III CONGRESSO INTERNACIONAL DE GESTÃO E TECNOLOGIAS COINTER - PDVGT 2019

CONTROLE DE POSIÇÃO FUZZY APLICADO A ROBÔ CARTESIANO ELETROPNEUMÁTICO

CONTROL DE POSICION FUZZY APLICADO AL ROBOT CARTESIANO ELECTROPNEUMATICO

FUZZY POSITION CONTROL APPLIED TO ELECTROPNEUMATIC CARTESIAN ROBOT

Apresentação: Comunicação Oral

Asafe dos Santos Silva¹; José Lucas Moreira Cavalcanti de Abreu²; Acarcio Gomes de Almeida Junior³ João Manoel Freitas Souza⁴; Alexander Patrick Chaves de Sena⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/2358-9728.VICOINTERPDVG.2019.0011>

Resumo

Este trabalho apresenta desenvolvimento de um controlador Fuzzy tipo Mamdani para o posicionamento XY de um robô cartesiano eletropneumático. O conjunto é composto basicamente por três válvulas eletropneumáticas proporcionais e três cilindros pneumáticos, cada um com uma régua potenciométrica para realimentação do controlador em malha fechada. Para interface do computador com as válvulas e réguas potenciométricas foi utilizado o módulo de aquisição de dados NI USB-6289. O software LabVIEW[®] foi empregado para o desenvolvimento do controlador e o Matlab[®] para analisar e apresentar os resultados experimentais. Sinais de referência do tipo degrau foram utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de controle. Os resultados demonstraram que a metodologia utilizada obteve bons índices de desempenho com um erro máximo de 6,2% no posicionamento do eixo X e de 1,5% no posicionamento do eixo Y.

Palavras-Chave: controle de posição, atuadores eletropneumáticos, válvulas proporcionais, manipulador cartesiano, lógica fuzzy.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un controlador Mamdani Fuzzy para el posicionamiento XY de un robot cartesiano electroneumático. El conjunto está compuesto básicamente por tres válvulas electroneumáticas proporcionales y tres cilindros neumáticos, cada uno con una regla

¹ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, asafesilva01@gmail.com

² Técnico em Mecatrônica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, josedeadbreu83@gmail.com

³ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, acarciojunior@gmail.com

⁴ Técnico em Mecatrônica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, josouza749@gmail.com

⁵ Doutor, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

potenciométrica para la retroalimentación del controlador de circuito cerrado. Para la interfaz de la computadora con válvulas y reglas potenciométricas, se utilizó el módulo de adquisición de datos NI USB-6289. El software LabVIEW® se utilizó para el desarrollo del controlador y Matlab® para analizar y presentar resultados experimentales. Se utilizaron señales de referencia de tipo de paso para evaluar el rendimiento del sistema de control. Los resultados mostraron que la metodología utilizada obtuvo buenos índices de rendimiento con un error máximo de 6,2% en el posicionamiento del eje X y 1,5% en el posicionamiento del eje Y.

Palabras Clave: control de posición, actuadores electroneumáticos, válvulas proporcionales, manipulador cartesiano, lógica difusa.

Abstract

This work presents the development of a Mamdani Fuzzy controller for the XY positioning of an electropneumatic Cartesian robot. The set is basically composed of three proportional electropneumatic valves and three pneumatic cylinders, each with a potentiometric ruler for closed loop controller feedback. For computer interface with potentiometric valves and rulers, the NI USB-6289 data acquisition module was used. LabVIEW® software was used for controller development and Matlab® to analyze and present experimental results. Step type reference signals were used to evaluate the performance of the control system. The results showed that the methodology used obtained good performance indexes with a maximum error of 6,2% in X axis positioning and 1,5% in Y axis positioning.

Keywords: position control, electropneumatic actuators, proportional valves, cartesian manipulator, fuzzy logic.

Introdução

Os sistemas eletropneumáticos têm sido constantemente utilizados em processos industriais por apresentarem uma boa relação de força, velocidade e aceleração, além de apresentarem baixo custo de manutenção (VALE, 2011). Nas válvulas proporcionais o fluxo magnético é produzido por eletroímãs, que são bobinas percorridas por correntes, no qual é possível variar sua intensidade e direção, ficando o condutor submetido à força de intensidade e direção variada, possibilitando infinitas posições de aberturas (VALE, 2011). Os sistemas eletropneumáticos apresentam não-linearidades ocasionadas pela compressibilidade do ar e pelo atrito entre os pistões e cilindros, que dificultam a aplicação de controladores que requerem modelos matemáticos concisos. Neste sentido, a comunidade acadêmica têm se motivado a idealizar estratégias modernas, tais como as preditivas e inteligentes, para o controle de máquinas acionadas por estes atuadores.

O controle fuzzy pertence ao grupo dos controladores baseados em inteligência artificial (I.A.) por representar um novo paradigma dentro da engenharia de controle, baseado em transferência do conhecimento sobre um problema. Ao contrário dos controladores clássicos, o controlador fuzzy dispensa o conhecimento do modelo matemático da planta a ser controlada (XAVIER FILHO, 2008). O controle fuzzy tem a capacidade de considerar vários critérios de desempenho simultaneamente, tanto na forma matemática como na forma linguística. Segundo Campos e Saito (2004), os objetivos destes controladores são: 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 e 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.

Os estudos para o desenvolvimento e implementação de robôs pneumáticos são temas de diversos trabalhos, tais como Richardson et al. (2005), Andrighetto et al. (2005) que projetaram e desenvolveram robôs pneumáticos com juntas rotacionais e Yang et al. (2005), Samhoury et al. (2005), Oliveira (2007), Souza (2010), Riul et al. (2010), Vale (2011) e Ferreira (2016) que projetaram e desenvolveram robôs pneumáticos com juntas prismáticas.

Em atendimento à necessidade de realização de novas pesquisas que envolvam o controle de posição de atuadores eletropneumáticos, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados da implementação de um controlador de posição baseado em lógica fuzzy para um robô cartesiano eletropneumático XY.

Fundamentação Teórica

A literatura classifica os sistemas fuzzy considerando as características do método de tomada de decisão que eles empregam. Nos modelos linguísticos as equações diferenciais, que normalmente caracterizam os sistemas dinâmicos, são substituídas por um conjunto de regras cuja construção abrange predicados e, muitas vezes, conhecimentos heurísticos. O método de inferência determina a forma operacional do modelo linguístico. Um dos métodos mais divulgados, pela sua simplicidade e por se adaptar muito bem aos controladores fuzzy, é

o método de Mamdani (ORTEGA, 2001), que tem como base a regra de composição de inferência max-min. Este método considera uma função de pertinência na saída com certo perfil, de modo que uma saída dita defuzzyficada pode ser obtida por meio das propriedades de área das saídas agregadas de todas as regras (FUJIMOTO, 2005).

De acordo com Simões e Shaw (2007) pode-se construir um sistema fuzzy Mamdani utilizando os seguintes blocos básicos: fuzzyficação, base de regras, tomada de decisões e defuzzyficação. Na Fig. (1) é apresentada a estrutura de um sistema de inferência fuzzy.

Fonte: Própria (2019)

Uma variável linguística x no universo de discurso X é definida em um conjunto de termos, nomes ou rótulos, $A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\}$, com cada valor sendo um número fuzzy definido em X (SIMÕES e SHAW, 2007). Um universo de discurso é um conjunto de valores finitos que a variável linguística pode assumir. A função de pertinência, $\mu_A(x)$, associa a um dado componente do universo de discurso, o seu respectivo grau de pertinência a um determinado conjunto fuzzy.

A função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada em que se atribuem valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável, em um universo de discurso. Essas funções representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de um sistema fuzzy (SIMÕES e SHAW, 2007). Para aplicações de controle e modelagem utilizando a filosofia fuzzy, as mais conhecidas funções são as de pertinência quadrática, linear por partes (triangular ou trapezoidal), gaussiana e sino. As funções lineares por partes são as mais populares devido à simplicidade e ao fato de que o custo computacional adicional exigido pelos outros tipos de função não refletem, em geral, em uma melhoria significativa na qualidade dos valores de saída dos sistemas (YEN e LANGARI, 1999).

A lógica fuzzy, de maneira análoga à lógica clássica, pode ser descrita em termos de orações que relacionam causa e consequência, normalmente expressas na forma (*if<antecedente>then<consequente>*) denominadas regras de inferências. O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas (mesmo parcialmente), determinam o processamento do consequente da regra por um mecanismo de inferência fuzzy, processo este denominado disparo de uma regra. As regras de controle difusas são declarativas, e não sequenciais, de forma que a ordem em que se expressam não é importante. De modo análogo à lógica clássica, na lógica fuzzy existem os operadores de conjunto união, intersecção e complemento; ou na nomenclatura booleana, *ou* (*or*), *e* (*and*) e *negação* (*not*), respectivamente. O análogo ao operador *and* na lógica fuzzy é conhecido como *T-norm*, e o análogo ao operador *or* como *S-norm* ou *T-conorm*. Existem diversas funções que são utilizadas para estes operadores, tais como: Zadeh, Mean, Yager, Zysno, e Dubois. As mais utilizadas são às funções de *máximo* e de *mínimo* (Zadeh) para os operadores *or* e *and*, respectivamente (FUJIMOTO, 2005), onde dados os conjuntos fuzzy *A* e *B* de *X*, a união e a intersecção são conjuntos fuzzy com funções de pertinência definidas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$\mu_{(A \cup B)}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \forall x \in X \quad (1)$$

$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \forall x \in X \quad (2)$$

Semelhantemente, para operação complemento existem diversas variações tais como: Zadeh, Yager e threshold, sendo a mais utilizada a definição de Zadek (FUJIMOTO, 2005) da Eq. (3).

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in X \quad (3)$$

Existem diversos tipos de inferência para relacionar as entradas e saídas do conjunto de regras. Eles diferem pelo tipo de operador utilizado e pelos tipos de antecedentes e consequentes. As regras podem ser constituídas por uma única entrada e uma única saída (SISO) ou múltiplas saídas (SIMO), bem como, por múltiplas entradas e uma única saída (MISO) ou múltiplas saídas (MIMO). Uma regra de inferência tipo MISO pode ser representada pela sintaxe *Se x é A e/ou y não é B e/ou... ..w é F então u é G*.

O operador *then* (*então*) define a implicação de cada regra sobre uma dada variável linguística da saída, podendo ser definido pela função mínimo da Eq. (4).

$$\mu_{CFR}[x_i] \leftarrow \min(\mu_{PT}, \mu_{CFS}[x_i]) \quad (4)$$

Onde μ_{CFR} é a função de pertinência de saída da regra de inferência após aplicação do operador, μ_{PT} é o grau de veracidade da oração antecedente da regra de inferência e μ_{CFS} é a função de pertinência da oração consequente (FUJIMOTO, 2005).

O operador de agregação de regras une a influência de todas as regras obtidas após aplicação do operador *then* sobre o resultado final, apresentando a consequência do sistema como um todo devido às entradas do sistema fuzzy. Este operador pode ser definido pela função máximo da Eq. (5).

$$\mu_{CFF}[x_i] \leftarrow \max_{j=1}^n (\mu_{CFR_j}[x_i]) \quad (5)$$

De acordo com Osiro (2013) os métodos de defuzzyficação podem ser classificados em duas aplicações práticas distintas: melhor compromisso (centro de área e centro do máximo) e resultado mais plausível (média do máximo).

O método de defuzzyficação da Média do Máximo (MoM) calcula a média de todos os valores de saída que tenham os maiores graus de possibilidade. A Eq. (6) determina a média do máximo, sendo M a quantidade de pontos com o mesmo valor máximo de $\mu_C(z)$ e z_k são os valores correspondentes de z onde $\mu_C(z)$ tem valor máximo (YAGER e FILEV, 1993).

$$MoM = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M z_k \quad (6)$$

A principal limitação do método MoM é que ele não considera a forma total do conjunto fuzzy de saída. Sendo assim, duas distribuições de possibilidades que apresentem diferentes formas, porém o mesmo conjunto de valores com grau de pertinência máximo, quando defuzzyficados fornecerá o mesmo valor clássico, o que é contra intuitivo (ORTEGA, 2001).

No método de centro de área (CoA) também denominado método do centro de gravidade (CoG) ou ainda centróide, a partir da área na variável de saída, obtida pela agregação dos consequentes de todas as regras. Diferentemente do MoM, a técnica do Centro de Área para calcular o valor clássico representativo considera toda a distribuição de possibilidade de saída do modelo. O procedimento é similar ao usado para calcular o centro de gravidade em física, se consideramos a função de pertinência $\mu_C(z)$ como a densidade de

massa de z . Por outro lado, o método do Centro de Área pode ser compreendido como uma média ponderada, onde $\mu_C(z)$ funciona como o peso do valor z . Se z é discreto, então a defuzzificação da conclusão fuzzy C é dada por:

$$\text{CoA} = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_C(z_k) \cdot z_k}{\sum_{k=1}^N \mu_C(z_k)} \quad (7)$$

A variável N é a quantidade de funções de pertinência da variável de saída.

Esse tipo de defuzzificação além de necessitar de um considerável esforço computacional, apresenta limitações quando aplicada em um processo no qual as funções de pertinência não possuem sobreposição ou quando mais de uma regra possuir a mesma saída fuzzy, o que caracteriza uma sobreposição de área (ORTEGA, 2001). O método denominado de centro do máximo (CoM) apresenta um cálculo mais simples ao ignorar as áreas das funções de pertinência ao considerar apenas seus respectivos picos (OSIRO, 2013).

Metodologia

A bancada de testes apresentada na Fig. (2) é composta por: um robô manipulador eletropneumático (1), uma fonte chaveada de 24VCC/15A (2), um módulo de aquisição de dados NI USB-6289 (3), fabricada pela National Instruments®, um computador com o software Labview® (4) e um regulador de pressão ajustado para 6 bar (5). O robô manipulador eletropneumático é composto por três elos, um que movimenta o eixo X e dois que movimentam o eixo Y. Esse robô é, portanto, cartesiano e possui três juntas prismáticas, resultando num movimento composto de duas translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de referência cartesiano XY. Desta forma os modelos dos elos são desacoplados.

O sistema funciona da seguinte forma: o compressor fornece ar comprimido ao regulador de pressão, que distribui para as válvulas eletropneumáticas proporcionais (FESTO® 5/2 vias da série MPYE) de tensão de 24VCC e sinais analógicos de controle em tensão de 0 a 10VCC, que acionam os cilindros pneumáticos de dupla ação e haste simples (FESTO® série DGPL geração B de 25/450mm), dando o movimento ao órgão efetuator. Ambos os eixos, X e Y, possuem 450mm de curso e atingem velocidades máximas de aproximadamente 400 mm/s (com pressão regulada em 6 bar).

Figura 2: Bancada de testes do robô eletropneumático.

Fonte: Própria (2019)

Os controladores fuzzy foram implementados utilizando o *toolkit* de lógica fuzzy disponível no software Labview®. Em conformidade com os princípios de controle fuzzy de serem baseados na experiência de operadores humanos e em padrões de raciocínio, o modelamento dos controladores dos eixos X e Y foram realizados a partir de um estudo experimental prévio do comportamento desejado para os regimes transitório e permanente.

A modelagem das funções de pertinência e regras fuzzy foi baseada, inicialmente, nas sugestões de Simões e Shaw (2007) e Júlio (2010), e posteriormente adaptadas a partir do conhecimento adquirido do comportamento da máquina nos ensaios realizados. Após estes testes realizados, foi possível identificar quatro comportamentos distintos dos atuadores dentro do *range* do sinal de controle ($[-100, 100] \%$ ou $[0, 10] \text{ VCC}$). Existia uma zona morta, onde valores de tensão não causavam deslocamento da base; uma zona que ocorriam deslocamentos em saltos; outra, que mudanças nos valores de tensão produziam mudanças de velocidade proporcionais; e após certo valor não ocorriam mais variações na velocidade do atuador. Neste sentido, as funções de pertinência de entrada e saída foram modeladas para conseguir controlar o atuador mesmo com essas características desfavoráveis.

No bloco de fuzzificação foi criada uma variável linguística denominada *Erro*, que representa o desvio entre o sinal de entrada (valor desejado de posição) e o sinal de realimentação (posição atual do atuador). O universo de discurso da variável *Erro* abrange o intervalo $[-400, 400]$, representando os valores máximos de erro, em milímetros, que o sistema pode apresentar devido aos freios mecânicos localizados nas extremidades do curso. A variável *Erro* foi composta por cinco funções de pertinência com os termos linguísticos denominados: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeno (NP), Quase Zero (QZ), Positivo Pequeno (PP) e Positivo Grande (PG). Para a variável QZ foi utilizada uma função do tipo triangular e para as demais foram utilizadas funções sigmóides, visando tornar a resposta da máquina mais suave.

Na defuzzificação foi criada uma variável linguística denominada *Saída*, que representa o sinal de controle que atuará na válvula eletropneumática. O universo de discurso desta variável abrange o intervalo $[-100, 100]$ que corresponde a um valor percentual da abertura da válvula, que posteriormente deve ser convertido para os valores de tensão de 0 a 10VCC. Para a variável *Saída*, foram associadas cinco funções de pertinência, definidas pelos termos NG, NP, Zero (Z), PP e PG. Para estas, utilizou-se funções do tipo *singleton*. Para este trabalho foi utilizado o método de defuzzificação de centro do máximo (CoM).

A variável linguística de entrada dos controladores dos eixos X e Y com suas funções de pertinência e termos linguísticos correspondentes são apresentadas na Fig. (3). As variáveis linguísticas de saída dos controladores dos eixos X e Y são apresentadas nas Fig. (4) e (5), respectivamente. Na Tab. (1) são apresentados os parâmetros de cada função de pertinência.

Figura 3: Funções de pertinência da variável de entrada dos controladores dos eixos X e Y.

Fonte: Própria (2019)

Figura 4: Funções de pertinência da variável de saída do controlador do eixo X.

Fonte: Própria (2019)

Figura 5: Funções de pertinência da variável de saída do controlador do eixo Y.

Fonte: Própria (2019)

Tabela 1: Parâmetros das funções de pertinência dos controladores fuzzy.

Variável	Controlador Eixo X		Controlador Eixo y	
Erro	NG (<i>sigmóide</i>)	[-400, -400, -75, -12]	NG (<i>sigmóide</i>)	[-400, -400, -75, -12]
	NP (<i>sigmóide</i>)	[-50, -25, -10, -9]	NP (<i>sigmóide</i>)	[-50, -25, -10, -9]
	QZ (<i>triangular</i>)	[-10, 0, 10]	QZ (<i>triangular</i>)	[-10, 0, 10]
	PP (<i>sigmóide</i>)	[9, 10, 25, 50]	PP (<i>sigmóide</i>)	[9, 10, 25, 50]
	PG (<i>sigmóide</i>)	[12, 75, 400, 400]	PG (<i>sigmóide</i>)	[12, 75, 400, 400]
Saída	NG (<i>singleton</i>)	[-100]	NG (<i>singleton</i>)	[-20]
	NP (<i>singleton</i>)	[-7]	NP (<i>singleton</i>)	[-10]
	Z (<i>singleton</i>)	[0]	Z (<i>singleton</i>)	[-5]
	PP (<i>singleton</i>)	[10]	PP (<i>singleton</i>)	[5]
	PG (<i>singleton</i>)	[100]	PG (<i>singleton</i>)	[12]

Fonte: Própria (2019)

As regras dos controladores Fuzzy do tipo SE-ENTÃO, apresentadas na Tab. (2), foram elaboradas de acordo com o conhecimento do funcionamento do sistema. A mesma base de regras foi usada para os controladores dos eixos X e Y.

Tabela 2: Tabela de regras fuzzy dos controladores fuzzy.

se <i>ERRO</i> = NG então <i>SAÍDA</i> = NG
se <i>ERRO</i> = NP então <i>SAÍDA</i> = NP
se <i>ERRO</i> = QZ então <i>SAÍDA</i> = Z
se <i>ERRO</i> = PP então <i>SAÍDA</i> = PP
se <i>ERRO</i> = PG então <i>SAÍDA</i> = PG

Fonte: Própria (2019)

Existem duas regiões críticas que os atuadores apresentam zona morta e de deslocamentos em saltos, impossibilitando deslocamentos controlados. Neste sentido, identificou-se a distância de 10 mm como sendo o deslocamento mínimo que a base consegue se mover de forma mais precisa. Por este motivo, adotou-se que erros de até 10 mm em relação ao valor de referência são aceitáveis para o controlador.

Resultados e Discussão

A fim de testar os controladores as bases correspondentes aos eixos X e Y foram submetidas, simultaneamente, a um sinal tipo degrau, em loop, com três valores de referência distintos em intervalos de aproximadamente 1,1 segundos. Os gráficos da resposta ao degrau das bases X e Y são apresentados numa janela de tempo de 2,0 a 5,5 segundos.

Inicialmente, a base X foi posicionada em 200 mm, e então foi inserido um valor de referência de 350 mm nos controladores. Após 1,1 segundos, esse valor foi alterado para 100 mm, e posteriormente retornado para os 200 mm iniciais. Na Fig. (8) são apresentadas as curvas de resposta da base X (posição) e do sinal de referência (*setpoint*). As respostas temporais do erro de posicionamento e da variável de controle da base X são apresentadas na Fig. (9) e na Fig. (10), respectivamente.

Da mesma forma que na base X, foram aplicados os sinais de referência na base Y de 200, 350 e 100 mm em intervalos de 1,1 segundos. O gráfico da Fig. (11) apresenta as curvas

de resposta da base Y (posição) e do sinal de referência (*setpoint*). Também é apresentado o comportamento temporal do erro de posicionamento e da variável de controle nas Fig. (12) e (13), respectivamente.

Figura 8: Curva de resposta ao degrau da base X.

Fonte: Própria (2019)

Figura 9: Curva do erro de posição da base X, para referência degrau.

Fonte: Própria (2019)

Figura 10: Curva da variável de controle da base X, para referência degrau.

Fonte: Própria (2019)

Figura 11: Curva de resposta ao degrau da base Y.

Fonte: Própria (2019)

Figura 12: Curva do erro de posição da base Y, para referência degrau.

Fonte: Própria (2019)

Figura 13: Curva da variável de controle da base Y, para referência degrau.

Fonte: Própria (2019)

Por meio destas curvas, foi possível obter alguns parâmetros das respostas nos regimes transitórios e permanentes, que são importantes para a análise do desempenho do controlador. Na Tab. (3) são apresentados o tempo de subida T_r (tempo necessário para a resposta passar de 10% a 90% do valor de referência), o tempo de atraso T_d (tempo necessário para a resposta atingir pela primeira vez a metade do valor de referência), o tempo de acomodação T_s (tempo

necessário para o sistema alcançar e permanecer dentro de um limite aceitável), o sobressinal M_p (valor percentual máximo da resposta em relação ao sinal de referência) e erro de regime permanente e_{ss} (erro que o sistema apresenta após o tempo de acomodação).

Tabela 3: Índices de desempenho dos controladores, para referência degrau.

Parâmetro analisado	Controlador Eixo X			Controlador Eixo y		
	200 - 350 mm	350 - 100 mm	100 - 200 mm	200 - 350 mm	350 - 100 mm	100 - 200 mm
T_r (s)	0,3	0,5	0,2	0,3	0,6	0,2
T_d (s)	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3
T_s (s)	0,5	0,8	0,6	0,5	0,9	0,5
M_p (%)	2,5	1,2	6,2	0,3	1,2	1,6
e_{ss} (mm)	3,5	3,2	6,2	0,3	3,1	1,5

Fonte: Própria (2019)

Além de outras informações, é possível verificar a partir da Tab. (3) que o sistema apresentou erros de regime permanente dentro do previsto. Há como perceber também que o erro e o sobressinal aumentam na medida em que a distância a ser percorrida diminui, característica essa inerente ao conjunto válvula-cilindros. Entretanto, mesmo com estas particularidades, o resultado do controlador é satisfatório para inúmeras aplicações.

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o controle de posição utilizando lógica fuzzy para as bases correspondentes aos eixos X e Y de um robô cartesiano eletropneumático. Na análise da curva de resposta do sistema e dos dados obtidos a partir desta, foi verificado desempenho satisfatório do controlador, com erro de regime permanente e sobressinal bem abaixo do previsto. A utilização da lógica fuzzy no Labview[®] permitiu a implementação do controlador sem a necessidade de um modelo matemático complexo. O controlador fuzzy desenvolvido mostrou-se bastante eficaz para o posicionamento de atuadores eletropneumáticos, abrindo mais ainda a gama de possibilidades para aplicação deste de tipo sistema. A simplicidade e robustez desses controladores permitiram verificar a eficácia do controle inteligente, apresentando um erro máximo de 6,2% no posicionamento do eixo X e de 1,5% no posicionamento do eixo Y, com velocidades de até 400 mm/s. Como continuação do trabalho,

serão projetados controladores fuzzy para o seguimento de trajetórias pré-definidas, bem como controladores neurais e neuro-fuzzy.

Referências

ANDRIGHETTO, P.L.; VALDIERO, A.C.; CARLOTTO, L. e HARTER, I.I., 2005. Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Acionado Pneumaticamente. **Anais** do IX Seminário de Automação de Processos da ABM, pp. 247-256.

CAMPOS, M.M. e SAITO, K. 2004. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna.

FERREIRA, G.S. Controle PID convencional e GPC adaptativo aplicados em um robô manipulador planar. João Pessoa, 2016. **Dissertação** (Engenharia Mecânica). Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, 2016.

FUJIMOTO, R.Y. Diagnóstico Automático de Defeitos em Rolamentos Baseado em Lógica Fuzzy. **Dissertação** (Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil. 2005.

JÚLIO, É.F.X. Controlador Fuzzy Aplicado a Um Sistema de Controle de Posição Acionado por Motores de Indução Trifásicos. **Dissertação** (Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa-PB, Brasil. 2010.

OLIVEIRA, M.F. Projeto de um Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático. **Dissertação** (Engenharia Mecânica), UFRS, Porto Alegre – RS, Brasil. 2007.

ORTEGA, N.R.S. Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina. **Tese** (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil. 2001.

OSIRO, L. Uso da Lógica Fuzzy para Avaliação e Desenvolvimento de Fornecedores Baseado em Modelos de Portfólio. **Tese** (Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil. 2013.

RICHARDSON, R.; BROWN, M.D; BHAKTA, B e LEVESLEY, M., 2005. Impedance Control for a Pneumatic Robot Based Around Pole-placement, Joint Space Controllers. **Control Engineering Practice**, vol. 13, n. 3, pp. 291-303.

RIUL, J. A.; VALE, F.A. e MONTENEGRO, P.H.M. Controlador Adaptativo Aplicado em um Robô Manipulador Eletropneumático de Três GDL Cartesiano. **Anais** do Nono Simpósio de Mecânica Computacional, São João Del-Rei, MG, Brasil. 2010.

SAMHOURI, M.; RAOUFI, A. e SURGENOR, B., 2005. Control of a Pneumatic Gantry Robot for Grinding: A Neuro-fuzzy Approach to PID Tuning. **IEEE Conference on Control Applications**, Toronto, Ontário.

SIMÕES, M.G. e SHAW, I.S., 2007. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Editora Blucher, 2ª ed. São Paulo.

SOUZA, O.B. Controle Adaptativo Aplicado em Dois Elos de um Robô Manipulador Eletropneumático de Três Graus de Liberdade Cartesiano. **Dissertação** (Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa – PB, Brasil. 2010.

VALE, V.A.C., 2011. Controle de Posição de um Robô Cartesiano por Meio de Técnicas Adaptativas. **Dissertação** (Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa – PB, Brasil.

XAVIER FILHO, A.F. Controlador Fuzzy Aplicado a Um Sistema de Controle de Posição. **Dissertação** (Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa – PB, Brasil. 2008.

YAGER R. e FILEV, D., 1993. Slide: A Simple Adaptive Defuzzification Method. **Ieee Transaction On Fuzzy Systems**, v. 1, n. 1, pp.69-78.

YANG, Y-Z; WU, C-Y e HU, X-D., 2005. Study of Web-based Integration of Pneumatic Manipulator and its Vision Positioning. **Journal of Zhejiang University**, Science A, vol. 6, n. 6, pp. 543-548.

YEN, J. e LANGARI, R., 1999. **Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information**. Prentice Hall, EUA.