos a transformação simplificada que descreve o modelo D-H do exemplo da Figura 5.

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_1C_2 - S_1S_2 & -C_1C_2 - S_1C_2 & 0 & a_2(C_1C_2 - S_1S_2) + a_1C_1 \\ S_1C_2 + C_1S_2 & -S_1S_2 + C_1C_2 & 0 & a_2(S_1C_2 + C_1S_2) + a_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Como $C_1C_2 - S_1S_2 = C(\theta_1 + \theta_2) = C_{12}$ e $S_1C_2 + C_1S_2 = S(\theta_1 + \theta_2) = S_{12}$ obtemos a transformação simplificada descrita pela Equação 4.

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & a_2C_{12} + a_1C_1 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & a_2S_{12} + a_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

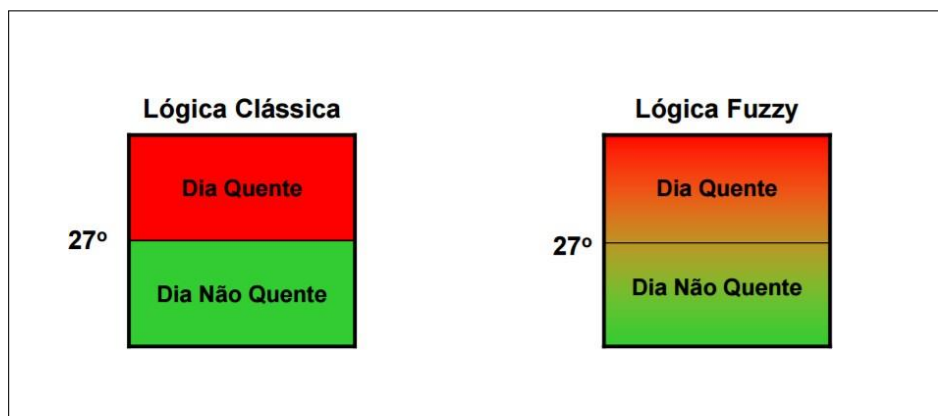
A cinemática direta permite encontrar a posição final do braço manipulador no espaço se existir valores válidos para θ_1 e θ_2 , assim como o comprimento de cada articulação (a_1 e a_2) (NIKU, 2010).

2.3 SISTEMAS FUZZY

Em 1965, Lofti Asker Zadeh introduziu o conceito de lógica *Fuzzy* ampliando a aplicação na área de controle de processos. Entretanto, os princípios de lógica *Fuzzy* surgiram primeiramente por Jan Lukasiewicz, que em 1920 introduziu o conceito de graus de pertinência, contrapondo com a lógica clássica.

O conceito *Fuzzy* permite que o sistema tenha uma resposta não-binária (Figura 6), isso dá a capacidade de extrair as informações de forma qualitativa, ou seja, a resposta do sistema pode assumir valores reais que estejam dentro do intervalo do universo de discurso.

Figura 6: Logica *booleana* e lógica *Fuzzy*



Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

De acordo com a lógica clássica, a partir da temperatura 27°C o sistema deixa de ser classificado como "Dia Não Quente" e passa a ser classificado como "Dia Quente". Existe uma linha tênue que define a separação dos conjuntos (BARG, 2002).

Segundo a lógica *Fuzzy*, não existe uma fronteira que separa a classificação de cada estado do sistema. Conforme o aumento da temperatura o sistema deixa de ser "Dia Não Quente" e gradativamente passa a ser "Dia Quente", sem possuir uma separação definida entre os dois estados (SILVA et al., 2010). Quando comparamos o tratamento de informações em sistemas inteligentes, sabemos que em Redes Neurais este é feito de forma quantitativa, utilizando uma base de dados conhecida pelo sistema. Em contrapartida, Sistemas *Fuzzy* tratam as informações de forma qualitativa, utilizando regras linguísticas para a tomada de decisão.

2.3.1 FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA

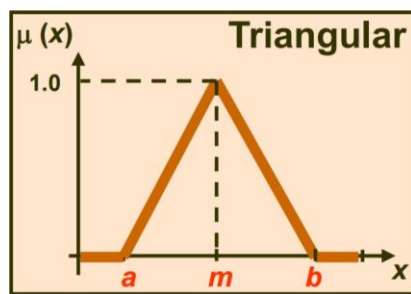
Segundo Kasabov (1996), a base da função de pertinência, também chamada de função de inclusão, indica que uma variável pode pertencer mais ou menos a um determinado conjunto. A Equação 5 expressa a função de inclusão ao conjunto *Fuzzy*, na qual $\mu_A(x)$ representa o grau de pertinência da variável x que pertence ao universo de discurso X em relação ao conjunto *Fuzzy A*.

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0, 1]; x \in X \tag{5}$$

Os principais tipos de Funções de Pertinência são:

- Triangular

Figura 7: Função de Pertinência Triangular

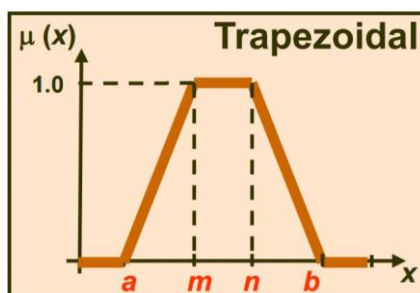


$$u(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \tag{6}$$

Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

- Trapezoidal

Figura 8: Função de Pertinência Trapezoidal



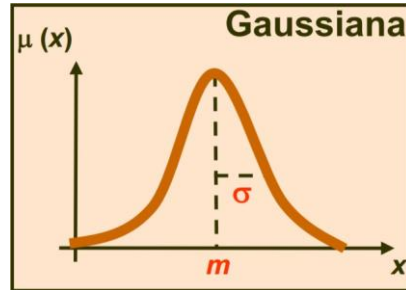
$$u(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases}$$

Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

(7)

- Gaussiana

Figura 9: Função de Pertinência Gaussiana



$$u(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

A seleção do conjunto de funções de pertinência que irão compor o universo de discurso se faz a partir da experiência do especialista do sistema. Seu intervalo é definido a partir das variáveis linguísticas, e deve cobrir todo o universo de discurso.

2.3.2 FUZZIFICAÇÃO

Durante o processo de *fuzzificação*, o valor de uma determinada variável de entrada do sistema é enquadrado em uma ou mais funções de pertinência, permitindo o cálculo do grau de pertinência. Tal resultado permite que a inferência defina as bases de regra que serão utilizadas.

2.3.3 INFERÊNCIA

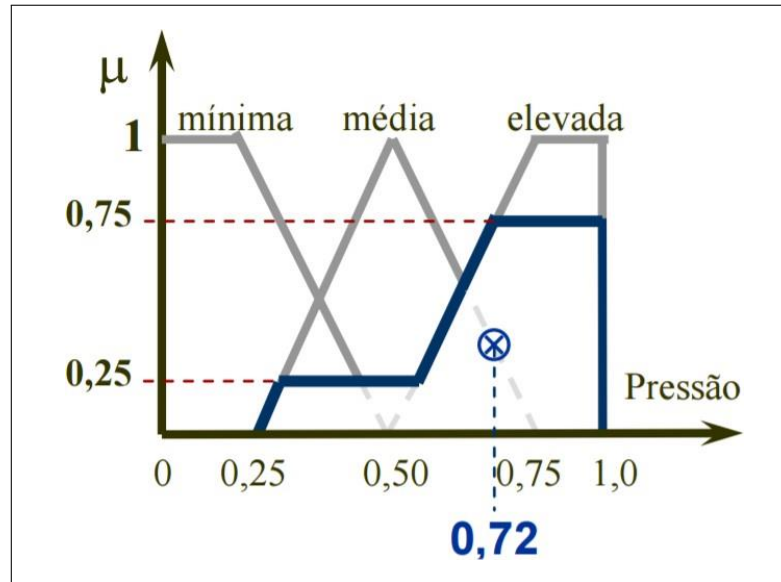
As regras de inferência possuem o modelo "Se... Então..." que definem a consequência que cada conjunto de variáveis da entrada desempenha na saída do controlador. O resultado do processo de inferência se dá por um valor nebuloso que não pode ser interpretado pelo controlador. Esse valor pode ser encontrado utilizando métodos de inferência que possuem alguns modelos que são mais utilizados, como o Método *Mamdani* e Método *Sugeno* (KASABOV, 1996).

2.3.4 DEFUZZIFICAÇÃO

Com isso, o processo de *defuzzificação* tem como objetivo retornar um valor numérico no qual pode ser interpretado pelo controlador. O processo de *defuzzificação* pode ser realizado utilizando o método *centróide* que consiste em encontrar a posição no eixo x que corresponde

ao centro da área formada pela ativação das funções de pertinência conforme exemplificado na Figura 9.

Figura 10: Exemplo Cálculo de Centróide



Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

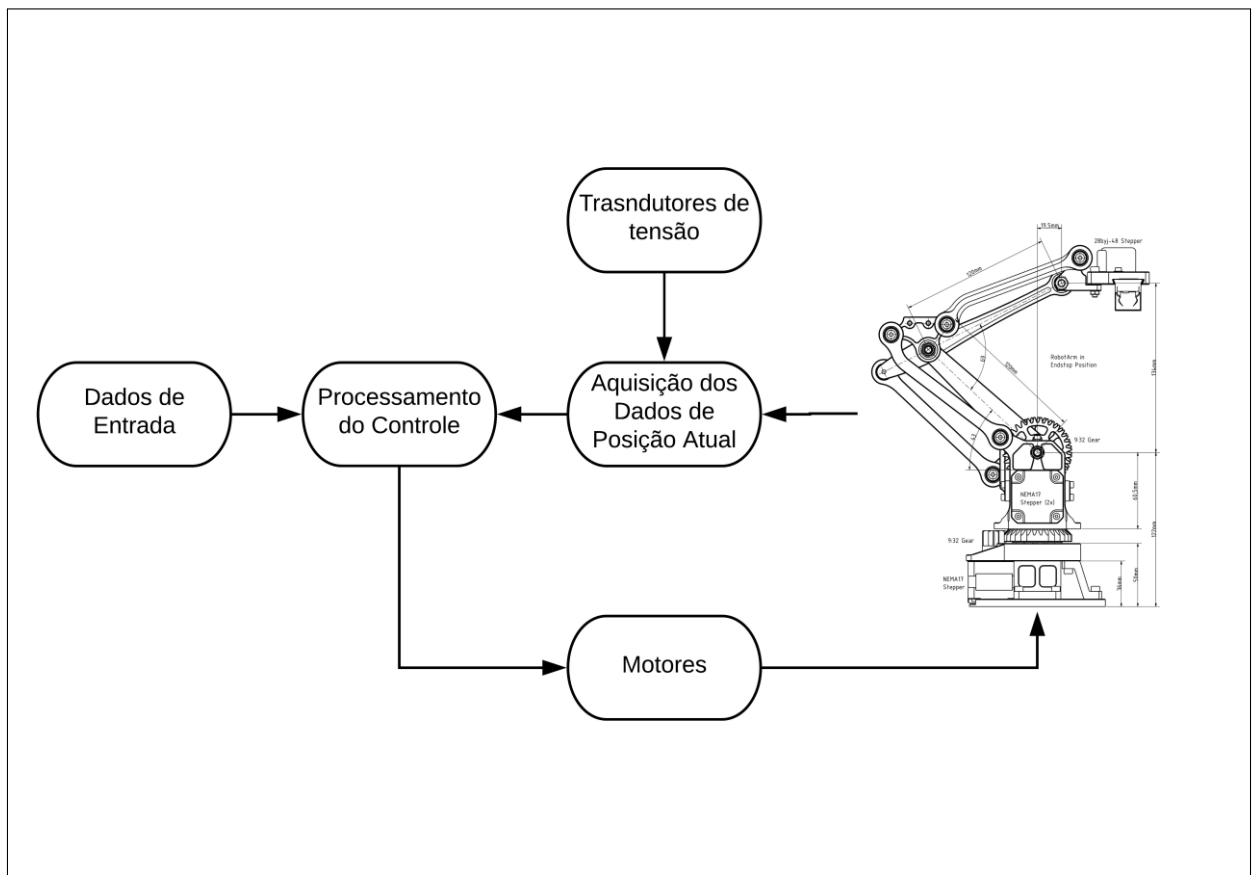
A Equação 9 mostra o cálculo para a obtenção do valor numérico do exemplo da Figura 10, onde p_k é o k-ésimo valor de discretização do universo de discurso, sendo N o número total de elementos deste universo.

$$centroide = \frac{\sum_{k=1}^N \mu(p_k) \cdot p_k}{\sum_{k=1}^N \mu(p_k)} \quad (9)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os passos seguidos para a execução deste trabalho. O diagrama da Figura 11 mostra o processo de funcionamento do sistema.

Figura 11: Diagrama de Funcionamento do Sistema



Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado, é possível dividir o sistema em 6 blocos principais: dados de entrada, processamento de controle, aquisição de dados de posição atual, transdutores de tensão, motores e o robô. Como segue, é detalhado cada bloco:

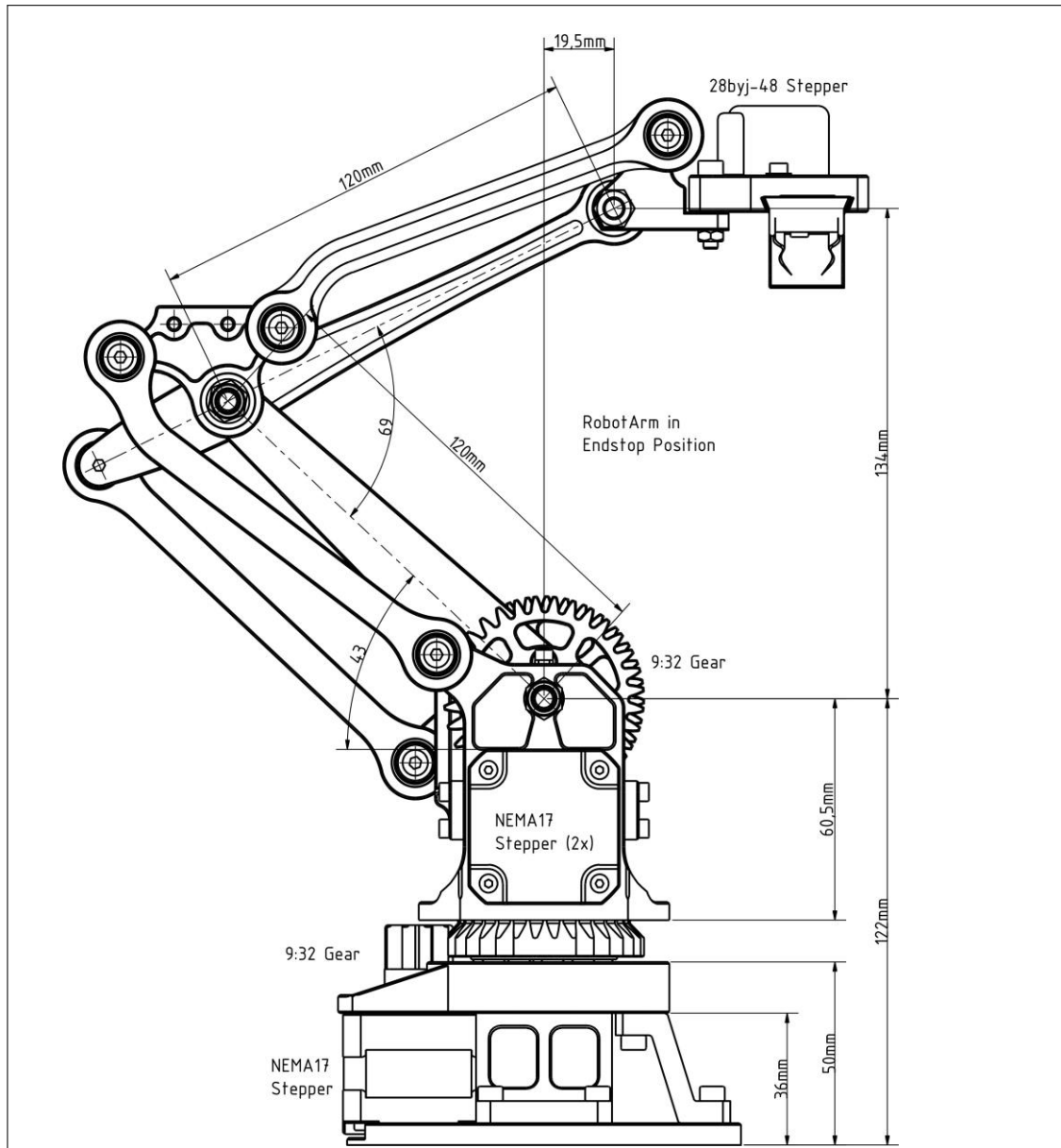
- O bloco "Dados de Entrada" é responsável por receber as informações de entrada do usuário do robô, caso utilize cinemática direta, as entradas serão os ângulos de cada articulação. Uma vez adotada a estratégia de cinemática inversa, as entradas serão as coordenadas no plano de trabalho do robô.
- O bloco "Processamento do Controle" engloba a lógica de controle utilizada, podendo adotar um sistema inteligente ou convencional.
- O estágio "Aquisição dos Dados de Posição Atual" é responsável pela interpretação das informações recebidas pelos transdutores de tensão em formato de posição no espaço de trabalho.
- O bloco "Transdutores de tensão" são responsáveis pela informação da abertura de cada articulação, estes se dão por potenciômetros localizados nas juntas do robô.
- O bloco "Motores" refere-se aos motores responsáveis pela movimentação do robô.
- O "Robô" é o conjunto da estrutura mecânica composta por 2 graus de liberdade e 1 base giratória.

Ao final, o conjunto de todos os blocos formam o manipulador robótico com 3 graus de liberdade, agregando um sistema de controle capaz de movimentar 2 articulações permitindo seu uso em um plano X-Y em duas dimensões.

3.1 ESTRUTURA DO ROBÔ

O robô utilizado para a implementação do controle possui uma base giratória e duas articulações movimentadas por meio de engrenagens em sua base, como mostra o diagrama da Figura 12. A movimentação de cada articulação é realizada de forma independente através de motores de passo bipolares localizados nas laterais da base. O atuador, localizado na extremidade da segunda articulação, possui um conjunto de hastes que permitem que a mesma se mantenha paralela ao eixo X em relação ao plano bidimensional.

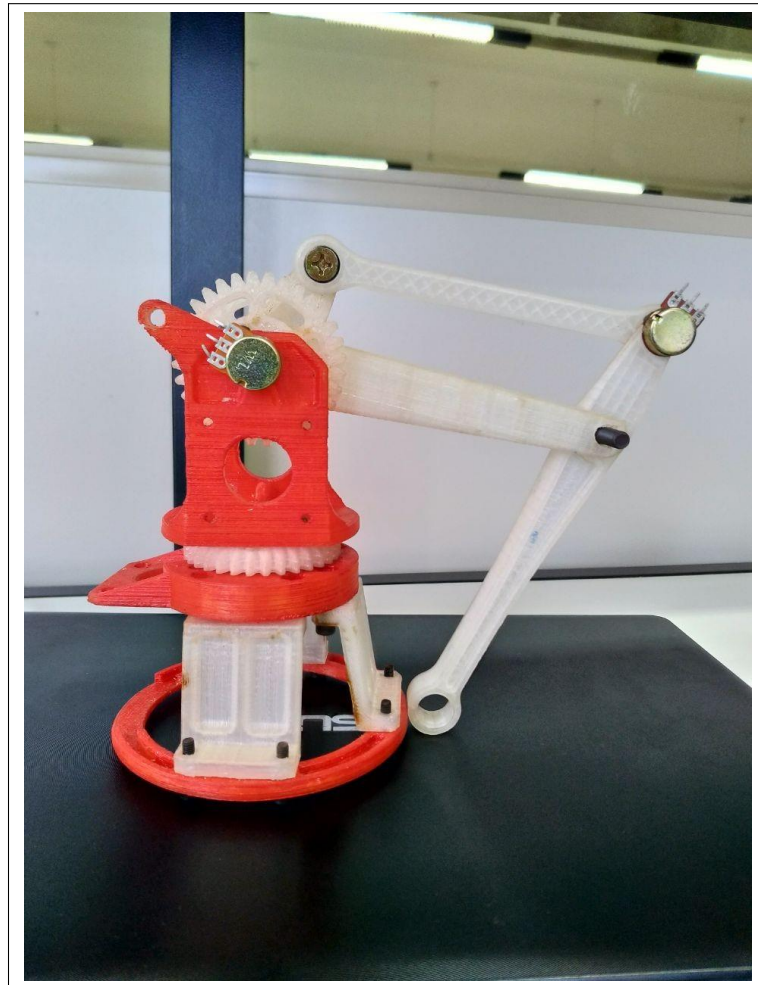
Figura 12: Diagrama Construtivo Manipulador Robótico



Fonte: <https://www.thingiverse.com/thing:1718984>

Para a construção da estrutura física, foi utilizado uma impressora 3D de formato cartesiano, na qual imprime os objetos em extrusão de plástico aquecido. Entretanto, a fim de simplificar o projeto de controle, foram descartados o uso do atuador final e suas hastes de estabilização.

Como resultado, a Figura 13 mostra a estrutura completa que será considerada para as análises e projeto de controle.

Figura 13: Modelo Real do Manipulador

Fonte: Autoria Própria

Para determinar o espaço de trabalho do manipulador, é necessário realizar uma análise cinemática com base nos dados de construção presentes na Figura 11. Foram realizados testes de abertura em ambas as articulações para determinar o valor de abertura mínimo e máximo, conforme descritos na Tabela 2

Tabela 2: Domínio de Abertura do Manipulador

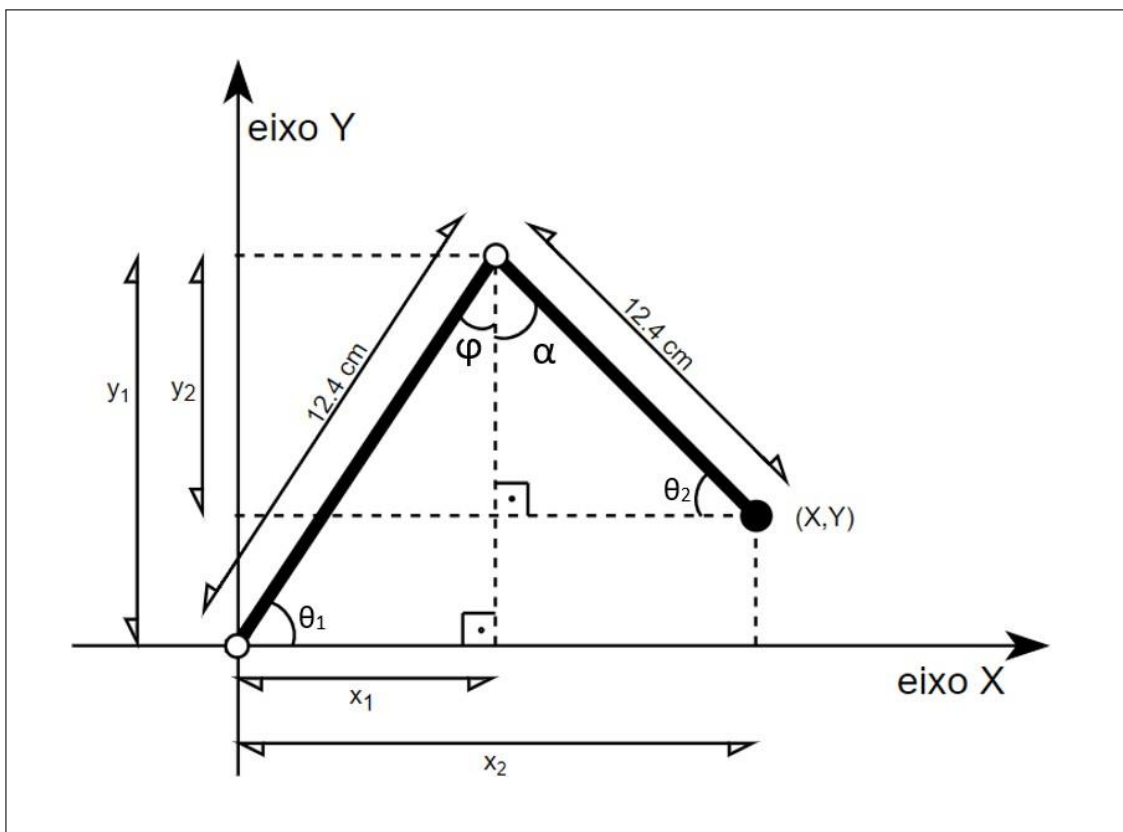
	Ângulo de Abertura Mínimo	Ângulo de Abertura Máximo
Articulação Inferior	0°	180°
Articulação Superior	32°	150°

Fonte: Autoria Própria

3.1.1 PRIMEIRO QUADRANTE

Devido à limitações físicas presentes na abertura da Articulação Superior, foram feitas duas análises em configurações de posição distintas. Para a primeira análise, foi considerado que o ângulo de abertura da Articulação Inferior (θ_1) esteja posicionado no primeiro quadrante do eixo cartesiano como mostra a Figura 14.

Figura 14: Primeira Condição de Posicionamento



Fonte: Autoria Própria

Portanto, com as informações contidas no diagrama da Figura 14, é possível então determinar equações que satisfaçam a determinação do ponto (X,Y).

Os valores de θ_1 e a somatória ($\phi + \alpha$) são conhecidos, pois representam os valores obtidos pelos transdutores de tensão. A Tabela de conversão tensão/ângulo está presente no Apêndice A.

Considerando que $\delta = \phi + \alpha$, pode-se encontrar o valor de θ_2 .

$$\phi = 180^\circ - 90^\circ - \theta_1 \quad (10)$$

$$\alpha = \delta - \phi \quad (11)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - 90^\circ - \alpha \quad (12)$$

Como θ_1 já é conhecido, pode-se determinar x_1 e x_2 ,

$$x_1 = 12,4 \cdot \cos(\theta_1) \quad (13)$$

$$x_2 = 12,4 \cdot \cos(\theta_2) \quad (14)$$

Para determinar y_1 e y_2 obtemos as equações,

$$y_1 = 12,4 \cdot \sin(\theta_1) \quad (15)$$

$$y_2 = 12,4 \cdot \sin(\theta_2) \quad (16)$$

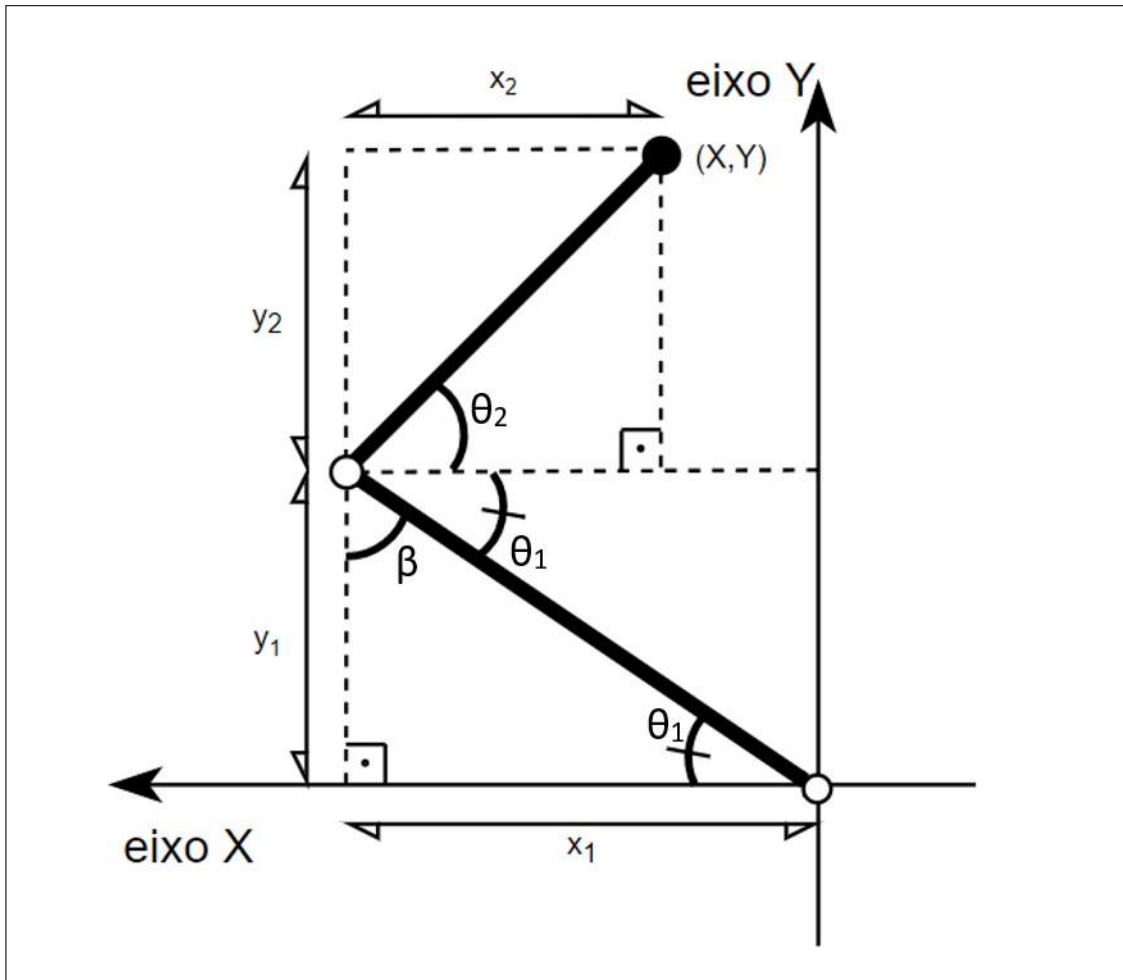
Por fim, para a Articulação Inferior com domínio no primeiro quadrante, o ponto (X, Y) pode ser descrito pela soma das equações 13, 14 e 15, 16, obtendo:

$$X = 12,4 \cdot \cos(\theta_1) + 12,4 \cdot \cos(\theta_2) \quad (17)$$

$$Y = 12,4 \cdot \sin(\theta_1) + 12,4 \cdot \sin(\theta_2) \quad (18)$$

3.1.2 SEGUNDO QUADRANTE

Para a outra configuração de posição, temos a Articulação Inferior presente no segundo quadrante do eixo cartesiano, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15: Segunda Condição de Posicionamento

Fonte: Autoria Própria

Assim como na Figura 14, obtém-se o valor de θ_1 por meio do transdutor de tensão localizado na origem. Realizando uma análise de triângulos congruentes, é possível definir o valor de θ_2 , uma vez que o valor da abertura da segunda junta é conhecido e chamado de ω .

Considerando $\omega = \theta_1 + \theta_2$, obtemos $\theta_2 = \omega - \theta_1$. Deste modo, pode-se obter os valores de x_1 , x_2 , y_1 e y_2 correspondentes a este posicionamento.

$$x_1 = -12,4 \cdot \cos(\theta_1) \quad (19)$$

$$x_2 = 12,4 \cdot \cos(\theta_2) \quad (20)$$

$$y_1 = 12,4 \cdot \sin(\theta_1) \quad (21)$$

$$y_2 = 12,4 \cdot \sin(\theta_2) \quad (22)$$

Para obter a coordenada (X, Y) referente ao segundo quadrante são somados os valores de cada componente assim como nas equações 17 e 18:

$$X = -12,4 \cdot \cos(\theta_1) + 12,4 \cdot \cos(\theta_2) \quad (23)$$

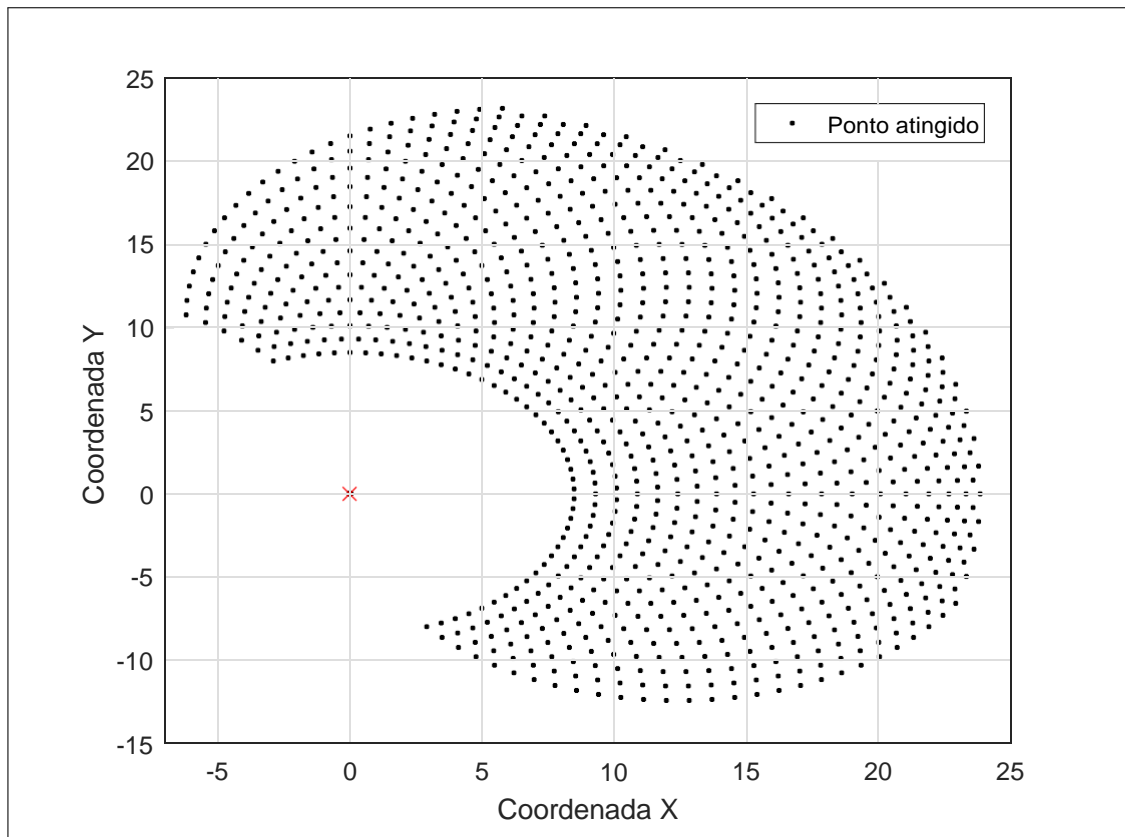
$$Y = 12,4 \cdot \sin(\theta_1) + 12,4 \cdot \sin(\theta_2) \quad (24)$$

3.1.3 ESPAÇO DE TRABALHO REAL

O espaço de trabalho se mostra importante na criação de um manipulador robótico pois delimita a região na qual o atuador final do robô pode alcançar. Além disso, podemos conferir a veracidade do posicionamento do manipulador em comparação com sua real posição e sua posição-alvo.

A Figura 16 mostra a construção do real espaço de trabalho do manipulador, respeitando as condições de cada quadrante e utilizando as informações de domínios presentes na Tabela 2.

Figura 16: Espaço de Trabalho Real



Fonte: Autoria Própria

Ao observar a Figura 16, é possível notar que o espaço de trabalho cobre o primeiro, segundo e quarto quadrantes do plano cartesiano. Entretanto, as condições definidas na modelagem da Figura 14 foram suficientes para essa solução. Nota-se também, que não existem pontos de alcance que pertençam ao terceiro quadrante, isso é dado pelo domínio da Articulação Inferior não ultrapassar o ângulo mínimo de 0° , conforme descrito na Tabela 2.

3.2 MOTORES

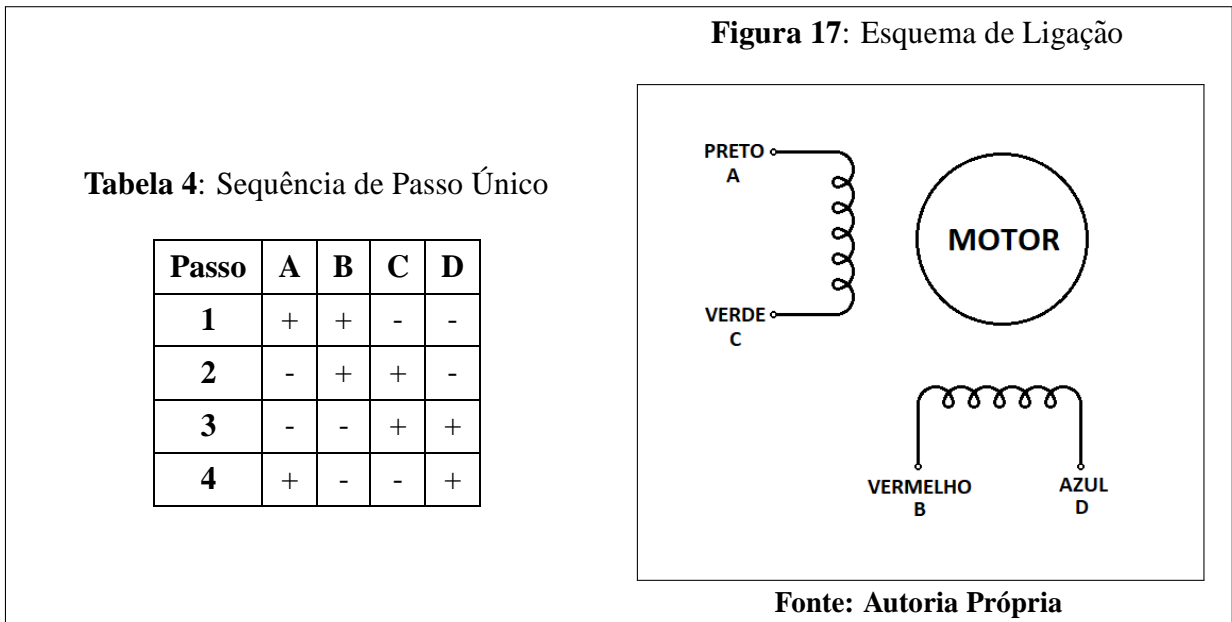
Para realizar a movimentação das articulações do manipulador foram inseridos três motores de passo do tipo bipolar modelo NEMA 17. O motor de passo é um atuador que possui resposta angular quando acionado por meio de pulsos em sua entrada. Da mesma maneira que motores elétricos, os motores de passo convertem energia eletromagnética em energia mecânica, diferenciando-se pela movimentação fixa, chamada de passo do motor, definida pela sua montagem física (ALCIATORE; HISTAND, 2014). Esta característica justifica o seu uso em projetos para controle de posição com precisão que necessitem de baixa ou média velocidade de operação.

Algumas especificações técnicas mais relevantes do motor estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3: Tabela de Especificações Técnicas

Item	Especificação
Angulo do Passo	1.8°
Nº de Passos	200
Torque	0.06gf.cm
Inércia do Rotor	48 g.cm^2
Quantidade de Fios	4

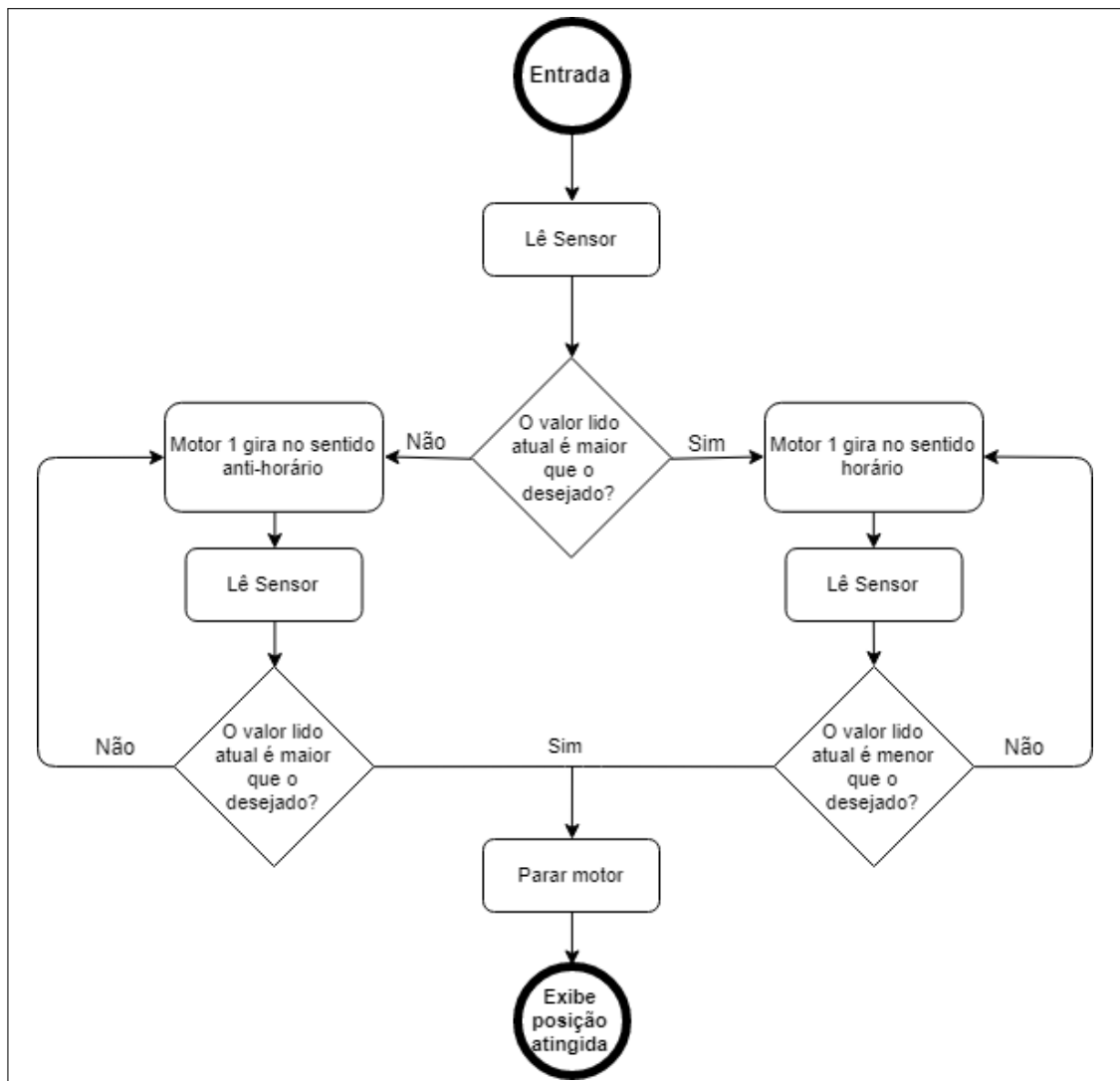
A Figura 17 e a Tabela 4 mostra o esquema de ligação e funcionamento do motor para realizar 1 passo. Conforme descrito na Tabela 3, serão necessários 200 passos para o eixo do motor completar uma volta.



3.3 CONTROLE DO MANIPULADOR

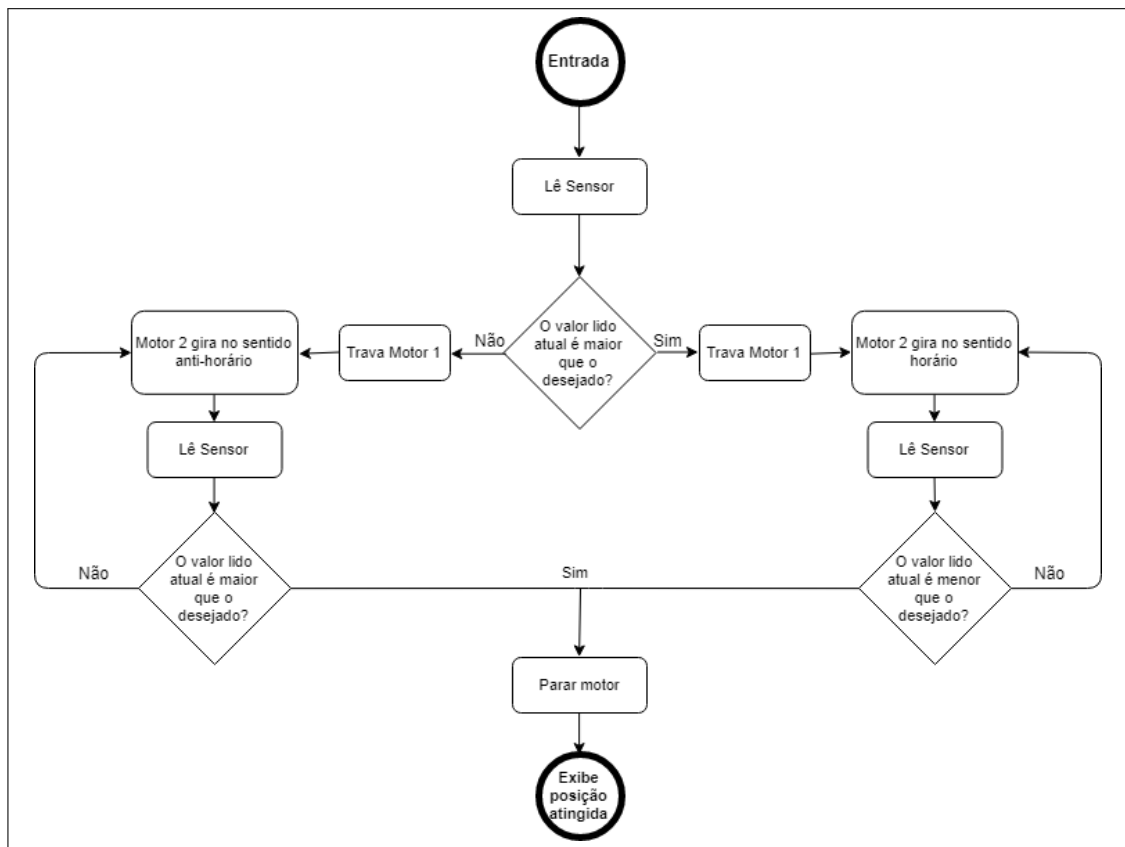
Para realizar o controle de posição utilizando cinemática direta, os motores foram acionados de forma individual. É feita uma leitura constante da abertura de cada articulação por meio de transdutores de tensão localizados nas juntas. A Figura 18 mostra o diagrama de acionamento do motor da articulação inferior.

Figura 18: Lógica de Acionamento da Articulação Inferior



Fonte: Autoria Própria

Para o acionamento do motor que controla o movimento da Articulação Superior, foi adicionado o estágio "trava motor inferior", para que durante seu funcionamento, a posição atingida anteriormente pela Articulação Inferior não se mova. O diagrama da Figura 18 mostra o funcionamento desta articulação com o travamento.

Figura 19: Lógica de Acionamento da Articulação Superior

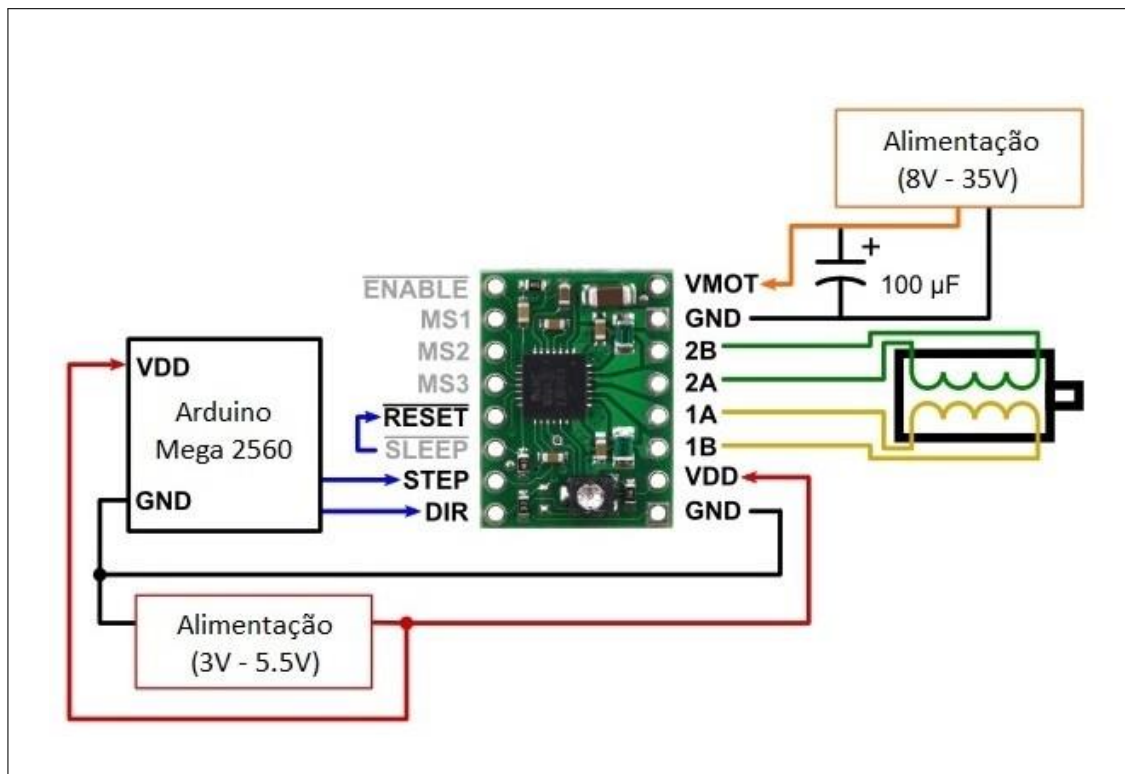
Fonte: Autoria Própria

Os acionamentos descritos nas Figuras 18 e 19 foram implementados no formato de funções programadas em ambiente MATLAB e acionadas pelo microcontrolador Arduino Mega2560 (KURNIAWAN, 2015). Como proposto, a solução da cinemática direta é caracterizada pela entrada de valores dos ângulos de abertura de cada articulação do manipulador, e como resultado, um ponto atingido no espaço de trabalho. Portanto, os dados recebidos no bloco inicial "Entrada" em cada diagrama recebe um valor de ângulo à ser atingido pela articulação.

3.3.1 ACIONAMENTO DOS MOTORES

Para realizar um controle fino de movimentação em cada motor, foram inseridos *drivers* contendo o chip A4988. Sua pinagem e esquema de ligação são mostrados na Figura 20.

Figura 20: Esquemático de Ligação do *Driver Motor de Passo A4988*



Fonte: Autoria Própria

A alimentação V_{DD} (3V - 5.5V) presente na placa, origina-se do microcontrolador Arduino Mega2560[§]. Entretanto, a alimentação dos motores V_{MOT} se dá por uma fonte externa chaveada e regulada para 12V com corrente cont'nuua.

A escolha deste *driver* justifica-se pela sua capacidade de realizar um controle preciso dos passos do motor, chamado de *microstepping* (SMITH, 2005). Esse recurso permite dividir o passo do motor em passos menores, podendo realizar até 16 micropassos para cada passo completo.

O controle é realizado pelo acionamento combinado nos pinos MS1, MS2 e MS3. A Tabela 5 mostra a combinação necessária para realizar o procedimento de *microstepping*.

Tabela 5: Tabela Verdade *Microstepping*

MS1	MS2	MS3	Resolução
LOW	LOW	LOW	Passo Completo
HIGH	LOW	LOW	1/2 Passo
LOW	HIGH	LOW	1/4 Passo
HIGH	HIGH	LOW	1/8 Passo
HIGH	HIGH	HIGH	1/16 Passo

Fonte: [https://www.pololu.com/file/0J450/a4988 DMOS microstepping driver with translator.pdf](https://www.pololu.com/file/0J450/a4988%20DMOS%20microstepping%20driver%20with%20translator.pdf)

Foram realizados alguns testes para verificar a velocidade de trabalho em que o motor pode operar sem perder passos. Portanto, o microcontrolador gera pulsos PWM no terminal do *driver* fazendo com que o motor se movimente de acordo com esses pulsos em uma velocidade proporcional ao *duty cycle* em porcentagem.

As combinações presentes na Tabela 4 influenciam diretamente na velocidade de operação do motor, uma vez que para completar uma volta completa na resolução "Passo Completo", serão necessários apenas 200 pulsos do PWM. Entretanto, para a resolução "1/16 Passo", serão necessários 3200 pulsos do PWM para completar a mesma volta em torno de seu próprio eixo.

Para obter uma resolução de passos satisfatória, foi escolhido a resolução "1/8 Passo" da Tabela 4. Entretanto, para compensar a perda de velocidade, o pulso PWM possui um *duty cycle* fixo em 90%, uma vez que não possui aceleração.

3.3.2 LEITURA DA ABERTURA DAS ARTICULAÇÕES

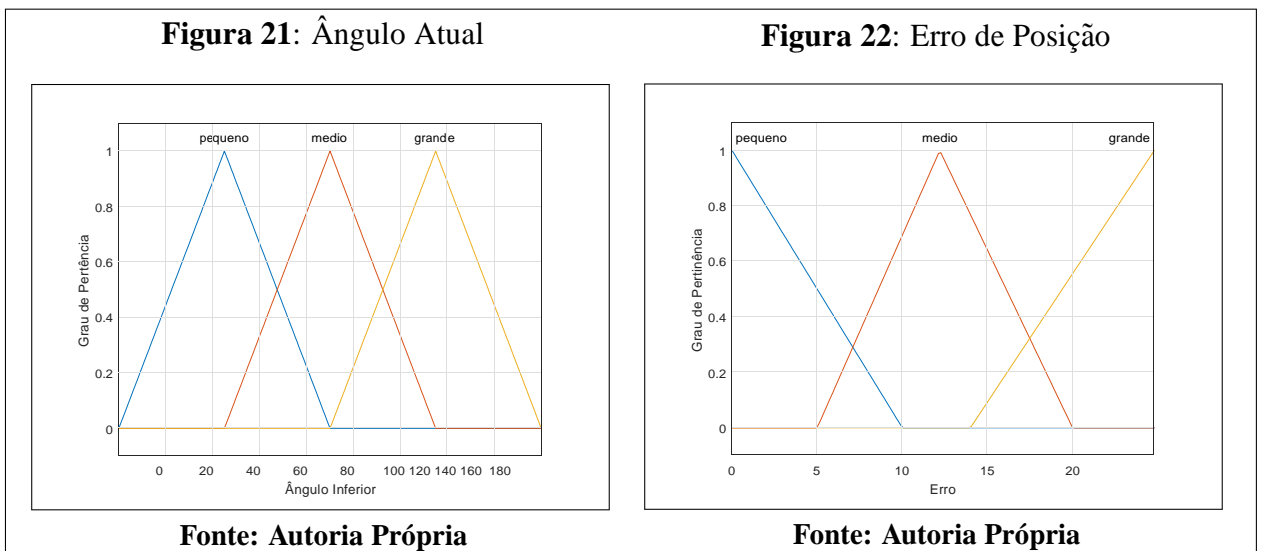
Para a leitura da abertura angular de cada articulação, foram implementados potenciômetros fixados em cada junta do manipulador, como mostra a Figura 13. Os sinais de tensão são captados pelo microcontrolador Arduino Mega2560 para serem processados.

Foram realizadas medições para determinar o valor de tensão que representa a abertura unitária de cada articulação, entretanto, medir com precisão cada grau de abertura se torna inviável. Com isso, foi realizado uma interpolação linear para calcular os valores desconhecidos entre dois valores de tensão medidos previamente. Os dados presentes nas Tabelas 7 e 8, nos apêndices A e B, são os resultados de uma interpolação linear realizada a partir dos valores de mínima, média e máxima abertura de cada articulação (RUGGIERO; LOPES, 1996).

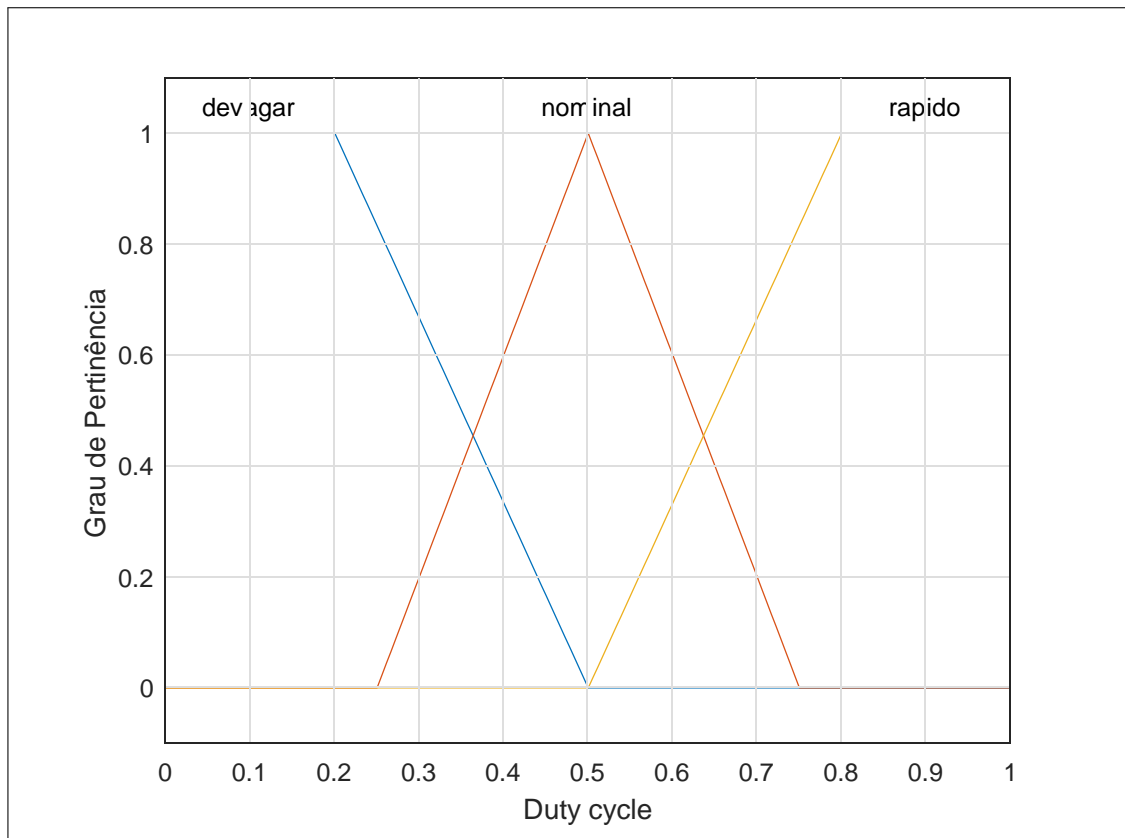
3.3.3 LÓGICA FUZZY

Para se obter um controle utilizando lógica *Fuzzy* é necessário definir quais serão as variáveis de entrada e saída do sistema. As variáveis de entrada correspondem àquelas utilizadas pelo operador para a tomada de decisões com base nas regras definidas no controle. Para este sistema, o erro entre o ponto desejado e o ponto atual é considerado uma entrada válida pois indica o quão próximo o controle está de seu objetivo. A posição atual da articulação também é utilizada como entrada para definir a posição real na qual o manipulador se encontra. A saída do sistema é o valor do *duty cycle* presente no pulso PWM que realiza o acionamento dos motores. Para cada articulação é definida uma lógica *Fuzzy* separada, entretanto com as mesmas entradas e saídas respectivas de cada articulação.

Sabe-se que o erro é calculado por meio da Equação 25, portanto será sempre um escalar positivo. Como cada articulação possui um controle próprio, o maior intervalo do erro pode ser definido pela distância entre o ponto que está mais a esquerda e o ponto que está mais a direita, respeitando os domínios de abertura de cada articulação. O intervalo de operação da segunda entrada é definido pela mínima abertura e máxima abertura de cada ângulo. Com base nessas informações é possível definir uma função de pertinência para as entradas do sistema *Fuzzy* pertencente à articulação inferior, como mostra as Figuras 21 e 22.

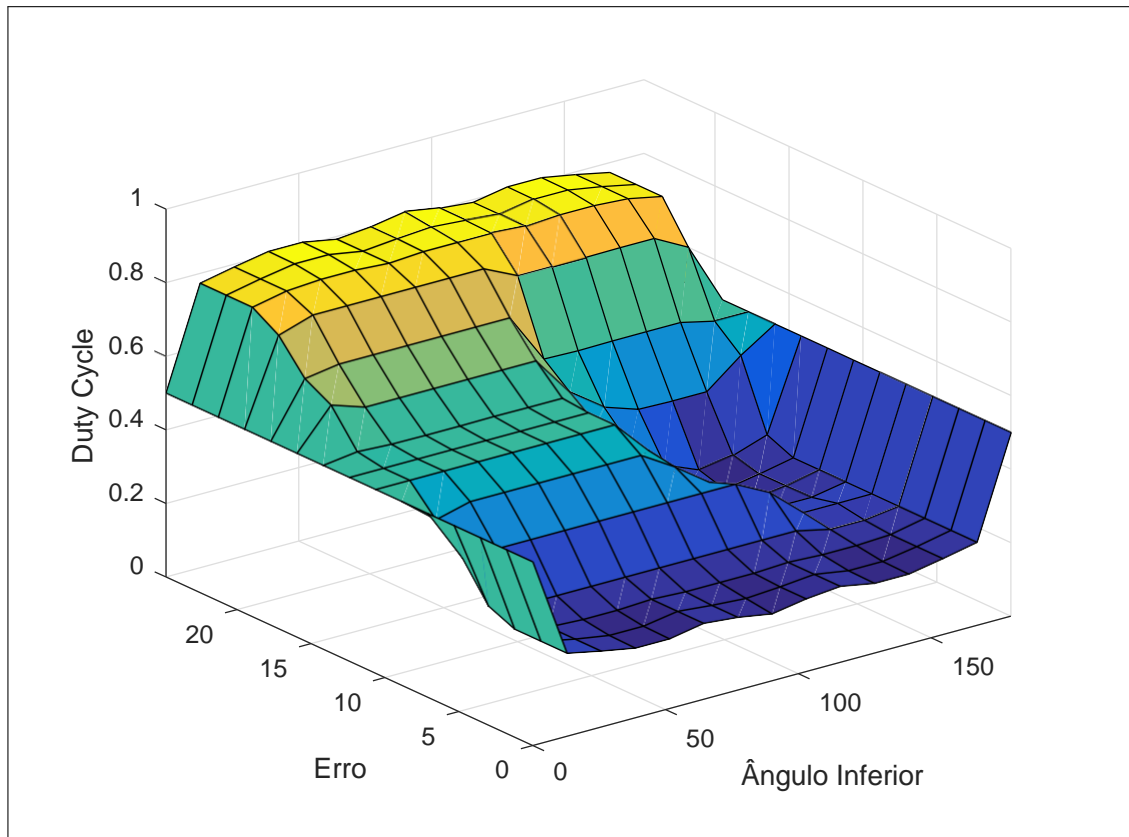


Da mesma maneira, é possível definir uma função de pertinência que descreva a saída do sistema, como mostra a Figura 23.

Figura 23: Saída do Sistema

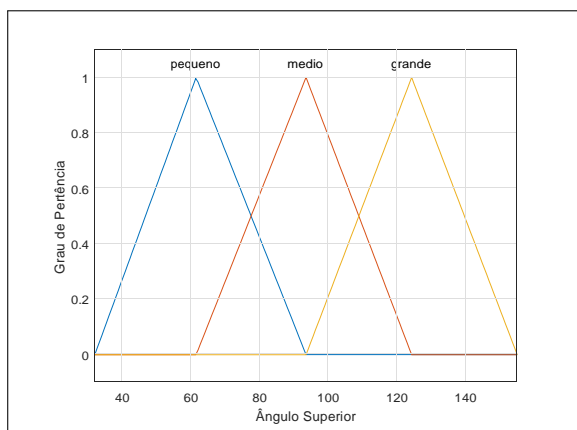
Fonte: Autoria Própria

Ao transpor o sistema *Fuzzy* no *MatLab*, com o auxílio da ferramenta *Fuzzy Logic Designer*, foi possível criar um controlador *Fuzzy* para a articulação inferior que é apresentada na Figura 24.

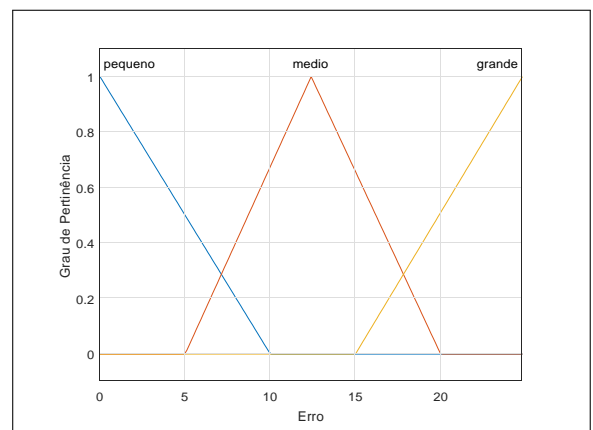
Figura 24: Superfície de Controle para Articulação Inferior

Fonte: Autoria Própria

Assim como na articulação inferior, a mesma lógica foi implementada na articulação superior, visto que ambas se diferem apenas no domínio dos ângulos de abertura como mostrado na Tabela 2. A função de pertinência mostrada na Figura 25 mostra os valores de ângulo de acordo a mínima e máxima abertura da articulação.

Figura 25: Ângulo Atual

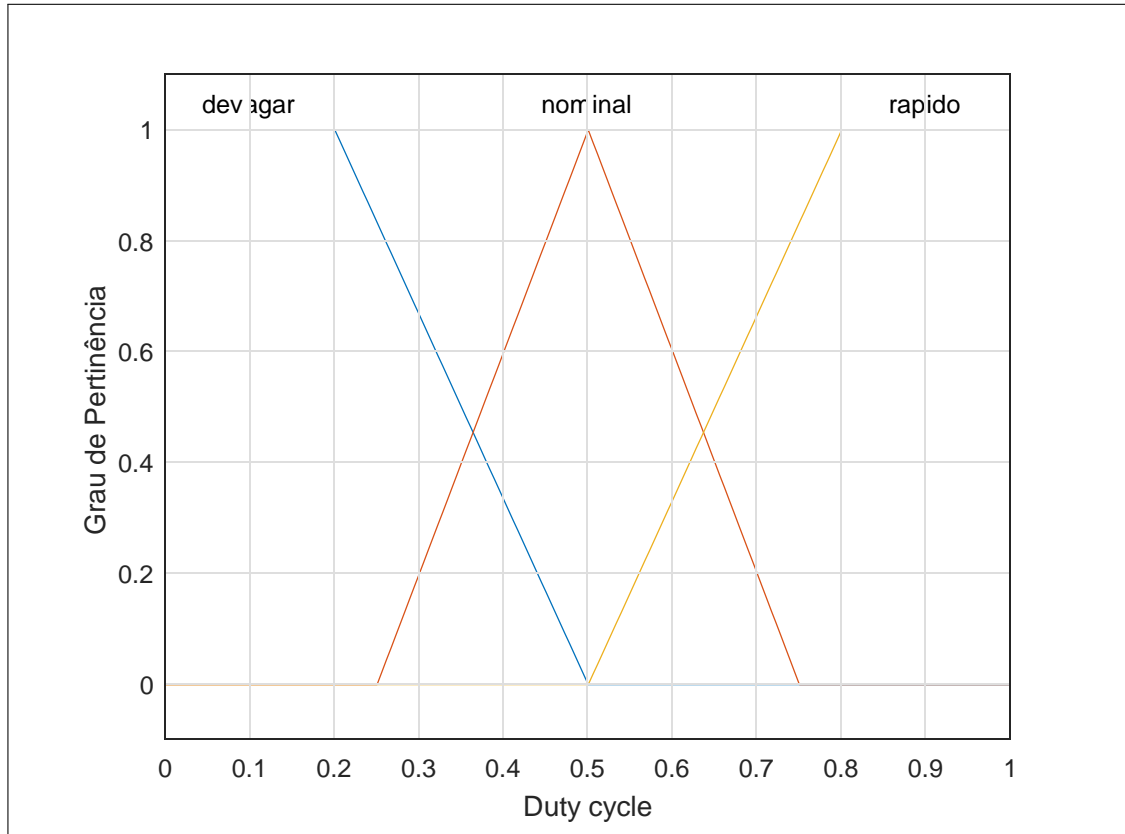
Fonte: Autoria Própria

Figura 26: Erro de Posição

Fonte: Autoria Própria

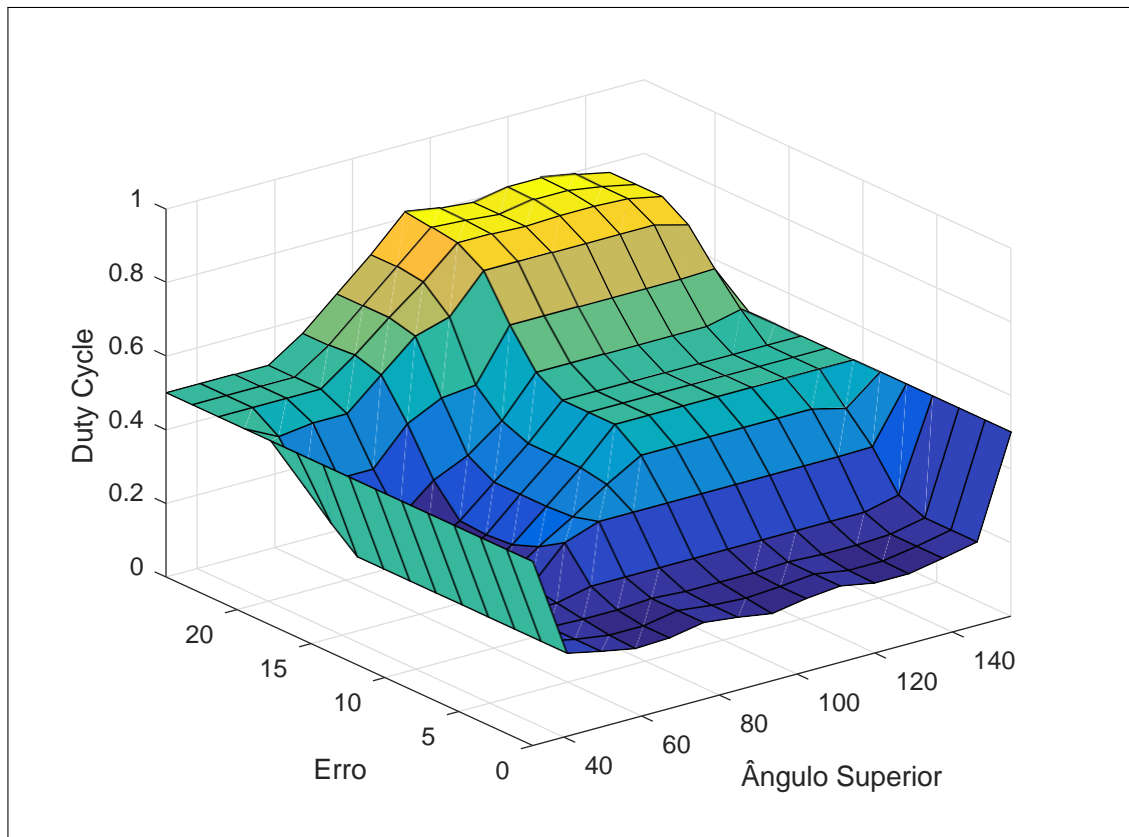
A saída do sistema também é definida em pulsos PWM com intervalo de 0 a 1. Da mesma forma na articulação superior a Figura 27 mostra a modulação feita para a lógica *Fuzzy*.

Figura 27: Saída do Sistema



Fonte: Autoria Própria

Ao novamente transpor o sistema *Fuzzy*, com o auxílio da ferramenta *Fuzzy Logic Designer*, foi possível obter um controlador *Fuzzy* para operar na articulação superior, apresentado na Figura 27.

Figura 28: Superfície de Controle para Articulação Inferior

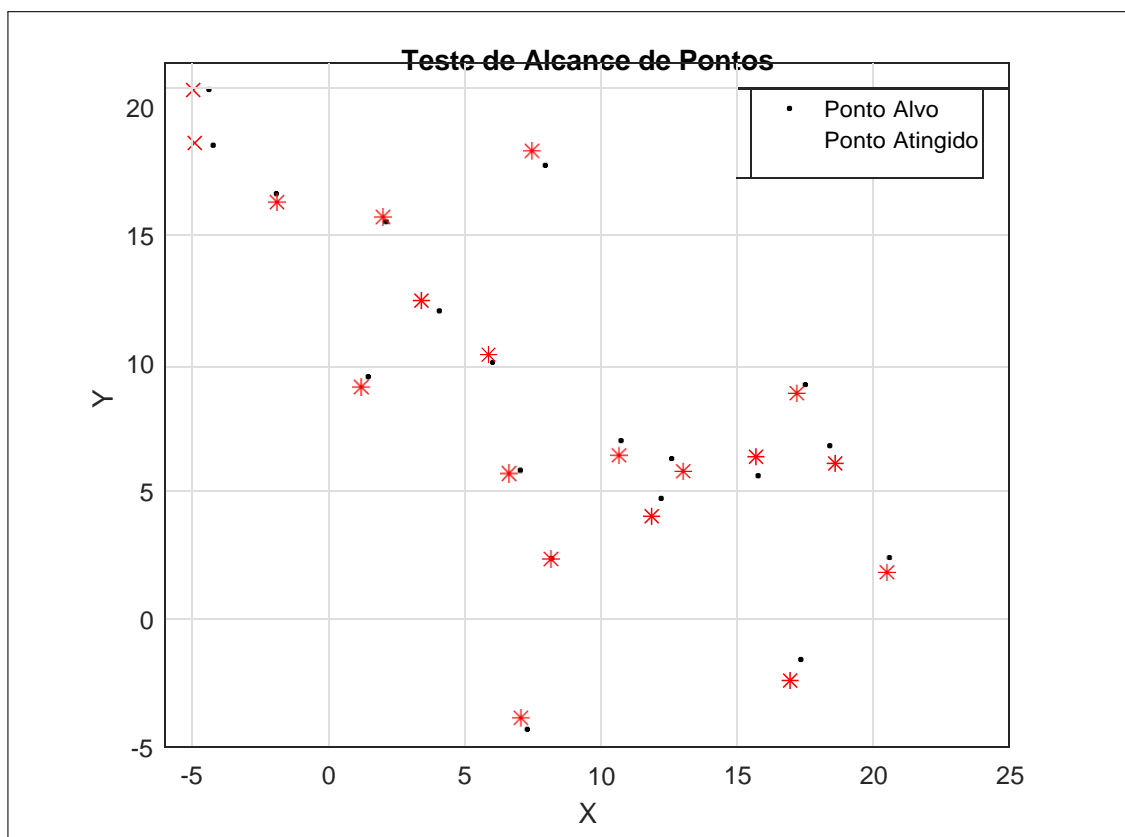
Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS

Para testar a eficácia do controle, o manipulador foi sujeito à um teste randômico de 20 pontos pertencentes ao seu espaço de trabalho. Respeitando os domínios de cada articulação apresentados na Tabela 2, foi utilizado a função *randi* do *MatLab* para escolher as combinações de ângulos à serem testadas (GILAT, 2009).

A Figura 29 mostra o resultado do teste indicando os pontos que o manipulador deveria atingir e os pontos nos quais o manipulador atingiu.

Figura 29: Teste de 20 Pontos de Alcance



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 6 mostra os valores testados, assim como o erro entre o ponto alcançado e o

ponto desejado. A Equação 25 é utilizada para calcular a distância entre dois pontos.

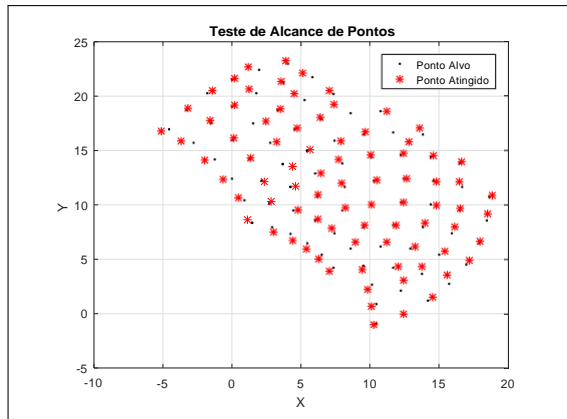
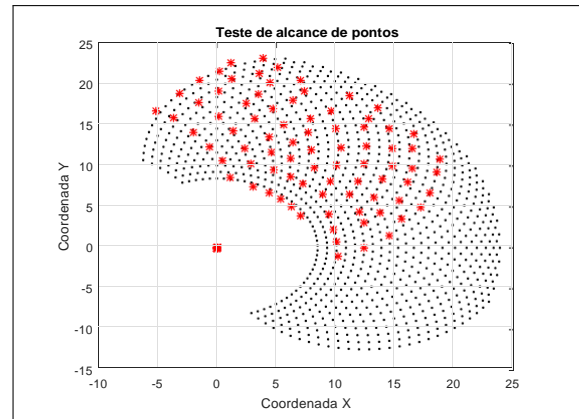
$$erro = \sqrt{(X_{alvo} - X_{atingido})^2 + (Y_{alvo} - Y_{atingido})^2} \quad (25)$$

Tabela 6: Teste de Alcance de Pontos Aleatórios

Ângulo Inferior	Ângulo Superior	Ponto Desejado		Ponto Alcançado		Erro
		Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada X	Coordenada Y	
140	89	17,30	-1,67	16,88	-2,52	0,95
90	99	12,25	14,34	12,17	14,77	0,43
43	111	-4,42	19,95	-4,97	19,95	0,55
94	40	8,15	2,34	8,15	2,34	0,00
49	61	3,99	11,94	3,31	12,34	0,80
34	95	-4,27	17,78	-4,96	17,90	0,71
33	80	-1,94	15,82	-1,90	15,49	0,33
88	62	10,71	6,96	10,63	6,39	0,58
101	63	12,14	4,54	11,79	3,83	0,79
141	40	7,27	-4,37	7,06	-3,91	0,50
98	69	12,57	6,27	12,99	5,79	0,64
74	41	6,98	5,17	6,57	5,04	0,43
113	84	15,69	5,40	15,59	6,14	0,74
122	104	18,36	6,68	18,51	5,84	0,86
59	56	6,00	9,98	5,83	10,30	0,36
74	98	7,91	16,96	7,42	17,49	0,72
45	74	2,08	14,78	1,97	14,97	0,22
31	45	1,40	9,39	1,19	9,01	0,43
115	105	17,45	9,08	17,17	8,75	0,44
140	113	20,55	2,34	20,48	1,79	0,55

Fonte: Autoria Própria

Para avaliar o comportamento do manipulador frente a um teste exaustivo, foi realizada uma rotina de repetição que percorre pontos paralelos pertencentes à região de operação da Figura 16. O resultado do teste pode ser observado na Figura 30. Para obter uma melhor perspectiva do teste, os pontos atingidos mostrados em vermelho foram sobrepostos diretamente na região de operação, como mostra a Figura 31

Figura 30: Vista Detalhada**Fonte: Autoria Própria****Figura 31: Vista Geral****Fonte: Autoria Própria**

5 CONCLUSÃO

O conjunto do braço robótico com o controlador *Fuzzy* apresentaram resultados que satisfazem os requisitos da proposta. Pode-se notar que em alguns momentos o manipulador conseguiu atingir o ponto desejado com erro extremamente reduzido ou nulo.

Algumas falhas no sistema foram verificadas e apuradas. Para um modelo feito a partir de uma impressora 3D, é importante ressaltar o acúmulo de erros que esta implementação pode acarretar. As engrenagens não possuem o passo exato como projetado, e isso se dá pela imprecisão no momento da impressão da peça. Outro fator à ser considerado é a flexibilidade na qual o material possui, portanto a fixação de peças podem sofrer deformidades conforme ocorrem os testes e o uso do manipulador.

Os motores não apresentaram sinais de superaquecimento mesmo em testes de exaustão, fato comum entre motores de passo. O circuito de controle apresentou boa comunicação e resposta frente às iterações testes.

Para o sensoriamento, o potenciômetro se mostrou suficiente para atender este trabalho, uma vez que um equipamento de maior precisão não se mostraria relevante frente às falhas físicas do modelo.

A utilização da lógica *Fuzzy* se mostrou válida pois não necessita de um modelo matemático do sistema e comportou-se com excelência.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho poderá ser utilizado para estudos mais profundo no campo da robótica educacional como a implementação de diferentes tipos de controladores e sua comparação visando eficiência e consistência.

Com o intuito de refinar a aplicação deste estudo, pode-se implementar uma placa de circuito impresso (PCB) para evitar interferências no circuito durante a manipulação do modelo.

REFERÊNCIAS

- ALCIATORE, D.; HISTAND, M. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições.** [S.l.]: AMGH Editora, 2014.
- BARG, E. K. Protótipo de um controlador de temperatura baseado em lógica fuzzy utilizando um microcontrolador. **Projeto de Graduação (Departamento de Ciências da Computação)- Universidade Regional de Blumenau, 57pp**, 2002.
- BILOBROVEC, M.; MARÇAL, R. F. M.; KOVALESKI, J. L. Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy. **XI SIMPEP, Bauru/Brasil**, 2004.
- CORKE, P. **Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB.** [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Springer Tracts in Advanced Robotics).
- CRAIG, J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control.** [S.l.]: Pearson/Prentice Hall, 2005. (Addison-Wesley series in electrical and computer engineering: control engineering).
- GILAT, A. **Matlab com Aplicações em Engenharia.** [S.l.]: Bookman, 2009.
- KASABOV, N. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering.** [S.l.]: MIT Press, 1996. (A Bradford book).
- KHALIL, H. **Nonlinear Systems.** [S.l.]: Pearson Education, Limited, 2013. (Always learning).
- KURNIAWAN, A. **Arduino Programming using MATLAB.** [S.l.]: PE Press, 2015.
- MANUAL, B. U. Fuzzy logic for g toolkit reference manual. 1997.
- NIKU, S. **Introduction to Robotics.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- NISE, N. **Engenharia de sistemas de controle.** [S.l.]: LTC, 2002.
- PAGALLO, U. **The Laws of Robots: Crimes, Contracts, and Torts.** [S.l.]: Springer Netherlands, 2013. (Law, Governance and Technology Series).
- REZENDE, S. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações.** [S.l.]: Manole, 2003.
- ROSARIO, J. **Principios de mecatronica.** [S.l.]: PRENTICE HALL BRASIL, 2005.
- RUGGIERO, M.; LOPES, V. da R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais.** [S.l.]: Makron Books do Brasil, 1996.
- SILER, W.; BUCKLEY, J. **Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning.** [S.l.]: Wiley, 2005.
- SILVA, I. D.; SPATTI, D.; FLAUZINO, R. **REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA ENGENHARIA E: CIENCIAS APLICADAS - CURSO PRATICO.** [S.l.: s.n.], 2010.
- SMITH, J. **Programming the PIC Microcontroller with MBASIC.** [S.l.]: Elsevier/Newnes, 2005. (Electronics & Electrical).

SYSTEMS, I. O. for S. T. C. A.; ROBOTS integration. S.; DEVICES robotic. **ISO 8373: Robots and Robotic Devices - Vocabulary.** [S.l.]: ISO, 2012.

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE ÂNGULO DE ABERTURA PARA ARTICULAÇÃO SUPERIOR

Tabela referente à interpolação linear dos valores de tensão relacionados com os ângulos de abertura para a articulação superior do braço manipulador robótico.

Tabela 7: Relação Ângulo de Abertura x Tensão Lida

ARTICULAÇÃO INFERIOR							
Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão
32	1.7155	63	1.2192	94	0.7344	125	0.3279
33	1.6995	64	1.2032	95	0.7213	126	0.3148
34	1.6835	65	1.1872	96	0.7082	127	0.3016
35	1.6675	66	1.1711	97	0.6951	128	0.2885
36	1.6515	67	1.1551	98	0.6820	129	0.2754
37	1.6354	68	1.1391	99	0.6689	130	0.2623
38	1.6194	69	1.1231	100	0.6558	131	0.2492
39	1.6034	70	1.1071	101	0.6426	132	0.2361
40	1.5874	71	1.0911	102	0.6295	133	0.2230
41	1.5714	72	1.0751	103	0.6164	134	0.2098
42	1.5554	73	1.0591	104	0.6033	135	0.1967
43	1.5394	74	1.0431	105	0.5902	136	0.1836
44	1.5234	75	1.0271	106	0.5771	137	0.1705
45	1.5074	76	1.0110	107	0.5639	138	0.1574
46	1.4914	77	0.9950	108	0.5508	139	0.1443
47	1.4753	78	0.9790	109	0.5377	140	0.1312
48	1.4593	79	0.9630	110	0.5246	141	0.1180
49	1.4433	80	0.9470	111	0.5115	142	0.1049
50	1.4273	81	0.9310	112	0.4984	143	0.0918
51	1.4113	82	0.9150	113	0.4853	144	0.0787

52	1.3953	83	0.8990	114	0.4721	145	0.0656
53	1.3793	84	0.8830	115	0.4590	146	0.0525
54	1.3633	85	0.8670	116	0.4459	147	0.0393
55	1.3473	86	0.8509	117	0.4328	148	0.0262
56	1.3313	87	0.8349	118	0.4197	149	0.0131
57	1.3152	88	0.8189	119	0.4066	150	0.0000
58	1.2992	89	0.8029	120	0.3935		
59	1.2832	90	0.7869	121	0.3803		
60	1.2672	91	0.7738	122	0.3672		
61	1.2512	92	0.7607	123	0.3541		
62	1.2352	93	0.7476	124	0.3410		

APÊNDICE B – RELAÇÃO DE ÂNGULO DE ABERTURA PARA ARTICULAÇÃO INFERIOR

Tabela referente à interpolação linear dos valores de tensão relacionados com os ângulos de abertura para a articulação inferior do braço manipulador robótico.

Tabela 8: Relação Ângulo de Abertura x Tensão Lida

ARTICULAÇÃO INFERIOR							
Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão
0	4.8974	46	4.0380	92	3.1791	138	2.3298
1	4.8787	47	4.0193	93	3.1606	139	2.3113
2	4.8600	48	4.0007	94	3.1421	140	2.2928
3	4.8414	49	3.9820	95	3.1237	141	2.2744
4	4.8227	50	3.9633	96	3.1052	142	2.2559
5	4.8040	51	3.9446	97	3.0868	143	2.2374
6	4.7853	52	3.9259	98	3.0683	144	2.2190
7	4.7666	53	3.9072	99	3.0498	145	2.2005
8	4.7479	54	3.8886	100	3.0314	146	2.1821
9	4.7293	55	3.8699	101	3.0129	147	2.1636
10	4.7106	56	3.8512	102	2.9944	148	2.1451
11	4.6919	57	3.8325	103	2.9760	149	2.1267
12	4.6732	58	3.8138	104	2.9575	150	2.1082
13	4.6545	59	3.7951	105	2.9391	151	2.0897
14	4.6358	60	3.7765	106	2.9206	152	2.0713
15	4.6172	61	3.7578	107	2.9021	153	2.0528
16	4.5985	62	3.7391	108	2.8837	154	2.0343
17	4.5798	63	3.7204	109	2.8652	155	2.0159
18	4.5611	64	3.7017	110	2.8467	156	1.9974
19	4.5424	65	3.6831	111	2.8283	157	1.9790

20	4.5238	66	3.6644	112	2.8098	158	1.9605
21	4.5051	67	3.6457	113	2.7913	159	1.9420
22	4.4864	68	3.6270	114	2.7729	160	1.9236
23	4.4677	69	3.6083	115	2.7544	161	1.9051
24	4.4490	70	3.5896	116	2.7360	162	1.8866
25	4.4303	71	3.5710	117	2.7175	163	1.8682
26	4.4117	72	3.5523	118	2.6990	164	1.8497
27	4.3930	73	3.5336	119	2.6806	165	1.8312
28	4.3743	74	3.5149	120	2.6621	166	1.8128
29	4.3556	75	3.4962	121	2.6436	167	1.7943
30	4.3369	76	3.4776	122	2.6252	168	1.7759
31	4.3183	77	3.4589	123	2.6067	169	1.7574
32	4.2996	78	3.4402	124	2.5882	170	1.7389
33	4.2809	79	3.4215	125	2.5698	171	1.7205
34	4.2622	80	3.4028	126	2.5513	172	1.7020
35	4.2435	81	3.3841	127	2.5329	173	1.6835
36	4.2248	82	3.3655	128	2.5144	174	1.6651
37	4.2062	83	3.3468	129	2.4959	175	1.6466
38	4.1875	84	3.3281	130	2.4775	176	1.6282
39	4.1688	85	3.3094	131	2.4590	177	1.6097
40	4.1501	86	3.2907	132	2.4405	178	1.5912
41	4.1314	87	3.2720	133	2.4221	179	1.5728
42	4.1127	88	3.2534	134	2.4036	180	1.5543
43	4.0941	89	3.2347	135	2.3851		
44	4.0754	90	3.2160	136	2.3667		
45	4.0567	91	3.1975	137	2.3482		