

CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM SISTEMA POSICIONADOR DE UM GRAU DE LIBERDADE

Élida Fernanda Xavier Júlio¹, Simplício Arnaud da Silva², José Bezerra de Menezes Filho³,
Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho³, Thyago Leite de Vasconcelos Lima³

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, CT, Universidade Federal da Paraíba, Campus I - João Pessoa, PB.

² Departamento de Engenharia Elétrica, CT, Universidade Federal da Paraíba, Campus I - João Pessoa, PB.

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, João Pessoa, PB.
elida_xnet@yahoo.com.br, sarnaud@ct.ufpb.br, jmenf@yahoo.com.br,
nobregasobrinho.ca@gmail.com, thyagolvasconcelos@gmail.com

Resumo – Neste trabalho, apresenta-se o projeto de um controlador fuzzy para o posicionamento de uma base de uma mesa de coordenadas X-Y. Essa base se desloca horizontalmente, acionada por um motor de indução trifásico alimentado através de um inversor de frequência. O sistema de controle em estudo possui um encoder óptico acoplado ao eixo do motor, a fim de detectar, em tempo real, a posição atual da mesa. Uma placa de aquisição de dados realizou a interface entre um computador Pentium 1,4 GHz e a planta, para captar os sinais provenientes do encoder e fornecer os sinais de controle ao inversor de frequência. No programa computacional LabVIEW®, implementou-se o controlador fuzzy, o qual determina a variável de controle que aciona o motor. Sinais de referência do tipo pulso retangular, degrau e coseno foram utilizados para a avaliação do desempenho do sistema, no controle de posição e seguimento de trajetória. Resultados experimentais são apresentados.

Palavras-chave – Controlador fuzzy, controle de posição, mesa de coordenadas.

1 Introdução

Uma mesa de coordenadas é uma mesa posicionadora ou de medição de coordenadas, que têm a finalidade de posicionar, adequadamente, uma peça a ser processada ou medida, assim como posicionar uma ferramenta que executará uma tarefa de usinagem, medição, soldagem, pintura, etc.

A grande maioria das mesas de coordenadas acionadas por motores elétricos utiliza malhas fechadas de controle que necessitam de sensores de posição. Nesses casos, os sensores de posição (encoders), normalmente, são acoplados ao eixo dos motores, a fim de fornecerem sinais elétricos indicando a posição da mesa [1]. No setor industrial, os sistemas de controle de posição buscam uma maior exatidão de posicionamento, utilizando recursos como os proporcionados pelo controle por computador.

O uso do controle digital pode levar a uma maior flexibilidade na resposta a mudanças no projeto. Quaisquer modificações que sejam necessárias na lei de controle podem ser reconfiguradas via software em vez de alterações em hardware [2]. Os controladores para acionamento de máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) têm a função de minimizar a diferença entre a posição de referência e a posição medida de malha fechada, causada pelo movimento conjunto dos eixos de uma máquina.

Para o controle de servomecanismos existem as técnicas de controle clássico e as de controle moderno. A primeira técnica fundamentada na relação entrada-saída ou função de transferência, como a de Ziegler-Nichols e as de avanço e atraso de fase, e a segunda técnica baseada no espaço de estados, como a do Regulador Linear Quadrático (LQR), do Regulador Linear Gaussiano (LQG) e de Controle H Infinito (H_∞) [1]. A estratégia de pesquisa mais recente é inserida na área de controle inteligente, consistindo basicamente de três abordagens: sistemas especialistas baseados em conhecimento, controle por lógica fuzzy e controle por redes neurais [3].

O controle por lógica fuzzy possibilita a implementação da experiência humana, intuição e heurística para controlar sistemas. É uma técnica que emula o raciocínio humano em sistemas de controle, introduzindo estratégias de tomadas de decisão em processos complexos [4], sendo frequentemente referida como inteligente, por introduzir alguma forma de inteligência artificial nas máquinas. Por meio da lógica fuzzy, é possível reduzir, consideravelmente, o tempo de desenvolvimento de um controlador não-linear, respeitando as especificações e restrições operacionais, controlando processos complexos de maneira simples, robusta e em tempo real [5].

Os algoritmos fuzzy são adaptativos e robustos, devido, principalmente, à sua arquitetura, formada por uma base de conhecimento gerada com determinado grau de incerteza, e um conjunto de regras que auxiliam na escolha do valor de comando adequado para uma situação específica [6].

Os controladores fuzzy são bastante eficientes em casos de difícil modelamento, tempo morto elevado e/ou zona morta alta [7]. Esses controladores não necessitam da modelagem matemática do processo, pois modelam o conhecimento do especialista [8], do usuário do sistema, utilizando para isso mecanismos de inferência baseados em regras de controle. Essas regras são estabelecidas a partir de um conjunto de condições “SE ENTÃO”, que é uma estratégia de ação elaborada de acordo com o desempenho do processo, e são constituídas por uma base de conhecimento. Através de uma base de conhecimento consistente é possível determinar uma relação precisa entre variáveis de entrada e ações de controle.

Existem dois modelos de sistema de inferência fuzzy: Mamdani [9] e Takagi-Sugeno [10], que diferem fundamentalmente em suas habilidades para representar diferentes tipos de informação. No controle fuzzy do tipo Mamdani, tanto os antecedentes como os consequentes da inferência fuzzy são constituídos por variáveis linguísticas, e no controle fuzzy do tipo Takagi-Sugeno, os antecedentes possuem variáveis linguísticas e os consequentes são equações lineares. Nos dois tipos de controladores, a ação de controle é obtida por meio da definição de um conjunto de regras de controle fuzzy.

Este trabalho apresenta a implementação de um controlador fuzzy do tipo Mamdani aplicado no controle de posição de uma base de uma mesa de coordenadas X-Y. O projeto do controlador fuzzy foi desenvolvido experimentalmente, a partir da experiência adquirida nos ensaios realizados, sem a necessidade de identificação e equacionamento matemático do sistema. O trabalho é validado com a apresentação dos resultados experimentais obtidos, analisando-se o desempenho do controlador por meio das características das curvas de resposta à referência do tipo pulso retangular, degrau e ao seguimento de trajetória a uma entrada coseno.

2 Montagem Experimental

Nesta pesquisa, utilizou-se como sistema posicionador uma mesa de coordenadas X-Y com mecanismo de transmissão do tipo parafuso sem fim. Para o controle de posição da base superior da mesa, foi acoplado ao fuso (passo de 4 mm/volta) um motor de indução trifásico, de 380 V, 60 Hz, alimentado por um inversor de frequência. A velocidade de rotação do eixo do motor controlou-se por meio de sinal de controle fuzzy enviado ao inversor. O controlador fuzzy foi implementado no ambiente de programação LabVIEW®, residente em um microcomputador Pentium 1,4 GHz, ao qual conectou-se uma placa de aquisição de dados tipo NI-DAQ. Na Figura 1, é mostrada a bancada experimental do sistema posicionador.

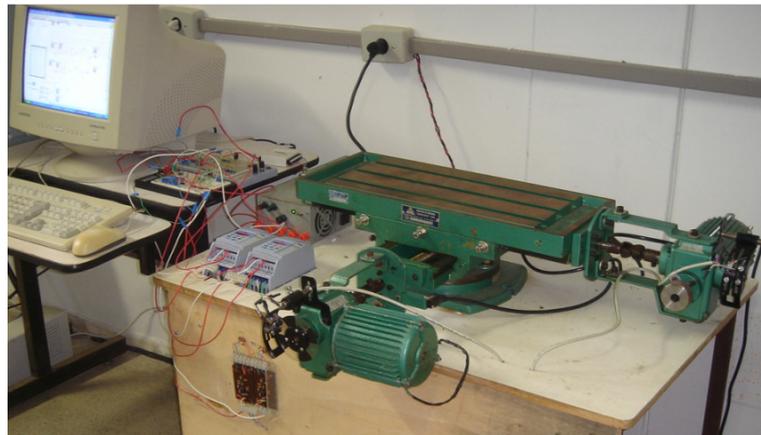


Figura 1 – Mesa de coordenadas X-Y do sistema posicionador.

O sistema de controle de posição foi implementado em malha fechada, constituído por um subsistema de medição de posição e um subsistema de acionamento. O primeiro subsistema correspondeu à aquisição e tratamento dos sinais de saída da planta, e o segundo compreendeu à obtenção e condicionamento dos sinais de entrada nos motores. Para o subsistema de medição de posição projetou-se um circuito detector de posição (encoder) contendo dois sensores ópticos, além de um circuito eletrônico de condicionamento do sinal de saída. No subsistema de acionamento estavam compreendidos um circuito de condicionamento de entrada, um inversor de frequência e um motor de indução trifásico. Na Figura 2, é apresentado o diagrama de blocos do sistema.

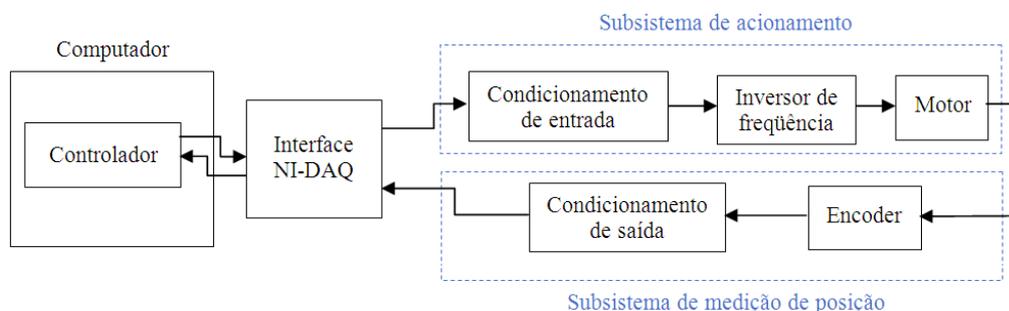


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de controle de posição.

Através do encoder óptico acoplado ao eixo do motor para medir da posição angular desse eixo, obtinham-se as informações de posição e sentido de deslocamento da base da mesa. A configuração do encoder utilizado gerava pulsos

elétricos com quatro estados em código Gray, convertidos em binário via programação. Esses pulsos eram utilizados como sinal de realimentação para o controlador fuzzy.

3 Implementação do Controlador Fuzzy

Para a implementação do controlador fuzzy do sistema, utilizou-se o Fuzzy Logic Toolkit do programa LabVIEW®. A modelagem do controlador utilizando o método fuzzy proposto por Mamdani possibilitou elaborar regras de controle estritamente lingüísticas.

As funções de pertinência das variáveis de entrada e de controle foram ajustadas, alterando as suas formas e distribuições, nos seus respectivos universos de discurso.

3.1 Etapa de Fuzzificação

Foram utilizadas duas variáveis de entrada: o erro (Erro) entre o sinal de referência de posição e o sinal de posição atualizado e a derivada deste erro (Derro).

A variável lingüística Erro é constituída por sete funções de pertinência, com formatos triangular e trapezoidal, denominadas: NG (Negativo Grande), NM (Negativo Médio), NP (Negativo Pequeno), QZ (Quase Zero), PP (Positivo Pequeno), PM (Positivo Médio) e PG (Positivo Grande). Antes dos ajustes nas funções de pertinências, dessa variável de entrada, o controle de posição da base, com sentido de deslocamento para esquerda, apresentou desempenhos diferentes de quando se controlou para direita. A assimetria dos termos lingüísticos do Erro, deveu-se à necessidade de equiparar o controle de posicionamento da base da mesa nos sentidos esquerdo e direito de movimento. Na Figura 3, são apresentados os gráficos das funções da variável Erro no universo de discurso com intervalo de -1 a 1.

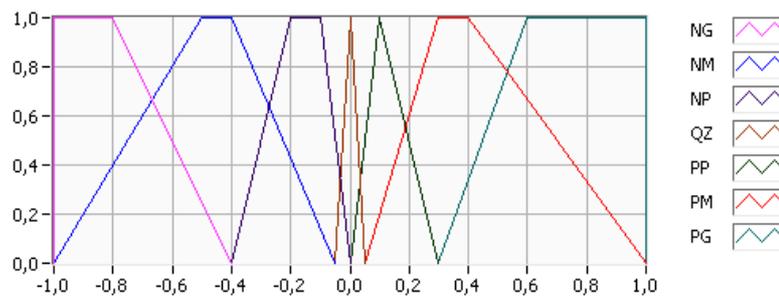


Figura 3 – Curvas de inferência da variável lingüística Erro.

Para a variável Derro estão associadas cinco funções de pertinência, com formas triangular e trapezoidal, definidas pelos termos: NG, NP, QZ, PP e PG. Na Figura 4, são mostrados os gráficos dessas funções no universo de discurso de -1 a 1.

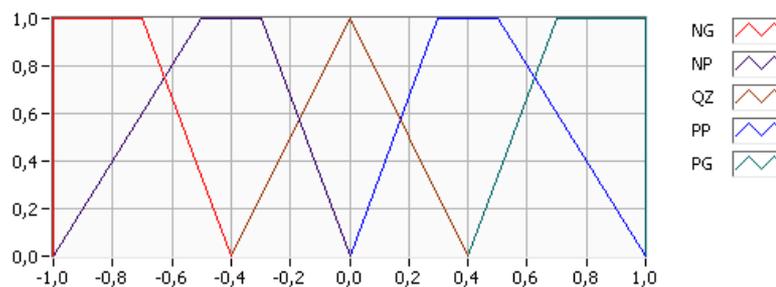


Figura 4 – Curvas de inferência da variável lingüística Derro.

3.2 Etapa de Defuzzificação

Nessa etapa é determinada a variável de controle Saída que aciona a base da mesa. Essa variável possui sete funções de pertinências, em triângulo e trapézio, que são NG, NM, NP, QZ, PP, PM e PG, abrangendo um universo de discurso de 0 a 5, conforme mostrado na Figura 5. Para o processo de defuzzificação foi selecionado o método do Centro-da-Área (C-o-A). Na Figura 5, são mostradas as funções de pertinência da variável de controle.

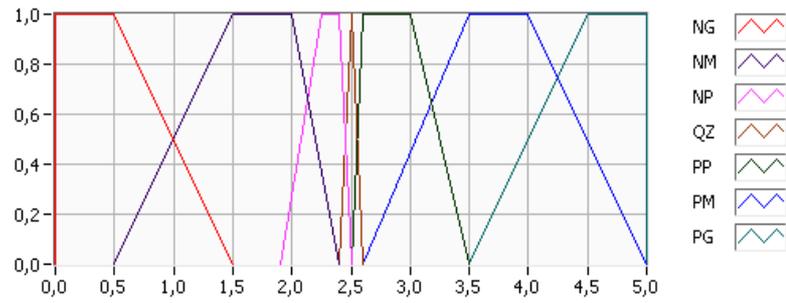


Figura 5 – Funções de pertinência da variável de controle Saída.

3.3 Etapa de Inferência Fuzzy

Na etapa de inferência fuzzy desse projeto, a composição de cada regra de controle e a relação entre elas foi realizada de acordo com a Tabela 1, onde são apresentadas trinta e cinco regras de controle.

No processo de inferência é realizado um mapeamento nas funções de pertinência das variáveis de entrada, sendo determinado como as regras de controle condicionais (SE ENTÃO), são ativadas. Nesse processamento, os conseqüentes são obtidos do valor mínimo da comparação entre os valores de pertinências dos antecedentes Erro e Derro. Para a composição de cada regra e a relação entre elas, utilizou-se a técnica de inferência MAX-MIN.

Tabela 1 – Tabela de regras fuzzy.

Derro \ Erro	NG	NP	QZ	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NG
NM	NG	NG	NM	NM	NG
NP	NG	NM	NP	QZ	NG
QZ	NM	NP	QZ	PP	PM
PP	PG	QZ	PP	PM	PG
PM	PG	PM	PM	PG	PG
PG	PG	PG	PG	PG	PG

A partir da configuração do controlador, é gerada a superfície de controle para a base da mesa, mostrada na Figura 6.

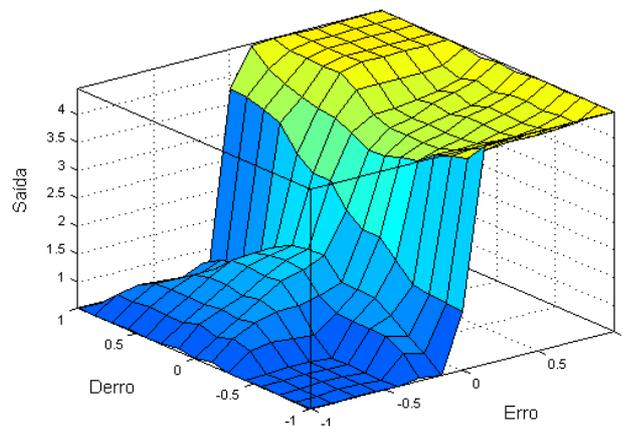


Figura 6 – Superfície de controle gerada pelo controlador fuzzy.

4 Resultados

Para a avaliação do desempenho do controlador analisaram-se as respostas experimentais aos sinais de referência do tipo pulso retangular, degrau e ao seguimento de trajetória a uma entrada tipo coseno.

Para os sinais de entrada pulso retangular, a base da mesa foi acionada partindo da sua posição inicial 0 mm (extremidade do curso) e retornando, ao final, à mesma posição.

Nas Figuras 7 e 8, são mostradas as curvas de resposta de deslocamento da mesa e da variável de controle, respectivamente, para um sinal de referência do tipo pulso retangular, com amplitude de 100 mm e largura de 12,78 s.

Constatou-se, na curva de resposta da Figura 7, um tempo de estabelecimento de 8,72 s, para a posição de 100 mm, e 8,80 s, para a posição de 0 mm. Para ambas as posições, o sobre-sinal e o erro de regime permanente foram nulos.

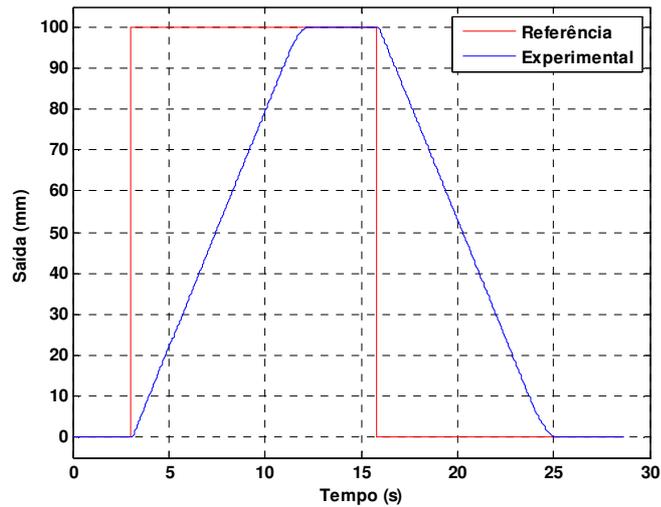


Figura 7 – Curvas de resposta experimental e de referência para excitação pulso retangular de amplitude 100 mm e largura de 12,78 s.

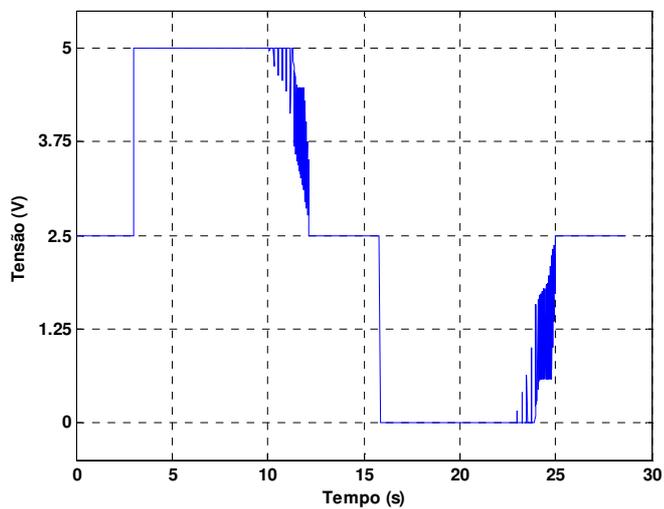


Figura 8 – Variável de controle para excitação pulso retangular de amplitude 100 mm e largura de 12,78 s.

Nas Figuras 9 e 10, são mostradas a curva de resposta da base e a variável de controle, respectivamente, para uma sequência de pulsos retangulares de amplitudes e larguras variáveis, a fim de verificar o desempenho quanto ao posicionamento ao longo do curso da mesa. Nesse ensaio, para cada valor da excitação, a curva de resposta apresentou sobre-sinal e erro de regime permanente nulos.

Com a base da mesa posicionada em 0 mm, aplicou-se um degrau de referência com amplitude de -30 mm. Logo após, a fim de verificar a eficiência do controle do sistema às perturbações, foram aplicadas duas perturbações por meio da imposição de rotações ao eixo do motor dessa base, através de um manipulador acoplado ao eixo do seu conjunto redutor. Na primeira perturbação, forçou-se o deslocamento da base para direita até a posição -28,25 mm, e na segunda, um deslocamento para esquerda até -31,5 mm.

Na Figura 11, é apresentada a curva de resposta de deslocamento da mesa, com os alcances de posições atingidos devido às perturbações. Após cada perturbação a base retornou à posição -30 mm, com sobre-sinal e erro de regime permanente nulos.

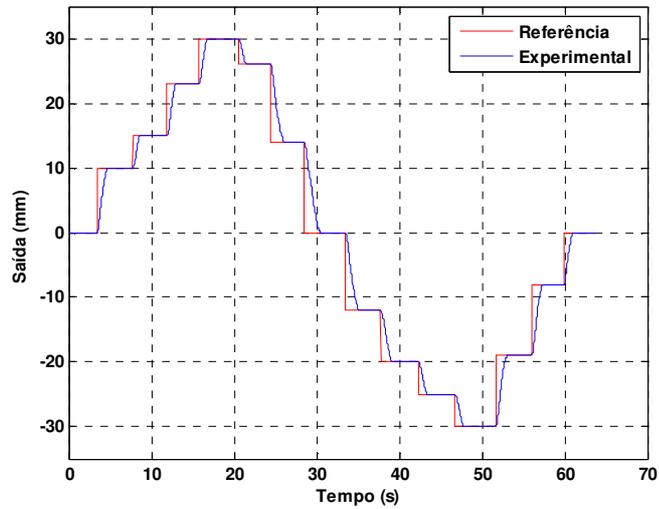


Figura 9 – Curvas de resposta experimental e de referência para excitação variável.

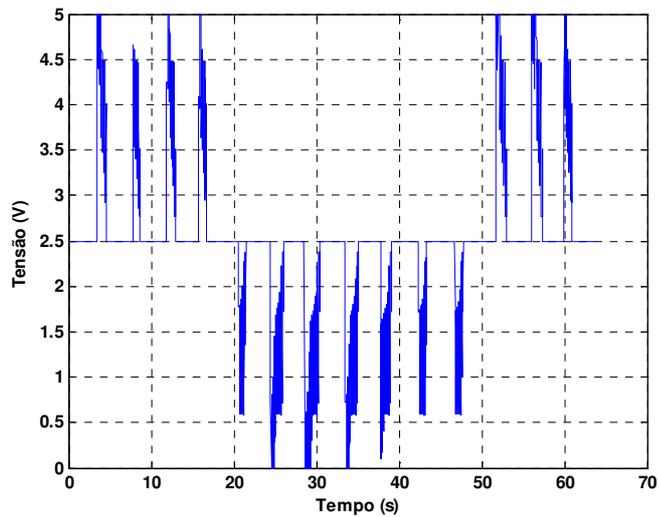


Figura 10 – Variável de controle para excitação variável.

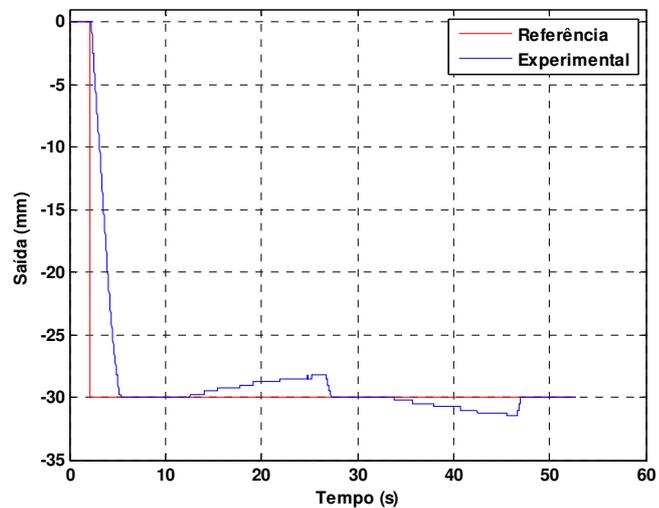


Figura 11 – Curvas de resposta experimental e de referência para excitação degrau.

Para um sinal de referência do tipo coseno, a base da mesa foi acionada partindo da posição 30 mm, retornando, ao final, à mesma posição.

Nas Figuras 12 e 13, apresentam-se as curvas de resposta de deslocamento da mesa e da variável de controle, respectivamente, para uma entrada coseno, com amplitude de 30 mm e período de 150 s. Na curva de resposta da Figura 11, é possível observar um bom desempenho no seguimento da saída à trajetória da referência coseno.

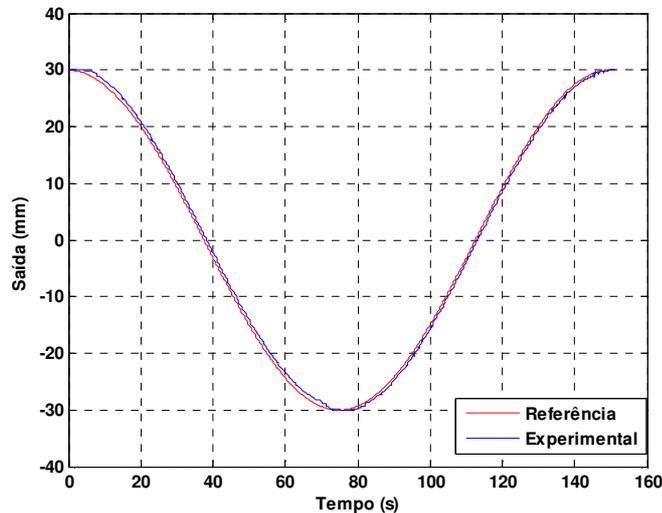


Figura 12 – Curvas de resposta experimental e de referência coseno para um período de 150 s.

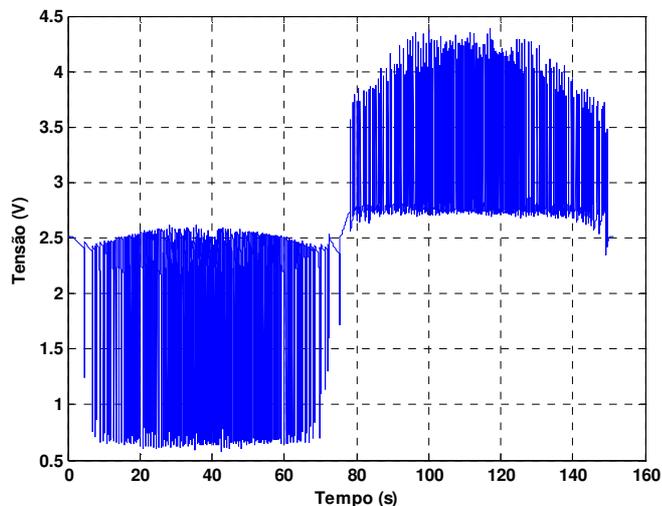


Figura 13 – Variável de controle para excitação coseno.

5 Comentários e Conclusões

Neste trabalho, foi apresentado um sistema de controle fuzzy, aplicado a uma base de uma mesa de coordenadas X-Y, acionada por um motor de indução trifásico. Utilizou-se um controlador implementado em ambiente computacional, que integra programas LabVIEW® e MATLAB® instalados em um microcomputador do tipo PC.

Na análise das curvas de resposta, constataram-se desempenhos satisfatórios do controlador fuzzy. As características das curvas de resposta, para excitações do tipo pulso retangular, apresentaram os resultados esperados do sistema. Todos os sobre-sinais e erros de regime permanente obtidos foram de valores nulos. Além disso, para um sinal de entrada degrau, o controlador mostrou-se eficiente no controle de posição na ocorrência de perturbações, não apresentando sobre-sinais e erros de regime permanente ao retornar à posição inicial. Para uma referência coseno, foi possível observar um bom acompanhamento à trajetória.

Entendeu-se que uma contribuição relevante, deste trabalho, é a aplicação de motor de indução, no controle de posição, utilizando a técnica de controle fuzzy.

Como perspectiva de trabalhos futuros, planeja-se desenvolver controladores neuro-fuzzy no sistema apresentado nesta pesquisa.

6 Referências

- [1] J. B. Menezes Filho, Controlador Neural Adaptativo para Mesa de Coordenadas, Tese de Doutorado, **Universidade Federal da Paraíba**, João Pessoa, PB, Brasil.
- [2] N. S. Nise, Engenharia de Sistemas de Controle. 3ª Edição, **Editora LTC**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2002).
- [3] P. N. Paraskevopoulos, Digital Control Systems, 1ª Edition, **Prentice Hall**, USA, (1995).
- [4] I. S. Shaw, M. G. Simões, Controle e Modelagem Fuzzy, **Editora Edgard Blucher Ltda**, São Paulo, SP, Brasil, (2004).
- [5] M. M. Campos, K. Saito, Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos, **Editora Ciência Moderna**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, (2004).
- [6] J. C. C. Rubio, J. G. Duduch, Algoritmo Híbrido PI Difuso + D para Posicionadores de Ultraprecisão, **II CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, João Pessoa, PB, Brasil, (2002).
- [7] S. T. M. Bezerra, Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia, Tese de Doutorado, **Universidade Federal da Paraíba**, João Pessoa, PB, Brasil, (2009).
- [8] T. A. A. Shheibia, Controle de um Braço Robótico Utilizando uma Abordagem de Agente Inteligente, Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal da Paraíba**, Campina Grande, PB, Brasil, (2001).
- [9] E. H. Mamdani, S. Assilian, An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, **International Journal of Man-Machine Studies**, 7 (1974), 1 – 13.
- [10] T. Takagi, M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modelling and Control, **IEEE Trans. Syst. Man Cybern.**, SMC-15, 1 (1985), 116 – 132.