

# IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE FUZZY DE POSIÇÃO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

GABRIELA L. REIS, LUIS F. F. SOUZA, FELIPE C. T. CARVALHO, JEAN A. S. CARVALHO,  
ANA P. L. SANTOS, VICTOR C. FARIA, MÁRCIO F. S. BARROSO, EDUARDO B. PEREIRA

*Laboratório de Estudos em Controle e Modelagem, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei*

*Caixa Postal 110, 36307-352, São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil*

*E-mails: gabireis10@yahoo.com.br, lnandoffs@hotmail.com, felipecarvalho50@gmail.com, jean\_asc@yahoo.com.br, apsantos87@yahoo.com.br, victorcastro89@hotmail.com, barroso@ufsj.edu.br, ebento@ufsj.edu.br*

**Abstract**— This paper presents the project of a fuzzy controller position for a robotic manipulator with two degrees of freedom, applied to the separation of charges. This is a robot made of rotary joints driven by servo motors, mounted with kit parts LEGO® Mindstorms model. In order to simulate the proposed controller before implementation in the manipulator, the dynamic modeling of the system was obtained through system identification. Experimental results are also presented, which show that the robot is able to achieve the desired positions to carry out the proposed task with a quite small error.

**Keywords**— Fuzzy Control, Position Control, Robotic Manipulator, System Identification.

**Resumo**— Este trabalho apresenta o projeto de um controlador fuzzy de posição para um manipulador robótico com dois graus de liberdade, aplicado à separação de cargas. Trata-se de um robô constituído de juntas rotativas acionadas por servo-motores, montado com peças do kit LEGO® modelo *Mindstorms*. A fim de simular o controlador proposto antes de sua implementação no manipulador foi feita a modelagem dinâmica por meio da identificação de sistemas. Resultados experimentais também são apresentados, os quais mostram que o robô é capaz de alcançar as posições desejadas para a realização da tarefa proposta com um erro bastante pequeno.

**Palavras-chave**— Controle Fuzzy, Controle de Posição, Manipulador Robótico, Identificação de Sistemas.

## 1 Introdução

A palavra robô considera diversos níveis de sofisticação tecnológica, desde uma máquina simples para a manipulação de materiais até máquinas que realizam tarefas complexas, cujos movimentos são bioinspirados (Garcia et al., 2007). Atualmente, há uma ampla variedade de robôs sendo desenvolvidos nos mais diferentes formatos e destinados às mais diversas aplicações. Entretanto, no ambiente industrial, os robôs no formato humanoide e veículos autônomos são de pouca serventia, sendo mais comum o uso dos chamados manipuladores robóticos.

O manipulador robótico é essencialmente um braço mecânico que opera sob o controle de um computador. Nas décadas de 50 e 60 esses robôs foram introduzidos com a finalidade de substituir o homem na execução de tarefas repetitivas ou perigosas, visando uma melhoria na qualidade, aumento da produtividade e redução dos custos de produção (Lima et al., 2011). Neste cenário, as aplicações típicas incluem fundição, pintura, soldagem, montagem, movimentação de cargas, inspeção de produtos e testes, tudo realizado com uma precisão, velocidade e robustez relativamente elevadas (Tauile, 1986).

Tais dispositivos, embora não sejam como os robôs da ficção científica, são sistemas eletromecânicos extremamente complexos, cuja descrição analítica requer métodos avançados, apresentando muitos problemas de pesquisa desafiadores e interessantes (Spong et al., 2005). Isto porque os manipuladores robóticos são sistemas multivariáveis extremamente

não-lineares e geralmente são objeto de variação de carga, incertezas e perturbações que tornam muito difícil controlá-los (Salem and Khelfi, 2012).

Tendo em vista a melhoria do desempenho dos robôs industriais, muitas técnicas têm sido empregadas na tentativa de solucionar os problemas de controle do movimento de robôs manipuladores, desde as mais tradicionais como o controle PID (Muro-Maldonado et al., 2007), até as mais modernas como o controle por redes neurais (Chen et al. 1996) e o controle por lógica fuzzy (Ahmad et al., 2010), que vêm sendo utilizados nos tempos atuais como alternativa ao controle convencional.

O controle fuzzy foi introduzido e aplicado pela primeira vez na década de 1970 em uma tentativa de projetar controladores para sistemas que são estruturalmente difíceis de modelar (Han-Xiong Li and Gatland, 1996). Desde então, tornou-se uma das áreas de pesquisa mais ativas na teoria dos conjuntos fuzzy, e muitas aplicações práticas para os processos industriais, bem como estudos da própria teoria, têm sido relatados (Kai-Yuan Cai and Lei Zhang, 2008).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o controle de posição de um manipulador robótico com dois graus de liberdade, por meio da aplicação da lógica fuzzy. Além disso, realizou-se a identificação do sistema, visando-se obter um modelo dinâmico do robô proposto, para a realização de simulações antes da aplicação das ações de controle no sistema real. Resultados de testes experimentais no manipulador são apresentados para as condições necessárias e suficientes para a realização da tarefa proposta.

## 2 Propósito

O manipulador robótico utilizado neste trabalho é um robô montado com peças do kit LEGO® modelo *mindstorms*. Tais robôs são compostos de blocos do tipo LEGO®, com unidades de processamento, partes móveis e de instrumentação que podem ser acopladas das mais diversas formas (Ferrari et al., 2002).

Como mostra a Figura 1, este manipulador é formado por três juntas rotacionais que constituem a base, o ombro e o efetuador, além de engrenagens para a obtenção de um maior torque e peças para compor a estrutura do robô. Cada motor ainda contém um *encoder*, que mede sua posição angular em graus. Como é possível notar pela Figura 1, a junta 2 apresenta limitações em sua estrutura, podendo variar apenas entre 45° (pra frente) e -120° (pra trás) a partir da posição observada.

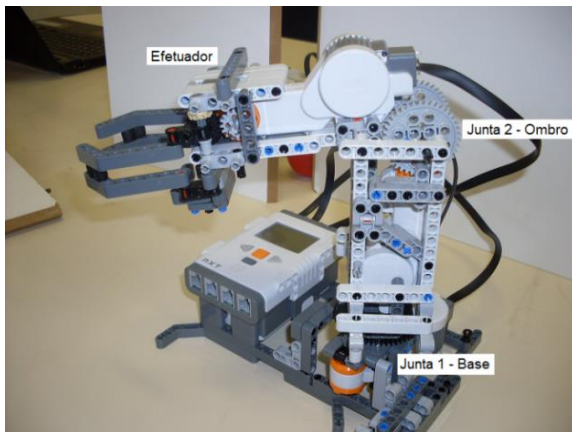


Figura 1. Manipulador robótico com dois graus de liberdade

Com o manipulador robótico montado, sabendo-se previamente de suas limitações, foi possível definir o cenário ao qual ele seria inserido. Desta forma, definiu-se primeiramente que as cargas seriam bolinhas de plástico provenientes dos próprios kits, nas cores vermelha e azul. Para facilitar o projeto, optou-se por montar um reservatório de bolinhas e uma rampa, por meio da qual a bolinha pudesse chegar ao ponto onde o braço deveria pegá-la. Para isso, foi montado um segundo robô destinado apenas a chutar as bolinhas, uma por vez, cada vez que uma bolinha era alocada pelo manipulador. Desta forma, ao invés do manipulador procurar a localização da carga, optou-se por fornecer as coordenadas para o mesmo, o que facilitou o trabalho e reduziu o número de sensores.

Sendo assim, foram utilizados apenas dois sensores de cor, um para o manipulador identificar a cor da bolinha e outro para o robô de chute identificar o momento certo para atuar, não havendo assim a necessidade de estabelecer uma comunicação entre os robôs. Além disso, foram montadas duas caixas para separar as bolinhas. A Figura 2 mostra o cenário montado conforme a descrição, no qual está inserido o manipulador robótico em sua posição inicial estabelecida.

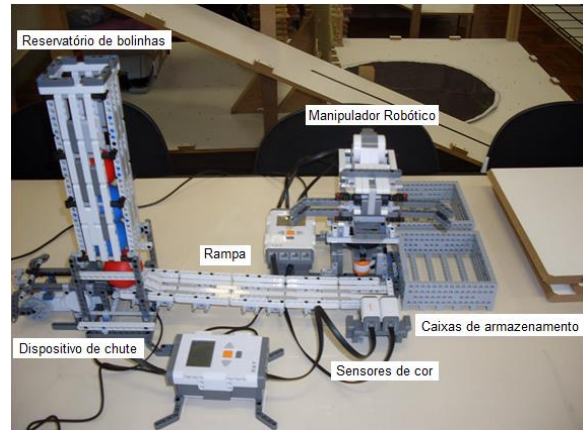


Figura 2. Montagem completa do sistema

Os robôs LEGO® podem ser programados por diferentes *softwares*, como o RobotC®, LeJOS® e LabVIEW®. Neste trabalho optou-se pela utilização do LabVIEW® para programar a interface virtual utilizada na realização da tarefa de separar as bolinhas por cor e na aplicação do sinal de entrada e coleta dos dados para a identificação do sistema.

É importante ressaltar que cada junta foi programada para realizar seu movimento separadamente e a trajetória a ser realizada pelo manipulador foi definida previamente. O fluxograma da Figura 3 mostra o algoritmo final implementado para a realização da tarefa proposta.

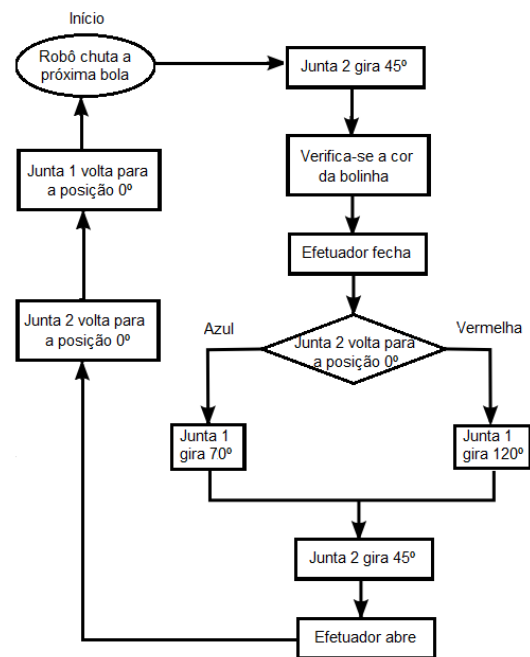


Figura 3. Fluxograma de automação do sistema

## 3 Identificação do sistema

A primeira parte do trabalho consistiu na obtenção das funções de transferência no modo contínuo, visando relacionar a tensão aplicada aos motores das juntas 1 e 2 do manipulador robótico com a suas

respectivas posições angulares. O objetivo desta etapa do trabalho é obter modelos que representem o comportamento dinâmico do sistema para simulação do controlador fuzzy. No efetuator optou-se por utilizar um controlador *on-off* para a realização dos movimentos de abrir e fechar, usando-se uma base de tempo, e, portanto, não foi necessário levantar um modelo para o mesmo.

Há várias formas e técnicas de se obter modelos matemáticos de um sistema, uma delas é a modelagem caixa branca. Nesse caso, faz-se necessário conhecer a fundo as relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos (Aguirre, 2007). Esse procedimento de modelagem nem sempre é viável devido ao tempo e conhecimento necessários.

Identificação de sistemas é um procedimento alternativo que permite à obtenção de um modelo matemático que explique, pelo menos em parte e de forma aproximada, a relação causa e efeito presente nos dados de entrada e saída de um sistema real qualquer.

A primeira etapa de um problema de identificação é a realização de testes dinâmicos e coleta de dados. Neste trabalho, optou-se por um sinal de entrada com característica aleatória, cujo tempo de patamar ( $T_b$ ) foi escolhido conforme a equação (1) a seguir:

$$\frac{\tau_{min}}{10} \leq T_b \leq \frac{\tau_{min}}{3} \quad (1)$$

sendo que  $\tau_{min}$  é a menor constante de tempo de interesse.

Uma vez obtidos dados de entrada e saída, deve ser feita a escolha da representação matemática a ser utilizada. Neste caso, foram obtidos modelos ARX, descritos por:

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + v(k) \quad (2)$$

sendo  $q^{-1}$  o operador de atraso, de forma que  $y(k)q^{-1} = y(k-1)$ ,  $v(k)$  ruído branco e  $A(q)$  e  $B(k)$  os polinômios definidos a seguir:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{ny}q^{-ny} \quad (3)$$

$$B(q) = 1 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nu}q^{-nu} \quad (4)$$

Por meio da obtenção de modelos ARX é possível levantar as funções de transferência no modo contínuo desejadas. Quanto à estrutura do modelo, foram escolhidos modelos de quarta ordem, por serem os que apresentaram os melhores resultados na etapa de validação.

Definida a estrutura, a próxima etapa é a estimação dos parâmetros. Um método muito comum e que foi utilizado neste trabalho é o método dos mínimos quadrados, que visa o melhor ajuste para um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados reais.

Por fim, obtidos os modelos, é necessário validá-los. Uma das formas de validação é comparar a simulação do modelo obtido com os dados medidos, tomando-se o cuidado de não utilizar os dados para a obtenção do modelo na validação.

Outra forma de validação é a análise dos resíduos, a qual informa se os parâmetros do modelo identificado foram ou não estimados corretamente. Neste tipo de validação faz-se a análise da autocorrelação dos resíduos e a correlação cruzada dos resíduos com a entrada, que devem ser próximas de zero.

## 4 Controle Fuzzy

O controlador fuzzy possui uma fase de elaboração do projeto simples, não sendo necessário utilizar equações matemáticas complexas ou tabelas, tarefas estas que consomem grande parte do tempo de projeto em outras técnicas de controle que as utilizam. O diagrama mostrado na Figura 4 mostra a estratégia utilizada neste tipo de controlador.

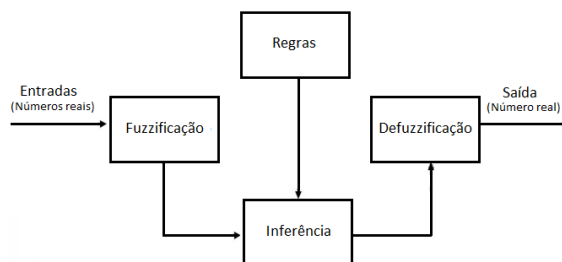


Figura 4. Processos de um controlador fuzzy.

A interface de fuzzificação recebe os valores de entrada, por meio dos quais é possível determinar os termos linguísticos e os graus de pertinência dos conjuntos nebulosos de entrada. Em controladores fuzzy de caráter geral como o apresentado aqui, as variáveis de entrada são usualmente o erro ( $e$ ), gerado a partir da diferença entre o sinal de referência e a saída da planta, e a variação do erro ( $de$ ), que consiste no erro atual menos o erro no instante anterior.

As ações de controle, decorrentes de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de entrada, são obtidas por métodos de inferência, baseados em regras do tipo *se antecedente... então consequente* com o objetivo de produzir uma saída fuzzy que será utilizada para fins de cálculo da variável de saída para o processo. Para isto, é necessário que o projetista conheça o comportamento do sistema a ser controlado e saiba quais ações devem ser tomadas em face das diversas condições que as variáveis de entrada possam assumir.

Uma vez definida a saída fuzzy, é necessário transformá-la em uma saída real que será enviada para o sistema. Esta etapa, denominada defuzzificação, pode ser feita através de vários métodos, dentre eles estão o centro dos máximos, média dos máximos e o centro de massa.

## 5 Resultados

### 5.1 Identificação do sistema

O sinal de entrada que proporciona o movimento do motor, por meio do bloco “Motor” do *software LabVIEW®* é um sinal que pode variar entre 0 e 127, valores estes que correspondem a um valor de tensão a ser aplicado no motor que pode ser no máximo de 9V. O ensaio ao degrau do sistema foi realizado numa faixa de operação de 1V a 6,3V. A constante de tempo obtida foi de aproximadamente 0,4s.

Desta forma, projetou-se um sinal de entrada com característica aleatória, sendo que cada patamar do sinal de excitação é mantido por 0,1s. Os ensaios para cada junta foram realizados por um período de 2 minutos e tempo de amostragem escolhido foi de 10ms.

Nas Equações (5) e (6) são mostrados os modelos na forma de função de transferência no modo contínuo obtidos por meio dos dados coletados do manipulador robótico para a base e para o ombro, respectivamente.

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{-0,1288s^3 + 99,14s^2 + 577,3s + 9,779 \times 10^6}{s^4 + 209,2s^3 + 1,126 \times 10^5 s^2 + 4,197 \times 10^6 + 9981} \quad (5)$$

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{-0,06498s^3 + 64,74s^2 + 5,775 \times 10^4 s + 2,009 \times 10^7}{s^4 + 371s^3 + 1,401 \times 10^5 s^2 + 5,751 \times 10^6 + 2,794 \times 10^6} \quad (6)$$

A massa dos dados foi dividida, sendo 60% dos dados utilizados para a obtenção dos modelos e 40% dos dados para a validação dos mesmos. A simulação livre dos modelos obtidos para as juntas 1 e 2, podem ser vistas nas Figura 5 e 6, respectivamente.

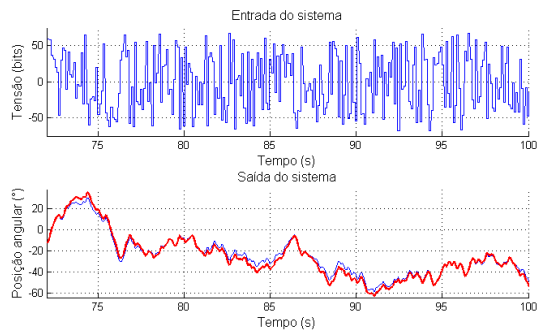


Figura 5. Validação dinâmica para o modelo linear referente à junta 1. (-) dados medidos de saída e (—) dados estimados.

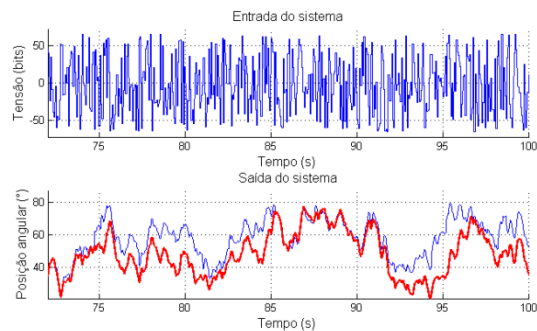


Figura 6. Validação dinâmica para o modelo linear referente à junta 2. (-) dados medidos de saída e (—) dados estimados.

Verifica-se que esses modelos, sobretudo o modelo obtido para a junta 2, não conseguem chegar aos picos. Isso se deve ao fato dos ganhos dos sistemas lineares serem fixos. Contudo, alguns aspectos do comportamento dinâmico do sistema são modelados. É importante ressaltar que a posição inicial da junta 2 para a realização do ensaio pelo qual obteve-se o melhor modelo, foi diferente da posição mostrada na Figura 1, por isso na Figura 6 a posição angular medida atinge 70°.

A autocorrelação e a correlação cruzada são mostradas nas Figuras 7 e 8. Percebe-se que os resíduos para a junta 1 possuem uma pequena correlação, que indica que o modelo está levemente polarizado. Essa polarização é passível de ser retirada com o aumento da ordem do modelo. Entretanto, para fins de simulação manteve-se a ordem igual a 4.

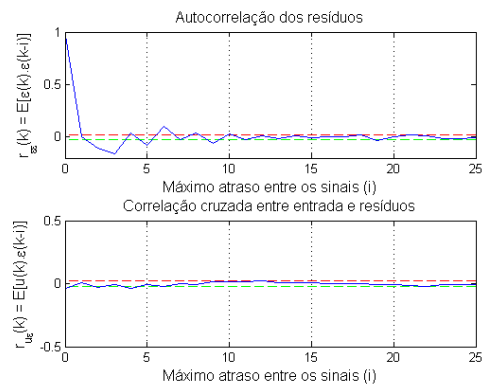


Figura 7. Autocorrelação dos resíduos e correlação dos resíduos com a entrada do modelo linear referente à junta 1.

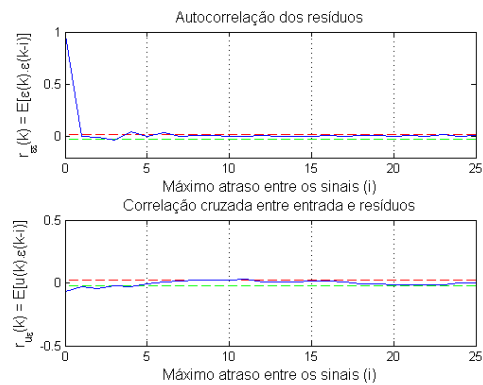


Figura 8. Autocorrelação dos resíduos e correlação dos resíduos com a entrada do modelo linear referente à junta 2.

### 5.2 Controle Fuzzy

O diagrama de blocos que representa o controlador fuzzy utilizado é mostrado na Figura 9.

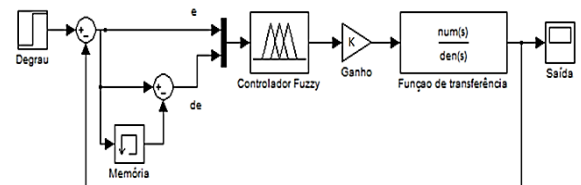


Figura 9. Planta com controlador fuzzy.

As entradas do controlador são dadas pelo erro (e), ou seja, a posição angular desejada menos a posição angular medida pelo *encoder*, e a variação do erro (de). A saída do controlador consiste num sinal que deverá ser aplicado ao bloco “Motor” do LabVIEW®, por isso seus valores foram definidos no intervalo -100 e 100.

Primeiramente, foi definida a etapa de fuzzificação. Para isso, foram utilizadas três funções de pertinência para classificar as variáveis de entrada: N (Negativo), Z (Zero) e P (Positivo). Os limites do grau de pertinência estabelecidos, que foram os mesmos para ambas as juntas, podem ser vistos na Figura 10.

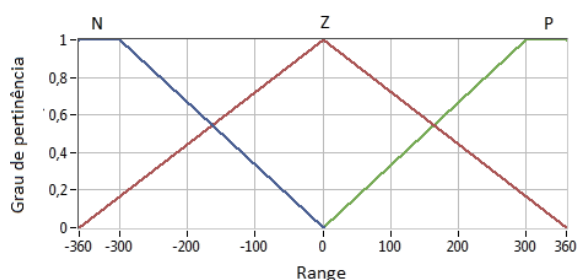


Figura 10. Fuzzificação das entradas e e de do controlador fuzzy proposto para as juntas 1 e 2.

Posteriormente, foram estabelecidas cinco funções de pertinência para classificar a variável de saída como MN (Muito Negativo), N (Negativo), Z (Zero), P (Positivo) e MP (Muito Positivo). A Tabela 1 mostra as regras de inferência propostas para os controladores implementados em ambas as juntas.

Tabela 1. Regras de inferência dos controladores fuzzy.

e \ de	N	Z	P
N	MN	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	MP

Por fim, foram definidas as funções de pertinência referentes à defuzzificação. Neste caso, os limites do grau de pertinência estabelecidos foram diferentes para cada junta. As Figuras 11 e 12 mostram as funções para o processo de defuzzificação dos controladores propostos para as juntas 1 e 2, respectivamente.

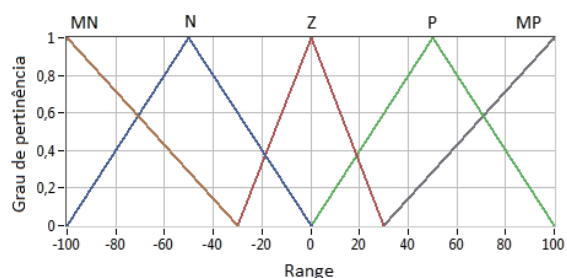


Figura 11. Defuzzificação da saída do controlador proposto para a junta 1.

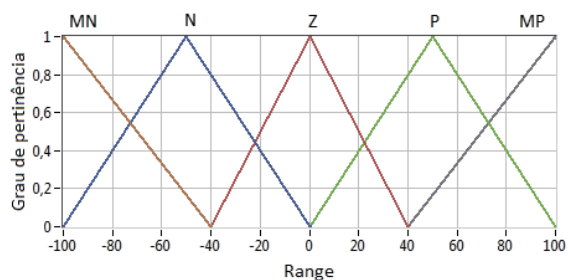


Figura 12. Defuzzificação da saída do controlador proposto para a junta 2.

Com base nos modelos propostos, foi feito o ajuste fino do controlador, definindo o ganho mostrado no diagrama da Figura 9 como sendo  $K = 10$ .

### 5.3 Testes no sistema real

Por fim, os controladores propostos foram implementados no manipulador robótico por meio do *software LabVIEW®*. A Figura 13 mostra o gráfico do desempenho dos controladores fuzzy implementados nas juntas 1 e 2 para diferentes valores de *offset*, incluindo os valores desejados para a realização da tarefa proposta.

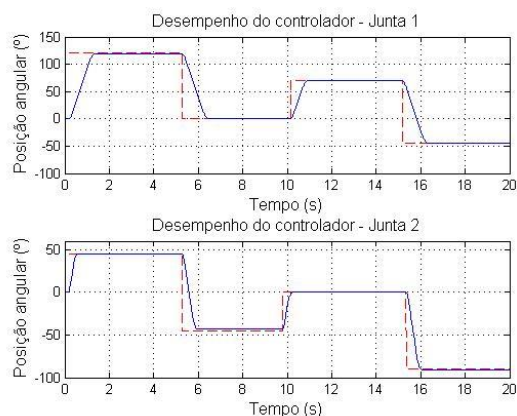


Figura 13. Desempenho dos controladores fuzzy no sistema real. (--) Referência e (-) Saída.

A Tabela 2 mostra os valores obtidos por meio dos testes realizados para as juntas 1 e 2, bem como o erro quadrático médio em cada caso.

Tabela 2. Valores obtidos pela implementação do controlador fuzzy no sistema real.

Junta 1		Junta 2	
Referência	Saída	Referência	Saída
120°	119,668°	45°	45,275°
0°	0,416°	-45°	-44,097°
70°	69,806°	0°	0°
-45°	-44,598°	-90°	-90,549°
RMSE = 0,695°		RMSE = 1,092°	

Por meio da Tabela 2 e pelos gráficos de desempenho dos controladores mostrados na Figura 13, nota-se que para diferentes valores de *setpoint*, ambos os controladores apresentaram bons resultados e possibilitaram a realização da tarefa proposta por meio de uma interface virtual desenvolvida.

## 6 Discussões

A primeira etapa do trabalho, referente à modelagem dinâmica do sistema apresentou algumas dificuldades, sobretudo pelas limitações da junta 2 do manipulador, sendo necessária a realização de diversos ensaios. Ainda assim, mostrou-se pela técnica aplicada que foi possível obter modelos que representam alguns aspectos do comportamento dinâmico do sistema.

A Figura 13 mostra a eficiência dos controladores de posição implementados no manipulador robótico. Observa-se pela Tabela 2, que os erros obtidos para diferentes valores de referência foram menores que 1°, e, portanto, bastante pequenos, considerando-se as limitações do robô que foi construído com peças do kit LEGO®. Além disso, a tarefa proposta para o robô não requer uma precisão elevada, sendo possível a sua realização por meio do controlador apresentado.

Desta forma, nota-se pelos resultados obtidos que o controlador fuzzy mostrou-se uma alternativa viável para o projeto proposto.

## 7 Conclusão

Este trabalho apresentou um projeto de controle fuzzy de posição para um manipulador robótico com dois graus de liberdade, acionado por servo-motores e montado com peças do kit LEGO®.

Para simular os controladores fuzzy propostos antes de sua implementação no sistema real, foi feita a modelagem dinâmica, por meio da qual foram obtidas as funções de transferência que relacionam a posição angular e a tensão aplicada aos motores que constituem as juntas 1 e 2 do manipulador.

Foi visto que o controlador implementado possui uma fase de elaboração do projeto simples, não sendo necessário utilizar equações matemáticas complexas ou tabelas.

A simplicidade do controlador fuzzy surpreende pelos resultados apresentados, os quais qualificam estes tipos de controladores para aplicações de uso geral, onde pequenos desvios não comprometem a eficiência do sistema de controle.

Para trabalhos futuros, pretende-se aumentar o grau de complexidade do sistema, acrescentando mais um grau de liberdade, e realizar o controle de trajetória do manipulador. Além disso, será feito o estudo de outros tipos de controladores, visando um melhor desempenho para aplicações mais complexas.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro, à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) pelo apoio logístico e infraestrutura física.

## Referências Bibliográficas

- Aguirre, L. A. (2007). *Introdução à Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*, 3ed, Belo Horizonte: Editora da UFMG.
- Ahmad, M. A. et al. (2010). Vibration Control Strategy for Flexible Joint Manipulator: A Fuzzy Logic Control Approach. In: *Proceedings of the Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Penang, Malaysia. IEEE Conference Publications: pp. 469-474.
- Chen, P. C. Y.; Mills, J. K. and Vukovich, G. (1996). Neural Network Learning and Generalization for Performance Improvement of Industrial Robots. In: *Proceedings of the Conference on Electrical and Computer Engineering*, Calgary, Alta, May, 1996. IEEE Conference Publications: pp. 566-569.
- Ferrari, M.; Ferrari, G.; and Hempel, R. (2002). *Building Robots With Lego Mindstorms*. United States of America: Syngress Publishing.
- Garcia, E. et al. (2007). The Evolution of Robotics Research: From Industrial Robotics to Field and Service Robotics. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 14(1), pp. 90-103.
- Han-Xiong LI and Gatland, H. B. (1996). Conventional Fuzzy Control and Its Enhancement. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(5), pp. 791-797.
- Kai-Yuan Cai and Lei Zhang. (2008). Fuzzy Reasoning as a Control Problem. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(3), pp. 600-614.
- Lima, T. V. et al. (2011). Desenvolvimento e controle neural de um manipulador robótico com dois graus de liberdade. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São João del-Rei, MG, Brasil.
- Muro-Maldonado, D.; Rodriguez-Angeles, A. and Cruz-Villar, C. A. (2007) Sliding PID Control for Trajectory Tracking of a 2 DOE Robot Manipulator: Simulations and Experiments. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Mexico City, September, 2007. IEEE Conference Publications: pp. 302-305.
- Spong, M. W.; Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*, 1 ed, New York: John Wiley & Sons.
- Salem, M. and Khelfi, M. F. (2012). Online RBF and fuzzy based sliding mode control of robot manipulator. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications*, Tunisia, March, 2012. IEEE Conference Publications: pp. 896-901.
- Tauile, J. R. (1986). Microeletrônica e automação: a nova fase da indústria automobilística brasileira. *Revista de Economia Política*, 25(3), pp. 69-81.