

CONTROLADOR NEBULOSO APLICADO A UM SISTEMA POSICIONADOR ACIONADO POR MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

José BEZERRA DE MENEZES FILHO (1); Simplício ARNAUD DA SILVA (2); Antonio FELICIANO XAVIER FILHO (3); élide FERNANDA XAVIER JÚLIO (4)

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, João Pessoa, PB, BR, CEP 5800000, telefone, 3208 3000, e-mail: jmenf@yahoo.com.br

(2) Universidade Federal da Paraíba, e-mail: sarnaud@ct.ufpb.br

(3) Universidade Federal da Paraíba, e-mail: antonio.feliciano@cefetpb.edu.br

(4) Universidade Federal da Paraíba, e-mail: elida_xnet@yahoo.com.br

RESUMO

O presente trabalho trata do projeto de um controlador fuzzy para o posicionamento de uma mesa de coordenadas, em um dos eixos. A mesa, que é acionada por um motor de corrente contínua, se desloca em um plano horizontal, cuja posição é medida com um sensor acoplado ao eixo do motor. O controlador fuzzy, foi implementado em duas etapas. Na primeira etapa, efetivou-se o controlador em modo de simulação, em que foi realizado o ajuste das funções de pertinência, utilizando-se a função de transferência obtida em um processo de identificação previamente realizado com o auxílio do algoritmo de identificação dos mínimos quadrados (MQR). Na segunda etapa, o controlador foi acionado em tempo real, onde utilizou-se excitações do tipo degrau de amplitude variável e do tipo senoidal. São apresentados resultados simulados e experimentais obtidos com o controlador.

Palavras-chave: Controle de posição; controle fuzzy; robótica.

1. INTRODUÇÃO

Devido a sua versatilidade, a mesa de coordenadas X-Y é utilizada em muitas aplicações nas áreas industrial, comercial e de serviços. A grande variedade de mesas X-Y existentes no mercado usam basicamente dois tipos de acionamento: o acionamento por motor de passo, que trabalha em uma estrutura de malha aberta e o acionamento por servomecanismo, que utiliza motores de corrente contínua ou de indução em malha fechada. Neste caso, há a necessidade de sensores de posição (Encoders) que servem para fornecer a posição angular e a rotação do eixo do motor.

Para o controle de servomecanismo existem várias técnicas de controle implantadas em indústrias, tais como a de Ziegler-Nichols (Ziegler, 1942) que é utilizada em casos onde a função de transferência do sistema não é conhecida e as técnicas de avanço e atraso de fase e de controle moderno (Phillips, 1997; Ogata, 2003; Shahian, 1993 ; Dorf, 2001).

Com a predominância de controle por computador, encontram-se na literatura várias técnicas de projeto e implementação de controladores discretos, (Hemerly, 1996; Astrom & Wittenmark, 1995).

Como alternativa ao controle convencional, tem-se o controle inteligente, consistindo basicamente de três abordagens, de acordo com Paraskevopoulos (1996): sistemas especialistas baseados em conhecimento, controle por lógica fuzzy e controle por redes neurais.

O controle por lógica fuzzy incorpora a maneira de pensar do homem em um sistema de controle (Simões, 2001).

Um exemplo de implantação de um controle por lógica, Fuzzy em um sistema multivariável, é dado por Coelho et al (2000), onde as principais características do sistema controlado são investigadas.

Segundo Campos & Saito (2004), pode-se afirmar que em se tratando de um sistema de controle, a lógica fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar. Por meio da lógica fuzzy pode-se capturar o conhecimento humano, especialmente de operadores de plantas e processos industriais, com fortes características de não linearidades, às vezes com comportamento dinâmico pouco conhecido e implementar um controlador computacional com desempenho idêntico, ou melhor do que o do operador humano.

Atualmente uma das áreas de maior utilização da lógica fuzzy é a de controle e automação de processos. Um controlador fuzzy é um sistema baseado em regras que interagem para produzirem o comportamento desejado para o sistema. As regras são avaliadas simultaneamente, ou em paralelo e a saída do controlador é obtida interpolando-se as ações recomendadas por cada regra. A utilização da lógica fuzzy em controle e automação de processos teve início com Mamdani (1975), na Inglaterra, onde o mesmo desenvolveu uma aplicação para um gerador de vapor experimental, mas o grande impulso foi mesmo no Japão nos anos 80. Essa tecnologia se mostrou poderosa no tratamento de informações e está sendo utilizada em inúmeras aplicações industriais e científicas como por exemplo: Controle de processos petroquímicos; Funcionamento automático de trens; Controle de centrais nucleares; Sistemas de controle na indústria aeroespacial; Sistemas inteligentes para eletrodomésticos (filmadoras, máquinas de lavar roupas e louças, fornos microondas, etc).

O controle fuzzy tem a capacidade de considerar vários critérios de desempenho simultaneamente, tanto na forma matemática como na forma lingüística. Segundo Campos & Saito (2004), os objetivos a serem alcançados por um controlador fuzzy são os seguintes: controlar e operar automaticamente processos complexos, não-lineares e multivariáveis, com desempenho pelo menos igual ao dos operadores; respeitar as especificações e restrições operacionais; ser simples, robusto e operar em tempo real.

Ainda segundo Campos & Saito (2004), uma das grandes vantagens do controle fuzzy é que ele pode reduzir consideravelmente o tempo de desenvolvimento de um controlador não-linear para um sistema complexo, além das vantagens decorrentes do fato de ser uma tecnologia fácil de ser implementada em tempo real, de ser comprovadamente robusta em aplicações práticas e de ser capaz de controlar processos complexos.

O controle Fuzzy também oferece a vantagem de se adaptar à novas situações de controle com a mudança de apenas uma regra ou de várias. Com relação ao controlador neural, várias estruturas estão presentes na literatura. Krishnapura & Jutan (2000) realizaram um controlador neural baseado em uma concepção de um controlador do tipo PID. Martins & Alencar (2002) usaram uma rede reural com funções de base radial para implementar um controlador em uma estrutura de Controlador do tipo PD. A função de base radial também foi utilizada por Coelho & Moedinger (2002) para identificação de um manipulador de 2 Graus de Liberdade.

Este trabalho apresenta um sistema automático de posição de um eixo de uma mesa de Coordenadas X-Y que utiliza um controlador do tipo fuzzy. A equação discreta que representa a dinâmica da mesa é usada para simulação do controlador fuzzy em um programa de simulação. Esta equação foi obtida usando o algoritmo de identificação dos mínimos quadrados recursivo. Após o processo de simulação o controlador fuzzy foi implementado em tempo real. O trabalho é validado com a apresentação dos resultados experimentais obtidos.

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Utilizou-se nesta pesquisa uma mesa de coordenadas X-Y com mecanismo de transmissão do tipo parafuso sem fim.

Para o controle de posição do eixo da mesa foi utilizado um motor de corrente contínua em malha fechada acionados por controlador do tipo fuzzy. O controlador foi implementado no ambiente LabVIEW residente em um microcomputador Pentium 1,4 GHZ, equipado com uma placa de aquisição de dados tipo NI-DAQ. Para adequar os níveis de corrente para utilização no motor de corrente contínua, foi utilizado um amplificador de potência especialmente projetado para esse fim em laboratório.

Para computar a posição do eixo do motor foi projetado um circuito detector de posição que fornece pulsos que foram utilizados como sinal de realimentação para o controlador fuzzy.

A foto da mesa de coordenadas X-Y utilizada nesta pesquisa é mostrada na Figura 1.

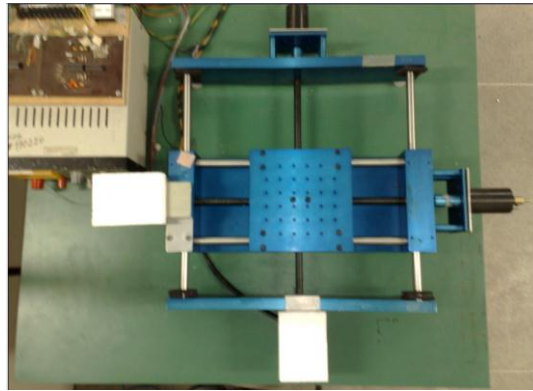


Figura 1. Vista da mesa de coordenadas X-Y

O motor de corrente contínua é de 12V, 1,0A e foi acoplado ao fuso de passo 3mm/volta. O sistema de medição (acoplador óptico), gera 8 pulsos por volta e possui uma resolução de 125 μm .

O diagrama de blocos do sistema de controle da mesa X-Y completo é mostrado na Figura 2.

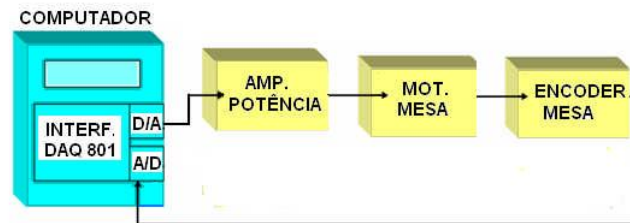


Figura 2. Diagrama de blocos do Sistema de Controle

2.1. MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

Na modelagem do sistema de controle foi utilizado o Método Mamdani disponível na Fuzzy Logic Toolbox do LabView®. Neste método, o Sistema de Inferência fuzzy é construído utilizando-se o conhecimento prévio do que se deseja do sistema a ser projetado e as regras de inferência fuzzy, que são estritamente lingüísticas. Foram utilizadas duas entradas que se constituíram em duas variáveis lingüísticas: o erro entre o sinal de referência de posição (E) e o sinal de posição atualizado e a derivada deste erro (dE).

Os universos de discurso das variáveis de entrada se situaram entre os valores de -1 a 1. Para isso, os valores destas variáveis de entrada são submetidos previamente a uma normalização tendo como base o valor de referência de posição.

As variáveis de entrada “E” e “dE” foram associadas à nove funções de pertinência: NB (Negativo grande), NM (Negativo médio), NS (Negativo pequeno), QZ (Quase Zero), PS (Positivo pequeno), PM (Positivo médio), PS (Positivo pequeno), PM (Positivo médio), PB (Positivo grande).

No processo de defuzzificação, é utilizado o método da média dos máximos, fornecendo um valor compreendido entre -1 a 1, que é então multiplicado pelo valor de base utilizado na normalização das entradas para acionamento do motor solidário ao eixo da mesa.

Foram estabelecidas quarenta e nove regras de inferência relacionando as sete funções de pertinência erro “E” com as sete da derivada do erro “dE”. A seguir são apresentadas na Tabela 1 as 49 regras do sistema de inferência fuzzy para o sistema de controle:

Tabela 1 - Tabela de regras fuzzy

ERRO \ DERR0	NB	NM	NS	QZ	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NM	NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS
NS	NB	NM	NS	NS	QZ	QZ	PS
QZ	NB	NM	NS	QZ	PS	PM	PB
PS	NS	QZ	QZ	PS	PS	PM	PB
PM	PS	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

As funções matemáticas utilizadas foram funções trapezoidais e triangulares, sempre iniciando no valor mínimo em cada intervalo do universo de discurso e terminando no valor máximo.

Na Figura 3 são apresentadas as funções de pertinência da variável lingüística erro.

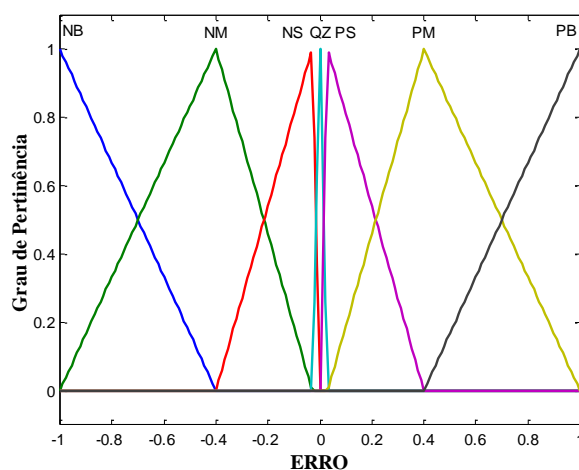


Figura 3- Curvas de inferência da variável lingüística erro

Na Figura 4 são apresentadas as funções de pertinência da variável lingüística derivada do erro.

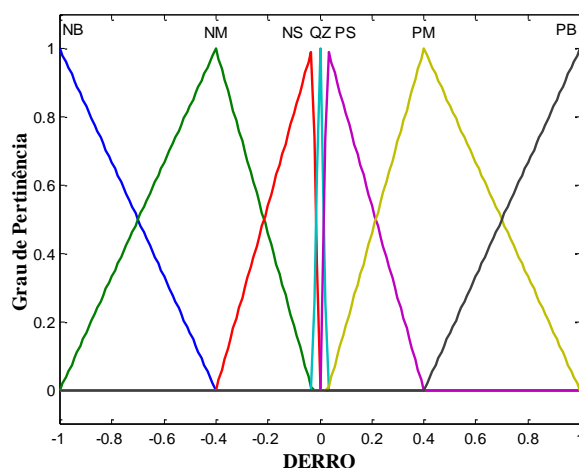


Figura 4. Curvas de inferência da variável lingüística derivada do erro

Na Figura 5 são apresentadas as funções de pertinência da variável lingüística saída

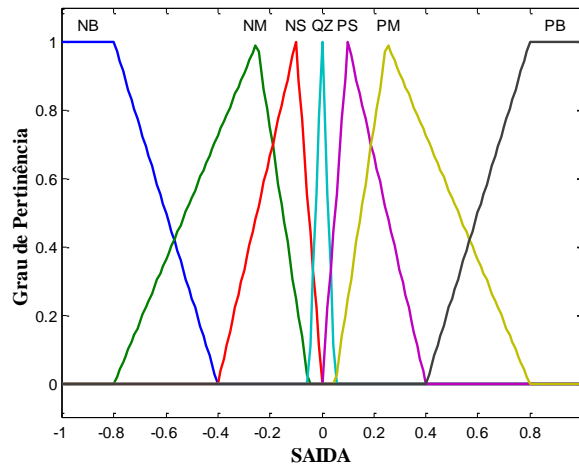


Figura 5 - Curvas de inferência da variável lingüística saída

3. MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE POSIÇÃO COM MOTOR DE CC

Para um motor de corrente contínua de ímã permanente considerando-se o atrito e a constante de inércia de uma carga acoplada, a relação entre a posição angular do eixo e a tensão aplicada na armadura é dada pela Equação 1:

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s^3(JL_a) + (R_a.J + L_a.F)s^2 + (R_a.F + K_v.K_m)s} \quad (1)$$

onde:

s: variável de Laplace

U(s): tensão de armadura [V]

K_v: constante de velocidade [V/rpm]

K_m: constante de torque da carga e do motor refletida no eixo do motor [Nm/A]

R_a: resistência de armadura do motor de CC [Ohms]

L_a: indutância de armadura [H]

Y(s): posição angular do eixo do motor [rpm]

J: Momento de inércia do motor e carga refletida ao eixo do motor [Kg.m²]

F: coeficiente de atrito viscoso do motor e carga refletida ao eixo do motor [Nm.s]

Reescrevendo a função de transferência dada pela Equação 2, tem-se:

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{S(S + P_1)(S + P_2)} \quad (2)$$

Onde K é o ganho do sistema e P₁ e P₂ são pólos em malha aberta.

A Equação 3 apresenta a função de transferência dada pela Equação 2 na forma discretizada.

$$\frac{\Omega(z)}{U(z)} = \frac{\Theta_4 z^2 + \Theta_5 z + \Theta_6}{z^3 + \Theta_1 z^2 + \Theta_2 z + \Theta_3} \quad (3)$$

Onde $[\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6]$ é o vetor de parâmetros da função de transferência discreta.

4. IDENTIFICAÇÃO DA MESA

Utilizou-se neste trabalho o método do Mínimo Quadrado Recursivo (MQR), para obtenção dos parâmetros constantes na Equação 2. O algoritmo de identificação pelo método dos Mínimo Quadrado Recursivo encontra-se descrito em Ljung (1987). Para aquisição dos dados de saída foi utilizado um sinal de onda quadrada como excitação para o motor da mesa. Os sinais de entrada e de saída correspondentes foram então utilizadas no algoritmo MQR, para o cálculo destes parâmetros. As Figuras 6 e 7 mostram os sinais de excitação e saída do sistema no processo de identificação.

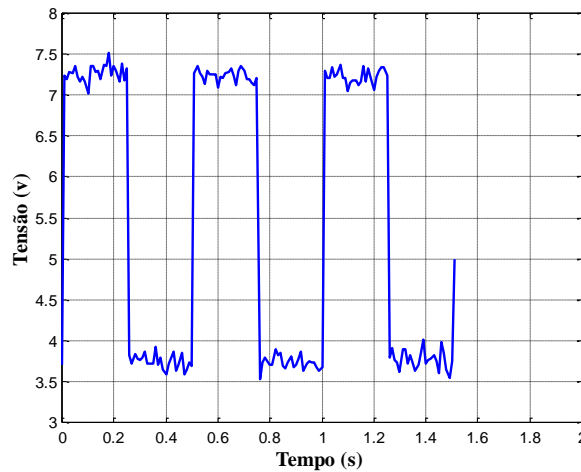


Figura 6 - Sinal de excitação utilizado no processo de identificação

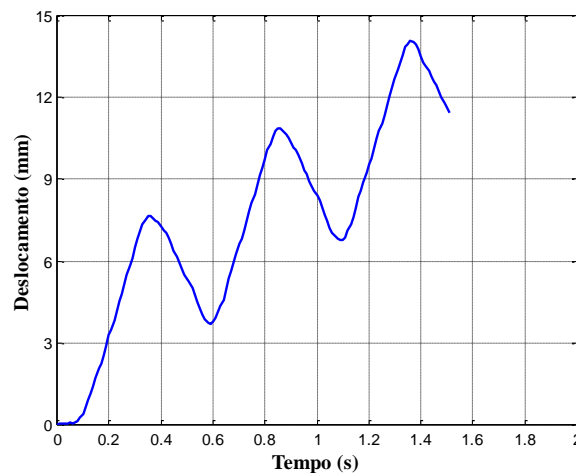


Figura 7 - Sinal de saída obtido no processo de identificação

A função de transferência do eixo da mesa, obtida do processo de identificação, é mostrada na Equação 4:

$$\frac{\Omega(z)}{U(z)} = \frac{0,0012749z^2 - 0,0021349z + 0,000864}{z^3 - 2,966576z^2 + 2,936758z - 0,970118} \quad (4)$$

Os pólos de malha aberta da função de transferência são:

$$[P1, P2, P3] = [1; 0,9247 + 0,3236i; 0,9247 - 0,3236i]$$

Observa-se, de acordo com a Equação 4 que o sistema é de ordem 1, possuindo, portanto, um integrador natural, mantendo coerência com a Equação 1, que é a função de transferência na forma contínua.

5. SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY

Para ajuste do controlador fuzzy, o sistema foi inicialmente submetido a uma simulação utilizando o programa LabVIEW, cuja planta foi representada pela Equação 3. O sistema foi submetido a uma série de degraus de amplitudes variáveis, como mostra a Figura 8, onde se pode comparar os sinais de referência com o de posição da base da mesa. Com base nos resultados da simulação, as funções de pertinência, mostradas nas Figuras 3, 4 e 5 foram obtidas através de ajustes com o objetivo de minimização dos sobresinais e dos erros de regime após cada mudança imposta na amplitude do sinal de excitação. Pode-se observar que os resultados foram satisfatórios.

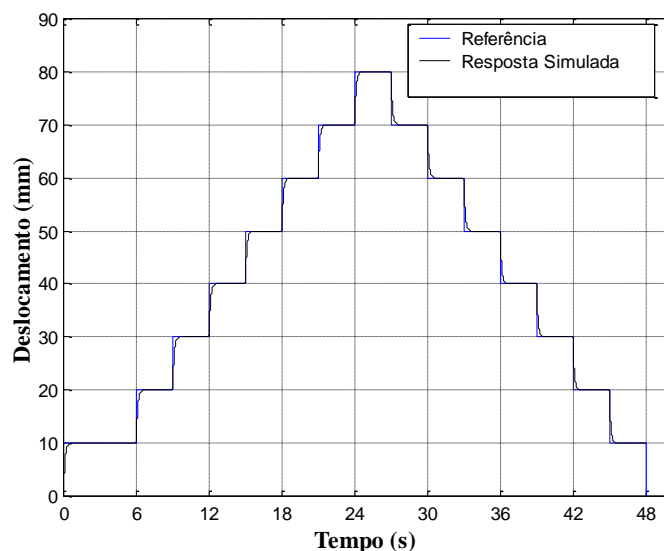


Figura 8 - Resultado simulado do controlador fuzzy para excitação em degrau variável

6. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONTROLADOR FUZZY

O controlador fuzzy foi implementado no ambiente LabVIEW utilizando um tempo de amostragem de 10 ms. Foi utilizado o mesmo controlador da etapa de simulação, já com as funções de pertinência previamente ajustadas. Os valores obtidos do sensor de posição foram normalizados com base no máximo percurso da base da mesa, que é de 80 mm. A limitação do valor máximo de percurso deve-se ao contador

binário do sensor de posição, já que, pelo fato de ter um comprimento de palavra de 8 bits, armazena apenas 255 posições, apesar do comprimento total da mesa ser de 200mm. Os valores de saída do controlador, que é convertido em valor analógico pela placa de aquisição de dados é então aplicado a um circuito reforçador de corrente que aciona o motor da base da mesa.

6.1. Acionamento do sistema com sinal se referência do tipo degrau variável

Inicialmente o sistema foi acionado com uma série de degraus de amplitudes variáveis. Neste caso, o sistema é submetido a uma condição de acionamento bastante severa. Os valores dos sinais de referência sofreram uma variação de 10mm a cada 3s, atingindo o valor máximo de 80mm. Em seguida, o sistema foi acionado com os valores de amplitude dos sinais de referência decrescentes. Foi observado, conforme a Figura 9, que o sistema de controle por lógica fuzzy implementado acompanhou os sinais de referência com pequenos sobresinais, além disso, os valores de erro de regime para cada intervalo de 3s foram todos no intervalo máximo de 1%.

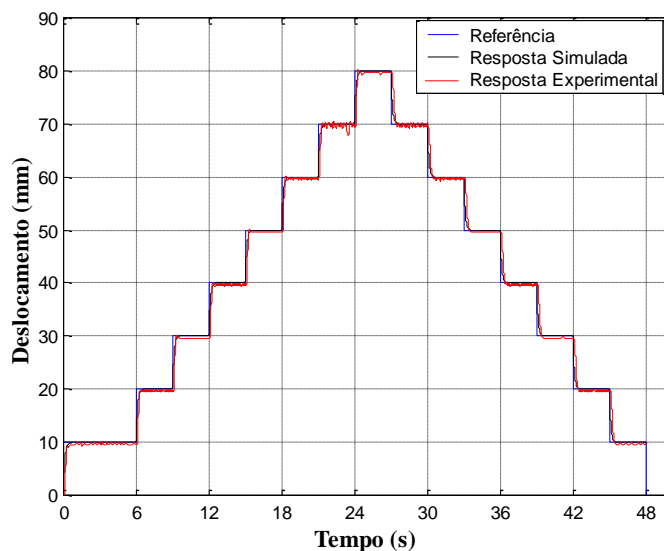


Figura 9 - Resultado experimental do controlador fuzzy para excitação em degrau variável

6.2. Acionamento do sistema com sinal de referência do tipo senoidal

Para testar o sistema como controle de trajetória foi imposto como referência um sinal senoidal de amplitude 40 mm e período de 100 s, com um tempo de amostragem de 10 ms. O resultado do acionamento é mostrado na Figura 10. Observa-se que o sinal experimental acompanha satisfatoriamente o sinal de referência de posição, tanto no percurso ascendente quanto no percurso descendente, não apresentando defasagem no tempo ao longo do acionamento.

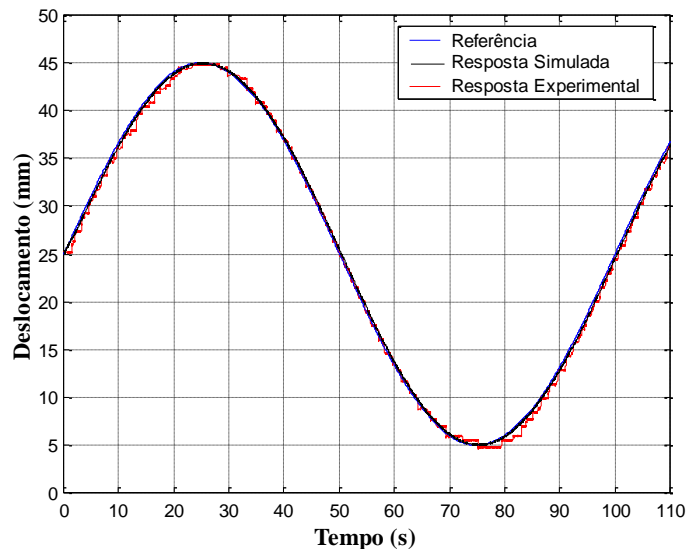


Figura 10 - Resultado experimental do controlador fuzzy para entrada senoidal

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um controlador fuzzy aplicado a um sistema posicionador. Inicialmente, a função de transferência do sistema foi obtida através de um programa de identificação, que utiliza a técnica dos Mínimos Quadrados Recursivos (MQR). Este processo foi realizado de forma satisfatória, com a obtenção de uma função de transferência que se mostrou adequada na representação da dinâmica do sistema na etapa do projeto do controlador fuzzy. Para esta etapa, o controlador fuzzy foi implementado de modo simulado objetivando-se a obtenção do desempenho mais satisfatório para o acionamento do sistema. Após o ajuste do controlador fuzzy ocorrido na etapa de simulação, foram realizados dois ensaios experimentais: o primeiro consistiu do acionamento do sistema com a excitação em degraus de amplitudes variáveis e o segundo acionamento consistiu da utilização de um sinal senoidal como entrada de referência. Em ambos os acionamentos, o controlador fuzzy apresentou um bom desempenho nos resultados obtidos.

Como perspectiva de trabalhos futuros, planeja-se investigar a utilização de controladores neuro fuzzy no sistema apresentado nesta pesquisa, bem como a implementação do controlador fuzzy do tipo Sugeno. Outra linha de pesquisa se dará também no acionamento do controlador com uma frequência maior do sinal de excitação.

8. REFERÊNCIAS

- Astrom, K. J. & Wittenmark, B., 1995. **Adaptive Control**. Editora Addison Wesley, Segunda Edição.
- Bonissone, P., **Industrial Application of Fuzzy Logic at General Electric**, Proceeding of IEEE, v.83, n.3, pp.450-465, 1995.
- Campos, M.M.; Saito, K., 2004. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**, 1.ed. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna.
- Coelho, L. S., Almeida, O. M., Coelho, A. R., 2000. **Fundamentos Relevantes de Controle Nebuloso: Aspectos de Implementação e Estudo de Caso Multivariável**. XIII Congresso Brasileiro de Automática. Florianópolis, SC - Brasil.
- Coelho, L. S., Moedinger, L. H., 2002. **Projeto e Sintonia de Controle PID baseado em Programação Evolutiva e Redes Neurais**. XIV Congresso Brasileiro de Automática.

- Dorf, R. C., 2001. **Sistemas de Controle Moderno**. Livros técnicos e científicos Editora, São Paulo, SP-Brasil.
- Hemerly, E. M., 1996. **Controle Por Computador de Sistemas Dinâmicos**. Ed. Edgard Blucher LTDA, S. Paulo - Brasil.
- Krishnapura, V. G., Jutan, A., (2000). **A neural adaptive controller**. Chemical Engineering Science, 55, 3803-3812.
- Ljung, L., 1987. **System Identification, Theory for the User**. Prentice-Hall , Inc. New Jersey, USA.
- Mamdani, E.H.; Assilian, S., 1975. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. International Journal of Man-Machine Studies, vol.7, n.1, pp.1 -13.
- Martins, N. A., Alencar, M., 2002. **Projeto de Controlador Adaptativo para Robôs Manipuladores no Espaço de Juntas**. XIV Congresso Brasileiro de Automática. Natal, RN - Brasil.
- Ogata, K., 2003. **Engenharia de Controle Moderno**. Editora Prentice Hall, São Paulo - Brasil.
- Phillips C. L., Harbor, R. D., 1997. **Sistemas de Controle e realimentação**. MAKRON Books do Brasil Editora LTDA.
- Paraskevopoulos, P.N., 1996. **Digital Control Systems**. First Edition, Prentice Hall, USA.
- Shahian, B., Hassul, M., 1993. **Control System Design**. Prentice Hall, USA.
- Simões, M. G., 2001. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP - Brasil.
- Ziegler , J. G., Nichols, N. B., 1942. **Optimum Settings for Automatic Controllers**. ASME Trans. 64, pp. 759-768.