



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

CONTROLE DE MANIPULADOR ROBÓTICO PLANAR PARALELO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY

Thiago Murilo Grossi, tgrossi@alunos.utfpr.edu.br¹
Victor Bolzon, victor_bolzon@hotmail.com¹
Fabian Andres Lara Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹
Cristiano Marcos Agulhari, agulhari@utfpr.edu.br¹
Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹
Daniel Almeida Colombo, danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procopio, Av. Alberto Carazzi, 1640, Cornélio Procopio, PR, 86300000, Brasil.

Resumo: O objetivo deste trabalho é apresentar a modelagem dinâmica de um manipulador paralelo planar com dois graus de liberdade (GdL), bem como a síntese de controladores para rastreamento de trajetória no espaço das juntas deste manipulador, utilizando técnicas fuzzy. A modelagem foi realizada utilizando a formulação de Lagrange, e simulada juntamente com as duas técnicas de controle propostas no software Matlab/Simulink. Ao final foi realizada uma análise para a verificação da eficiência das técnicas utilizadas. Sendo assim possível notar a qualidade do controle fuzzy, resultando em um menor erro, além de um menor torque utilizado para a realização da trajetória.

Palavras-chave: Manipulador paralelo, Modelagem dinâmica, Controle de manipuladores, Controle Fuzzy.

1. INTRODUÇÃO

Manipuladores robóticos são aplicados em diversas áreas, nas quais faz-se necessária a alta repetitividade de movimentos e elevada precisão. Consequentemente os manipuladores paralelos possuem vantagens potenciais que se devem ao fato de que sua estrutura apresenta melhor desempenho dinâmico, maior rigidez e relação carga/peso, quando comparado aos mecanismos seriais, (Molina *et al.*, 2012).

Dentro das diversas aplicações de manipuladores é necessário que estes sigam determinadas trajetórias. Para realizar esta tarefa com maior precisão faz-se necessário a aplicação de técnicas de controle que visam melhorar o desempenho dinâmico no rastreamento destas trajetórias.

Para isto, diversas metodologias de controle têm sido aplicadas com a finalidade de controlar o movimento dos manipuladores paralelos no rastreamento de uma trajetória no espaço de trabalho (Paccot *et al.*, 2009). Dentre as principais técnicas aplicadas no controle de posição para o rastreamento das trajetórias dos manipuladores paralelos podem-se enumerar: controle preditivo (Andres Lara-Molina *et al.*, 2014), técnicas de controle robusto (Marco Henrique Terra, 2001) e controle multivariável (Helton Vicente Hultmann Ayala, 2009). No entanto, o controle baseado em lógica Fuzzy tem apresentado resultados satisfatórios no controle de manipuladores seriais (Lara-Molina *et al.*, 2015).

Portanto, nesta contribuição, um manipulador paralelo planar de dois graus de liberdade será controlado utilizando controle baseado em lógica Fuzzy. Para isto, o modelo completado será derivado utilizando o princípio de Lagrange. O controle Fuzzy será baseado na dinâmica completa do manipulador. Adicionalmente, um controle PID com torque computado será projetado com o objetivo de comprar o desempenho do controlador Fuzzy com esta técnica de controle amplamente utilizada na literatura.

O restante deste artigo está organizado em cinco seções. Na segunda seção, apresenta-se o modelo dinâmico completo do manipulador paralelo. Na seção 3, a técnica de controle Fuzzy e sua aplicação no controle de posição do manipulador paralelo são apresentadas. O desempenho dinâmico do manipulador no controle de posição é apresentado com o controle Fuzzy e com o controle de torque computado. Finalmente, algumas conclusões sobre este trabalho são apresentadas.

2. MODELO ESTUDADO

O manipulador paralelo de dois GdL é um robô composto por uma cadeia cinemática que possui duas juntas passivas rotacionais, ou seja, juntas que não possuem motores ou sensores e duas juntas ativas, as quais possuem motores e sensores. As juntas ativas são fixas na base do manipulador, e são atribuídos a elas os graus de liberdade do sistema.

Na Fig. 1 é apresentado um esquemático do manipulador, onde é possível observar seu modelo geométrico. Especificamente a gravidade é perpendicular ao plano do manipulador, uma vez que se trata de um plano de trabalho horizontal.

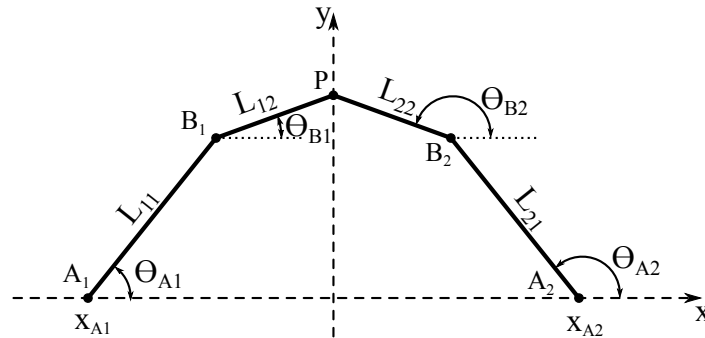


Figura 1: Esquemático do manipulador paralelo 2 GdL estudado
Fonte: Autoria Própria

Sendo:

A_i - é a junta ativa da perna i do manipulador;

B_i - é a junta passiva da perna i do manipulador;

P - é a posição do efetuador final;

L_{ij} - é o comprimento do link i pertencente à perna j do manipulador;

θ_{Ai} - é o ângulo da junta ativa pertencente à perna i do manipulador;

θ_{Bi} - é o ângulo da junta passiva pertencente à perna i do manipulador;

X_{Ai} - é a posição da junta ativa i do manipulador no eixo x ;

Sendo $i = 1, 2$.

2.1 MODELAGEM DO MANIPULADOR

A modelagem matemática do manipulador foi obtida por meio da formulação de Lagrange, dada pela Eq. (1), que leva em consideração as energias cinética e potencial do mecanismo para a obtenção do modelo, (Le, 2012).

$$\tau - F = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} \quad (1)$$

Sendo:

L - é o Lagrangiano, dado por:

$$L = K - P \quad (2)$$

τ - é o vetor das forças aplicadas em cada uma das juntas;

f - é o vetor das forças de atrito em cada uma das juntas;

q - é o vetor das variáveis de junta;

$\dot{q}$ - é a derivada no tempo do vetor das variáveis de junta.

Na Eq. (2), K e P são as energias cinética e potencial total do manipulador, respectivamente. Como a gravidade é perpendicular ao plano de trabalho da cadeia cinemática, a energia potencial é nula.

Para simplificar a análise do mecanismo, primeiramente é realizada a modelagem de uma das pernas do manipulador, sendo esta uma modelagem de um mecanismo serial.

2.2 Modelagem de uma Cadeia Cinemática

Considerando somente uma das pernas do manipulador, temos a cadeia cinemática apresentada na Fig. 2.

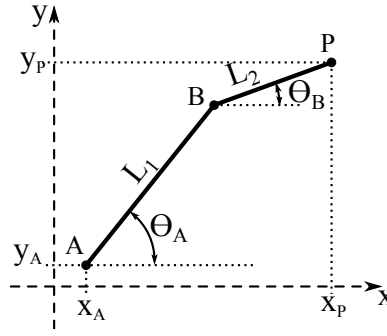


Figura 2: Esquemático de uma das pernas do Manipulador Paralelo
Fonte: Autoria Própria

Fazendo $K = K_1 + K_2$, onde K_1 e K_2 representam a energia cinética do link 1 e do link 2 respectivamente. Da energia cinética de cada link, tem-se então que:

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \dot{\theta}_A^2 + \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot (\dot{x}_{c1}^2 + \dot{y}_{c1}^2)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \cdot I_2 \cdot \dot{\theta}_B^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (\dot{x}_{c2}^2 + \dot{y}_{c2}^2)$$

Sendo:

I_i - o momento de inércia do link i em relação a sua origem;

(x_{ci}, y_{ci}) - as coordenadas cartesianas do centro de massa do link i .

Após realizar as devidas operações e substituições na Eq. (2), chega-se à Eq. (3)

$$L = K = \frac{1}{2} \cdot \dot{\theta}_A^2 \cdot \alpha + \frac{1}{2} \cdot \dot{\theta}_B^2 \cdot \beta + \gamma \cdot \dot{\theta}_A \cdot \dot{\theta}_B \cdot \cos(\theta_A - \theta_B) \quad (3)$$

Onde:

$$\alpha = I_1 + m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot l_1^2$$

$$\beta = I_2 + m_2 \cdot r_2^2$$

$$\gamma = m_2 \cdot l_1 \cdot r_2$$

Para esta configuração cinemática consideramos $q = [\theta_A \ \theta_B]^T$, $\dot{q} = [\dot{\theta}_A \ \dot{\theta}_B]^T$, $\tau = [\eta_1 \ \eta_2]^T$ e $f = [f_1 \ f_2]^T$.

Assim tem-se que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_A} \right) \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_B} \right) \right]^T$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} = \left[\frac{\partial L}{\partial \theta_A} \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_B} \right]^T$$

Calculando as derivadas e substituindo na formulação de Lagrange, Eq. (1), obtemos:

$$\eta_1 - f_1 = \alpha \cdot \ddot{\theta}_A + \gamma \cdot \dot{\theta}_B^2 \cdot \text{sen}(\theta_A - \theta_B) + \gamma \cdot \cos(\theta_A - \theta_B) \cdot \ddot{\theta}_B \quad (4)$$

$$\eta_2 - f_2 = \beta \cdot \ddot{\theta}_B - \gamma \cdot \dot{\theta}_A^2 \cdot \text{sen}(\theta_A - \theta_B) + \gamma \cdot \cos(\theta_A - \theta_B) \cdot \ddot{\theta}_A \quad (5)$$

Reescrevendo as equações (4) e (5) na forma matricial apresentada na Eq. (6).

$$\tau - F = M(\theta) \cdot \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

Obtemos:

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma \cdot \cos(\theta_A - \theta_B) \\ \gamma \cdot \cos(\theta_A - \theta_B) & \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & \gamma \cdot \dot{\theta}_B \cdot \text{sen}(\theta_A - \theta_B) \\ -\gamma \cdot \dot{\theta}_A \cdot \text{sen}(\theta_A - \theta_B) & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3 Modelo Dinâmico das Duas Cadeias Cinemáticas

Partindo do modelo de uma cadeia cinemática serial da Eq. (6), é possível ampliar o modelo para obter a dinâmica referente às duas cadeias cinemáticas, presentes no manipulador paralelo.

As matrizes referentes à inércia do manipulador, na Eq. (9), e às forças centrífugas e de Coriolis, na Eq. (10), do modelo considerando as duas cadeias cinemáticas são apresentadas a seguir.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \gamma_1 \cdot C_{AB1} & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & \gamma_2 \cdot C_{AB2} \\ \gamma_1 \cdot C_{AB1} & 0 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \cdot C_{AB2} & 0 & \beta_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \gamma_1 \cdot \dot{\theta}_{B1} \cdot S_{AB1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_2 \cdot \dot{\theta}_{B2} \cdot S_{AB2} \\ -\gamma_1 \cdot \dot{\theta}_{A1} \cdot S_{AB1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma_2 \cdot \dot{\theta}_{A2} \cdot S_{AB2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde os símbolos C_{ABi} e S_{ABi} representam o $\cos(\theta_{Ai} - \theta_{Bi})$ e o $\sin(\theta_{Ai} - \theta_{Bi})$, respectivamente. Sendo $i = 1, 2$.

2.4 Acoplamento das Duas Cadeias Cinemáticas

Para se obter o modelo total do manipulador paralelo é necessário considerar o acoplamento existente no efetuador final. A restrição é obtida por meio do cálculo da matriz do Jacobiano de todas as juntas em relação as ativas, representando por Ψ . Do princípio de D'Alembert e do trabalho virtual os torques das juntas ativas τ_a e os torques generalizados τ satisfazem a Eq. (11), (Le, 2012).

$$\tau_a = \Psi^T \cdot \tau \quad (11)$$

Temos que $\Psi = [I, J]^T$, onde I é identidade de dimensão dois e $J = \partial\theta_B / \partial\theta_A$, calculado por meio da Eq. (12).

$$J = \frac{\partial\theta_B}{\partial\theta_A} = - \left[\frac{\partial h}{\partial\theta_B} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{\partial h}{\partial\theta_A} \right] \quad (12)$$

Onde:

$$h = \begin{bmatrix} l_{11} \cdot C_{A1} + l_{12} \cdot C_{B1} + X_{A1} - l_{21} \cdot C_{A2} - l_{22} \cdot C_{B2} - X_{A2} \\ l_{11} \cdot S_{A1} + l_{12} \cdot S_{B1} - l_{21} \cdot S_{A2} - l_{22} \cdot S_{B2} \end{bmatrix}$$

Considerando as restrições e realizando as devidas manipulações matemáticas, obtêm-se o modelo completo do manipulador paralelo. Dado pela Eq. (13)

$$M_A \cdot \ddot{\theta}_A + C_A \cdot \dot{\theta}_A + F_A = \tau_A \quad (13)$$

Onde $M_A = \Psi^T M \Psi$ e $C_A = \Psi^T M \dot{\Psi} + \Psi^T C \Psi$, são as matrizes de inércia e das forças centrífugas e de Coriolis respectivamente.

3. TÉCNICAS DE CONTROLE

3.1 Controle PID com Torque Computado

Devido às não linearidades apresentadas no modelo da Eq. (13), observa-se um aumento na complexidade do controle para rastreamento de trajetórias, uma vez que um controlador PID convencional resultaria em um bom controle somente para a região onde foi sintonizado. Uma solução para este problema é baseada na linearização por realimentação, conhecido na literatura de robótica como controle com torque computado (CTC), (Aguirre, 2007).

Para esta técnica é utilizado o modelo dinâmico inverso do manipulador, dado pela Eq. (13), aplicando o torque computado no sistema, tem-se a anulação das não linearidades, resultando em modelo resultante linear e desacoplado para junta equivalente a um integrador duplo. Com isto é possível aplicar técnicas de controle linear, como por exemplo o PID, para controlar a posição. A Fig. 3 apresenta o esquemático do CTC com PID aplicado no manipulador.

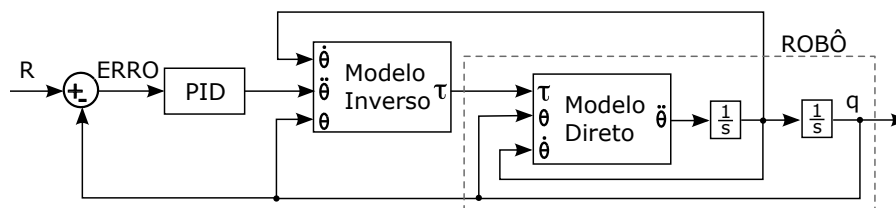


Figura 3: Esquemático da malha de controle com PID com torque computado

Fonte: Autoria Própria

Sendo a nova entrada de controle do manipulador igual a τ , sua relação com a ação de controle sem o torque computado é expressa pela Eq. (14).

$$\tau = M_A \cdot U + C_A \cdot \dot{\theta}_A + F_A \quad (14)$$

Onde os ganhos do PID são encontrados por meio das equações (15), (16) e (17).

$$K_p = 3 \cdot \omega_n^2 \quad (15)$$

$$K_i = \omega_n^3 \quad (16)$$

$$K_d = 3 \cdot \omega_n \quad (17)$$

Onde considerando $\omega_n = 15 \text{ rad/s}$, tem-se os ganhos como sendo $K_p = 675$, $K_i = 3375$ e $K_d = 45$.

Uma desvantagem desta técnica é o fato de que é preciso conhecer muito bem o modelo do seu sistema, o que nem sempre é possível devido a incertezas presentes na modelagem do sistema.

3.2 Controle PD Fuzzy + I

Esta técnica consiste em adicionar uma lógica Fuzzy juntamente com a parte proporcional, derivativa do controle, enquanto a parcela integral não sofre influência da lógica Fuzzy. A Fig. 4 apresenta um diagrama do controlador Fuzzy.

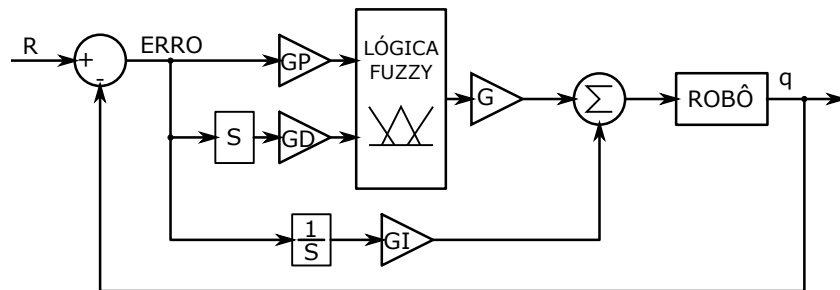


Figura 4: Esquemático da malha de controle com PD Fuzzy + I
Fonte: Autoria Própria

Sendo que para uma comparação com o controle PID convencional é necessário que GP multiplicado por G seja igual ao ganho K_p do controlador, o mesmo é válido para GD multiplicado por G que deve ser correspondente ao ganho K_d . Enquanto o ganho GI do controle Fuzzy é menor ou igual ao ganho K_i do PID convencional, sendo ajustado de acordo com o projeto para obter melhor desempenho, (Jantzen, 2007), neste trabalho $GI = K_i/100$.

Neste trabalho a superfície da lógica Fuzzy utilizada no controle do manipulador é apresentada na Fig. 5, as entradas da lógica são os erros multiplicados pelos seus respectivos ganhos, e a saída passa ainda pelo ganho G da malha de controle, conforme pode ser observado no diagrama apresentado na Fig. 4.

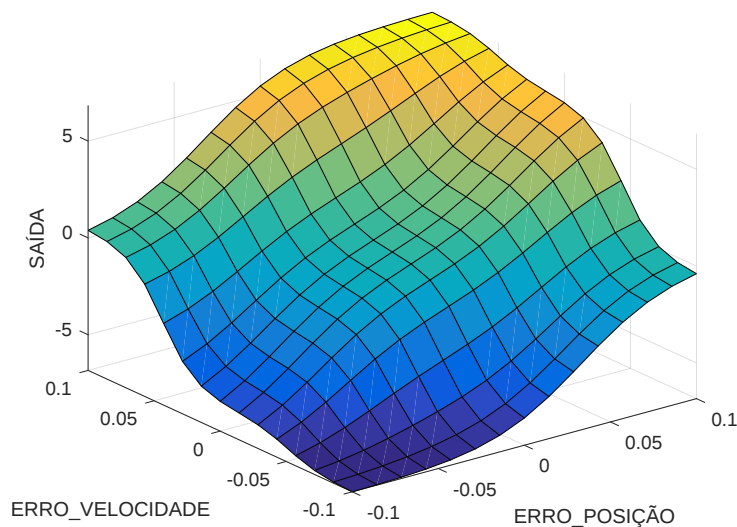


Figura 5: Superfície da lógica Fuzzy implementada para o controle
Fonte: Autoria Própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que fosse possível realizar as trajetórias desejadas no espaço de trabalho, foi necessário elaborar um estudo sobre a cinemática do manipulador, a fim de poder transformar a trajetória no espaço cartesiano para uma equivalente referente a posição de cada uma das juntas, sendo que para isto foi utilizado o modelo cinemático inversor do manipulador (Le, 2012).

Após as simulações foram obtidos os gráficos do erro e torque para cada uma das técnicas de controle, com o intuito de poder verificar a eficiência das estratégias de controle utilizadas.

Conforme pode ser observado na Fig. 6 ambas as técnicas se mostraram eficientes para o rastreamento de trajetórias no espaço das juntas, porém a técnica utilizando um controlador *Fuzzy* apresentou melhores resultados com um erro máximo próximo a 3.10^{-3} , enquanto a técnica de linearização por realimentação obteve um erro máximo próximo a 12.10^{-3} .

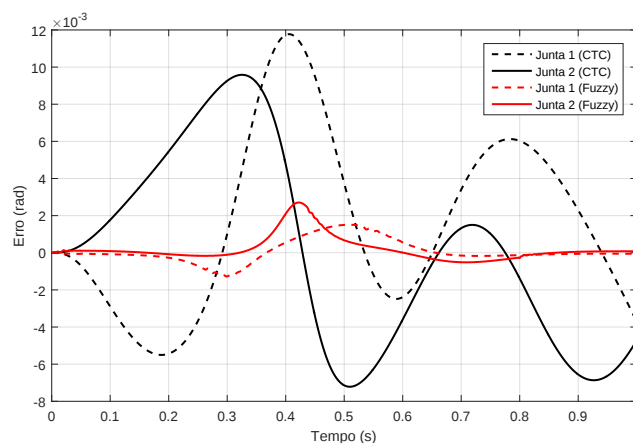


Figura 6: Erro de posição das juntas do manipulador para cada uma das técnicas utilizadas

Fonte: Autoria Própria

Também foi analisado o erro do posicionamento do efetuador final no plano cartesiano, para assim poder constatar a eficiência dos controladores no rastreamento de trajetórias no espaço de trabalho do manipulador. As Figs 7 e 8, apresentam os erros relacionados aos eixos coordenados x e y, respectivamente.

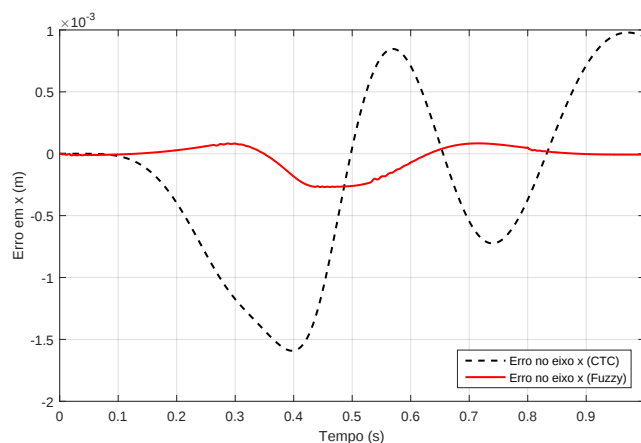


Figura 7: Erro de posicionamento do efetuador final no eixo coordenado x para as duas técnicas de controle

Fonte: Autoria Própria

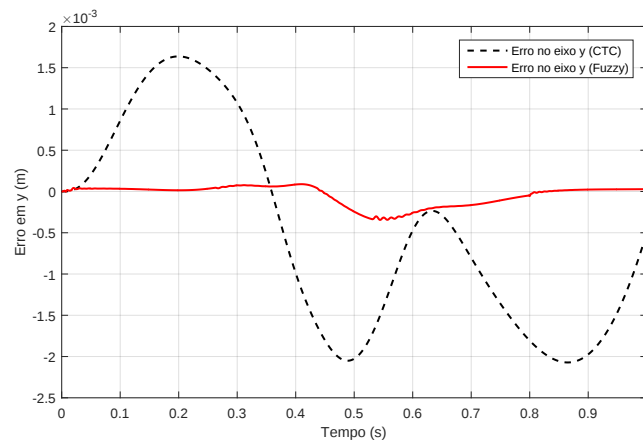


Figura 8: Erro de posicionamento do efetuador final no eixo coordenado y para as duas técnicas de controle
Fonte: Autoria Própria

Analisando as Fig.s 7 e 8, nota-se novamente a eficiência dos dois controladores em seguir uma trajetória, o controle *Fuzzy* obteve o menor erro no plano cartesiano, como era esperado uma vez que o erro de rastreamento no espaço das juntas influencia diretamente no posicionamento do efetuador final do manipulador.

As Fig.s 9 e 10, apresentam a trajetória desejada e as realizadas com o CTC e com controle *Fuzzy*, respectivamente. Com isso é possível verificar o erro do efetuador final do manipulador posicionado no espaço cartesiano. E ainda é evidenciado um erro na posição final do manipulador, quando utilizado o CTC, o que não ocorre com o controle *Fuzzy*.

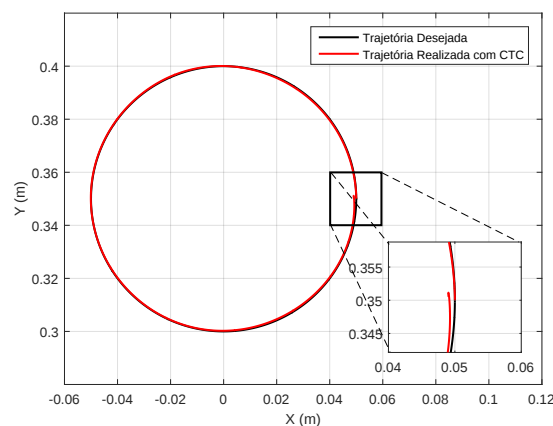


Figura 9: Comparação da trajetória desejada com a realizada pelo CTC
Fonte: Autoria Própria

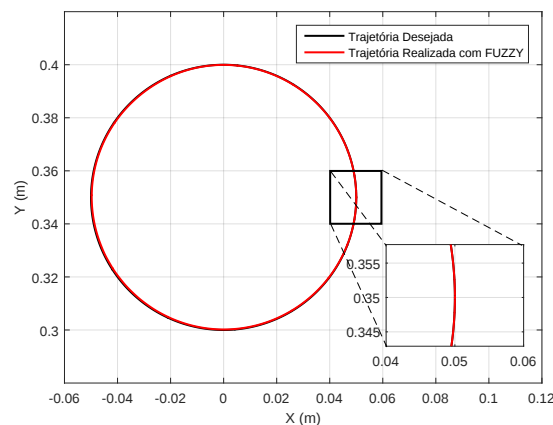


Figura 10: Comparação da trajetória desejada com a realizada pelo controle *Fuzzy*
Fonte: Autoria Própria

Observa-se ainda pela Fig. 11 que o controle com lógica *Fuzzy* necessitou de um torque inferior para a execução da trajetória.

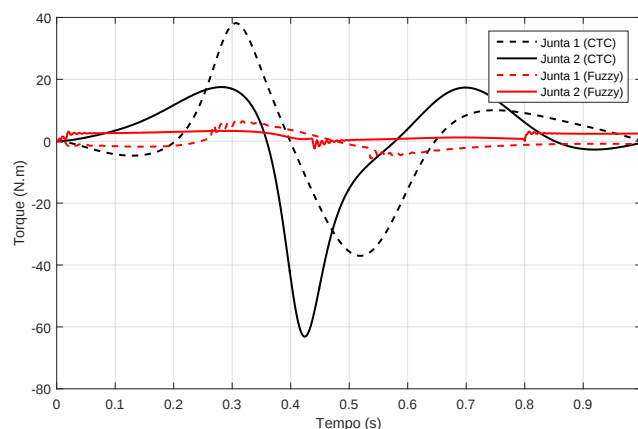


Figura 11: Torque nas juntas ativas do manipulador para cada uma das técnicas utilizadas

Fonte: Autoria Própria

5. Conclusões

O presente trabalho apresentou a modelagem de um manipulador planar com dois graus de liberdade, bem como a proposta de duas técnicas de controle para o rastreamento de trajetória.

Conforme pode ser observado na seção 4, resultados e discussões, o controle PID *Fuzzy* obteve melhor desempenho para o rastreamento de trajetórias, quando comparado com o a técnica PID com CTC, apresentando também um menor torque para a realização da tarefa de rastreamento. Além de que o controle baseado em *Fuzzy* apresenta um menor custo computacional para a implementação.

Em trabalhos futuros serão utilizadas técnicas *Fuzzy* com compensação paralela distribuída com o objetivo de implementar um controlador robustificado baseado em lógica *Fuzzy*.

6. AGRADECIMENTOS

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da UTFPR-CP, DIRPPG e o Programa de Iniciação Científica e Tecnológica da Fundação Araucária FA Paraná/Brasil.

7. REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A., 2007. *Enciclopédia de Automática: Controle e Automação, volume III*. Blucher.
- Andres Lara-Molina, F., Maurício Rosário, J., Dumur, D. and Wenger, P., 2014. "Robust generalized predictive control of the orthoglide robot". *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 275–285.
- Helton Vicente Hultmann Ayala, Viviane Dal Molin de Souza, L.d.S.C., 2009. "Otimização multiobjetivo usando enxame de partículas de controladores multivariáveis para uma aplicação em robótica". *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Jantzen, J., 2007. *Foundations of Fuzzy Control*. Wiley.
- Lara-Molina, F., Takano, K. and Koroishi, E., 2015. "Set-point regulation of a robot manipulator with flexible joints using fuzzy control". In *2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR)*. IEEE, pp. 103–108.
- Le, T.D., 2012. "Chattering-free neuro-sliding mode control of 2-dof planar parallel manipulators". *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- Marco Henrique Terra, Marcel Bergerman, R.T.A.A.G.S., 2001. "Controle tolerante a falhas de robôs manipuladores". *SBA Controle & Automação Vol. 12 no. 02*.
- Molina, F.A.L. et al., 2012. "Simulação e implementação experimental de um controlador preditivo generalizado para um robô orthoglide baseado na modelagem dinâmica".
- Paccot, F., Andreff, N. and Martinet, P., 2009. "A review on the dynamic control of parallel kinematic machines: Theory and experiments". *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 395–416.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

CONTROL OF PARALLEL PLANAR ROBOTIC MANIPULATOR USING FUZZY CONTROL

Thiago Murilo Grossi, tgrossi@alunos.utfpr.edu.br¹

Victor Bolzon, victor_bolzon@hotmail.com¹

Fabian Andres Lara Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹

Cristiano Marcos Agulhari, agulhari@utfpr.edu.br¹

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Daniel Almeida Colombo, danielcolombo@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Federal Technological University of Paraná, Câmpus Cornélio Procópio, Av. Alberto Carazzi, 1640, Cornélio Procópio, PR, 86300-000, Brazil.

Abstract: *The purpose of this paper is to present the dynamic modelling of a manipulator parallel planar with two degrees of freedom (DoF) and the synthesis of controllers for trajectory tracking in the joints space of this manipulator, using Fuzzy techniques. The modeling was carried out using the formulation of Lagrange, and simulated with two proposed control techniques in Matlab/Simulink software. At the end of an analysis to verify the efficiency of the technique was performed. Therefore possible to observe the quality of fuzzy control, resulting in a lower error in addition to a lower torque used to perform the trajectory.*

Palavras-chave: *Robotic manipulator, Lagrange, Computed torque, Fuzzy*