

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UM SISTEMA ELETRO-HIDRÁULICO

Jorge Luiz Matias de Lima, jorge.tek@gmail.com¹

George Oliveira de Araújo Azevedo, georgeazevedo@gmail.com¹

João Deodato Batista dos Santos, joaodeodato3@gmail.com¹

Wallace Moreira Bessa, wmbessa@ct.ufrn.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil

Resumo: *Sistemas eletro-hidráulicos são amplamente utilizados em aplicações industriais, tais como manipuladores robóticos, suspensões ativas, máquinas ferramentas de precisão e sistemas aeroespaciais. Eles oferecem muitas vantagens sobre os motores elétricos, incluindo alta força em relação ao peso, tempo de resposta rápido e tamanho compacto. No entanto, o controle preciso de sistemas eletro-hidráulicos, devido à sua inerente característica não linear, não pode ser facilmente obtido com os controladores lineares convencionais. Neste trabalho, um controlador fuzzy é aplicado a um sistema eletro-hidráulico composto por unidade hidráulica, servoválvula proporcional de quatro vias e três posições, atuador hidráulico de dupla ação e um potenciômetro linear para medir a posição do atuador. Resultados numéricos e experimentais comprovam a viabilidade e o bom desempenho da metodologia empregada.*

Palavras-chave: *Controle de sistemas mecânicos, Controle Fuzzy, Lógica fuzzy, Sistemas eletro-hidráulicos, Zona-morta.*

1. INTRODUÇÃO

Atuadores eletro-hidráulicos desempenham um papel fundamental em diversos ramos do setor industrial e, normalmente, representam a escolha mais apropriada quando grandes carregamentos e altas velocidades se fazem necessários. Seu campo de aplicação vai de manipuladores robóticos a sistemas aeroespaciais. Uma das principais vantagens deste tipo de atuador está na capacidade de manter o carregamento por tempo indeterminado, o que dificilmente pode ser obtido com atuadores elétricos devido ao superaquecimento.

No entanto, por apresentar um comportamento dinâmico altamente não linear, o controle eficiente de dispositivos eletro-hidráulicos não pode ser facilmente obtido mediante a utilização de técnicas convencionais de controle linear. Além das não linearidades comuns, geradas pela compressibilidade do fluido hidráulico e das propriedades de escoamento e pressão das válvulas, muitos dos sistemas eletro-hidráulicos também são submetidos a grandes não linearidades como a zona morta, que ocorre quando o carretel da válvula sobrepõe o orifício de passagem do fluido impedindo seu escoamento mesmo para um pequeno deslocamento do carretel. Esta zona morta pode degradar a performance do controlador e gerar instabilidade no sistema de malha fechada.

Neste contexto, o aumento do número de trabalhos, propondo novas estratégias de controle para esta classe de sistemas, demonstra o grande interesse do setor industrial e da comunidade acadêmica pelo tema. As abordagens mais comuns baseiam-se em metodologias adaptativas (Guan e Pan, 2008b,a; Yanada e Furuta, 2007; Yao *et al.*, 2000) e algoritmos à estrutura variável (Bessa *et al.*, 2010b; Mihajlov *et al.*, 2002; Bonchis *et al.*, 2001; Liu e Handroos, 1999). No entanto, outras estratégias como controle em cascata (Valdiero *et al.*, 2007; Cunha *et al.*, 2002), PID com ajuste otimizado (Liu e Daley, 2000), redes neurais artificiais (Knohl e Unbehauen, 2000) e controle fuzzy (Bessa *et al.*, 2010a) também podem ser encontrados na literatura.

É importante ressaltar que o uso de técnicas baseadas na inteligência artificial, tanto para a modelagem quanto para o controle de sistemas não lineares e incertos vem crescendo bastante. Branco e Dente (2000a) e Branco e Dente (2000b), por exemplo, descrevem a modelagem e o controle de posição em um sistema eletro-hidráulico utilizando lógica fuzzy para a integração de mecanismos de aprendizado.

Neste trabalho, um controlador fuzzy é aplicado a um sistema eletro-hidráulico composto por unidade hidráulica, servoválvula proporcional de quatro vias e três posições, atuador hidráulico de dupla ação e um potenciômetro linear para medir a posição do atuador. A principal vantagem da lógica fuzzy reside na sua capacidade de acomodar a experiência de especialistas, através de regras heurísticas e variáveis linguísticas. Resultados numéricos e experimentais comprovam a viabilidade e o bom desempenho da metodologia empregada.

2. CONTROLADOR FUZZY

O controlador proposto no presente trabalho é um sistema de malha fechada, onde a variável de controle (u) será calculada de maneira proporcional ao erro de acordo com o conjunto de regras fuzzy.

As bases da lógica fuzzy (frequentemente traduzida como difusa ou nebulosa) foram estabelecidas por Zadeh (1965), através da introdução do conceito de conjuntos difusos. Segundo Zadeh, um conjunto fuzzy A em um universo de discurso X pode ser definido por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \left\{ \left(x, \mu_A(x) \right) \mid x \in X \right\}$$

onde $\mu_A(x)$ é a função de pertinência do conjunto difuso A , e que é responsável por relacionar cada elemento $x \in X$ a um valor no intervalo $0 \leq \mu_A \leq 1$ (Jang *et al.*, 1997).

A representação do universo de discurso através de conjuntos nebulosos permite que um certo domínio seja convenientemente classificado, de modo a facilitar a obtenção posterior de informações a partir de um sistema de inferência. A estrutura básica de um sistema de inferência fuzzy consiste em transformar as variáveis de estado em variáveis linguísticas, para então a partir de uma base de conhecimento, armazenada sob a forma de regras, determinar uma saída numérica.

Para o sistema em análise devemos utilizar uma base de regras fuzzy associada ao universo de discurso do erro, onde o controle será feito sobre a abertura da válvula proporcional através de um valor de tensão.

Devido a sua simplicidade e sua já comprovada eficiência computacional (Jang *et al.*, 1997), o sistema de inferência adotado neste trabalho para definir a estrutura do controlador foi o TSK (Takagi–Sugeno–Kang) de ordem zero. Este sistema é equivalente às redes neurais do tipo RBF (*Radial Basis Function*) (Jang e Sun, 1993) e suas regras podem ser escritas na forma:

$$\text{Se } \tilde{x} \text{ é } \tilde{X}_r \text{ então } u_r = U_r \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, N$$

onde $\tilde{x} = x - x_d$ é o erro de rastreamento, calculado a partir da diferença entre posição real (x) e posição desejada (x_d) do atuador, \tilde{X}_r são conjuntos difusos relativos ao erro de rastreamento, cujas funções de pertinência podem ser escolhidas apropriadamente, e U_r são os valores de saída relativos à cada uma das N regras.

Tendo em vista que cada regra determina um valor numérico como resposta, a saída final u do sistema inferência pode ser calculada através de uma média ponderada:

$$u = \frac{\sum_{r=1}^N w_r \cdot U_r}{\sum_{r=1}^N w_r} \quad (1)$$

ou, similarmente,

$$u = \mathbf{U}^T \Psi(\tilde{x}) \quad (2)$$

onde, $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_N]^T$ é o vetor contendo os valores atribuídos a U_r para cada regra r , e $\Psi(\tilde{x}) = [\psi_1(\tilde{x}), \psi_2(\tilde{x}), \dots, \psi_N(\tilde{x})]^T$ é o vetor de componentes $\psi_r(\tilde{x}) = w_r / \sum_{r=1}^N w_r$, sendo w_r o valor de ativação da premissa de cada regra. Especialmente neste caso, como há apenas uma condição na premissa, o valor de ativação w_r recebe o valor da função de pertinência associado a cada um dos conjuntos nebulosos \tilde{X}_r .

O diagrama de blocos do controlador fuzzy empregado neste trabalho é apresentado na Fig. 1.

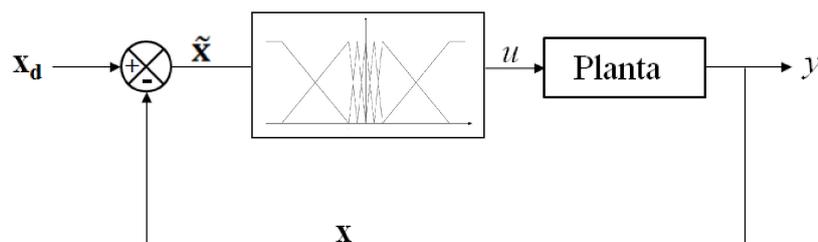


Figura 1: Diagrama de blocos do controlador fuzzy.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA ELETRO-HIDRÁULICO

Para a simulação do sistema de controle para um atuador eletro-hidráulico se faz necessário o conhecimento do modelo matemático do mesmo que represente sua dinâmica. Em Merritt (1967) é abordado claramente o modelo dessa dinâmica para o sistema utilizado.

O modelo do sistema abordado é composto por uma válvula proporcional de quatro vias e três posições, um cilindro hidráulico de dupla ação e um carregamento variável, modelado, onde o atuador irá agir. O sistema de carregamento variável, presente no modelo, é representado por um sistema massa, mola e amortecedor. Na Fig. 2 é apresentado um diagrama esquemático do sistema que está sendo analisado.

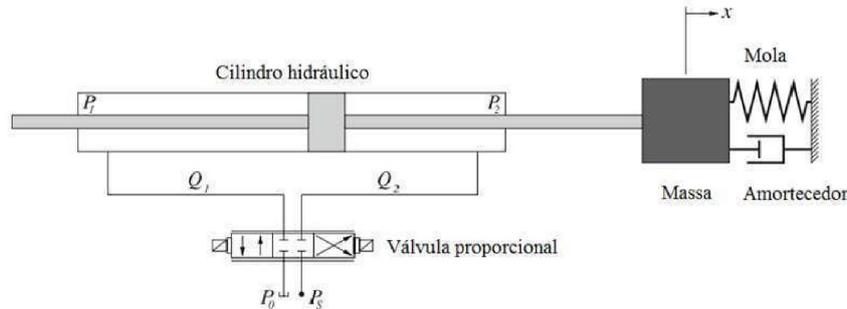


Figura 2: Diagrama esquemático do sistema eletro-hidráulico

Através do diagrama de corpo livre pode ser feita a análise das forças atuantes no cilindro, obtendo-se a equação de movimento do mesmo:

$$F_g = A_1 P_1 - A_2 P_2 = M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} + K_s x \quad (3)$$

sendo F_g a força resultante produzida pelo pistão, P_1 e P_2 as pressões atuantes nas câmaras do cilindro hidráulico, A_1 e A_2 as áreas das superfícies do pistão onde as pressões estarão atuando, M_t a massa total do sistema composto pelo pistão e pelo carregamento, B_t o valor do amortecimento do sistema, K_s rigidez da mola e x corresponde ao deslocamento do pistão na sua direção.

Admitindo que a pressão transmitida entre as câmaras do cilindro é dada por $P_l = P_1 - P_2$ e considerando o sistema modelado com áreas do pistão simétricas, ou seja, $A_p = A_1 = A_2$ temos, a partir da Eq. (3), que:

$$M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} + K_s x = P_l A_p \quad (4)$$

Utilizando a equação da continuidade para o escoamento do fluido no sistema, é obtida a seguinte expressão:

$$Q_l = A_p \dot{x} + C_{tp} P_l + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{P}_l \quad (5)$$

sendo $Q_l = (Q_1 + Q_2)/2$ a vazão do sistema de controle, C_{tp} o coeficiente de vazamento do pistão, V_t todo o volume sobre compressão nas duas câmaras do cilindro e β_e o módulo de elasticidade volumétrica do fluido.

Sabendo que a pressão do fluido de retorno é muito inferior às demais pressões envolvidas, considera-se $P_0 \approx 0$ e admite-se também que as aberturas, para passagem de fluido, da válvula são simétricas. A vazão do fluxo de fluido, Q_l , através da válvula é dada por:

$$Q_l = C_d w \bar{x}_{sp} \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - \text{sgn}(\bar{x}_{sp}) P_l)} \quad (6)$$

onde o C_d é o coeficiente de descarga, w é o gradiente de área da válvula, \bar{x}_{sp} corresponde ao deslocamento efetivo do carretel da válvula, ρ é a massa específica do fluido utilizado, P_s a pressão fornecida pelo sistema de bombeio do fluido, e $\text{sgn}(\cdot)$ é uma função do seguinte modo:

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} -1 & \text{se } z < 0 \\ 0 & \text{se } z = 0 \\ 1 & \text{se } z > 0 \end{cases} \quad (7)$$

Assume-se que a válvula possui dinâmica suficientemente rápida para que seja desprezada, tornando o deslocamento de seu carretel, que proporciona mudanças de posição da válvula, proporcional à tensão de controle (u). Durante o

funcionamento das válvulas ocorre sobreposição do seu carretel, promovendo uma não linearidade do tipo zona morta, apresentada na Fig. 3 e descrita matematicamente a seguir:

$$\bar{x}_{sp} = \begin{cases} k_v(u(t) - \delta_l) & \text{se } u \leq \delta_l \\ 0 & \text{se } \delta_l < u < \delta_r \\ k_v(u(t) - \delta_r) & \text{se } u \geq \delta_r \end{cases} \quad (8)$$

sendo k_v o ganho da válvula e δ_l e δ_r são parâmetros da válvula, dependentes da região de sobreposição do carretel, que determinam o tamanho da zona morta presente.

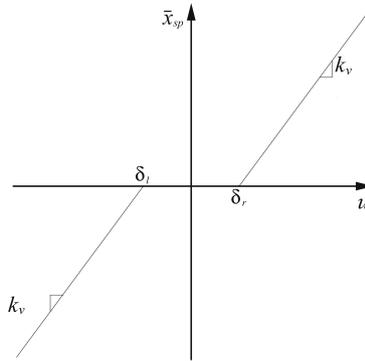


Figura 3: Não linearidade do tipo zona morta.

Segundo Bessa *et al.* (2010b), a forma mais adequada para apresentar a equação da zona morta, quando utilizada para controle, é da maneira a seguir:

$$\dot{x}_{sp} = k_v[u(t) - d(u)] \quad (9)$$

onde $d(u)$ é obtido através da Eq. 8 e Eq. 9:

$$d(u) = \begin{cases} \delta_l & \text{se } u(t) \leq \delta_l \\ u_t & \text{se } \delta_l < u(t) < \delta_r \\ \delta_r & \text{se } u(t) \geq \delta_r \end{cases} \quad (10)$$

Combinando as Eqs. 4, 5, 6, 9 e 10 obtém-se a representação dinâmica do comportamento do sistema eletro-hidráulico em uma equação diferencial de terceira ordem:

$$\ddot{x} = -\mathbf{a}^T \mathbf{x} + bu - bd \quad (11)$$

onde $\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \ddot{x}]$ é o vetor de estados que representa os estados do sistema, enquanto $\mathbf{a} = [a_0, a_1, a_2]$ é composto pelos parâmetros já mencionados anteriormente e apresentados a seguir:

$$a_0 = \frac{4\beta_e C_{tp} K_s}{V_t M_t} \quad (12a)$$

$$a_1 = \frac{K_s}{M_t} + \frac{4\beta_e A_p^2}{V_t M_t} + \frac{4\beta_e C_{tp} B_t}{V_t M_t} \quad (12b)$$

$$a_2 = \frac{B_t}{M_t} + \frac{4\beta_e C_{tp}}{V_t} \quad (12c)$$

O ganho do controlador, presente na Eq. 11 é definido da seguinte maneira:

$$b = \frac{4\beta_e A_p}{V_t M_t} C_d w k_v \sqrt{\frac{1}{\rho} [P_s - \text{sgn}(u)(M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} + K_s x) / A_p]} \quad (13)$$

Deste modo, no intuito de calibrar e selecionar os parâmetros do controlador fuzzy, o modelo matemático apresentado na Eq. 11 é utilizado como simulador da dinâmica do sistema eletro-hidráulico. Fazendo com que esses parâmetros sejam selecionados de maneira mais ágil.

3.1 Simulação numérica

Os estudos simulados foram obtidos mediante uma implementação computacional realizada em C++, e com taxas de amostragem de 1000 Hz para a dinâmica do modelo e de 200 Hz para o sistema de controle. As equações diferenciais da dinâmica modelada foram solucionadas numericamente através do método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Com relação ao sistema de inferência difusa utilizado, as regras difusas e tipos das funções de pertinência e sua distribuição no universo de discurso são determinadas de forma heurística, de acordo com a experiência e conhecimento do projetista em relação ao sistema. Porém, esse processo de determinação dos parâmetros dos centros das funções de pertinência distribuídos no universo de discurso e dos valores das regras difusas que estão diretamente relacionadas com o esforço de controle, pode ser descrito como um processo iterativo onde o desenvolvedor do controlador faz com que o erro de regime possua valores mais próximos do zero que os centros das funções de pertinência. O valor de cada regra deve ser determinado de maneira que não ocorra saturação do controlador e também deve haver uma transição suave entre o uso das regras.

Baseado na experiência utilizando esse tipo de controlador para esse tipo de sistema e a finalidade de sua seleção, foram utilizados seis regras, escolhidas arbitrariamente, relacionadas a seis conjuntos fuzzy \tilde{X}_r e distribuídas no espaço do erro da posição \tilde{x} , e com os valores centrais de cada conjunto distribuídos em $C = \{0,05; 0,005; 0,001; -0,001; 0,005; 0,05\}$, a distribuição das funções de pertinência são apresentadas na Fig. 4. Os tipos das funções de pertinência associadas as duas regras mais externas do universo de discurso são de forma trapezoidal, enquanto as demais funções de pertinência são do tipo triangular. O vetor de regras das regras difusas utilizado foi $\mathbf{U} = [10,0, 5,0, 2,0, -2,0, -5,0, -10,0]$.

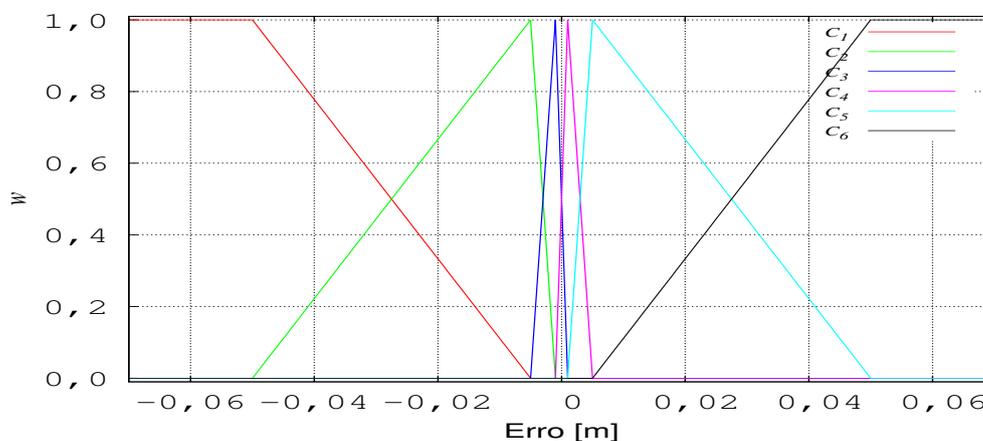


Figura 4: Universo de discurso com funções de pertinência fuzzy.

Em cada iteração do sistema simulado, de acordo com o erro (\tilde{x}), é calculado o esforço de controle, que é enviado ao atuador sob a forma de tensão, que no caso do problema em questão está numa faixa de -10 V a 10 V. Ficando o esforço de controle saturado nessa faixa de tensão. O curso máximo do atuador é de 200mm, consequentemente, o erro máximo e mínimo admissíveis são, respectivamente, 200mm e -200mm.

Os parâmetros adotados para o sistema eletro-hidráulico simulado foram $P_s = 7MPa$, $\rho = 850kg/cm^3$, $C_d = 0,6$, $w = 2,5 \times 10^{-2}$, $A_p = 3 \times 10^{-4}m^2$, $C_{tp} = 2 \times 10^{-12}m^3/(sPA)$, $\beta_e = 700MPa$, $V_t = 6 \times 10^{-5}m^3$, $M_t = 250kg$, $B_t = 0Ns/m$, $K_s = 0N/m$, $\delta_l = -1,5V$ e $\delta_r = 1,5V$. O modelo do sistema foi desenvolvido para uma aplicação genérica, porém na sua aplicação de avaliação experimental abordada nesse trabalho foi utilizado um carregamento constante, para isso foram utilizados como nulos o amortecimento e a rigidez da mola, que representam um carregamento variável na modelagem.

A Fig. 5 apresenta o desempenho do controlador para o rastreamento de uma trajetória senoidal, representada por $x_d = 0,05 \sin(0,1t)m$. O uso dessa trajetória se deve à simplicidade do controlador empregado, sendo um pouco limitado quando aplicado à sistemas com elevado grau de incerteza.

Pode-se observar na Fig. 5 que o controlador fuzzy foi capaz de rastrear a trajetória proposta com um pequeno erro associado.

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONTROLADOR FUZZY

A simulação numérica já consagrou-se como a principal ferramenta de apoio à investigação do comportamento de sistemas dinâmicos. No entanto, deve-se ressaltar que para viabilizar o desenvolvimento de estratégias efetivas de controle, torna-se necessária também a avaliação experimental das metodologias propostas.

Neste trabalho, utilizou-se como plataforma experimental um sistema eletro-hidráulico composto por: (1) Unidade de energia hidráulica, a qual é constituída de um reservatório de fluido hidráulico, bomba, manômetro, e algumas conexões de engate rápido, sedo 4 tomadas de pressão, 4 drenos e 4 de retorno de fluido para o reservatório; (2) Servoválvula proporcional de quatro vias e três posições, também com os mesmos engates rápidos em suas conexões, e tensão de alimentação entre -10V e +10V; (3) Cartão de amplificação, o qual tem a função de receber o sinal de tensão e transformá-

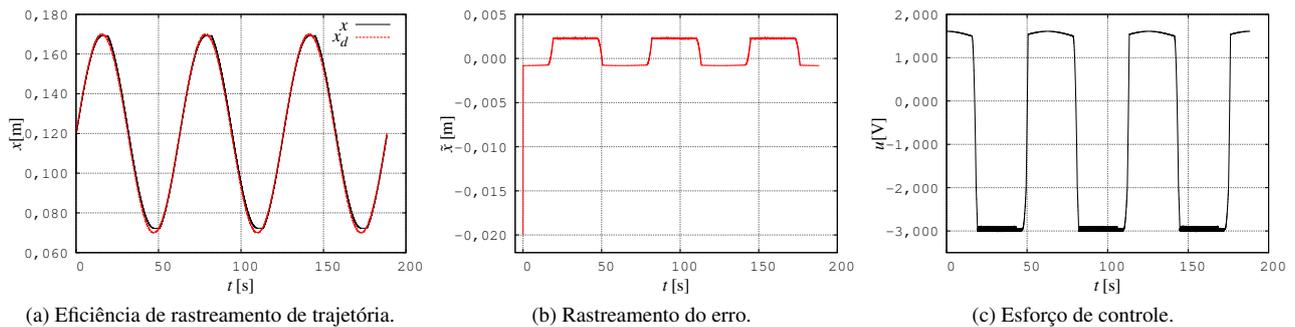


Figura 5: Resultados para sistema eletro-hidráulico simulado rastreamento trajetória senoidal.

lo em um sinal se corrente, adequado para a atuação das bobinas da eletroválvula; (4) Cilindro hidráulico de dupla atuação com curso de 200mm, e também com engates rápidos; (5) Potenciômetro linear, também com um curso de 220mm, e que entrega uma sinal de tensão com um range de 0 a 10V, o qual é utilizado para a leitura de posição do atuador; (6) Fonte de tensão contínua de 24V. Além destes equipamentos conta-se ainda com manguerias hidráulicas flexíveis com engates rápidos e cabos para as ligações elétricas. Todos esses equipamentos são da linha didática da FESTO. Na Fig. 6 apresenta-se a plataforma experimental utilizada, com todos os componentes mencionados acima.



Figura 6: Planta em operação.

Além dos dispositivos eletromecânicos citados anteriormente, o sistema de aquisição de dados é composto por uma placa da empresa ADVANTECH, modelo USB4711. Esta placa apresenta diversos recursos, dentre eles estão, 8 entradas e saídas digitais, 16 entradas analógicas e 2 saídas analógicas com resolução de 12bit. Os sinais de tensão provenientes do sensor de posição (potenciômetro linear) são lidos pela a placa de aquisição, que os convertem de sinal analógico para digital, e então são enviados para o computador usando uma porta USB.

4.1 Resultados experimentais

O mesmo controlador utilizado na simulação computacional é agora aplicado à planta experimental, de modo a validar o desempenho previamente observado a partir dos resultados numéricos. O controlador foi novamente implementado em C++ e utilizou-se os dados recebidos pelo potenciômetro que são sinais de tensão, correspondentes a uma determinada posição do atuador. Essa posição foi comparada com a posição desejada (referência), retornando o valor do erro (\tilde{x}) para o controlador fuzzy, já mencionado anteriormente. Os parâmetros do controlador foram os mesmos utilizados na simulação. Na Fig. 7 estão representados os dados experimentais do controle da planta eletro-hidráulica.

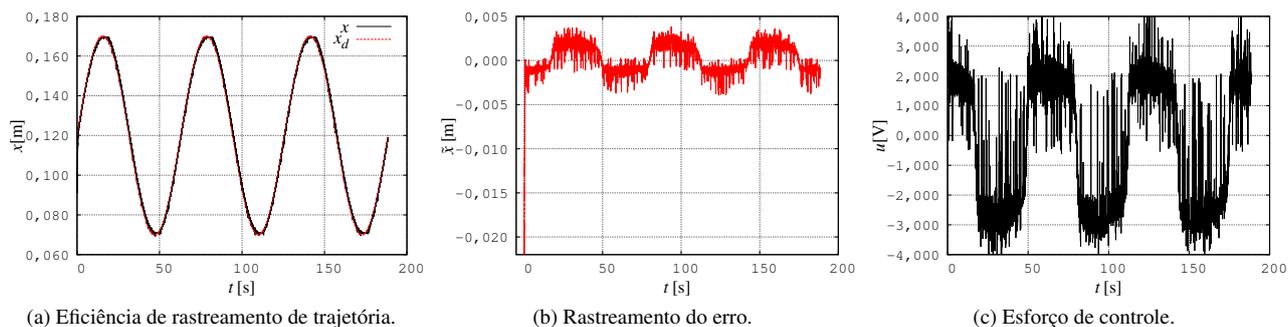


Figura 7: Resultados para sistema eletro-hidráulico experimental rastreando trajetória senoidal.

Pode-se observar nos resultados experimentais apresentados na Fig. 7 que o controlador fuzzy também foi capaz de rastrear a trajetória proposta, apresentando um bom desempenho e um pequeno erro associado. Não foi observado saturação do controlador, de maneira que a saturação ocorre em +10V ou -10V.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo utilizou-se a lógica fuzzy, mediante a implementação de um sistema de inferência Takagi–Sugeno–Kang de ordem zero (TSK-0), no desenvolvimento de um controlador para um atuador eletro-hidráulico. Em uma primeira etapa, com base em um modelo matemático para o sistema eletro-hidráulico, o controlador proposto foi então avaliado através de simulações computacionais. Esta etapa teve como objetivo principal a calibração do controlador para a etapa seguinte: a avaliação experimental. O controlador também pode ser calibrado diretamente na planta experimental, sabendo que os parâmetros fuzzy serão utilizados na comparação do erro da posição com sua base de regras fuzzy. A plataforma experimental utilizada foi descrita em detalhes e o controlador fuzzy pode ser avaliado com base em procedimentos experimentais. A partir dos resultados obtidos, tanto numericamente quanto experimentalmente, pôde-se verificar o desempenho satisfatório do controlador, apresentando apenas um pequeno erro de rastreamento em ambas as situações. Deve-se ainda ressaltar que o modelo matemático foi empregado apenas na construção do simulador utilizado na avaliação numérica, não sendo necessário ao desenvolvimento do controlador em si. Deste modo, como principais vantagens do controlador utilizado deve-se destacar, além da sua relativa simplicidade, o fato de não ser necessário o conhecimento do modelo matemático para a elaboração da lei de controle, visto que no controlador experimental não é utilizado nenhum parâmetro do modelo. Esta característica o torna um forte candidato a ser utilizado em aplicações industriais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer à Coodenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD) e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo 14 (PRH-14 ANP) pelo apoio e financiamento.

7. REFERÊNCIAS

- Bessa, W.M., Dutra, M.S. e Kreuzer, E., 2010a. “An adaptive fuzzy dead-zone compensation scheme and its application to electro-hydraulic systems”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 1–7.
- Bessa, W.M., Dutra, M.S. e Kreuzer, E., 2010b. “Sliding mode control with adaptive fuzzy dead-zone compensation of an electro-hydraulic servo-system”. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 58, No. 1, pp. 3–16.
- Bonchis, A., Corke, P.I., Rye, D.C. e Ha, Q.P., 2001. “Variable structure methods in hydraulic servo systems control”. *Automatica*, Vol. 37, pp. 589–895.
- Branco, P.J.C. e Dente, J.A., 2000a. “On using fuzzy logic to integrate learning mechanisms in an electro-hydraulic system – Part I: Actuator’s fuzzy modeling”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part C*, Vol. 30, No. 3, pp. 305–316.
- Branco, P.J.C. e Dente, J.A., 2000b. “On using fuzzy logic to integrate learning mechanisms in an electro-hydraulic system – Part II: Actuator’s position control”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part C*, Vol. 30, No. 3, pp. 317–328.
- Cunha, M.A.B., Guenther, R., De Pieri, E.R. e De Negri, V.J., 2002. “Design of cascade controllers for a hydraulic actuator”. *International Journal of Fluid Power*, Vol. 3, No. 2, pp. 35–46.
- Guan, C. e Pan, S., 2008a. “Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters”. *Control Engineering Practice*, Vol. 16, pp. 1275–1284.
- Guan, C. e Pan, S., 2008b. “Nonlinear adaptive robust control of single-rod electro-hydraulic actuator with unknown nonlinear parameters”. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 434–445.

- Jang, J.S.R. e Sun, C.T., 1993. “Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems”. *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 4, No. 1, pp. 156–159.
- Jang, J.S.R., Sun, C.T. e Mizutani, E., 1997. *Neuro Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall, New Jersey.
- Knohl, T. e Unbehauen, H., 2000. “Adaptive position control of electrohydraulic servo systems using ANN”. *Mechatronics*, Vol. 10, pp. 127–143.
- Liu, G.P. e Daley, S., 2000. “Optimal-tuning nonlinear PID control of hydraulic systems”. *Control Engineering Practice*, Vol. 8, pp. 1045–1053.
- Liu, Y. e Handroos, H., 1999. “Sliding mode control for a class of hydraulic position servo”. *Mechatronics*, Vol. 9, pp. 111–123.
- Merritt, H.E., 1967. *Hydraulic Control Systems*. John Wiley & Sons, New York.
- Mihajlov, M., Nikolić, V. e Antić, D., 2002. “Position control of an electro-hydraulic servo system using sliding mode control enhanced by fuzzy PI controller”. *Facta Universitatis (Mechanical Engineering)*, Vol. 1, No. 9, pp. 1217–1230.
- Valdiero, A.C., Guenther, R., De Pieri, E.R. e De Negri, V.J., 2007. “Cascade control of hydraulically driven manipulators with friction compensation”. *International Journal of Fluid Power*, Vol. 8, No. 1, pp. 7–16.
- Yanada, H. e Furuta, K., 2007. “Adaptive control of an electrohydraulic servo system utilizing online estimate of its natural frequency”. *Mechatronics*, Vol. 17, pp. 337–343.
- Yao, B., Bu, F., Reedy, J. e Chiu, G.T.C., 2000. “Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: Theory and experiments”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 79–91.
- Zadeh, L.A., 1965. “Fuzzy sets”. *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338–353.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A FUZZY CONTROLLER AND ITS APPLICATION TO AN ELECTRO-HYDRAULIC SYSTEM

Jorge Luiz Matias de Lima, jorge.tek@gmail.com¹

George Oliveira de Araújo Azevedo, georgeazevedo@gmail.com¹

João Deodato Batista dos Santos, joaodeodato3@gmail.com¹

Wallace Moreira Bessa, wmbessa@ct.ufrn.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil

Abstract: *Electro-hydraulic servo-systems are widely employed in industrial applications such as robotic manipulators, active suspensions, precision machine tools and aerospace systems. They provide many advantages over electric motors, including high force to weight ratio, fast response time and compact size. However, precise control of electro-hydraulic systems, due to their inherent nonlinear characteristics, cannot be easily obtained with conventional linear controllers. Most flow control valves can also exhibit some hard nonlinearities such as dead-zone due to valve spool overlap. This work describes the development of a fuzzy controller for an electro-hydraulic system. Numerical and experimental results are presented in order to demonstrate the control system performance.*

Keywords: *Dead-zone, Electro-hydraulic systems, Feedback linearization, Fuzzy logic, deadzone.*