

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADOR FUZZY TIPO SUGENO NO CONTROLE DE POSIÇÃO, DE UMA MESA DE UM EIXO, ACIONADA POR UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

JÚLIO, Élide Fernanda Xavier, elida_xnet@yahoo.com.br¹
SILVA, Simplício Arnaud da, sarnaud@ct.ufpb.br²
MENEZES FILHO, José Bezerra de, jmenf@yahoo.com.br³
NÓBREGA SOBRINHO, Carlos Alberto, carlosautomacao@gmail.com¹
SENA, Alexander Patrick Chaves de, sandro.preto@gmail.com¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa-PB,

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa-PB,

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe - João Pessoa (PB).

Resumo: Neste trabalho apresenta-se um sistema de controle de posição de uma mesa de um grau de liberdade, acionada por um motor de indução trifásico, usando um controlador fuzzy. O controle da velocidade de rotação do motor é feito através de um inversor de frequência variável, cujo sinal de controle é gerado no programa computacional LabVIEW®, ambiente no qual está implementado o controlador. O sistema de controle de posição, em estudo, possui um sensor de posição (encoder) acoplado ao eixo do motor, para detectar, em tempo real, a posição atual da mesa. Uma placa de aquisição de dados, conectada a um computador, é utilizada como interface para captar o sinal do encoder e fornecer o sinal de controle de posicionamento da mesa, de acordo com a variável de controle gerada no controlador fuzzy. Resultados experimentais são apresentados.

Palavras-chave: Controlador fuzzy; mesa de coordenadas; controle de posição.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia moderna tem produzido, em escala crescente, sistemas com a finalidade de executar tarefas que, seja pela importância que adquirem em seu contexto ou pela sua complexidade e seu custo, justificam o esforço despendido na sua otimização e automação. Nessa conjuntura, os sistemas posicionadores tais como as mesas de coordenadas, são bastante utilizados numa grande diversidade de equipamentos, tais como o plotter, ou no posicionamento de ferramentas para tarefas de usinagem, medições, pintura, soldagem, etc. No setor industrial os sistemas que necessitam de controle de posicionamento, buscam um contínuo melhoramento da qualidade do produto, assim como, a minimização dos custos de fabricação, por meio de equipamentos que possam disponibilizar exatidão elevada nos movimentos, flexibilidade, repetibilidade, rapidez e segurança. Porém, para se cumprir tais exigências buscam-se uma variedade de dispositivos eletromecânicos controláveis, tais como, os motores elétricos, e os acionamentos hidráulicos ou pneumáticos, sendo a seleção destes atuadores em função de fatores econômicos, características técnicas e funcionais.

Para o projeto de controladores existem várias técnicas, 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; Dorf, 2001). Atualmente, há uma forte tendência para utilização de controle por computador, devido à facilidade de reprogramação, sendo encontradas na literatura várias técnicas de projeto e implementação de tais controladores, (Astrom & Wittenmark, 1995). A estratégia de investigação mais recente é inserida na área de 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.

A grande maioria dos acionamentos de mesas de coordenadas, através de motores elétricos, utiliza malhas-fechadas de controle, que necessitam de sensores de posição, os quais têm a finalidade de fornecer um sinal elétrico correspondente à posição da mesa (Xavier, 2008). Este sinal elétrico é enviado a um computador no qual é comparado com o valor desejado, sendo em seguida processado pelo controlador fuzzy. A função do controlador é gerar uma saída adequada ao sinal de erro a fim de conseguir o objetivo proposto, ou seja, fazer com que a variável controlada atinja o valor de referência dentro de parâmetros estabelecidos pela aplicação. Um controlador fuzzy ou nebuloso tem o mesmo objetivo de um controlador convencional que é o gerenciamento automático de um sistema, por meio de comandos

dados em função dos valores medidos das variáveis que descrevem o processo. Este controlador é um sistema baseado em regras que interagem para produção de um 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 principal vantagem de um controlador nebuloso é possibilitar a implementação da experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo. Além disso, eles permitem uma rápida prototipagem, se comparados a seus similares convencionais.

Controladores fuzzy tratam igualmente sistemas lineares e não-lineares, além de não requererem o modelamento matemático do processo a ser controlado. Essa característica é, sem dúvida, o grande atrativo dos sistemas nebulosos. Sistemas baseados nesta lógica têm mostrado grande utilidade em uma variedade de operações de sistemas industriais e em tarefas de reconhecimento de padrões que se estendem desde reconhecimento de texto manuscrito, até a avaliação de crédito financeiro. Existe também um interesse crescente em se utilizar a lógica nebulosa em sistemas especialistas para torná-los mais flexíveis (Camargos, 2002).

A lógica fuzzy tem como apoio a teoria dos conjuntos fuzzy para sua representação. Os controladores fuzzy descritos na literatura são classificados em função das características gerais do seu método de tomada de decisão. Embora diferentes métodos sejam apresentados na literatura, segundo Sugeno (1985), eles podem ser reunidos em dois grandes grupos. O primeiro reúne os que são baseados nas funções de implicação fuzzy e em operadores de composição para a definição da saída fuzzy do controlador. Já os do segundo grupo dispensam a definição de funções de implicação e operadores para a inferência. Os controladores do tipo Mamdani, são baseados no primeiro grupo, e os controladores do tipo desenvolvido por Takagi e Sugeno, fazem parte do segundo. Nos dois tipos de controladores a ação de controle é obtida por meio da definição de um conjunto de instruções (ou regras) de controle fuzzy, isto é, de um algoritmo fuzzy.

O controle fuzzy tem a capacidade de considerar vários critérios de desempenho simultaneamente, tanto na forma matemática como na forma linguística. 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), um dos grandes benefícios do controle fuzzy é que ele pode reduzir, consideravelmente, o tempo de desenvolvimento de um controlador não-linear para um sistema complexo, além de ser uma tecnologia fácil de ser implementada em tempo real e comprovadamente robusta em aplicações práticas, capaz de controlar processos complexos. O controle fuzzy também oferece a vantagem de se adaptar às novas situações de controle com a mudança de apenas uma regra ou de várias.

Segundo Mozelli (2008), com o aumento da complexidade dos sistemas e a exigência de critérios de projeto cada vez mais restritivos, as técnicas de controle tradicionais podem não ser suficientes. O controle fuzzy baseado em modelos Takagi-Sugeno (T-S) é uma alternativa interessante, por serem capazes de representar, de forma aproximada ou exata, dinâmicas não-lineares quaisquer como a combinação de modelos lineares válidos localmente, sendo também menos complexos do que outras classes de modelos fuzzy facilitando aspectos de identificação e modelagem.

Os controladores de Mamdani e Takagi-Sugeno sofreram aprimoramentos ao longo do tempo e têm sido utilizados para diferentes aplicações (Lee, 1990). Atualmente, esses controladores estão disponíveis em pacotes computacionais, com diferentes recursos para suas implementações, facilitando o desenvolvimento de controladores fuzzy para a solução de diferentes problemas de controle a partir da seleção de um desses tipos básicos.

Os modelos fuzzy Takagi-Sugeno são baseados essencialmente numa combinação de conceitos fuzzy e “não-fuzzy” (Bezerra, 2009). Pois, é uma abordagem híbrida que combina um método fuzzy baseado em regras e um método matemático (Shaw e Simões, 2004).

Este trabalho apresenta a implementação de um controlador fuzzy tipo Sugeno aplicado no controle de posição de uma base de uma mesa. 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 e ao seguimento de trajetória a uma entrada rampa.

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Utilizou-se nesta pesquisa, como sistema posicionador, uma base de uma mesa de coordenadas X-Y com mecanismo de transmissão do tipo parafuso sem fim. Para o controle de posição da base da mesa foi utilizado um motor de indução trifásico operando em malha fechada. A velocidade do motor é controlada por meio de um sinal de controle fuzzy enviado a um inversor de frequência. 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 computar a posição do eixo do motor foi projetado um circuito detector de posição que fornece pulsos para serem utilizados como sinal de retroalimentação para o controlador fuzzy. A Figura (1) mostra a mesa de coordenadas X-Y utilizada nesta pesquisa.

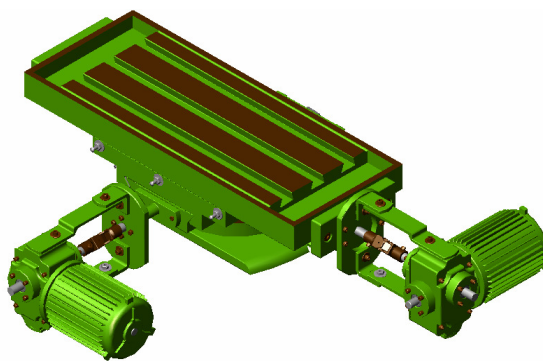


Figura 1. Vista da mesa de coordenadas X-Y.

O motor de corrente alternada é de 380 V, 60 Hz, acoplado ao fuso de passo 4 mm/volta. O sistema de medição (acoplador óptico) gera um código Gray convertido em binário via programação.

O computador é equipado com uma placa de aquisição de dados que possui um conversor Digital Analógico (DAC) que serve para transformar os sinais digitais obtidos do controlador fuzzy em sinal analógico de controle para o inversor de frequência. Um circuito eletrônico foi projetado para condicionar o sinal de controle, proveniente da placa (DAQ), à tensão de controle do inversor de frequência e é constituído de três etapas. Na primeira etapa o sinal de controle variável de 0 V a 5 V (NI-DAQ) é enviado ao somador inversor, do qual se obtêm uma forma de onda com picos de 2,5 V e -2,5 V, que em seguida é amplificado com um ganho de 4, resultando em um sinal com tensão máxima de 10 V e mínima de -10 V. No segundo circuito, é realizada uma retificação de onda completa, obtendo-se um sinal retificado com tensões variando de 0 V a 10 V objetivando-se controlar a velocidade de rotação do motor de indução. O terceiro circuito é um comparador de tensão, através do qual o sinal é comutado em 0 V ou 10 V, informando ao inversor o sentido de rotação do motor; 10 V implica em uma revolução anti-horária e 0 V no sentido horário. O diagrama de blocos do sistema de controle da base da mesa é mostrado na Fig. (2).

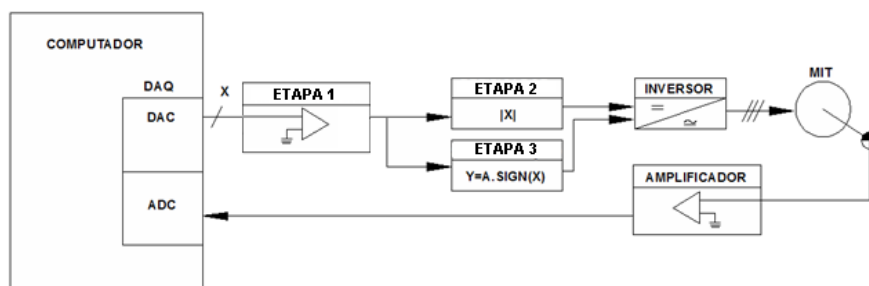


Figura 2. Diagrama de blocos do Sistema de Controle da mesa.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY

Para controlar o sistema foi utilizado um algoritmo, de acordo com a proposta de Takagi-Sugeno, implementado no ambiente computacional LabView®. Essa técnica de controle, também chamada de controle fuzzy paramétrico, aborda os problemas combinando regras, que são ações de controle, com funções matemáticas (Bezerra, 2009).

O modelo T-S utilizado é composto por proposições condicionais cujos antecedentes são variáveis linguísticas e cujos consequentes são equações lineares.

As funções de pertinência das variáveis de entrada estão distribuídas em universos de discurso variando de -1 a 1, e foram ajustadas, alterando as suas formas e distribuições nesses 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 linguística 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 linguísticos do Erro, deveu-se à necessidade de equiparar o controle de posicionamento da base da mesa nos sentidos esquerdo e direito de movimento. A Figura (3) apresenta os gráficos das funções da variável Erro no seu universo de discurso.

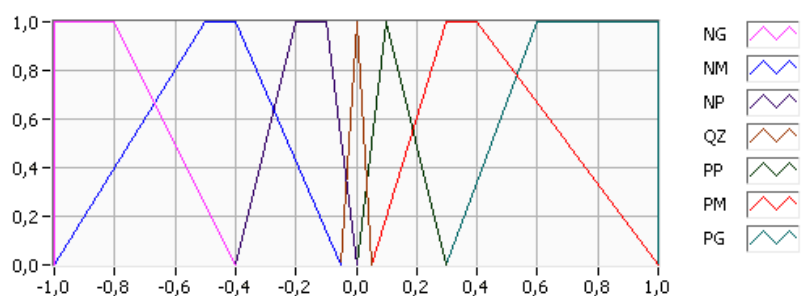


Figura 3. Curvas de inferência da variável linguística Erro.

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) constam os gráficos dessas funções.

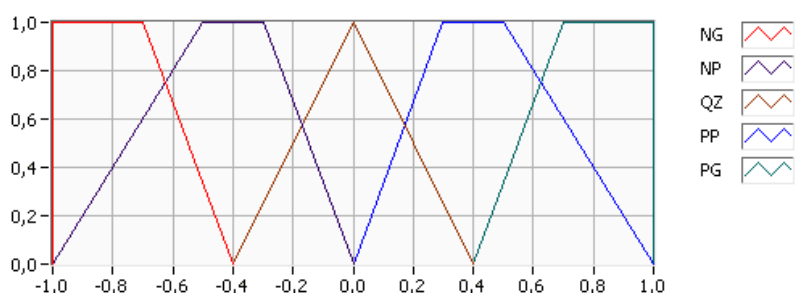


Figura 4. Curvas de inferência da variável linguística Derro.

3.2 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 as 35 regras de controle.

Nesse processo de inferência é realizado um mapeamento nas funções de pertinência das variáveis de entrada, determinando como as regras de controle, condicionais SE ENTÃO, serão ativadas. Nesse processamento, os consequentes são obtidos do valor mínimo da comparação entre os valores de pertinências dos antecedentes Erro e Derro.

Tabela 1. Tabela de regras fuzzy.

Derro \ Erro	NG	NP	QZ	PP	PG
NG	uNG	uNG	uNG	uNG	uNG
NM	uNG	uNG	uNM	uNM	uNG
NP	uNG	uNM	uNP	uQZ	uNG
QZ	uNM	uNP	uQZ	uPP	uPM
PP	uPG	uQZ	uPP	uPM	uPG
PM	uPG	uPM	uPM	uPG	uPG
PG	uPG	uPG	uPG	uPG	uPG

3.3. Determinação da Variável de Saída

A variável de controle (u_s) será associada a uma variação de tensão de 0 V a 5 V na saída analógica da NI-DAQ. Para a determinação do sinal de saída fuzzy foi utilizada a Eq. (1) conforme se segue.

$$u_s = \frac{u_{s1} + u_{s2} + u_{s3}}{uNG + uNM + uNP + uQZ + uPG + uPM + uPP} \quad (1)$$

Onde os termos u_{s1} , u_{s2} e u_{s3} são expressos por meio da Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente.

$$u_{s1} = 2,5 + uNG.(15.Erro - 0,1.Derro) + uNM.(30.Erro - 0,3.Derro) \quad (2)$$

$$u_{s2} = uNP.(38.Erro - 0,5.Derro) + uQZ.(0,1.Erro - 8.Derro) + uPG.(6.Erro - 0,1.Derro) \quad (3)$$

$$u_{s3} = uPM.(9.Erro - 0,3.Derro) + uPP.(15.Erro - 0,5.Derro) \quad (4)$$

4. RESULTADOS

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

Foi imposto como desempenho do sistema, para o projeto do controlador, um tempo de estabelecimento T_s inferior a 10 s, sobre-sinal M_p menor que 5% e erro de regime permanente e_{ss} inferior a 2%, nas curvas de resposta ao 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 (5) e (6), 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 14,3 s.

Constatou-se, na curva de resposta da Figura (5), um tempo de estabelecimento de 8,56 s, para a posição de 100 mm, e 8,68 s, para a posição de 0 mm. Para ambas as posições, o sobre-sinal e o erro de regime permanente foram nulos.

Nas Figuras (7) e (8), 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 erro de regime permanente nulo. Apenas na posição de 50 mm, no percurso ascendente da curva, verificou-se um sobre-sinal de 1%.

Para um sinal de referência do tipo rampa, a base da mesa foi acionada partindo da posição inicial 0 mm até a posição 100 mm.

Nas Figuras (9) e (10), apresentam-se as curvas de resposta de deslocamento da mesa e da variável de controle, respectivamente, para a entrada rampa, com amplitude de 100 mm e inclinação de 4,89 mm/s. Na curva de resposta da Figura (9), constatou-se um erro máximo (final do curso da base) de 0,75%.

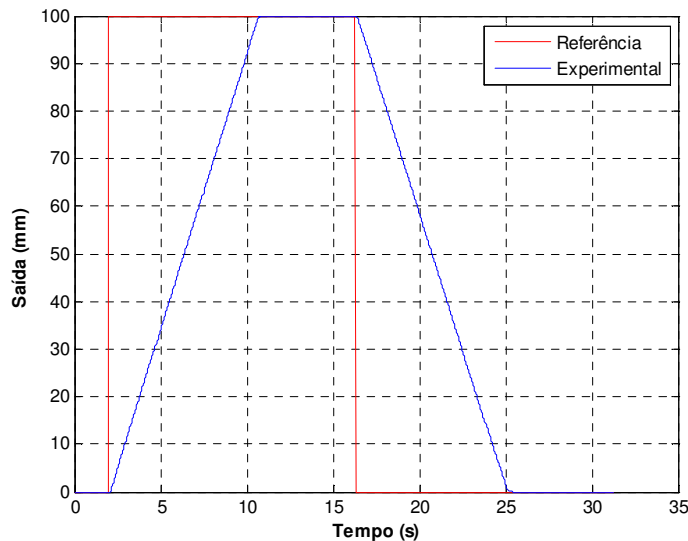


Figura 5. Curvas de resposta experimental e de referência para excitação do tipo pulso retangular de amplitude 100 mm e largura de 14,3 s.

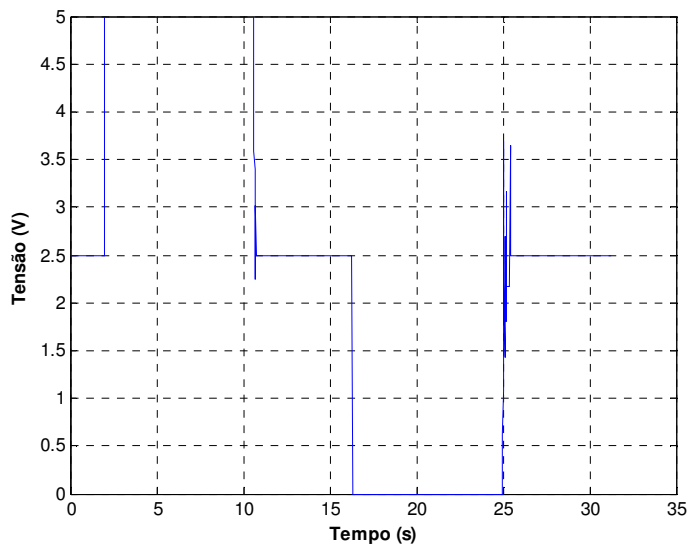


Figura 6. Variável de controle à excitação pulso retangular de amplitude 100 mm e largura de 14,3 s.

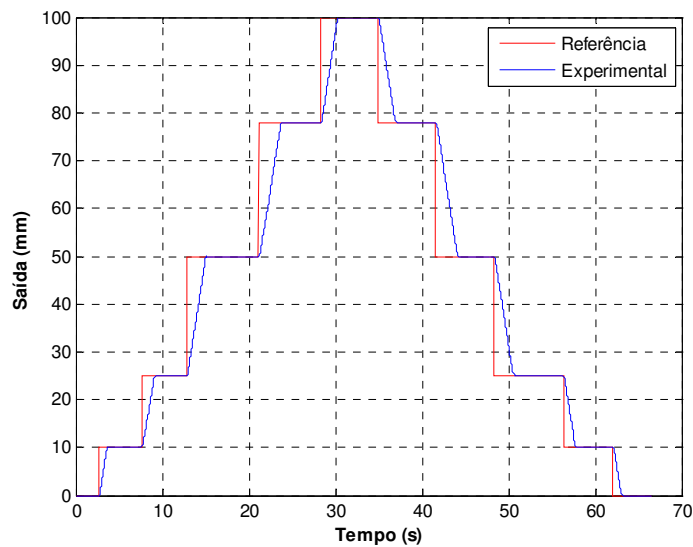


Figura 7. Curvas de resposta experimental e de referência à excitação variável.

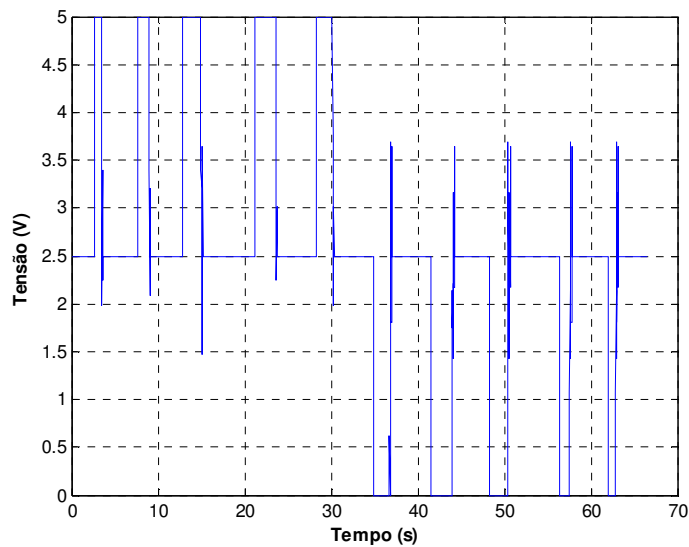


Figura 8. Variável de controle à excitação variável.

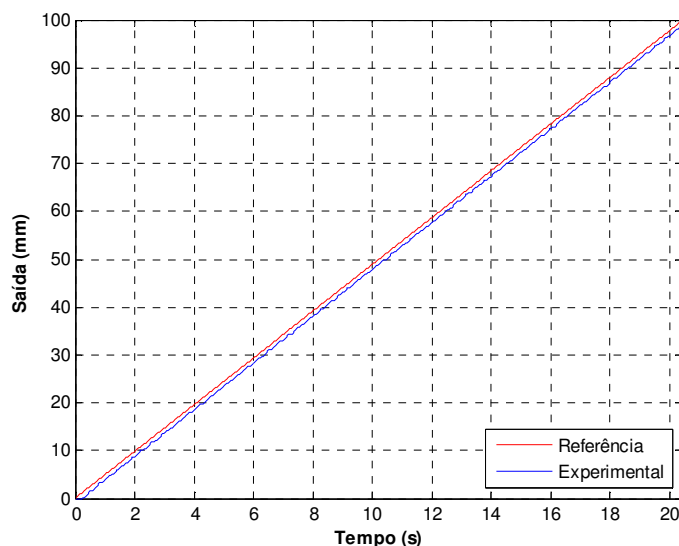


Figura 9. Curvas de resposta experimental e de referência para excitação do tipo rampa de amplitude 100 mm.

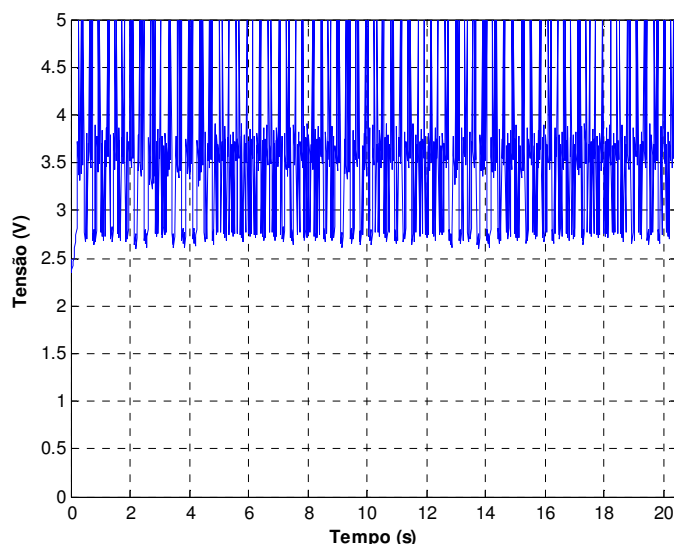


Figura 10. Variável de controle à excitação rampa de amplitude 100 mm.

5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado um sistema de controle fuzzy, aplicado a uma mesa de um grau de liberdade, 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 índices de desempenho com valores dentro das faixas especificadas, e, para uma entrada rampa, 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 comparar o controle fuzzy do tipo Mamdani com o do tipo Sugeno, bem como investigar a viabilidade de controladores neuro-fuzzy no sistema apresentado nesta pesquisa.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Astrom, K. J. & Wittenmark, B., 1995. Adaptive Control. Editora Addison Wesley, Segunda Edição. Bonissone, P. Bezerra, S. T. M., 2009, Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia. Tese de D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- Camargos, Fernando Laudares, 2002, “Lógica Nebulosa: uma abordagem filosófica e aplicada”, Artigo Publicado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.

- Campos, M.M.; Saito, K., 2004. Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos, 1.ed. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna.
- Dorf, R. C., 2001. Sistemas de Controle Moderno. Livros técnicos e científicos Editora, São Paulo, SP-Brasil.
- Lee, C. C. (1990) Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, March/April 1990, pp. 404 – 418.
- Mozelli, Leonardo Amaral. Controle Fuzzy para Sistemas Takagi-Sugeno: Condições Aprimoradas e Aplicações. Belo Horizonte: UFMG, 2008. 87 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- Shaw, I. S., Simões, M. G., 2004, Controle e Modelagem Fuzzy. São Paulo, SP, Brasil, Editora Edgard Blucher Ltda.
- Sugeno, M. (1985). An introductory survey of fuzzy control. Information Sciences 36, p. 59-83.
- 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;
- Simões, M. G., 2001. Controle e Modelagem Fuzzy. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP - Brasil.
- Xavier, Antonio Feliciano Filho, 2008, “Controlador Fuzzy aplicado a um Sistema de Controle de Posição”, Dissertação de Mestrado, UFPB, Brasil.
- Ziegler, J. G., Nichols, N. B., 1942. Optimum Settings for Automatic Controllers. ASME Trans. 64, pp. 759-768.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

IMPLEMENTATION OF FUZZY CONTROLLER TYPE SUGENO IN POSITION CONTROL, OF AN AXE OF A TABLE, POWERED BY A TREE-PHASE INDUCTION MOTOR

JÚLIO, Élide Fernanda Xavier, elida_xnet@yahoo.com.br¹
SILVA, Simplício Arnaud da, sarnaud@ct.ufpb.br²
MENEZES FILHO, José Bezerra de, jmenf@yahoo.com.br³
NÓBREGA SOBRINHO, Carlos Alberto, carlosautomacao@gmail.com¹
SENA, Alexander Patrick Chaves de, sandro.preto@gmail.com¹

¹ Postgraduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Paraíba, Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa-PB,

² Department of Electrical Engineering, Federal University of Paraíba, Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa-PB,

³ Federal Institute for Education, Science and Technology of Paraíba, Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe - João Pessoa (PB).

Abstract: *This work presents a system for position control of a table with one degree of freedom, driven by a three-phase induction motor, using a fuzzy controller. The control of the rotational speed of the engine is carried by an inverter with variable frequency. The control signal is generated in computer program LabVIEW®, where the controller is implemented. The control system of position, in study, has a position sensor (encoder) engaged to the axe of the motor, to detect, in real time, the current position of the table. A board data acquisition, connected to a computer is used as an interface to capture the signal from the encoder and provide the control signal for positioning the table, according to the control variable generated in the fuzzy controller. Experimental results are presented.*

Keywords: *Fuzzy controller; coordinates table; position control.*