

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

**CONTROLE DE POSIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS *FUZZY*
APLICADOS A UM MANIPULADOR ROBÓTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

ANDRÉ LUÍS FERNANDES PEDRA

**CONTROLE DE POSIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS *FUZZY*
APLICADOS A UM MANIPULADOR ROBÓTICO**

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

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

Controle de posição utilizando sistemas *Fuzzy* aplicados a um manipulador robótico

por

André Luís 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, 01/06/2017

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

RESUMO

PEDRA, André L. F.. Controle de posição utilizando sistemas *Fuzzy* aplicados a um manipulador robótico. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

A modelagem matemáticas de sistemas complexos se mostra infactível ao se aplicar um controle de forma clássica. O PID, em sua majoritária aplicação, resolve os problemas relacionados à engenharia de maneira eficiente. Entretanto, o controlador clássico possui limitações frente à mudança dos estados de controle de uma planta, caracterizando a perda de robustez pelo controlador.

Um sistema inteligente é capaz de executar tarefas de forma análoga ao cérebro humano. Tal fato se dá pelo paralelismo encontrado no processamento de informações e pela capacidade de aprendizagem diante de variáveis não-lineares. Em particular, Sistemas *Fuzzy* se destacam pela sua alta capacidade de tratamento de variáveis incertas e pela simplicidade na interpretação, uma vez que utiliza base de regras linguísticas para tomadas de decisão.

O presente trabalho irá expor a construção de um manipulador robótico com até três graus de liberdade. Esta será feita utilizando uma impressora 3D cartesiana que utiliza plástico em deposição. O controlador *Fuzzy* será aplicado para cada grau de liberdade separadamente e possui a metodologia *Mamdani* para o processo de inferência.

Palavras-chave: Controle inteligente, Sistemas *Fuzzy*, Manipulador robótico, Robótica, Impressora 3D

ABSTRACT

PEDRA, André L. F.. . 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The mathematical modeling of complex systems show being infeasible to apply with a classic control. The PID, in its majority application, solve the problems related to engineering in an efficient way. However, the classical controller has limitations on regarding of changing the states of a machine, characterizing a loss of robustness by the controller.

An intelligent system is able to perform tasks similar to the human brain. This is due to the parallelism found in information processing and in the learning ability of non-linear variables. In particular, Fuzzy Systems stand out for their high ability to handle uncertain variables and for the simplicity in interpretation, since it uses a linguistic rules for decision making.

This paper will expose the construction of a robotic manipulator with up to three degrees of freedom. This will be done using a 3D printer with plastic in deposition. The *Fuzzy* controller will be applied for each degree of freedom separately and has the *Mamdani* methodology for the inference process.

Keywords: Robotics, *Fuzzy* Systems, Artificial Intelligence, 3D Printer

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Robô industrial ABB IRB 1600.	15
FIGURA 2	– Sistemas de coordenadas robóticas	16
FIGURA 3	– Sistemas de coordenadas robóticas	17
FIGURA 4	– Braço Robótico Articulado com 2-GDL	18
FIGURA 5	– Logica <i>booleana</i> e lógica <i>Fuzzy</i>	20
FIGURA 6	– Função de Pertinência Triangular	21
FIGURA 7	– Função de Pertinência Trapezoidal	21
FIGURA 8	– Função de Pertinência Gaussiana	22
FIGURA 9	– Exemplo Cálculo de centróide	23
FIGURA 10	– Diagrama de Controle Fuzzy	24
FIGURA 11	– Diagrama Construtivo Manipulador Robótico	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Tabela de Parâmetros D-H	18
TABELA 2	– Cronograma de Execução	27

LISTA DE SIGLAS

PID	Proporcional Integral Diferencial
R	Resistência Elétrica
C	Capacitância
M	Massa
F_a	Força de atrito
RNA	Redes Neurais Artificiais
3D	Três Dimensões
P	Pristmático
R	Rotacionais
S	Esféricos
D-H	<i>Denavit-Hartenberg</i>
GDL	Graus de Liberdade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	PROBLEMA	10
1.2	JUSTIFICATIVA	10
1.3	OBJETIVOS	11
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	ROBÓTICA	13
2.1.1	Definição de Robô	14
2.1.2	Componentes de um Robô	14
2.1.3	Graus de Liberdade	15
2.1.4	Coordenadas Robóticas	15
2.1.5	Espaço de Trabalho	16
2.2	MODELO DENAVIT-HARTENBERG	17
2.2.1	Modelo D-H para Cinemática Direta	17
2.3	SISTEMAS <i>FUZZY</i>	20
2.3.1	Função de Pertinência	21
2.3.2	<i>Fuzzificação</i>	22
2.3.3	Inferência	22
2.3.4	<i>Defuzzificação</i>	23
3	METODOLOGIA	25
3.0.1	Materiais	26
4	CRONOGRAMA	27
	REFERÊNCIAS	28

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 simular o comportamento do cérebro humano para a tomada de decisões (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.

Os propósitos deste trabalho são construir um manipulador robótico a partir de uma impressora 3D cartesiana e realizar o controle de posição e acompanhamento de sua trajetória. Será utilizada uma estrutura de controle inteligente por Sistemas *Fuzzy*, utilizando o *tollbox* disponibilizado pelo software *MatLab/Simulink*®.

1.1 PROBLEMA

O comportamento de um sistema físico, seja elétrico ou mecânico, pode ser representado matematicamente através de um conjunto de equações. A modelagem é feita através da extração de características físicas do sistema, como por exemplo, resistência elétrica (R), capacitância (C), massa (M) e força de atrito (F_a) citação ogata. Por fim, obtém-se uma função de transferência que descreve o comportamento do sistema como um todo.

A partir da função de transferência, pode-se projetar um controlador que levará a planta à um estado desejado pelo usuário. É importante ressaltar que a sintonização do controlador clássico depende diretamente dos valores obtidos na modelagem da função de transferência. Entretanto, esses valores não são constantes, pois a planta pode sofrer alterações e desgastes ao longo do tempo, fazendo com que o controlador perca sua eficiência.

Além do mais, a dificuldade em modelar uma função de transferência está relacionada com a complexidade do sistema à ser controlado. Com isso, para máquinas com múltiplos sensores e atuadores, a obtenção de um modelo matemático se torna infactível ou extremamente trabalhoso.

1.2 JUSTIFICATIVA

Ao se utilizar técnicas de controle inteligente não é necessário que o projetista tenha conhecimento total do modelo matemático do sistema, dispensando o uso da função de transferência.

Podemos descrever dois subgrupos de controladores com essa característica: Redes Neurais Artificiais (RNA) e Sistemas *Fuzzy*. A divergência entre ambos está no tratamento das informações fornecidas pelas variáveis de entrada, sendo que Redes Neurais utilizam técnicas de aprendizagem baseada em conhecimento prévio e sistemas *fuzzy* possuem base de regras

linguísticas para tomada de decisões.

Em particular, sistemas *Fuzzy* emulam o comportamento do cérebro humano para tomada de decisões, visto que o tratamento das informações é executado de forma qualitativa. Ademais, sistemas *Fuzzy* possuem tolerância frente à incertezas advindas dos dados, caracterizando robustez e confiabilidade para o controle.

Com isso, o presente trabalho tem como foco desenvolver um controlador capaz de tratar um sistema complexo e de difícil modelagem. Aqui será utilizado um manipulador robótico, no qual possui múltiplos sensores e atuadores e uma de suas articulações é caracterizada por possuir movimento composto.

1.3 OBJETIVOS

Propor um modelo de controle inteligente utilizando Sistemas *Fuzzy* no qual seja capaz de controlar a posição de cada articulação de um manipulador robótico com dois e três graus de liberdade.

O primeiro passo para a realização do trabalho será estabelecer uma comunicação serial entre a lógica de controle embarcada no robô e o Sistema *Fuzzy* presente no computador.

O *feedback* será dado através de transdutores localizados em cada elo das articulações, fazendo uma comparação com o valor de tensão lido e sua relação com o ângulo de abertura do braço.

Definido os objetivos gerais, podemos descrever abaixo a relação das particularidades do trabalho realizado, dados pelos objetivos específicos:

- Construir um manipulador robótico com três graus de liberdade, assim como sua base e engrenagens, utilizando uma impressora 3D cartesiana;
- Realizar a comunicação serial entre o computador e o robô através da placa de aquisição de dados NI USB-6008 da *National Instruments*TM;
- Determinar a base de regras que será aplicada ao Sistema de controle *Fuzzy* para dois graus de liberdade;
- Determinar a base de regras que será aplicada ao Sistema de controle *Fuzzy* para três graus de liberdade;
- Tratar os ruídos gerados pela planta e pelos sensores.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 1 é apresentado uma introdução geral, mostrando alguns fatos históricos sobre automação industrial, robótica e lógica difusa. Também é mostrado a definição do problema e a justificativa para a realização do trabalho, assim como os objetivos gerais e específicos

No capítulo 2 é definido a fundamentação teórica, dando base para a realização prática dos itens mostrados nos objetivos. São mostrados os conceitos de robótica, Modelo Denavit-Hartenberg e Sistemas *Fuzzy*

O capítulo 3 é composto pela metodologia que será aplicada para a realização do trabalho, definindo os componentes utilizados na implementação e os métodos empregados pelos mesmos.

O cronograma que será seguido está presente no capítulo 4, mostrando as etapas concluídas, em andamento e pendentes presentes na Tabela 2.

Por fim, é apresentado as referências bibliográficas utilizadas como embasamento teórico para a idealização da proposta.

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 *robota* 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

Um robô industrial é construído através da integração dos seguintes elementos (NIKU, 2010):

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.

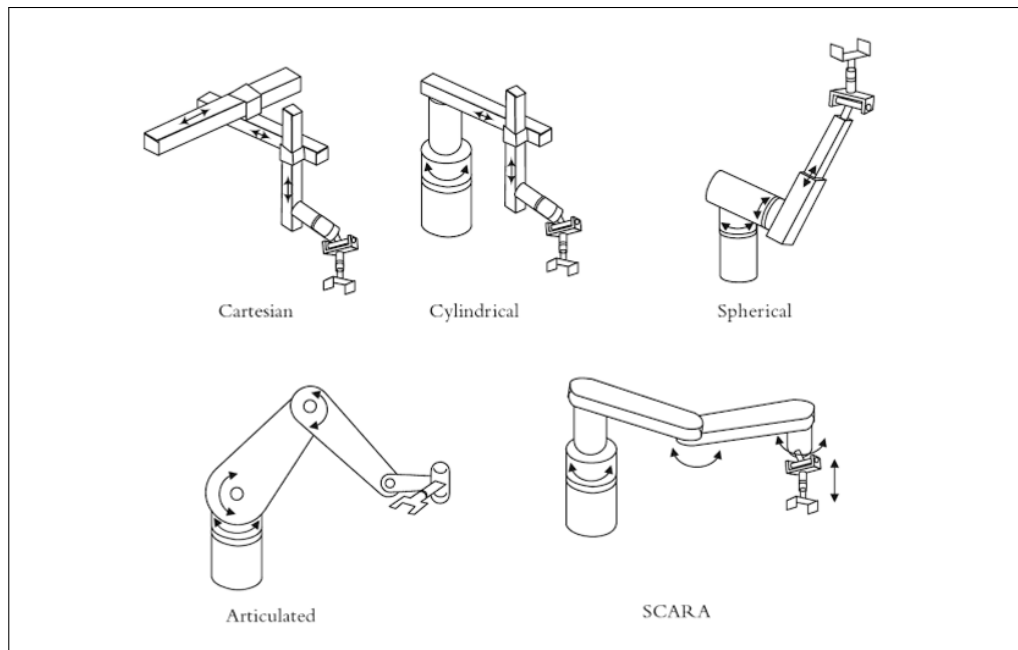


Figura 2: Sistemas de coordenadas robóticas

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.

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.

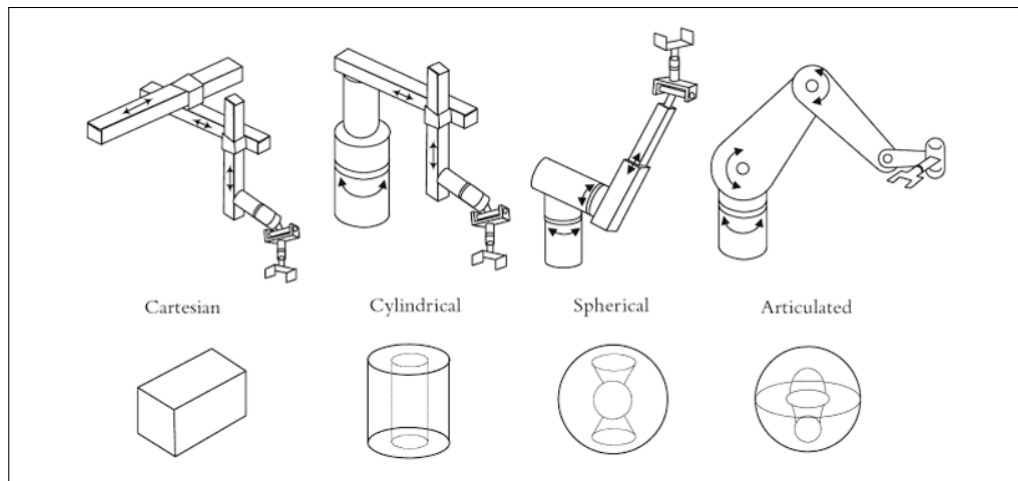


Figura 3: Sistemas de coordenadas robóticas

Fonte: Adaptado (NIKU, 2010)

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 (NIKU, 2010).

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 ultima articulação.

2.2.1 MODELO D-H PARA CINEMÁTICA DIRETA

Supondo um braço robótico articulado com 2-GDL como ilustrado na Figura 4, deseja-se definir um modelo D-H no qual represente sua cinemática de movimento.

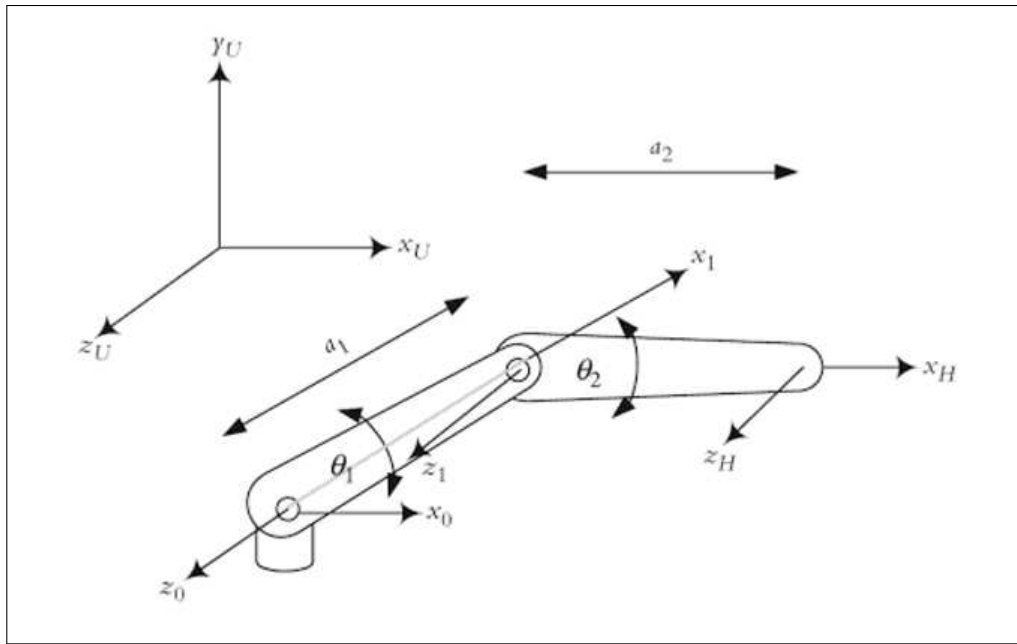


Figura 4: Braço Robótico Articulado com 2-GDL

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 4, temos

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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 4.

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

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 5), 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.

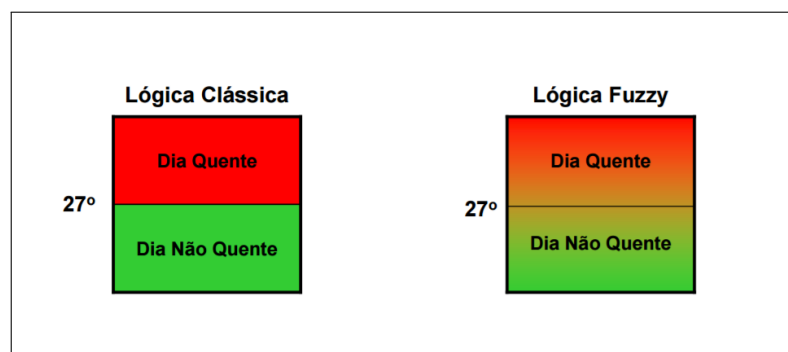


Figura 5: Logica booleana e lógica Fuzzy

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.

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. 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.

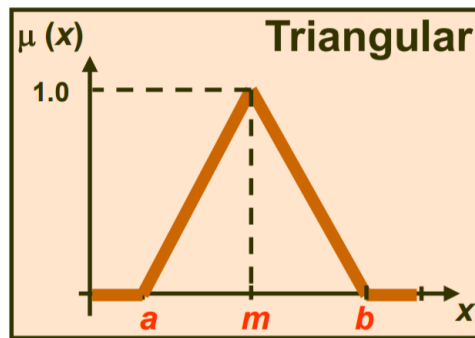
2.3.1 FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA

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 .

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

Os principais tipos de Funções de Pertinência são:

- Triangular



$$u(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{array} \right\} \quad (6)$$

Figura 6: Função de Pertinência Triangular

Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

- Trapezoidal

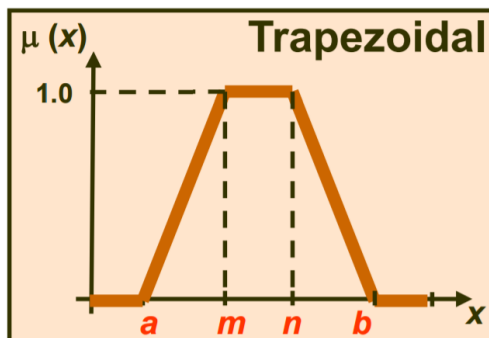
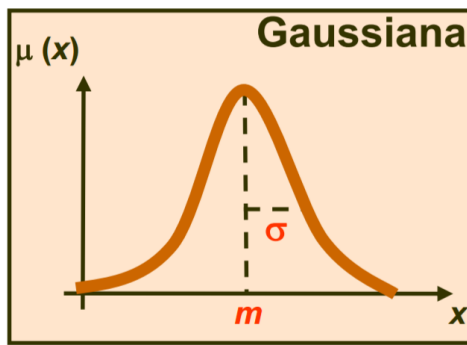


Figura 7: Função de Pertinência Trapezoidal

Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

$$u(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{n-x}{n-b}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{array} \right\} \quad (7)$$

- Gaussiana



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

Figura 8: Função de Pertinência Gaussiana

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 define 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.

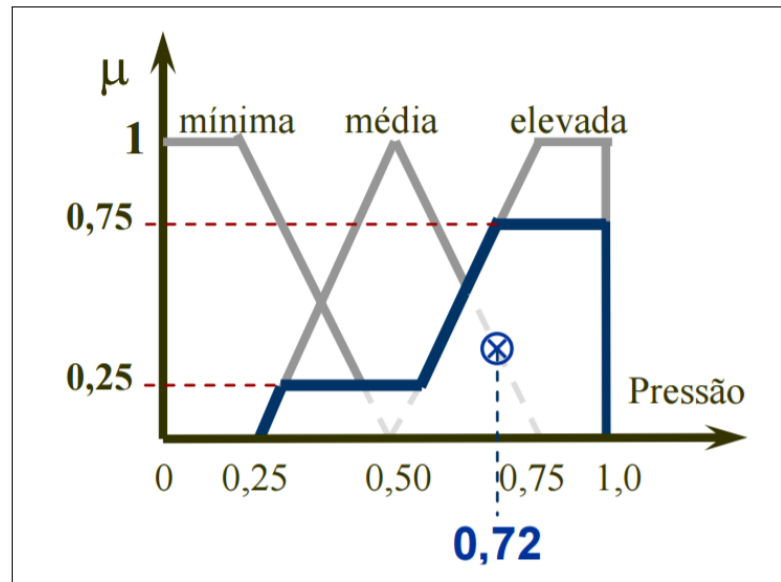


Figura 9: Exemplo Cálculo de centróide

Fonte: Adaptado SILVA et al. (2010)

A Equação 9 mostra o calculo para a obtenção do valor numerico do exemplo da Figura 9, onde p_k é o k-ésimo valor de discretização do universo de discurso, sendo N o numero total de elementod deste universo.

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

Por fim, o diagrama da Figura 10 mostra o processo de controle utilizando Sistemas *Fuzzy*.

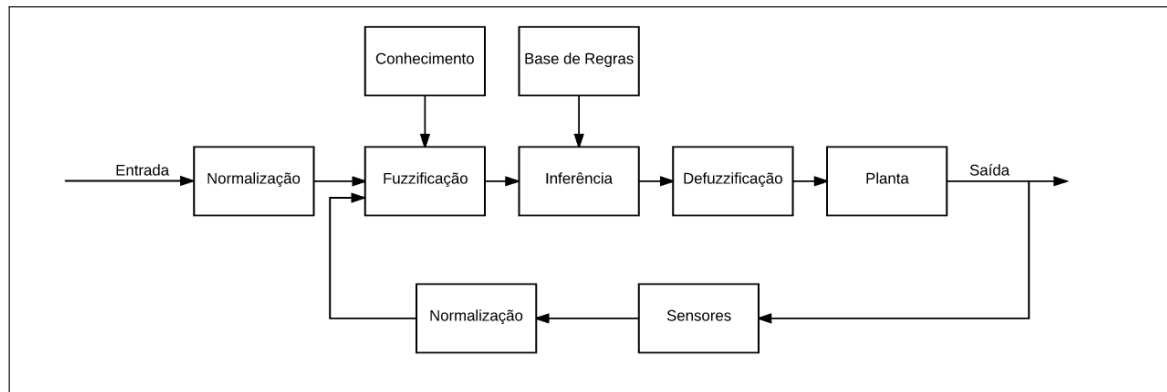


Figura 10: Diagrama de Controle Fuzzy

Fonte: Autoria Própria

3 METODOLOGIA

Para o presente trabalho será aplicado um controle de posição para um manipulador robótico com até três graus de liberdade. Também será definido a mostrado o processo construtivo do braço manipulador utilizando uma impressora 3D cartesiana.

O robô utilizado para a implementação do controle possui uma base giratória e duas articulações movimentadas através de engrenagens em sua base, como mostra o diagrama da Figura 11. Os movimentos de cada articulação é de caráter complexo, uma vez que o domínio do ângulo de abertura da segunda articulação depende do ângulo de abertura da primeira. A movimentação de cada articulação é realizada de forma independente através de motores de passo bipolares localizados nas laterais da base.

O controle será feito utilizando Sistemas *Fuzzy* para monitorar o ângulo de abertura de cada articulação. Este será dado por transdutores localizados em cada elo das articulações.

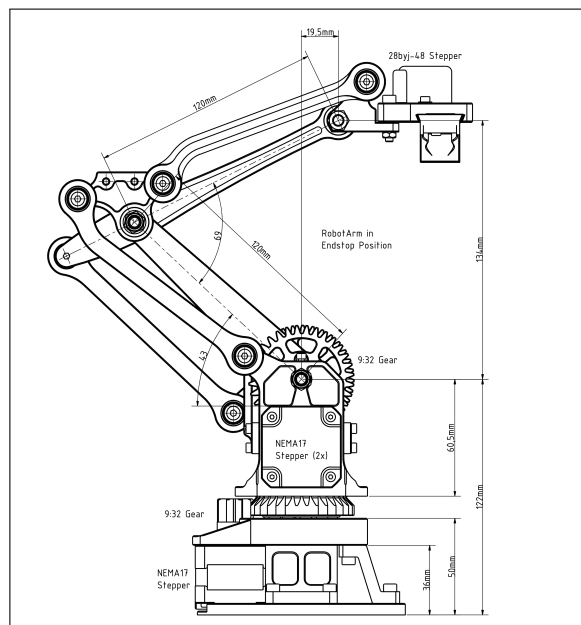


Figura 11: Diagrama Construtivo Manipulador Robótico

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

Para melhores resultados, cada transdutor terá um controlador *fuzzy* particular contendo um conjunto de duas entradas e uma saída utilizando a metodologia *Mamdani* para o processo de inferência. Os controladores serão desenvolvidos e manipulados em ambiente *MatLab/Simulink*®.

A saída do controlador será a quantidade de pulsos que cada motor deverá executar para atingir um determinado ponto no espaço. Exaustivamente serão testados pontos dentro do espaço de trabalho do robô que inicialmente será suprimido para apenas dois GDL. Por fim, será adicionado um terceiro grau de liberdade com o intuito de incrementar a complexidade dos testes e verificar o comportamento do controlador inteligente.

3.0.1 MATERIAIS

- Literatura
- Impressora 3D
- Fonte de Tensão CA/CC
- Rolamentos 686zz
- Motor de Passo NEMA 17
- Driver Motor de Passo A4998
- Arduino Mega2560
- Shield RAMPS 1.4
- Placa NI USB-6008 *National Instruments*™
- Potenciômetros rotativos
- Computador
- Plataforma *MatLab/Simulink*®

4 CRONOGRAMA

Tabela 2: Cronograma de Execução

Etapas	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x							
3		x	x	x					
4			x	x	x				
5			x	x					
6						x	x	x	
7							x	x	x

1. Revisão Bibliográfica: Em andamento
2. Escolha do Tema: Concluído
3. Escrita da Proposta: Concluído
4. Correções da Propostas: Concluído
5. Construção do Robô: Concluído
6. Controle *Fuzzy*: Pendente
7. Testes e Ajustes: Pendente

REFERÊNCIAS

KASABOV, N. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering**. MIT Press, 1996. (A Bradford book). ISBN 9780262112123. Disponível em: <<https://books.google.com.py/books?id=9bdwtUQLchIC>>.

KHALIL, H. **Nonlinear Systems**. Pearson Education, Limited, 2013. (Always learning). ISBN 9781292039213. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VZ72nQEACAAJ>>.

NIKU, S. **Introduction to Robotics**. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470604465. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2V4aGvlGt7IC>>.

NISE, N. **Engenharia de sistemas de controle**. LTC, 2002. ISBN 9788521613015. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=uWG5AAAACAAJ>>.

PAGALLO, U. **The Laws of Robots: Crimes, Contracts, and Torts**. Springer Netherlands, 2013. (Law, Governance and Technology Series). ISBN 9789400765641. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ZJhB7KHuo_UC>.

REZENDE, S. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Manole, 2003. ISBN 9788520416839. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UsJe_PlbnWcC>.

SILER, W.; BUCKLEY, J. **Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning**. Wiley, 2005. ISBN 9780471698494. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=MQNtBFmVfswC>>.

SILVA, I. D.; SPATTI, D.; FLAUZINO, R. **REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA ENGENHARIA E: CIENCIAS APLICADAS - CURSO PRATICO**. [s.n.], 2010. ISBN 9788588098534. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=w2VHbwAACAAJ>>.

SYSTEMS, I. O. for S. T. C. A.; ROBOTS integration. S.; DEVICES robotic. **ISO 8373: Robots and Robotic Devices - Vocabulary**. ISO, 2012. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8SWdjwEACAAJ>>.