

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO DE CONTROLADOR FUZZY PARA ROBÔ
MANIPULADOR**

Rodrigo Takeshi da Silva Miura

São Paulo
2008

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE CONTROLADOR FUZZY PARA ROBÔ
MANIPULADOR**

**Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia**

Rodrigo Takeshi da Silva Miura

Orientador: Prof. Dr. Décio Crisol Donha

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Miura, Rodrigo Takeshi da Silva
Projeto de controlador Fuzzy para robô manipulador / R. T.
S. Miura. -- São Paulo, 2008.
50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Robôs 2.Controle automático 3.Lógica fuzzy I.Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecânica II.t.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é projetar um controlador fuzzy para um robô manipulador de dois graus de liberdade, obtendo controle de posição e trajetória. A construção de um sistema de controle fuzzy é baseada na idéia de se incorporar experiência ou conhecimento especialista de um operador humano ou do projetista visando obter a melhor estratégia de controle. Foi construído um algoritmo de controle no qual a capacidade de controlar o sistema foi inserida no controlador através de um conjunto de regras de inferência. As ações de controle são selecionadas a partir deste conjunto de regras utilizando lógica fuzzy. O controlador trabalha apoiado em um sistema de simulação da dinâmica de operação do robô manipulador. Um controlador foi desenvolvido e feitas simulações do controle de posição e de trajetória do sistema. Os resultados obtidos com o controlador projetado, apresentados ao longo do texto, mostram que os objetivos propostos foram atingidos.

ABSTRACT

The aim of this work is to design a fuzzy logic controller for a robot manipulator of two degrees of freedom, achieving control of position and trajectory. The design of a fuzzy control system is based on incorporate experience or expert knowledge from a human operator or from the controller designer to achieve better control strategies. A control algorithm was built and the ability to control the system was inserted in the controller by a set of inference rules, which works with a dynamic operation simulation system of the robot manipulator. The control actions are selected from this set of rules using fuzzy logic. The results reached with the controller designed, presented through the text show that he objectives proposed were reached.

Lista de Figuras

Fig. 1: Estrutura do sistema de controle inteligente	9
Fig. 2: Conjunto booleano Temperatura média	11
Fig. 3: Conjunto fuzzy temperatura média.....	12
Fig. 4: União e intersecção de conjuntos fuzzy	15
Fig. 5: Complemento do conjunto fuzzy M	15
Fig. 6: Planta controlada por um sistema de controle fuzzy	17
Fig. 7: Representação fuzzy das entradas do exemplo	18
Fig. 8: Representação fuzzy da saída.....	20
Fig. 9: Resultado da inferência Fuzzy do exemplo	21
Fig. 10: Exemplo de robô manipulador dois graus de liberdade [CICESE, Robotics lab.].....	24
Fig. 11: Esquema do robô manipulador 2 graus de liberdade	25
Fig. 12: Transformação escalar-fuzzy da variável erro de posição.....	31
Fig. 13: Transformação escalar-fuzzy da variável velocidade angular.....	32
Fig. 14: Números fuzzy da saída do controlador.....	33
Fig. 15 : Superfície de Controle	35
Fig. 16: Gráfico posição angular do elo 1.....	37
Fig. 17: Gráfico posição angular do elo 2.....	37
Fig. 18: Posição do Elo 1 com condição de referência de graus com altura variando com tempo.	39
Fig. 19: Posição do Elo 2 com condição de referência de graus com altura variando com tempo.	39
Fig. 20: Posição do elo 1.....	42
Fig. 21: Posição do elo 2.....	42
Fig. 22: Posição do elo 1.....	44
Fig. 23: Posição do elo 2.....	44
Fig. 24: Posição do elo 1 com atuadores operando em condição de saturação.	46
Fig. 25: Posição do elo 2 com atuadores operando em condição de saturação.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Base de regras do exemplo	19
Tabela 2: Parâmetros do robô manipulador	29
Tabela 3: Conjunto de regras adotadas.....	34

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3 OBJETIVOS	7
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
4.1 Sistemas de controle Inteligente	8
4.2 Teoria de conjuntos clássica	10
4.3 Teoria de Conjuntos Fuzzy	11
4.4 Operações básicas sobre conjuntos fuzzy	13
4.5 Controle Fuzzy	16
5 ROBÔ MANIPULADOR	23
5.1 Modelo em forma compacta	28
6 PROJETO DO CONTROLADOR	30
6.1 Definição dos parâmetros do controlador	30
6.2 Simulação do sistema e do controlador	35
6.3 Resultados: Controle de Posição	36
6.4 Resultados: Controle Trajetória	40
7 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	47
BIBLIOGRAFIA	49

1 INTRODUÇÃO

O conceito de robô se transformou da idéia de um humano artificial, concebido pela ficção científica, para a realidade das máquinas autônomas atuais. Uma importante classe destas máquinas é a de robôs manipuladores, projetados para executar uma grande variedade de tarefas em linha de produção de diversos setores industriais. A *robótica*, que é o termo que designa o estudo dos robôs, se tornou um campo importante para a tecnologia moderna, envolvendo conhecimentos de diversas disciplinas como engenharia mecânica, mecatrônica, elétrica, ciência da computação e matemática aplicada.

Nos últimos anos é crescente a utilização de robôs na indústria devido ao barateamento destes equipamentos. Robôs além de mais baratos vêm se tornando mais rápidos, precisos e flexíveis. Isto, somado ao aumento no custo da mão-de-obra humana tradicional, vem viabilizando o investimento em automação. Um exemplo de fator não econômico que leva ao aumento da aplicação de robôs em plantas industriais é a possibilidade de substituir homens em situações em que existe grande risco de acidentes ou condições insalubres de trabalho, como por exemplo, as atividades ligadas à mineração ou a manipulação de peças a altas temperaturas em forjarias.

Como resultado da demanda da indústria moderna cresce o interesse pelo estudo e desenvolvimento desta área. O controle de robôs é um dos assuntos pertinentes, e consiste em fazer uma máquina realizar uma determinada tarefa automaticamente. Isto consiste no projeto dos controladores deste robô. Este controlador, tipicamente toma a forma de uma equação ou algoritmo implementado em programas de computador.

Os controladores mais simples e mais utilizados em robôs manipuladores na indústria são os controladores PID. Em geral, este tipo de controlador é projetado com base em um modelo matemático do robô, este composto por equações diferenciais não lineares. Apesar deste tipo de controlador ser amplamente utilizado, para determinadas ações eles nem sempre resultam em bom desempenho. Existem alternativas a esses controladores como os baseados em técnicas de controle

moderno, nos quais o controlador obtido a partir de análises matemáticas complexas do modelo do robô. Alternativas são controladores não baseados em modelos como os controladores fuzzy, que não necessitam de matemática tão complexa para serem projetados, nem que se conheçam detalhadamente as equações diferenciais que regem o sistema a ser controlado.

Segundo SHAW (1999) controladores fuzzy são controladores baseados em lógica fuzzy e na teoria de conjuntos fuzzy. A característica especial da lógica fuzzy (também referida como lógica nebulosa, lógica difusa ou teoria de possibilidades) é representar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas.

Pessoas raciocinam de forma incerta, imprecisa, difusa ou nebulosa, enquanto as máquinas e computadores são movidos por raciocínio preciso, binário. A eliminação de tal restrição faria com que as máquinas fossem “inteligentes”, isto é, pudessem raciocinar de maneira imprecisa como os seres humanos.

A lógica fuzzy fornece um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos. Isto abre portas para se converter à experiência humana em forma compreensível pelos computadores. Assim essa tecnologia tem um imenso valor prático na inclusão da experiência de operadores humanos que controlam processos ou plantas, em controles computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos. Controle fuzzy é classificado como um método de controle inteligente por ter a capacidade de emular o comportamento humano.

Em vez de utilizar um modelo matemático, os controladores industriais baseados em lógica fuzzy podem ser investidos com o conhecimento prático de operadores humanos treinados, fazendo com que a ação de controle seja tão boa, ou melhor, que a destes e sempre consistente. Operadores humanos treinados podem trabalhar em plantas industriais que não compreendem completamente, processos mal definidos e sistemas com dinâmica não conhecida. Esses operadores sabem qual ação tomar quando observam certas condições. Assim a grande vantagem de controladores fuzzy é permitir que um conjunto de regras simples que capturam estratégias de controle de operadores humanos, possam ser convertidas em formas heurísticas compreensíveis aos computadores, possibilitando o controle de plantas

não-lineares com relativa facilidade. Isso resolve o problema de se automatizar tarefas geralmente delegadas para controle manual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A lógica fuzzy tem emergido nos últimos tempos como uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento de sistemas de controle e de tomada de decisão. As aplicações englobam uma grande variedade de sistemas como: controle automático de complexos processos industriais, controle de trens de metrô, controle de equipamentos domésticos, sistemas de diagnósticos médicos, etc.

No desenvolvimento da teoria de lógica fuzzy existem dois marcos significantes. O primeiro ocorreu em 1965 quando a lógica fuzzy foi apresentada formalmente ao meio acadêmico por ZADEH, um professor de ciência da computação da Universidade da Califórnia. A teoria foi formulada para tratar problemas com imprecisões, nos quais algumas variáveis são definidas de forma vaga ou com pouca precisão. O segundo marco ocorreu em 1974, quando MANDANI apresentou os primeiros resultados de um controlador de processos baseado em lógica fuzzy.

É comum encontrar na literatura a afirmação de que um controlador fuzzy fornece maior robustez que um controlador convencional tipo PID, JANTZEN (1998), porém não foi localizada uma pesquisa que comprove tal cientificamente afirmação. JAGER (1995) afirma que um controlador fuzzy é uma não-linearidade estática, cuja robustez depende das regras que o define. Quando a forma de variação dos parâmetros do processo for bem conhecida, um controlador fuzzy pode ser menos sensível à variação desses parâmetros e, portanto, mais robusto que um controlador linear. Então é possível afirmar que os controladores fuzzy podem ser mais robustos a variações de parâmetros conhecidos.

Considerando o atual estágio de desenvolvimento de controladores fuzzy, é possível identificar que as principais áreas onde tais controladores podem ser aplicados com sucesso são:

a) Processos que podem ser perfeitamente controlados ou operados por pessoas e processos nos quais o controlador projetado utiliza-se de sensores que forneçam informações similares às aquelas utilizadas por pessoas para tomada de decisão. Exemplos de tipo de aplicação são transmissões automáticas de automóveis, máquinas de lavar, frenagem de caminhões, etc.

b) Processos que podem ser controlados por algoritmos de controle linear e que necessitam de aprimoramento em seus projetos para resultar em algoritmos de controle não linear. Exemplo controle de robôs.

Exemplos de aplicação de lógica fuzzy são encontrados na literatura:

- Controle de um sistema para aquecer água desenvolvido por KICKERT, LEMKE (1976);
- Controle de robô, desenvolvido por URAGAMI et al. (1976);
- Controle de um trocador de calor e de um forno de cimento desenvolvido por OSTERDAAD (1977);
- Sistema de controle de tráfego por PAPPIS, MANDANI (1977);
- Sistema de controle de voo por LARKIN (1977);
- Controle automático para manobrar e estacionar carros por SUGENO, MURAKAMI (1984);
- Controle de processo para purificação de águas residenciais por YAGISHITA, ITOH, SUGENO (1985);
- Sistema de transmissão automática de carro por KASAI, MORIMOTO (1988).

Tem crescido também o número de aplicações de sistemas baseados em lógica fuzzy, em áreas distintas de controle de processos. Por exemplo:

- Diagnóstico médico, LESMO et al. (1982);
- Recuperação de informações, NAKAMURA, IWA (1982);
- Modelagem matemática de sistemas por TAKAGI, SUGENO (1985);
- Classificação de padrões por ISHIBUCHI et al. (1993).

A bibliografia disponível, tanto sobre lógica e controle fuzzy, quanto sobre modelagem, controle, projeto de robôs e manipuladores robóticos, é vasta. Sobre robótica existem diversos textos e revistas especializadas disponíveis, cobrindo todos os principais aspectos, como modelagem (cinemática e dinâmica), geração de trajetórias, controle clássico, instrumentação, softwares e implementação. Por causa deste amplo escopo, os textos geralmente preferem abordar cada tema de forma superficial. Neste trabalho, a principal bibliografia consultada neste assunto é

CRAIG, J. Introduction to robotics: Mechanics and Control. (2005) que é um livro que cobre basicamente todos os assuntos pertinentes.

Sobre lógica e controle fuzzy foram publicados diversos livros, revistas, sites especializados e artigos. Os textos mais utilizados para desenvolver o trabalho foram SHAW, I.; SIMÕES, M. Controle e modelagem fuzzy e NGUYEN, H.; PRASAD, N.; WALKER, C.; WALKER, E. A first course in fuzzy and neural control. 1.ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC,2003.

3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é projetar um controlador para um robô manipulador utilizando lógica e teoria de controle fuzzy. As necessidades a serem supridas são:

- Obtenção do modelo matemático do robô manipulador a ser controlado: Necessário para simular o desempenho do controlador a ser projetado já que não será possível construir um protótipo devido aos altos custos envolvidos, principalmente devido aos sensores necessários.
- Conhecimento da dinâmica do robô a ser controlado: Necessário para a elaboração das regras de controle utilizadas pelo controlador fuzzy. Para isto serão utilizadas informações sobre a dinâmica do robô escolhido, disponíveis na bibliografia e pela simulação do modelo obtido.
- Obter o controle: Obter controle de posição e trajetória planejada para o robô manipulador, utilizando controle fuzzy. As regras da base de conhecimento utilizadas, as regras de inferência adotadas e os outros parâmetros relevantes para o projeto de controladores fuzzy devem ser otimizados para obter um resultado com grau de robustez adequado e respostas melhores que as possíveis com métodos de controle clássicos geralmente utilizados.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Sistemas de controle Inteligente

De acordo com o dicionário Aurélio, a palavra inteligência é derivada de intelecto e significa faculdade ou capacidade de aprender, compreender ou adaptar facilmente. Um comportamento inteligente é então a habilidade de raciocinar, planejar e aprender, o que torna necessário acesso a conhecimento.

Inteligência Artificial é uma tentativa de trocar inteligência humana por inteligência de máquinas. Um sistema inteligente de controle combina técnicas de inteligência artificial com técnicas de engenharia de controle para projetar sistemas autônomos com capacidade de raciocinar, planejar, aprender e agir de um modo inteligente. Tal sistema deve ser capaz de atingir e manter o comportamento desejado sob condições de incerteza, que podem incluir [JOHNSON. (1995)]:

- Incertezas do modelo da planta.
- Variações imprevisíveis do ambiente que introduzem distúrbios.
- Informações dos sensores incompletas, inconsistentes ou não confiáveis.
- Mau funcionamento de atuadores.

Um sistema de controle inteligente é composto pelos subsistemas mostrados na Fig. 1:

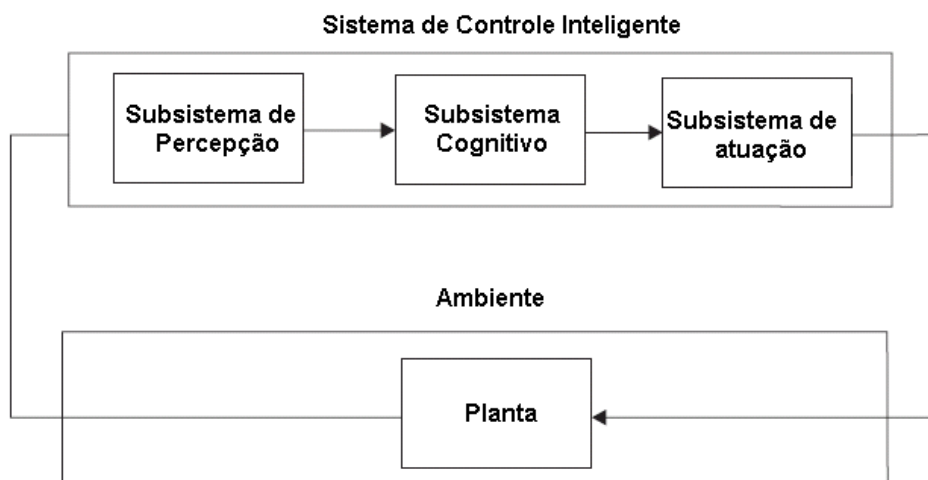


Fig. 1: Estrutura do sistema de controle inteligente

O subsistema de percepção coleta informações da planta e do ambiente e processa essa informação de forma adequada ao subsistema cognitivo. O subsistema cognitivo é responsável pela tomada de decisão do controlador inteligente sob condições de incerteza, gerando uma ação de controle. O subsistema de atuação processa esta ação de controle para uma forma compreensível do ponto de vista planta.

Existem diferentes técnicas possíveis de serem aplicadas no subsistema cognitivo de forma a fazer com que o controlador tenha características inteligentes. A utilização de lógica fuzzy introduz uma forma de raciocínio ao controlador. A observação de uma condição de entrada, combinada à consulta da base de conhecimento, gera uma decisão na forma de ação de controle. Esse encadeamento de ações caracteriza um comportamento inteligente. Outros métodos podem ser utilizados, isoladamente ou combinados, de forma a gerar outras características de inteligência. Um exemplo é a utilização de redes neurais, que possibilitam o aprendizado e o enriquecimento da base do conhecimento do controlador.

O escopo deste trabalho se restringe à utilização da lógica fuzzy em técnicas de controle. Nos próximos capítulos serão apresentados os conceitos básicos da lógica fuzzy e sua aplicação em sistemas de controle.

4.2 Teoria de conjuntos clássica

Neste tópico são lembrados os conceitos básicos da teoria de conjuntos clássicos ou booleanos. As principais operações realizadas com estes conjuntos são:

- União: $S \cup T = \{ x \mid x \in S \text{ ou } x \in T \}$ (4.1)

- Interseção: $S \cap T = \{ x \mid x \in S \text{ e } x \in T \}$ (4.2)

- Complementar: $\bar{X} = \{ x \mid x \notin S \}$ (4.3)

- Produto Cartesiano: $A \times B = \{ (a,b) \mid a \in A \text{ e } b \in B \}$ (4.4)

O produto cartesiano do conjunto A com o conjunto B, indicado por $A \times B$ é o conjunto formado por todos os pares ordenados através da combinação de um elemento de A com um elemento de B. As relações da teoria de conjuntos booleanos são:

- Uma relação $R(s,t)$ é uma associação ou uma propriedade, entre dois ou mais objetos. Formalmente, define-se uma relação R entre um conjunto S e um conjunto T, se para todo $s \in S$ e $t \in T$, $R(s,t)$ for verdadeira ou falsa. O produto cartesiano é um exemplo de relação.
- Domínio de uma relação R (dos conjuntos S e T), indicado por $\text{Dom}(R)$, é um subconjunto do conjunto S, para o qual R relaciona algum elemento de S com algum elemento de T.
- Contra Domínio de uma relação R (dos conjuntos S e T), indicado por $\text{Ran}(R)$, é um subconjunto de T para o qual R relaciona algum elemento de S com algum elemento de T.
- Uma função f de S em T é uma forma especial de relação na qual existe um único elemento de T correspondendo a qualquer elemento de S. O conjunto de todos os mapeamentos de S em T é notado como:

$$S \rightarrow T = \{ f \mid x \text{ em } S \Rightarrow f(x) \text{ em } T \}. \quad (4.5)$$

Para ilustrar um conjunto indicador de função define-se o seguinte subconjunto:

$M \subset T = \{ x \mid x \in T \text{ e } 20 \leq x \leq 30 \}$, que pode representar uma função, por exemplo das temperaturas do ambiente consideradas médias. A expressão “ $20 \leq x \leq 30$ ” indica uma função de x que pode assumir os valores de verdadeiro ou falso. Associando 1 a verdadeiro e 0 a falso, então é possível expressar o conjunto M , conforme a Fig. 2. A função μ indicada na figura é um indicador de pertinência, que recebe o nome de função de pertinência e assume valores iguais a 1 para todos os pontos de M e valores 0 para $\bar{M}$.

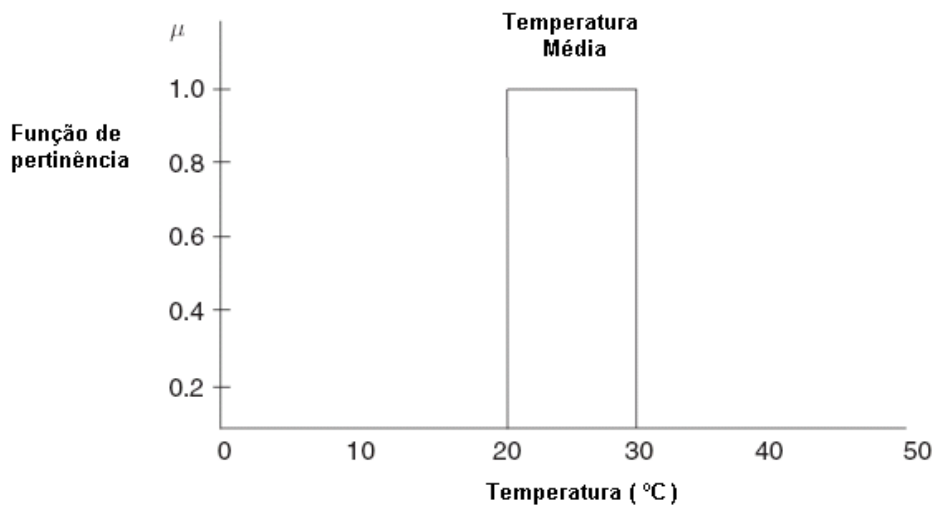


Fig. 2: Conjunto booleano Temperatura média

4.3 Teoria de Conjuntos Fuzzy

Os conceitos relacionados a conjuntos fuzzy formam uma base para o tratamento e manipulação de conceitos vagos ou imprecisos.

Dado um conjunto U , denominado universo de discurso, um conjunto fuzzy A em U é caracterizado por uma função de pertinência, a qual associa a cada elemento u de U , um valor $\mu_A(u)$ no intervalo $[0,1]$, que representa o grau de pertinência de u em A .

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$$

Um conjunto fuzzy pode ser visto como uma generalização do conceito clássico de conjunto, no qual a função de pertinência assume valores 0 e 1. Assim um conjunto fuzzy A em U pode ser representado como um conjunto de pares ordenados, o qual é formado por um elemento genérico u e seu grau de pertinência em A, $\mu_A(u)$:

$$A = \{ (u, \mu_A(u)) \mid u \in U \} \quad (4.6)$$

Quando o conjunto U é contínuo, o conjunto fuzzy A pode ser escrito como:

$$A = \int_u \mu_A(u) / u \quad (4.7)$$

A Fig. 3 mostra a função de pertinência do conjunto fuzzy chamado temperatura média análogo ao exemplo do item anterior.

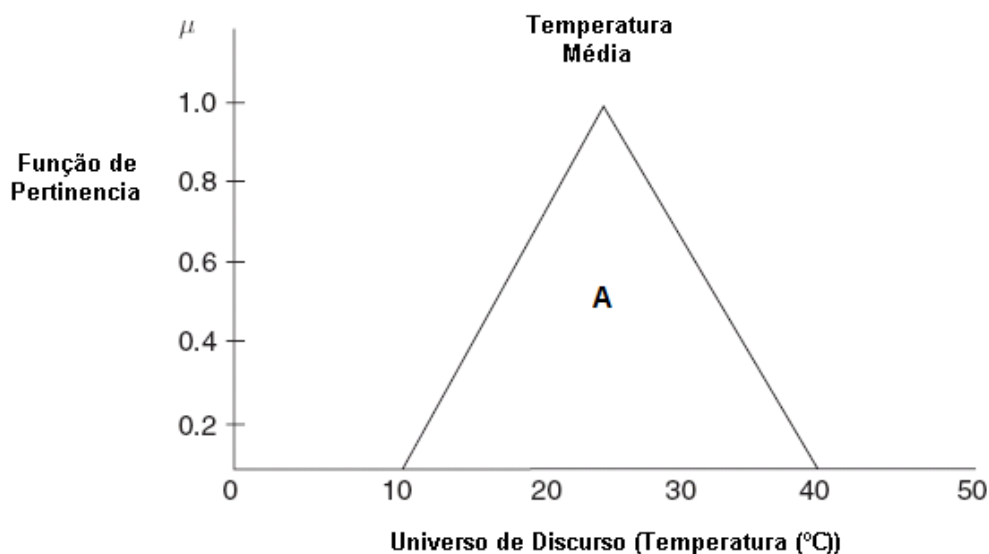


Fig. 3: Conjunto fuzzy temperatura média

A Fig. 2 mostra uma função de pertinência de um conjunto booleano denominado temperatura média. Temperaturas entre 20 e 30 °C pertencem ao conjunto temperatura média, assim as temperaturas deste intervalo tem grau de pertinência de valor um neste conjunto. Temperaturas fora deste intervalo têm grau de

pertinência de valor zero neste conjunto. Assim um conjunto booleano é definido através de uma função de pertinência μ : Temperatura $\rightarrow \{0,1\}$.

O conceito central da teoria de conjunto fuzzy é que a função de pertinência μ pode assumir valores no intervalo entre 0 e 1. A Fig. 3 ilustra este conceito. A função de pertinência μ tem relação com o eixo x, chamado universo de discurso U.

No caso foi escolhida uma função de pertinência triangular, que são muito utilizadas, por fornecerem bons resultados e pela fácil programação em computador. Outros arranjos são possíveis, como triângulos não simétricos, trapezóides, Gaussianas, etc.

No domínio fuzzy uma temperatura pertence ao conjunto temperatura média de acordo com um grau de pertinência que varia de 0 a 1. Na Fig. 3 temos que $\mu_M(20) \approx 0,6$, ou seja, a temperatura 20 °C pertence ao conjunto temperatura média com grau de pertinência 0,7.

4.4 Operações básicas sobre conjuntos fuzzy

As operações definidas para conjuntos fuzzy são similares as definidas para conjuntos booleanos. Sejam L e M dois conjuntos fuzzy num universo de discurso U, com funções de pertinência μ_L e μ_M respectivamente. As operações de união, interseção, complementar, produto e produto cartesiano são definidas em termos de suas respectivas funções de pertinência.

União: A união de dois conjuntos fuzzy L e M é um conjunto fuzzy de U, com a função de pertinência definida por, para todo $u \in U$:

$$\mu_{L \cup M}(u) = \max\{\mu_L(u), \mu_M(u)\} \quad (4.8)$$

Intersecção: A função de pertinência da intersecção de dois conjuntos fuzzy L e M pode ser definida por, para todo $u \in U$:

$$\mu_{L \cap M}(u) = \min\{\mu_L(u), \mu_M(u)\} \quad (4.9)$$

Complemento: A função de pertinência do complemento do conjunto fuzzy L pode ser definida por, para todo $u \in U$:

$$\mu_{\overline{L}}(u) = 1 - \mu_L(u) \quad (4.10)$$

Produto: O produto de L e M, denotado por $A \cdot B$, é definido como:

$$A \cdot B = \int_u \mu_L(u) \cdot \mu_M(u) / u \quad (4.11)$$

Produto cartesiano: Se $L_1, L_2, \dots, L_n$ são conjuntos fuzzy em $X_1, X_2, \dots, X_n$ respectivamente, o produto cartesiano de $L_1, L_2, \dots, L_n$ é um conjunto fuzzy no espaço produto $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, cuja função de pertinência é definida como:

$$\mu_{L_1 \times L_2 \times \dots \times L_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{L_1}(u_1), \dots, \mu_{L_n}(u_n)\} \quad (4.12)$$

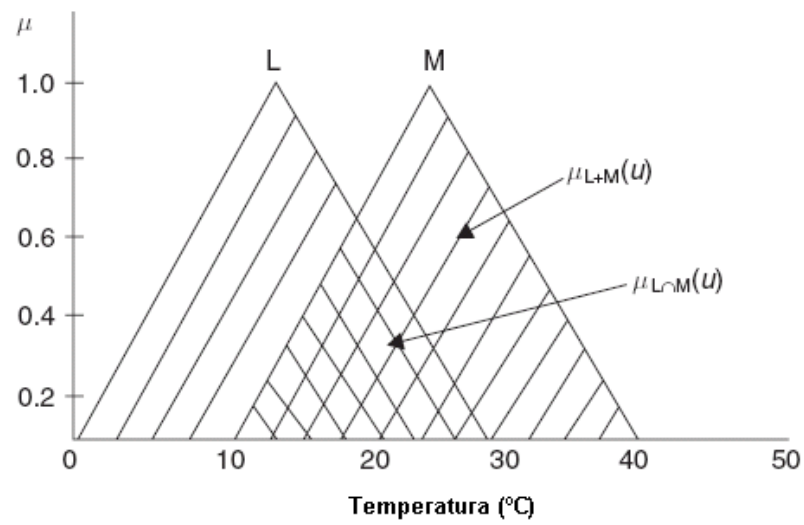


Fig. 4: União e intersecção de conjuntos fuzzy

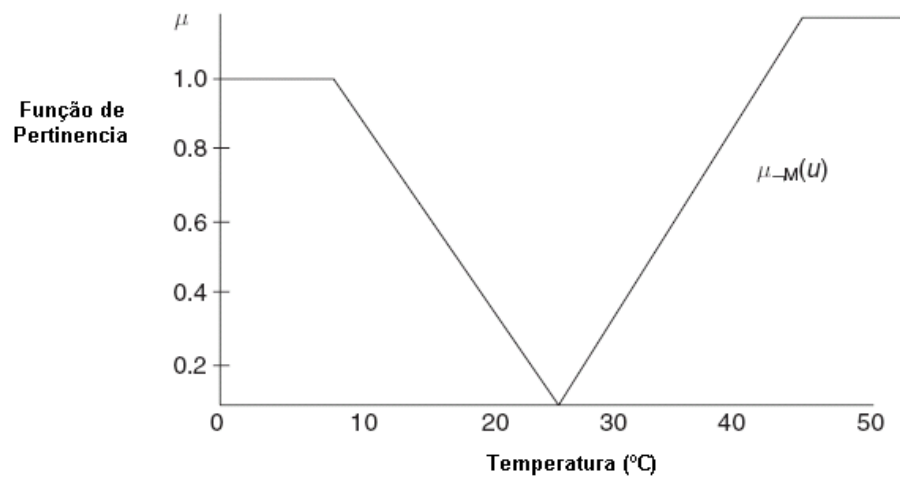


Fig. 5: Complemento do conjunto fuzzy M

4.5 Controle Fuzzy

Sistemas de controle fuzzy têm o objetivo de incorporar experiência ou conhecimento especialista de um operador humano para se obter a melhor estratégia de controle. Os sistemas de controle fuzzy são baseados na lógica fuzzy para a construção de bases de conhecimento e para a realização de inferências.

A configuração de uma planta controlada por um sistema de controle fuzzy é mostrada na Fig. 6. Um controlador fuzzy possui quatro componentes principais:

1. **Interface escalar-fuzzy:** Realiza a transformação de um valor escalar em valores de pertinência em conjuntos fuzzy. Todo processo está relacionado com imprecisão, pois é uma aplicação que transforma uma medida real em um valor subjetivo. Pode ser definido como o mapeamento de observações realizadas no espaço das entradas em conjuntos fuzzy contidos no universo de discurso das entradas. São parâmetros do projeto deste componente:
 - Número de entradas no controlador.
 - Tamanho do universo de discurso, que é a faixa esperada de valores de entrada.
 - Número e forma de conjuntos fuzzy. Para cada conjunto é dado um rótulo lingüístico, como Grande Positivo (PB), Médio Positivo (PM), Pequeno Positivo (SP), Zero (Z), Pequeno Negativo (NS), Médio Negativo (NM) e Grande Negativo (NB).

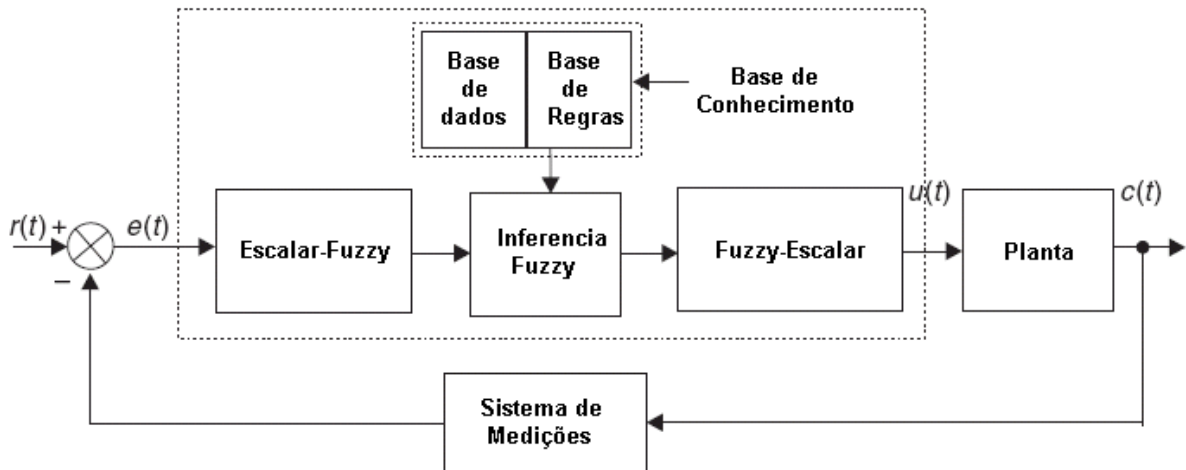


Fig. 6: Planta controlada por um sistema de controle fuzzy

Considerando um exemplo em que as entradas do controlador são o erro $e(t)$ e a taxa de variação de erro $ce(t)$, e que estes valem respectivamente 2,5 e $-0,2$ em um dado instante. Usando sete conjuntos fuzzy triangulares com os nomes descritos, de acordo com a Fig. 7, os valores de pertinência no instante considerado serão:

$$\mu_{PS}(e) = 0,7 \quad \mu_{PM}(e) = 0,4$$

$$\mu_{NS}(ce) = 0,6 \quad \mu_Z(e) = 0,3$$

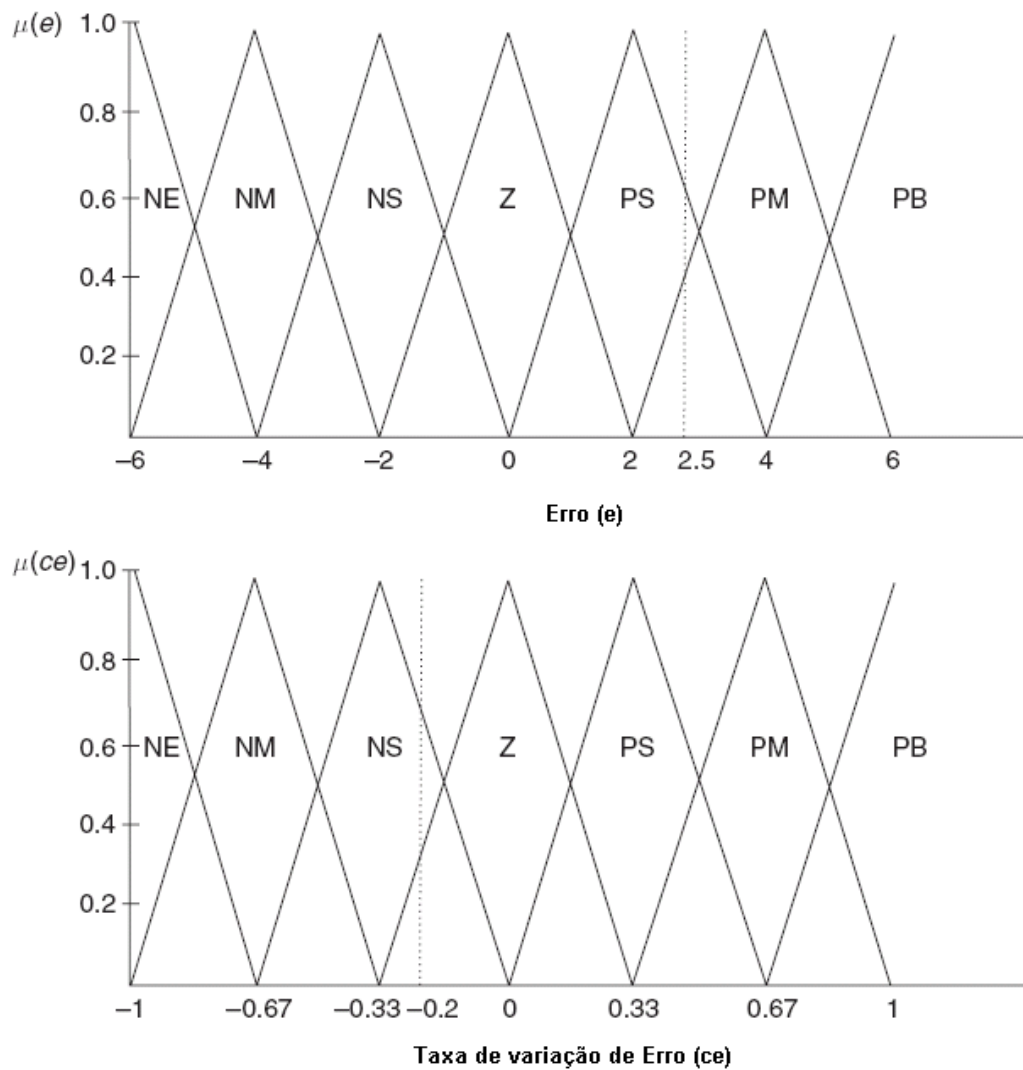


Fig. 7: Representação fuzzy das entradas do exemplo

2. Base de Conhecimento

A base de conhecimento é o componente principal do controlador fuzzy, no sentido que todos os outros componentes operam de forma a interpretá-la na busca na solução do problema. A base de conhecimento consiste de uma base de dados e uma base de regras lingüísticas de controle.

a) **Base de regras:** Consiste num conjunto de regras lingüísticas paralelas na forma:

$$R1: \text{se } e = A1 \text{ e } ce = B1 \text{ então } u = C1$$

R2: se $e = A2$ e $ce = B2$ então $u = C2$

A base de regras deve caracterizar os objetivos e a política de controle, que são de domínio do especialista no assunto, através de um conjunto de regra lingüísticas de controle do tipo “if-else”.

b) **Base de dados:** Fornece as definições necessárias para configurar as regras e para manipular os dados fuzzy no controlador. Corresponde a definição quantitativa dos conjuntos fuzzy, isto é, para as regras apresentadas no item “a”, as definições de $A1$, $A2$, $B1$, $B2$, $C1$. As definições quantitativas dos conjuntos fuzzy correspondem à identificação de parâmetros do controlador. A base de conhecimento deve compreender todo o domínio de aplicação específica, assim como atende aos objetivos de controle. A Tabela 1 mostra o resumo da base do conhecimento do exemplo considerado:

Tabela 1: Base de regras do exemplo

$\begin{matrix} e \\ ce \end{matrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	Z	PM	PB
NM	NB	NB	NB	NM	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
PM	NB	NM	NS	PM	PB	PB	PB
PB	NB	NM	Z	PM	PB	PB	PB

3. **Inferência Fuzzy (Lógica de tomada de decisões):** É o núcleo do controlador fuzzy, infere as ações de controle através do emprego de implicações e regras de inferência fuzzy. Pode-se considerar que a ação de

controle também seja representada por um conjunto de números fuzzy com os mesmos rótulos lingüísticos das entradas (Fig. 8).

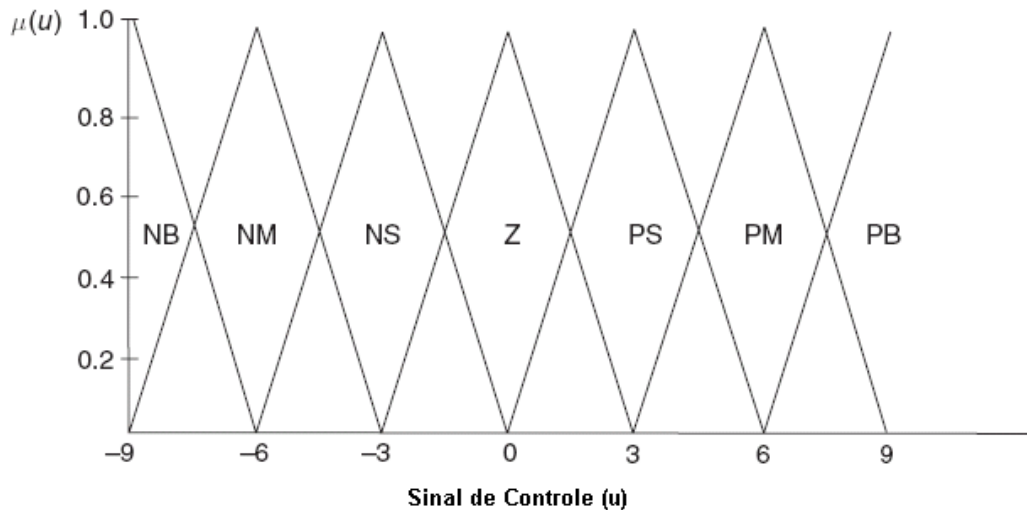


Fig. 8: Representação fuzzy da saída

Assumindo que uma regra da base de regras é dada pela seguinte equação:

$$\text{Ou se } e = A \text{ e } ce = B \text{ então } u = C$$

Das operações básicas sobre conjuntos fuzzy a operação booleana “ou” (união) é uma operação de máximo (4.8), e a operação booleana “e” (interseção) é uma operação de mínimo (4.9). Assim a regra apresentada pode ser escrita por:

$$\mu_C(u) = \text{máx}[\text{mín}(\mu_A(e), \mu_B(ce))] \quad (4.13)$$

Considerando $e(t)=2,5$ e $ce(t)= -0, 2$ e observando as Fig. 7 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, conclui-se que regras relevantes são:

...Ou se $e = PS$ e $ce = NS$

Então $u = PS$

...Ou se $e = PS$ e $ce = Z$

Então $u = PS$

... Ou se $e = PM$ e $ce = NS$

Então $u = PM$

... Ou se $e = PM$ e $ce = Z$

Então $u = PM$

A inferência fuzzy destas regras resulta em:

$$\mu_{PS}(u) = \text{máx}[\text{mín}(\mu_{PS}(e), \mu_{NS}(ce)), \text{mín}(\mu_{PS}(e), \mu_Z(ce))] \quad (4.14)$$

$$\mu_{PS}(u) = \text{máx}[\text{mín}(0.7, 0.6), \text{mín}(0.7, 0.3)] = 0.6$$

$$\mu_{PM}(u) = \text{máx}[\text{mín}(\mu_{PM}(e), \mu_{NS}(ce)), \text{mín}(\mu_{PM}(e), \mu_Z(ce))] \quad (4.15)$$

$$\mu_{PM}(u) = \text{máx}[\text{mín}(0.4, 0.6), \text{mín}(0.4, 0.3)] = 0.4$$

A inferência fuzzy é, portanto, o mapeamento dos valores de inferência das entradas, através da base de regras, para os valores das saídas.

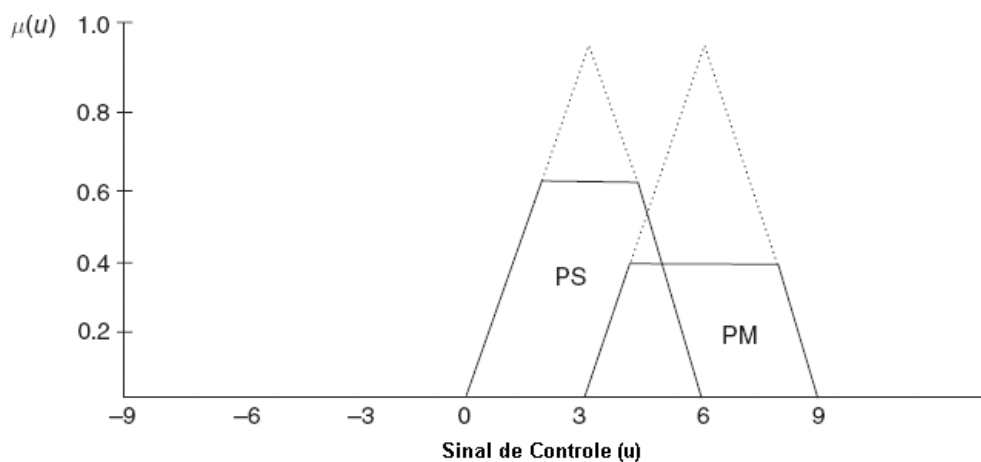


Fig. 9: Resultado da inferência Fuzzy do exemplo

4. **Interface fuzzy-escalar:** É o processo de transforma uma ação de controle fuzzy numa ação de controle escalar. A saída do módulo de inferência é ainda um conjunto fuzzy, que representa a distribuição de possibilidades da ação de controle inferida. Porém, em um processo de controle, a ação de controle deve ser fornecida em um valor real e conseqüentemente o conjunto

fuzzy da ação de controle deve ser transformado num valor escalar “u”. Assim interface fuzzy-escalar tem a função de realizar um mapeamento, de forma a converter a faixa de valores das variáveis de saída em valores correspondentes no universo de discurso e transformar uma ação de controle fuzzy, resultante do processo de inferência em uma ação de controle não-fuzzy. Existem diversos métodos para realizar esse processo. O método adotado foi o de centro de gravidade ou centro da área.

O método do centro das áreas é o mais utilizado e gera o centro de gravidade da distribuição de possibilidades da ação de controle. No caso de um universo contínuo, este método calcula a ação de controle por:

$$u(t) = \frac{\int u \cdot \mu(u) du}{\int \mu(u) du} \quad (4.16)$$

No exemplo analisado, $u = 3.83$, que é o valor do sinal de controle que divide a área interna as linhas cheias em duas partes iguais na Fig. 9.

5 ROBÔ MANIPULADOR

Robôs manipuladores são cada vez mais utilizados em engenharia. Entre as diversas aplicações pode-se citar o uso cada vez mais freqüente em processos de produção, exploração espacial, medicina e em ambientes hostis.

Um robô manipulador é definido como uma máquina com características significantes de versatilidade e flexibilidade [SCIAVICCO & SICILIANO, (1996)]. Um robô manipulador é constituído por:

- Manipulador: Constituído por um conjunto de elos conectados através de articulações (ou juntas).
- Atuadores: Responsáveis pela movimentação do manipulador através de forças aplicadas direta ou indiretamente nas juntas. As forças são aplicadas por motores elétricos, pneumáticos ou hidráulicos.
- Sensores: Indicam o *status* do manipulador.
- Sistema de controle (computador): Permite o controle e a supervisão do manipulador.

Neste trabalho será utilizado um modelo de um robô manipulador de dois graus de liberdade, plano, composto de dois elos rígidos ligados por juntas de revolução. Os elos são movidos por motores elétricos localizados numa base e outro entre os elos. A Fig. 10 ilustra um exemplo deste tipo de manipulador:



Fig. 10: Exemplo de robô manipulador dois graus de liberdade [CICESE, Robotics lab.]

Serão derivadas as equações da dinâmica completa deste robô manipulador, com objetivo de obter um modelo para realizar as simulações do controlador fuzzy a ser projetado. A Fig. 11 mostra um esquema do robô manipulador a ser modelado e utilizado na simulação do controlador.

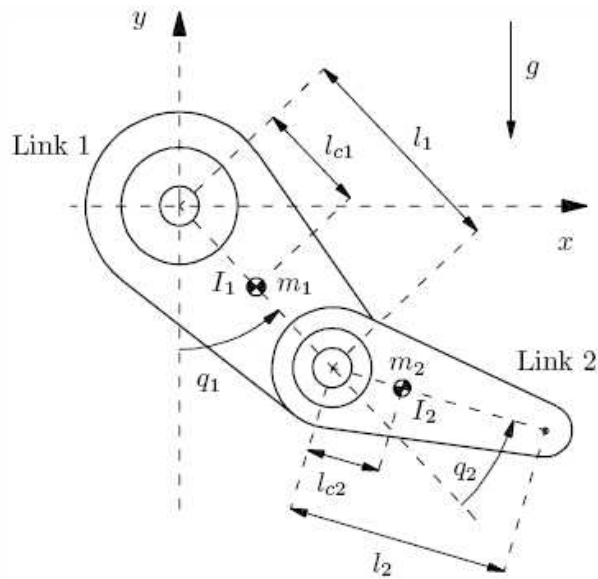


Fig. 11: Esquema do robô manipulador 2 graus de liberdade

O manipulador consiste de dois elos de comprimentos l_1 e l_2 , de massas m_1 e m_2 respectivamente. As distâncias dos eixos de rotação aos centros de massa são chamados l_{c1} e l_{c2} para os elos 1 e 2, respectivamente. Finalmente I_1 e I_2 são os momentos de inércia dos respectivos elos com relação a eixos perpendiculares ao plano mostrado passando pelos respectivos centros de massa. Os graus de liberdade associados são os ângulos de q_1 medido do eixo vertical, e q_2 que é medido em relação a eixo passando pela extensão do elo 1. Ambos positivos no sentido anti-horário. O vetor de posição é definido por:

$$q = [q_1 \ q_2]^T \quad (5.0)$$

Para deduzir as equações dinâmicas utilizam-se as derivadas das equações de Lagrange. Inicialmente escrevendo a função de energia cinética, $K(q, \dot{q})$. Para o elo 1 as posições do centro de massa e suas velocidades são dadas por:

$$\begin{aligned}
x_1 &= l_{c1} \cdot \text{sen}(q_1) \\
y_1 &= -l_{c1} \cdot \cos(q_1) \\
v_1 &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1} \cdot \cos(q_1) \dot{q}_1 \\ l_{c1} \cdot \text{sen}(q_1) \dot{q}_1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

A energia cinética correspondente ao movimento do elo 1 é dada por:

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^T v_1 + \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \dot{q}_1^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot l_{c1}^2 \cdot \dot{q}_1^2 \tag{5.2}$$

Para o elo 2 as posições do centro de massa e suas velocidades são dadas por:

$$\begin{aligned}
x_2 &= l_1 \cdot \text{sen}(q_1) + l_{c2} \cdot \text{sen}(q_1 + q_2) \\
y_2 &= -l_1 \cdot \cos(q_1) - l_{c2} \cdot \cos(q_1 + q_2) \\
v_2 &= \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cdot \cos(q_1) \cdot \dot{q}_1 + l_{c2} \cdot \cos(q_1 + q_2) \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_1 \cdot \text{sen}(q_1) \cdot \dot{q}_1 + l_{c2} \cdot \text{sen}(q_1 + q_2) \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

A energia cinética correspondente ao movimento do elo 2 é dada por:

$$\begin{aligned}
K_2(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^T v_2 + \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot [\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2 \\
&= \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_1^2 \cdot \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_{c2}^2 \cdot [\dot{q}_1^2 + 2 \cdot \dot{q}_1 \cdot \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2]^2 + \\
&\quad m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot [\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \cdot \dot{q}_2] \cdot \cos(q_2) + \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot [\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2
\end{aligned} \tag{5.4}$$

As energias potenciais associadas as massas m_1 e m_2 dos elos são respectivamente:

$$U_1(q) = -m_1 \cdot l_{c1} \cdot g \cdot \cos(q_1) \tag{5.5}$$

$$U_2(q) = -m_2 \cdot l_1 \cdot g \cdot \cos(q_1) - m_2 \cdot l_{c2} \cdot g \cdot \cos(q_1 + q_2) \tag{5.6}$$

A equação de Lagrange é dada por:

$$L(q, \dot{q}) = K_1(q, \dot{q}) + K_2(q, \dot{q}) - U_1(q) - U_2(q) \quad (5.7)$$

As equações da dinâmica do modelo de robô manipulador são obtidas aplicando as equações de Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (i=1,2) \quad (5.8)$$

Os termos desta equação para o robô manipulador analisado são apresentados a seguir:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right] &= [m_1 \cdot l_{c1}^2 + m_2 \cdot l_1^2 + m_2 \cdot l_{c2}^2 + 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2)] \cdot \ddot{q}_1 + \\ &[m_2 \cdot l_{c2}^2 + m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2)] \ddot{q}_2 + \\ &- 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \cdot \dot{q}_2 - m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2^2 + \\ &I_1 \cdot \ddot{q}_1 + I_2 [\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2] \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = -[m_1 \cdot l_{c1} + m_2 \cdot l_1] \cdot g \cdot \sin(q_1) - m_2 \cdot l_{c2} \cdot g \cdot \sin(q_1 + q_2) \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right] &= m_2 \cdot l_{c2}^2 \cdot \ddot{q}_1 + m_2 \cdot l_{c2}^2 \cdot \ddot{q}_2 + \\ &m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2)] \ddot{q}_1 - m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \\ &I_2 [\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2] \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = -m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \sin(q_2) \cdot [\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1^2] - m_2 \cdot l_{c2} \cdot g \cdot \sin(q_1 + q_2) \quad (5.12)$$

Finalmente substituindo (5.9) e (5.10) em (5.8) obtém-se a equação da dinâmica do elo 1. O torque externo é representado por τ_1 :

$$\begin{aligned}\tau_1 = & [m_1 \cdot l_{c1}^2 + m_2 \cdot l_1^2 + m_2 \cdot l_{c2}^2 + 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2) + I_1 + I_2] \cdot \ddot{q}_1 + \\ & [m_2 \cdot l_{c2}^2 + m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2) + I_2] \cdot \ddot{q}_2 + \\ & - 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \cdot \dot{q}_2 - m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \sin(q_2) \cdot \dot{q}_2^2 + \\ & [m_1 \cdot l_{c1} + m_2 \cdot l_1] \cdot g \cdot \sin(q_1) + \\ & m_2 \cdot g \cdot l_{c2} \cdot \sin(q_1 + q_2)\end{aligned}\quad (5.13)$$

Analogamente substituindo (5.11) e (5.12) em (5.8) obtemos a equação da dinâmica do elo 2. O torque externo no elo 2 é representado por τ_2 :

$$\begin{aligned}\tau_2 = & [m_2 \cdot l_{c2}^2 + m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2) + I_2] \cdot \ddot{q}_2 + \\ & m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \sin(q_2) \cdot \dot{q}_1^2 + m_2 \cdot g \cdot l_{c2} \cdot \sin(q_1 + q_2)\end{aligned}\quad (5.14)$$

5.1 Modelo em forma compacta

Para fins de controle, é mais prático reescrever as equações dinâmicas (5.13) e (5.14) na forma compacta.

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \cdot \ddot{q} + \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) & C_{12}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & C_{22}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \cdot \dot{q} + \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \end{bmatrix} = \tau \quad (5.15)$$

Onde,

$$M_{11}(q) = m_2 \cdot l_{c1}^2 + m_2 \cdot [l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2)] + I_1 + I_2$$

$$M_{12}(q) = m_2 \cdot [l_{c2}^2 + l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2)] + I_2$$

$$M_{21}(q) = m_2 \cdot [l_{c2}^2 + l_1 \cdot l_{c2} \cdot \cos(q_2)] + I_2$$

$$M_{22}(q) = m_2 \cdot l_{c2}^2 + I_2$$

$$C_{11}(q, \dot{q}) = -m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \text{sen}(q_2) \cdot \dot{q}_2$$

$$C_{12}(q, \dot{q}) = -m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \text{sen}(q_2) \cdot [\dot{q}_1 + \dot{q}_2]$$

$$C_{21}(q, \dot{q}) = m_2 \cdot l_1 \cdot l_{c2} \cdot \text{sen}(q_2) \cdot \dot{q}_1$$

$$C_{22}(q, \dot{q}) = 0$$

$$g_1(q) = [m_1 \cdot l_{c1} + m_2 \cdot l_1] \cdot g \cdot \text{sen}(q_1) + m_2 \cdot l_{c2} \cdot g \cdot \text{sen}(q_1 + q_2)$$

$$g_2(q) = m_2 \cdot l_{c2} \cdot g \cdot \text{sen}(q_1 + q_2)$$

As variáveis de estado adequadas a descrever este problema são as posições angulares (q_1, q_2) e as velocidades angulares $(\dot{q}_1, \dot{q}_2)$. Usando as variáveis de estado, o modelo dinâmico do robô pode ser escrito por:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ M(q)^{-1} [\tau(t) - C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} - g(q)] \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Os dados utilizados na simulação são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do robô manipulador

Descrição	Notação	Valor	Unidade
Comprimento elo 1	l1	0,26	m
Comprimento elo 2	l2	0,26	m
Distancia centro de massa (elo 1)	lc1	0,0983	m
Distancia centro de massa (elo 2)	lc2	0,0229	m
Massa elo 1	m1	6,5225	kg
Massa elo 2	m2	2,0458	kg
Inércia rel. ao centro de massa (elo 1)	I1	0,1213	kg m ²
Inércia rel. ao centro de massa (elo 2)	I2	0,0116	kg m ²
Gravidade	g	9,81	m/s ²

6 PROJETO DO CONTROLADOR

6.1 Definição dos parâmetros do controlador

Para o projeto do controlador foram inicialmente definidos quais os parâmetros a serem utilizados como entrada do controlador. Numa primeira etapa o objetivo é conseguir obter o controle de posição do robô manipulador. Dada uma posição desejada o controle deve levar o robô a esta posição de forma rápida, com pequeno erro e sem que ocorram muitas oscilações em torno da posição desejada. Obtido um controlador que cumpra bem essa tarefa, este será ajustado para seguir uma trajetória desejada. A posição desejada será passada na forma do valor do ângulo dos elos.

Para realizar o projeto do controlador fuzzy é necessário eleger um conjunto de variáveis de entrada do controlador. As variáveis de entrada escolhidas para o controlador foram o erro entre a posição desejada e a posição atual do robô manipulador, e as velocidades angulares atuais de cada elo. Estas informações indicam qual a posição relativa dos elos e se o elo está se aproximando ou se afastando da posição desejada. Com essas informações o controlador deve ser capaz de levar o erro de posição a zero. Assim as entradas são:

$$\begin{aligned} e_1 &= q_{1d} - q_1 \\ e_2 &= q_{2d} - q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{aligned} \tag{6.1}$$

O universo de discurso dos ângulos de entrada do controlador foi definido como o intervalo $[-6,3 \ 6,3]$ radianos, o que corresponde a aproximadamente uma volta completa em torno do eixo de cada elo em qualquer sentido, a partir da origem do sistema de coordenadas.

Para a avaliação da ação de controle fuzzy a partir das variáveis de entradas é necessário realizar um mapeamento das variáveis de entrada em conjuntos fuzzy de

entrada, cuja função de pertinência é um valor real que varia entre 0,0 e 1,0. Este mapeamento é denominado transformação escalar-fuzzy. O mapeamento da variável erro de posição é mostrado na Fig. 12. O mesmo mapeamento foi utilizado para ambos os elos.

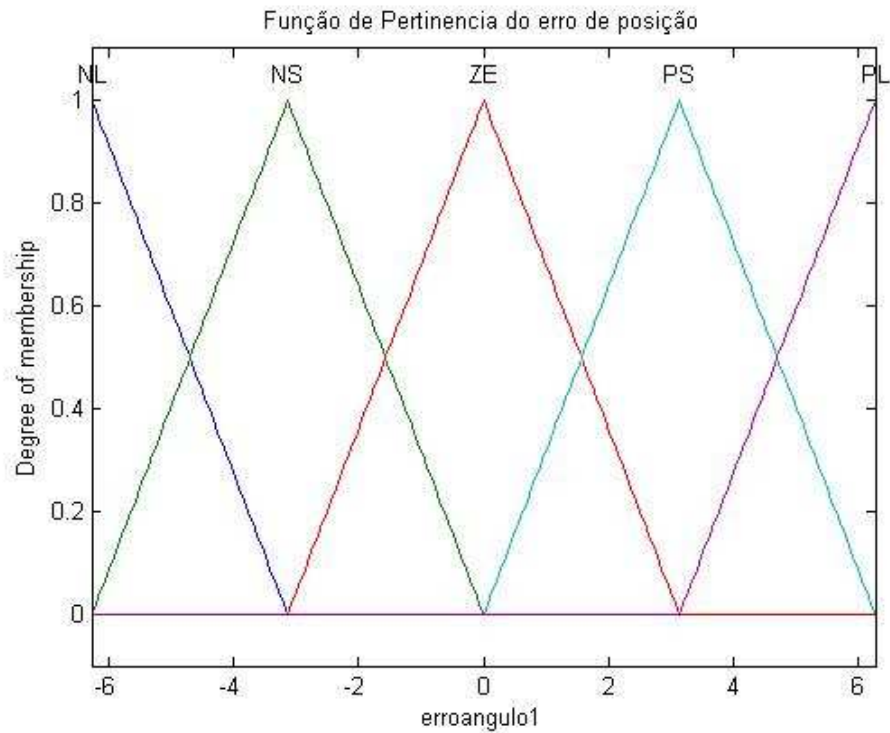


Fig. 12: Transformação escalar-fuzzy da variável erro de posição.

O variável real erro de posição é transformada pelo processo de transformação fuzzy-escalar em uma variável lingüística, que é formada pelos seguintes rótulos: NL (grande negativo), NS (pequeno negativo), ZE (zero), PS (pequeno positivo) e PL (grande positivo).

O mapeamento da variável velocidade angular é mostrado na Fig. 13. O mesmo mapeamento foi utilizado para ambos os elos. O universo de discurso das velocidades angulares de entrada do controlador foi definido como o intervalo $[-3,14 \ 3,14]$ rad/s. A variável real velocidade angular é transformada pelo processo de transformação fuzzy-escalar em uma variável lingüística, que é formada pelos seguintes rótulos: NL (grande negativo), NS (pequeno negativo), ZE (zero), PS (pequeno positivo) e PL (grande positivo).

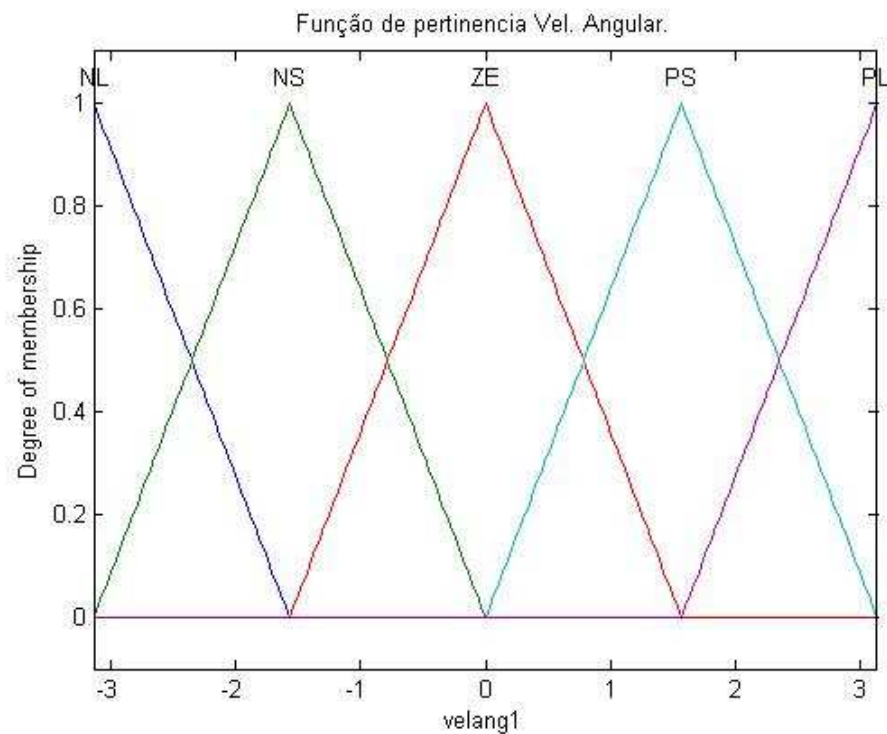


Fig. 13: Transformação escalar-fuzzy da variável velocidade angular.

Para realizar o projeto do controlador fuzzy é necessário eleger um conjunto de variáveis de saída do controlador. As saídas do controlador são as entradas de controle da planta, os torques τ_1 e τ_2 . O universo de discurso foi definido como o intervalo $[-1 \ 1]$. Assim para ajustes foi aplicado um ganho ao valor de saída do controlador fuzzy para ajuste.

Para a avaliação da ação de controle fuzzy a partir das variáveis de saída é necessário realizar um mapeamento dos conjuntos fuzzy de saída nas variáveis de saída. Este mapeamento é denominado transformação fuzzy-escalar. O mapeamento das variáveis de saída do controlador é mostrado na Fig. 14. O mesmo mapeamento foi utilizado para os torques dos atuadores de ambos os elos.

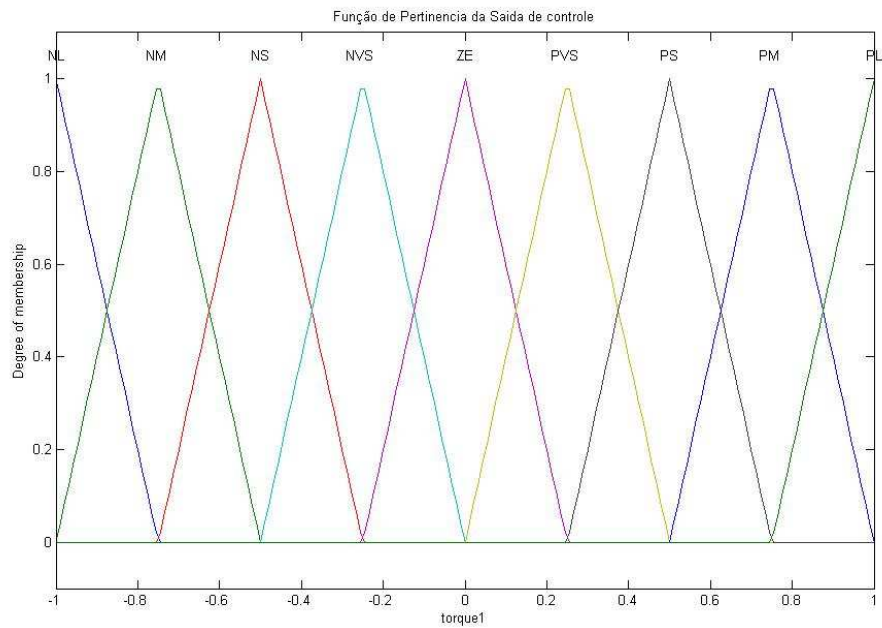


Fig. 14: Números fuzzy da saída do controlador.

A Tabela 3 mostra o conjunto de regras adotado como base de conhecimento do controlador. As entradas são o erro de posição e a velocidade angular de cada elo e a saída é o torque a ser aplicado no motor da junta de cada elo. Os valores foram associados com combinações das seguintes variáveis lingüísticas de origem inglesa:

N = Negative

P = Positive

Z = Zero

L = Large

S = Small

M = Médium

V = Very

Tabela 3: Conjunto de regras adotadas

Vel. Angular	Erro de Posição				
	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	NM	NVS	PS	PL	PL
NS	NL	NS	PVS	PL	PL
ZE	NL	NM	ZE	PM	PL
PS	NL	NL	NVS	PS	PL
PL	NL	NL	NS	PVS	PM

Para elaboração destas regras a linha de raciocínio principal era obter um sistema de controle rápido, levando o erro a próximo de zero rapidamente. O ajuste das regras, do universo de discurso, da largura da base e posições de centro das funções pertinência e dos ganhos foram obtidos a partir de simulações prévias e análises dos resultados obtidos.

A Fig. 15, feita utilizando o software Matlab®, mostra a superfície de controle obtida do conjunto de regras acima. Observando ficam claras as características não lineares deste controlador. A superfície de controle mostra a(s) saída(s) do controlador em função de duas das entradas em um gráfico de três eixos. Observando a figura fica mais claro o raciocínio utilizado na elaboração das regras. Para grandes erros, o torque aplicado pelo motor ao elo é sempre alto, com o objetivo de atingir posições próximas as desejadas rapidamente. Para evitar grandes “overshoots”, para pequenos erros de posição, com o elo se afastando da posição desejada são gerados grandes torques no sentido contrario ao movimento.

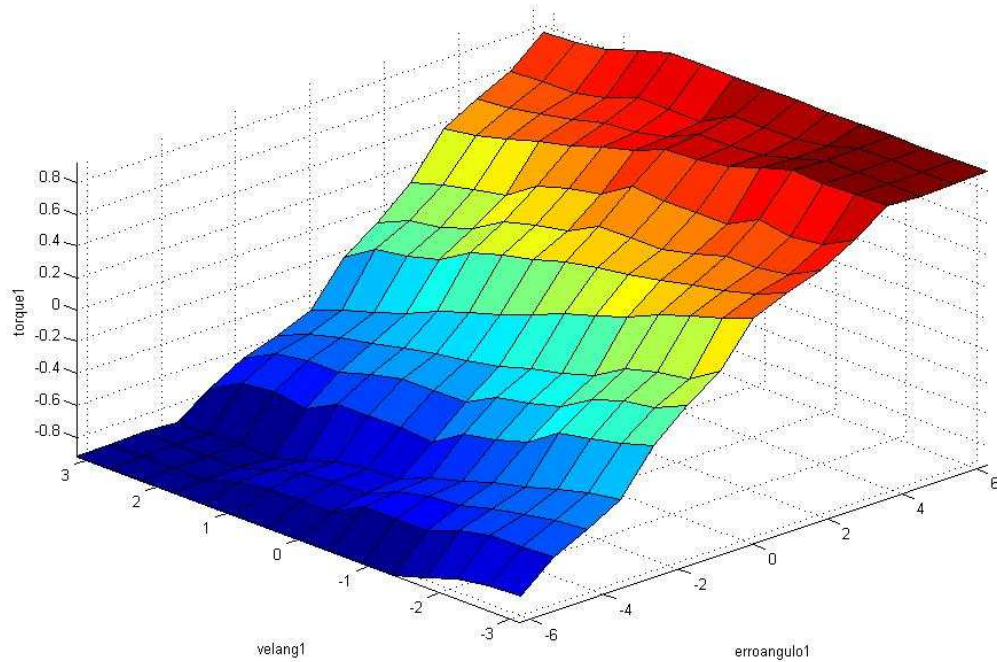


Fig. 15 : Superfície de Controle

6.2 Simulação do sistema e do controlador

Para a simulação do controlador projetado foi utilizado o *software* comercial Matlab®. Este *software* possui um *toolbox* para lógica fuzzy, no qual é possível montar os conjuntos fuzzy de entrada e saída, definir as regras de controle, escolher diferentes métodos para operações de conjunto e tipos de transformação fuzzy-escalar. Inserindo os parâmetros do controlador neste *toolbox* cria-se uma função que a partir das entradas do controlador avalia a saída de controle.

Utilizando as equações da dinâmica do sistema, (5.13) e (5.14), foram realizadas simulações do controlador com os parâmetros apresentados na Tabela 2. Para a integração destas equações foi utilizado o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Foi feita uma simplificação considerando que durante o passo de integração a variável de controle é constante. Utilizando um passo pequeno, a diferença no resultado entre o caso com e sem esta simplificação deve ser desprezível.

6.3 Resultados: Controle de Posição

Inicialmente procurou-se obter o controle de posição dos elos. Isso significa levar o sistema a uma posição determinada a partir de uma condição inicial diferente da desejada. A condição inicial adotada na simulação é:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Foi simulado um degrau simples em que as posições de referência para ambos os elos são:

$$\begin{aligned} q_{d1} &= 3rad \cong 172^\circ \\ q_{d2} &= 3rad \cong 172^\circ \end{aligned} \quad (6.3)$$

Os resultados da simulação para os elos 1 e 2 nessa condição são apresentados nos gráficos a seguir.



Fig. 16: Gráfico posição angular do elo 1.



Fig. 17: Gráfico posição angular do elo 2.

O controlador obtido tem um bom desempenho no controle de posição considerando que o degrau simulado é alto (172°). Nas figuras Fig. 16 e Fig. 17 é possível observar que o tempo de acomodação é aproximadamente de 2 segundos e o erro de posição em regime é da ordem de 0,002 radianos.

Para confirmar que o controlador tem desempenho satisfatório no controle de posição em condições diferentes da apresentada foram realizadas simulações em que a altura do degrau da condição de referência varia com o tempo, para ambos os elos. O resultado desta simulação é apresentado nos gráficos das Fig. 18 e Fig. 19. Os gráficos indicam que o controlador obteve bom desempenho, com tempo de acomodação adequado a altura do degrau e erro de posição pequeno na ordem de 0,002 radianos.

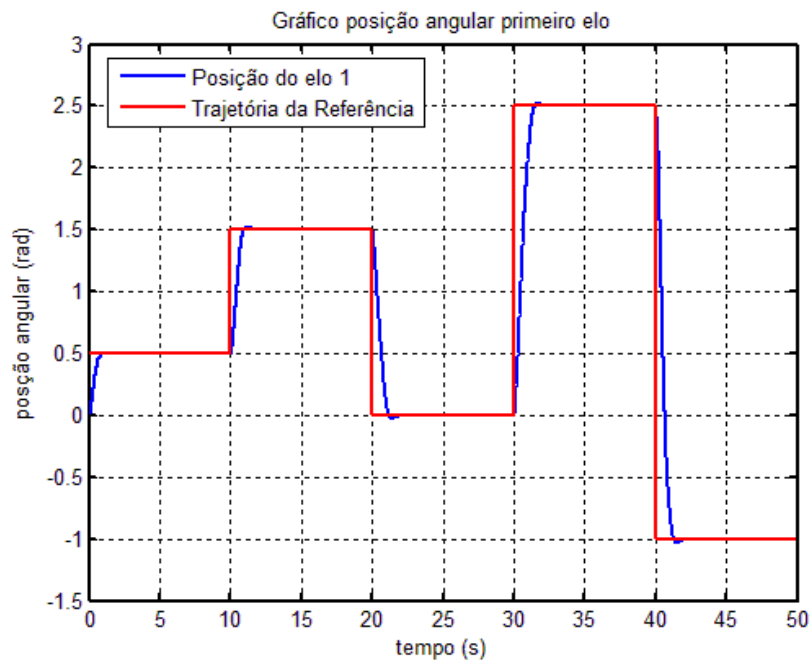


Fig. 18: Posição do Elo 1 com condição de referência degraus com altura variando com tempo.

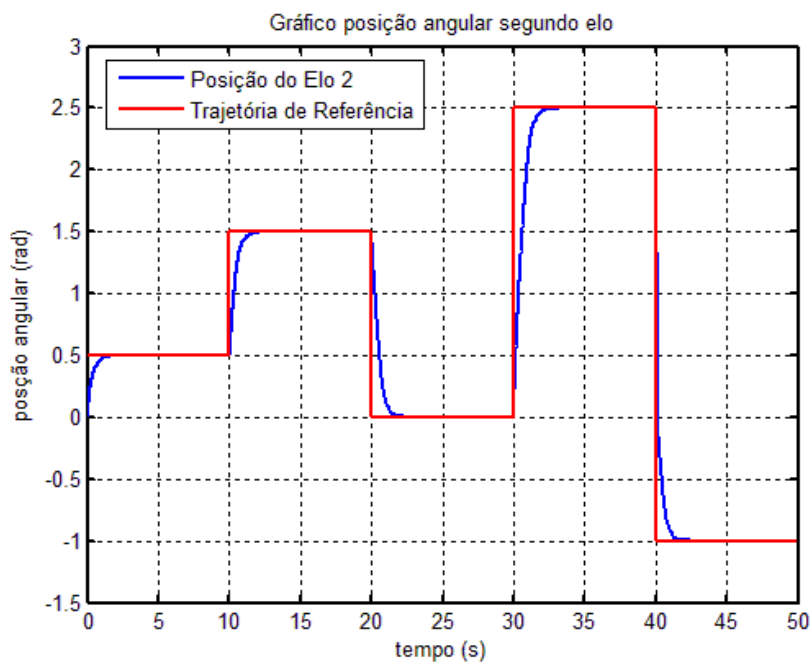


Fig. 19: Posição do Elo 2 com condição de referência degraus com altura variando com tempo.

6.4 Resultados: Controle Trajetória

Com o objetivo de avaliar o desempenho do controlador projetado, foram selecionadas as seguintes trajetórias dos elos:

$$q_{d1} = b_1 \cdot [1 - e^{-2,0t^3}] + c_1 \cdot [1 - e^{-2,0t^3}] \cdot \sin(w_1 \cdot t) \quad (6.4)$$

$$q_{d2} = b_2 \cdot [1 - e^{-2,0t^3}] + c_2 \cdot [1 - e^{-2,0t^3}] \cdot \sin(w_2 \cdot t) \quad (6.5)$$

As trajetórias escolhidas têm as seguintes características:

- As trajetórias têm um termo senoidal para avaliar o desempenho do controlador em movimentos periódicos rápidos. Este teste é importante, pois estes movimentos excitam não-linearidades no sistema.
- As trajetórias também têm um termo que cresce devagar no início para evitar levar os atuadores à saturação durante a partida.

O módulo e frequência do termo senoidal devem ser escolhidos de modo a evitar a saturação dos atuadores. Em outras palavras, a trajetória de referência deve ser tal que a dinâmica do robô percorrendo estas trajetórias tenha torque e velocidade admissíveis para o atuador. Assim pode ser garantido que a trajetória é fisicamente possível para o robô simulado.

Das simulações realizadas e da bibliografia sobre manipuladores de dois graus de liberdade obtiveram-se os seguintes limites para o robô analisado:

$$\|q_d\|_{Máx} \leq 1,92[rad] \quad (6.6)$$

$$\|\dot{q}_d\|_{Máx} \leq 2,33[\frac{rad}{s}] \quad (6.7)$$

$$\|\ddot{q}_d\|_{Máx} \leq 9,52[\frac{rad}{s^2}] \quad (6.8)$$

As equações da primeira e segunda derivadas das posições desejadas são apresentadas a seguir:

$$\dot{q}_{d1} = 6 \cdot b_1 \cdot t^2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} + 6 \cdot c_1 \cdot t^2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \sin(w_1 \cdot t) + [c_1 - c_1 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3}] \cdot \cos(w_1 \cdot t) \cdot w_1 \quad (6.9)$$

$$\dot{q}_{d2} = 6 \cdot b_2 \cdot t^2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} + 6 \cdot c_2 \cdot t^2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \sin(w_2 \cdot t) + [c_2 - c_2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3}] \cdot \cos(w_2 \cdot t) \cdot w_2 \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{d1} = & 12 \cdot b_1 \cdot t \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} - 36 \cdot b_1 \cdot t^4 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} + 12 \cdot c_1 \cdot t \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \sin(w_1 \cdot t) + \\ & - 36 \cdot c_1 \cdot t^4 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \sin(w_1 \cdot t) + 12 \cdot c_1 \cdot t^2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \cos(w_1 \cdot t) \cdot w_1 + \\ & - [c_1 - c_1 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3}] \cdot \sin(w_1 \cdot t) \cdot w_1^2 \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{d2} = & 12 \cdot b_2 \cdot t \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} - 36 \cdot b_2 \cdot t^4 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} + 12 \cdot c_2 \cdot t \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \sin(w_2 \cdot t) + \\ & - 36 \cdot c_2 \cdot t^4 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \sin(w_2 \cdot t) + 12 \cdot c_2 \cdot t^2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3} \cdot \cos(w_2 \cdot t) \cdot w_2 + \\ & - [c_2 - c_2 \cdot e^{-2,0 \cdot t^3}] \cdot \sin(w_2 \cdot t) \cdot w_2^2 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Para uma primeira análise, foram realizadas simulações do sistema numa trajetória em que os atuadores trabalham numa condição muito abaixo da saturação. Os parâmetros utilizados nas equações (6.4) e (6.5) são:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\pi}{4} & b_2 &= \frac{\pi}{3} \\ c_1 &= \frac{\pi}{9} & c_2 &= \frac{\pi}{6} \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\varpi_1 = 0,5 \text{ rad/s} \quad \varpi_2 = 0,5 \text{ rad/s}$$

Para estas trajetórias tem-se que:

$$\|q_d\|_{Máx} = \|q_{2d}\|_{Máx} = 1,57 \leq 1,92 \quad (6.14)$$

$$\|\dot{q}_d\|_{Máx} = \|\dot{q}_{2d}\|_{Máx} = 1,94 \leq 2,33 \quad (6.15)$$

$$\|\ddot{q}_d\|_{Máx} = \|\ddot{q}_{2d}\|_{Máx} = 4,37 \leq 9,52 \quad (6.16)$$

Assim esta trajetória é fisicamente possível para o robô em análise. Os resultados da simulação considerando a condição inicial (6.2) são mostrados nos gráficos das Fig. 20 e Fig. 21.

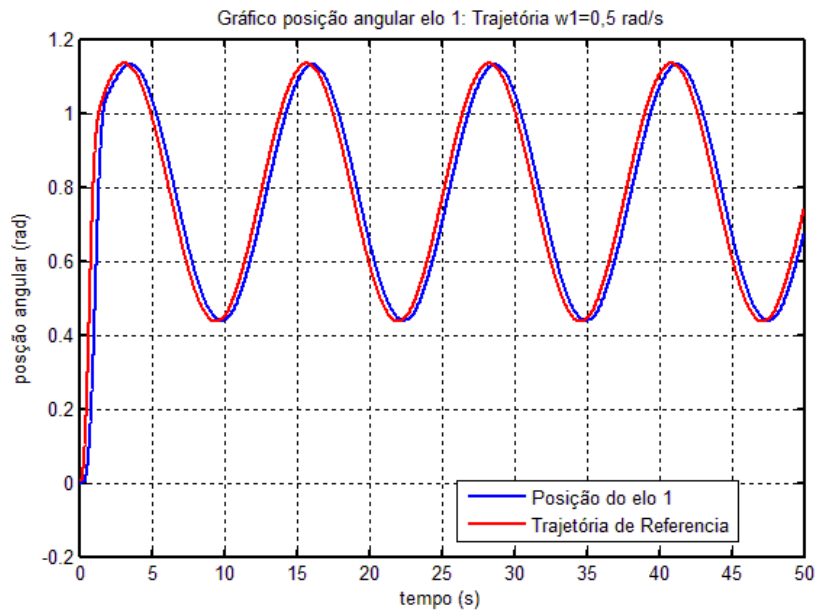


Fig. 20: Posição do elo 1.

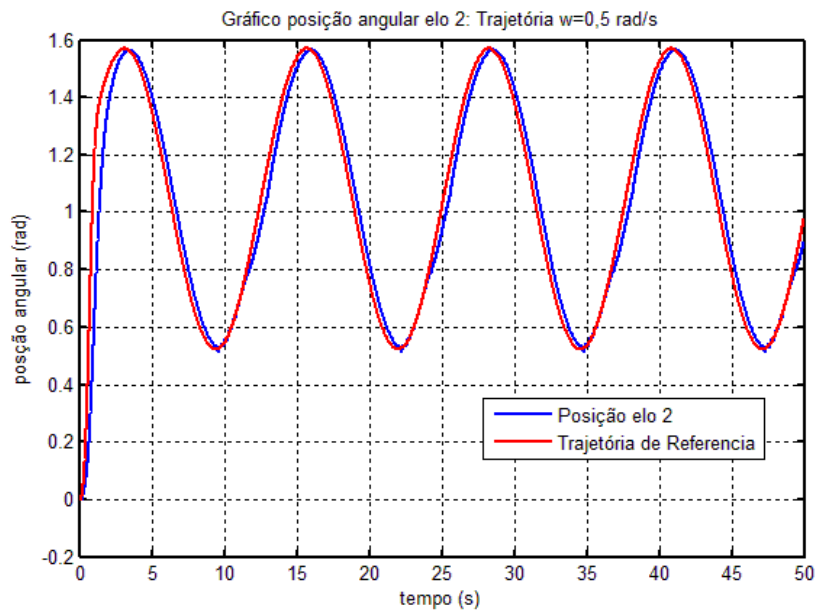


Fig. 21: Posição do elo 2.

Observando os gráficos conclui-se que o desempenho do controlador em uma trajetória com frequência angular baixa e com o sistema trabalhando longe da

saturação é bom. O robô consegue passar exatamente pelos pontos da trajetória de referência com um atraso pequeno, inferior a 0,5 segundo, sendo que em um dado instante o erro de posição é da ordem de 0,02 rad.

Para análise do desempenho do controlador numa trajetória em que os atuadores operam próximo a saturação foram escolhidos os seguintes parâmetros para as eq. (6.4) e (6.5):

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\pi}{3} & b_2 &= \frac{\pi}{3} \\ c_1 &= \frac{\pi}{6} & c_2 &= \frac{\pi}{6} \\ \varpi_1 &= 1,0 \text{ rad/s} & \varpi_2 &= 1,0 \text{ rad/s} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Para estas trajetórias tem-se que:

$$\|q_d\|_{Máx} = \|q_{1d}\|_{Máx} = \|q_{2d}\|_{Máx} = 1,57 \leq 1,92 \quad (6.18)$$

$$\|\dot{q}_d\|_{Máx} = \|\dot{q}_{1d}\|_{Máx} = \|\dot{q}_{2d}\|_{Máx} = 2,26 \leq 2,33 \quad (6.19)$$

$$\|\ddot{q}_d\|_{Máx} = \|\ddot{q}_{1d}\|_{Máx} = \|\ddot{q}_{2d}\|_{Máx} = 5,11 \leq 9,52 \quad (6.20)$$

Assim esta trajetória é fisicamente possível para o robô em análise, mas quando comparado a trajetória anterior, leva o sistema a trabalhar mais próximo ao seu limite. Os resultados da simulação considerando a condição inicial (6.2) são mostrados nos gráficos das Fig. 22 e Fig 23.

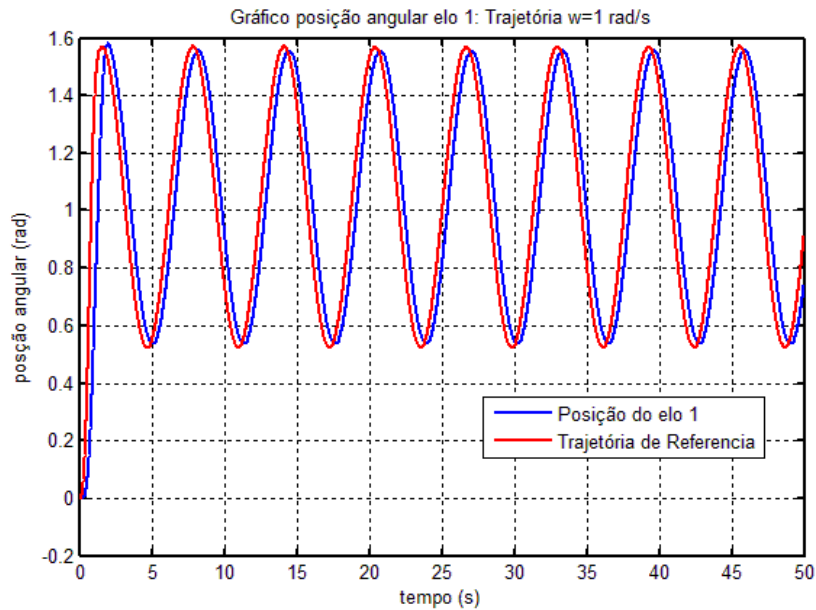


Fig. 22: Posição do elo 1.

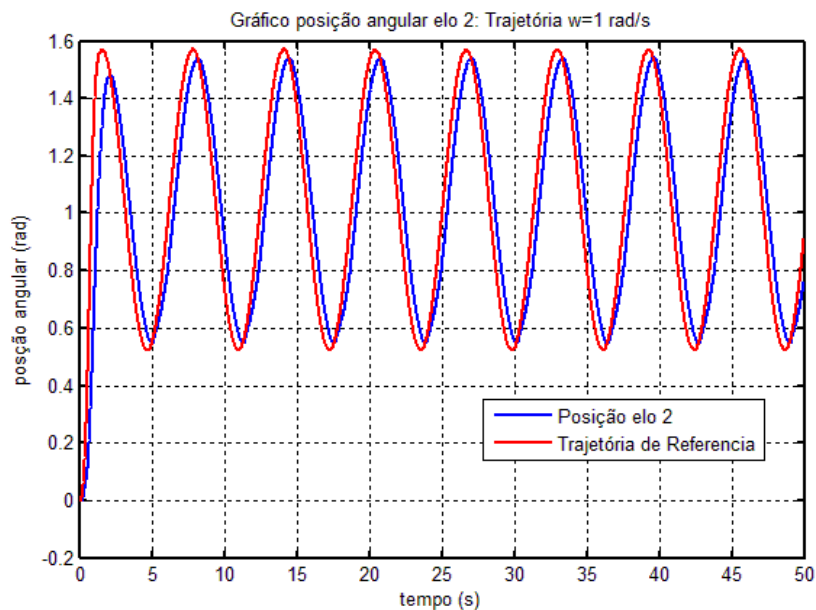


Fig 23: Posição do elo 2.

Observando os gráficos conclui-se que o desempenho do controlador em uma trajetória com o sistema trabalhando próximo a saturação é satisfatório. O robô já não consegue passar exatamente por todos os pontos da trajetória de referência, principalmente nos picos da senoide. O atraso é pouco maior que 0,5 segundo e em um dado instante o erro de posição chega a ser da ordem de 0,1 rad. Apesar da limitação do sistema nesta condição de operação, o controlador pode ser utilizado a

partir de ajustes entre a tarefa a ser realizada e a trajetória de referência do controlador.

Foi realizada uma simulação com sistema operando em uma condição em que os atuadores estão saturados. Os parâmetros destas trajetórias para as eq.(6.4) e (6.5) são:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\pi}{3} & b_2 &= \frac{\pi}{3} \\
 c_1 &= \frac{\pi}{6} & c_2 &= \frac{\pi}{6} \\
 \varpi_1 &= 3,0 \text{ rad/s} & \varpi_2 &= 3,0 \text{ rad/s}
 \end{aligned} \tag{6.21}$$

Para estas trajetórias tem-se que:

$$\|q_d\|_{Máx} = \|q_{1d}\|_{Máx} = \|q_{2d}\|_{Máx} = 2,09 \geq 1,92 \tag{6.22}$$

$$\|\dot{q}_d\|_{Máx} = \|\dot{q}_{1d}\|_{Máx} = \|\dot{q}_{2d}\|_{Máx} = 3,14 \geq 2,33 \tag{6.23}$$

$$\|\ddot{q}_d\|_{Máx} = \|\ddot{q}_{1d}\|_{Máx} = \|\ddot{q}_{2d}\|_{Máx} = 14,4 \geq 9,52 \tag{6.24}$$

Assim esta trajetória é fisicamente impossível para o robô em análise. Os resultados da simulação considerando a condição inicial (6.2) são mostrados nos gráficos das Fig. 24 e Fig. 25. Conforme esperado o sistema não é capaz de seguir esta trajetória de referência.

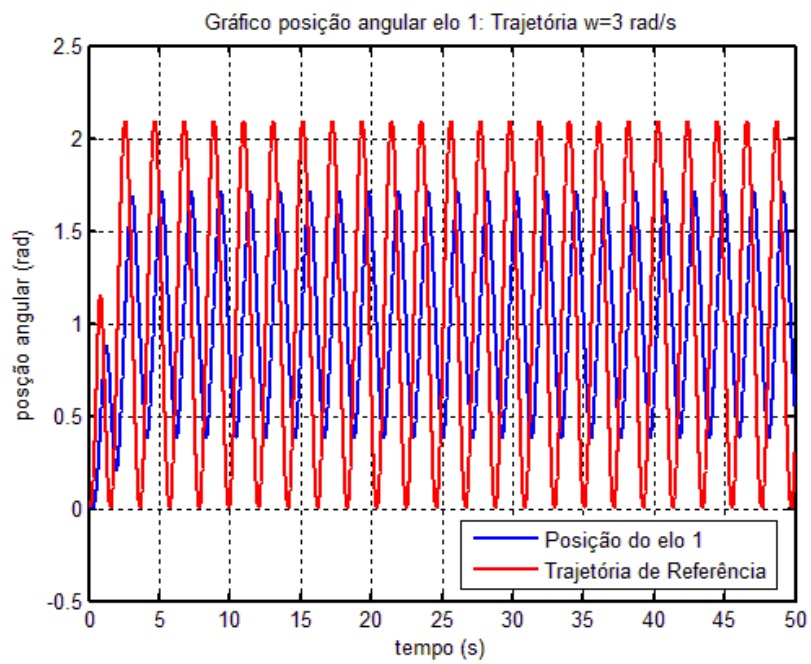


Fig. 24: Posição do elo 1 com atuadores operando em condição de saturação.

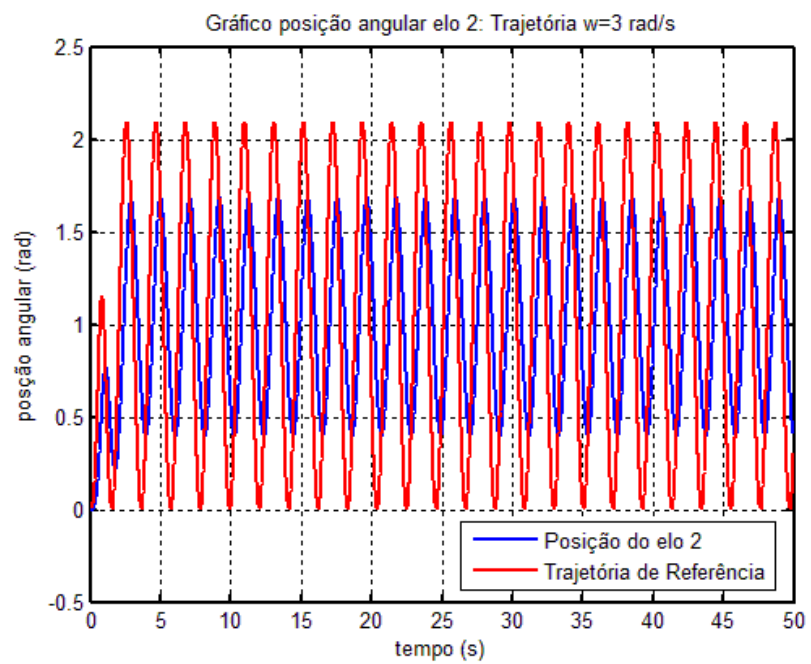


Fig. 25: Posição do elo 2 com atuadores operando em condição de saturação.

7 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O controlador fuzzy para o controle de um manipulador robótico foi desenvolvido utilizando algoritmos de controle, baseados em lógica fuzzy e expressos em forma lingüística. Este tipo de controle mostrou ser muito eficiente para controlar sistemas complexos, não-lineares ou difíceis de serem modelados na forma de equações diferenciais. Um sistema difícil de controlar com técnicas tradicionais de controle, como um robô manipulador, é controlado de maneira relativamente fácil utilizando um controlador fuzzy.

O programa desenvolvido para simular o sistema e o controlador foi relativamente simples de ser desenvolvido. Uma dificuldade encontrada no projeto do controlador foi a falta conhecimento do sistema a ser controlado, dificultando a elaboração das regras de controle. Esta dificuldade foi superada a partir do estudo da bibliografia disponível sobre o assunto e das simulações do modelo obtido.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o desempenho do controlador, de forma geral, foi satisfatório para as tarefas propostas. No controle de posição obteve-se erro em regime da ordem de 0,002 radianos (0,1°). Considerando que os elos do robô simulado são curtos (0,26 m), o erro da posição final da ponta do elo 2 será muito pequeno. Assim este controlador poderia ser utilizado para controle de posição.

No controle de trajetória o controlador projetado teve um bom desempenho em frequências angulares mais baixas, piorando à medida que se aproximava da saturação dos atuadores. Considerando que não sejam feitas modificações no controlador, no caso de uma aplicação onde os atuadores tiverem que trabalhar próximos a saturação, teriam que ser feitas correções entre a trajetória de referência passada ao controlador e a trajetória real que se deseja que o robô percorra.

O conjunto de resultados foi obtido por um mesmo conjunto de regras, independente da tarefa a ser realizada. Observou-se que devido a sua sensibilidade, o controlador pode ser otimizado para situações específicas, se forem adicionadas informações que possam enriquecer o conjunto de regras. Uma sugestão para trabalhos futuros

seria o de complementar o conjunto de regras de forma que o robô seja capaz de realizar tarefas mais complexas.

Bibliografia

ASADA, H.; SLOTINE, J. **Robot analysis and control**. 1.ed. John Wiley & Sons, 1986.

CRAIG, J. **Introduction to robotics: Mechanics and Control**. 3.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005.

ISHIBUCHI, H.; YOZAKI, k.; TANAKA, H. **Distributed representation of fuzzy rules and its application to pattern classification**. *Fuzzy Sets and Systems*, N° 52, p. 21-32, 1992.

JAGER, R. **Fuzzy Logic Control**. Delft, Tese (Doutorado), Delft University, 1995.

JANTZEN, J. **A Robustness Study of Fuzzy Control Rules**. Technical University of Denmark, 1998.

JOHNSON, J.; PICTON, P. **Designing intelligent machines, concepts in artificial intelligence (vol. 2)**. 1.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

KELLY, R.; SANTIBÁÑEZ, V.; LORÍA, A. **Control of robot manipulators in joint space**. 1.ed. London: Springer, 2005.

KICKERT, W. J.; LEMKE, H. **Application of fuzzy controller in a warm water plant**. *Automatica*, N° 12, p 301-308, 1976.

LARKIN, L, I. **A fuzzy logic controller for aircraft flight control**. First International Conference on Fuzzy Information Processing, Hawaii, 1984.

LESMO, L. et al. **Learning of fuzzy production rules for medical diagnosis**. *Approximate Reasoning in Decision Analysis*. North-Holland, p.249-260, 1982.

MARUYAMA, N. **Projeto e Análise de Controladores Fuzzy**. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

MANDANI, E, H. **Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant**. *Proceeding of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 121, N° 12, December, 1974.

NAKAMURA, K.; IWAI, S. **Topological fuzzy sets as a quantitative description of a analogical inference and its application to question – answering systems for information retrieval**. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, p. 193-204, 1982.

NGUYEN, H.; PRASAD, N.; WALKER, C.; WALKER, E. **A first course in fuzzy and neural control**. 1.ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003.

OSTERGAARD, J. J. **Fuzzy logic control of a heat exchanger process**. *Fuzzy Automata and Decision Process*, NORTH-Holland, 1977.

PAPPIS, C. P.; MANDANI, E. H. **A fuzzy logic controller for a traffic junction.** *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, SMC-7(10), p. 707-717, 1977.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. **Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control.** *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, SMC-15(1), p. 116-132, 1985.

TANSCHKEIT, RICARDO. **Controle Nebuloso: Princípios e Aplicações Atuais. Workshop internacional em controle inteligente.** Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 1991.

TERAMOTO, A.; ISHIDO, K. **Projeto de controlador fuzzy para suspensão ativa de automóvel.** Trabalho de Formatura, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

TERANO, T.; ASAI, K.; SUGENO, M. **Fuzzy systems theory and its applications.** 1. ed. London: Academic Press, 1992;

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modeling and control of robot manipulator.** McGraw-Hill, 1996.

SHAW, I.; SIMÕES, M. **Controle e modelagem fuzzy.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

SUGENO, M.; MURAKAMI, K. **Fuzzy parking control car.** *Fuzzy Sets and Systems*, N° 16, p. 103-116, 1985.

URUGAMI, M. et al. **Fuzzy robot control.** *J. Cybernetic*, N° 6 (1-2), p.39-64, 1976.

YAGISHITA, O. et al. **Application of fuzzy reasoning to the water purification process.** *Industrial Application of Fuzzy Control*, North-Holland, 1985.

ZADEH, L. **Fuzzy sets.** *Information and control*. New York, v.8, n.3, p.338-353, 1965.