



CONTROLE DE MOVIMENTO DE UM MANIPULADOR COMPLETAMENTE PARALELO UTILIZANDO CONTROLE ÓTIMO

Victor Renan Bolzon, victor_bolzon@hotmail.com¹

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

Edson Hideki koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Thiago Murilo Grossi, thiagomgrossi@gmail.com¹

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

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio, Av. Alberto Carazzi, 1640, Cornélio Procopio, PR, 86300-000, Brasil.

Resumo: O objetivo desta contribuição é aplicar controle ótimo em um manipulador paralelo de seis graus de liberdade. A Plataforma de Stewart-Gough é o manipulador considerado nesta contribuição. O controle de posição utilizando é o Regulador Linear Quadrático (RLQ), juntamente com o Controle de Torque Computado, que são aplicados com o objetivo de minimizar o erro de rastreamento de trajetórias no espaço de trabalho. Adicionalmente, um controlador PD com controle de torque computado foi implementado para avaliar a precisão do rastreamento de trajetória em comparação com o RLQ. As simulações foram implementadas no software Matlab/Simulink® para avaliar o desempenho dos controladores.

Palavra-chave: Plataforma de Stewart-Gough, Controle de posição, Regulador Linear Quadrático, Controle de Torque Computado

1. INTRODUÇÃO

Os mecanismos paralelos têm como características alta rigidez, precisão nos movimentos e alta capacidade de transmissão carga no efetuator final em função da sua estrutura cinemática. A Plataforma Stewart-Gough é um mecanismo de cinemática paralela que possui seis graus de liberdade (gdl) na plataforma móvel, sendo três gdl de rotação e três gdl de translação. Devido as suas características a empregabilidade da Plataforma de Stewart-Gough é bem ampla: simuladores de voo, máquinas industriais, e por causa da sua alta precisão pode ser utilizada em robôs cirúrgicos (Lara-Molina, 2008).

Existem diversos trabalhos que envolvem o controle da posição e da trajetória da plataforma Stewart-Gough. Como o trabalho proposto por Davliakos and Papadopoulos (2007), no qual aplicou-se o controle PD para o controle de posição da Plataforma de Stewart-Gough com atuadores eletro-hidráulicos. Ghobakhloo *et al.* (2006) adotou um controlador PD utilizando a dinâmica inversa da Plataforma de Stewart-Gough, para simular uma trajetória para o manipulador, obtendo dessa forma os erros de posição e orientação para assim realizar a compensação através do controlador e das forças aplicadas nos atuadores, mostrando deste modo a eficiência do controlador. Adicionalmente, o desempenho do controlador de torque computado com PID considerando as incertezas nos parâmetros geométricos e dinâmicos no manipulador Plataforma Stewart-Gough (Lara-Molina *et al.*, 2015). Por outro lado, técnicas lineares de avançadas de controle têm sido aplicadas com a finalidade de aprimorar o desempenho dinâmico do manipulador no rastreamento de trajetórias (Lara-Molina *et al.*, 2011). No entanto, este trabalho visa aplicar técnicas de controle ótimo no controle dos movimentos para aprimorar o desempenho dinâmico do manipulador e também deixar o desempenho do manipulador em relação ao erro de posição.

A análise dinâmica da plataforma de Stewart-Gough foi desenvolvido previamente por Dasgupta and Mruthyunjaya (1998). Baseada nesta contribuição, a modelagem dinâmica completa da Plataforma de Stewart-Gough será apresentada através da formulação de Newton-Euler que permite expressar a equação dinâmica mediante uma expressão fechada. Com a finalidade de implementar o controle ótimo na Plataforma Stewart-Gough serão introduzidas as técnicas de Controle de Torque Computado (CTC) e Regulador Linear Quadrático, do inglês *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Finalmente, são realizadas as simulações adicionando um controlador PD e utilizando o modelo completo da plataforma de Stewart-Gough, para assim comparar o desempenho das técnicas CTC e LQR na precisão do rastreamento de trajetória com ambos controladores e erros de posição.

Este trabalho está organizado em seis seções enumeradas a seguir. A seção 2 apresenta a modelagem completa da

Plataforma de Stewart-Gough. A seção 3 apresenta a técnica do Controle de Torque Computado e PD. Na seção 4 aborda o Regulador Linear Quadrático. A seção 5 apresenta e discute os resultados. Por fim, as conclusões deste trabalho são enunciadas na seção 6.

2. MODELAGEM PLATAFORMA STEWART-GOUGH

A plataforma de Stewart-Gough que pode ser vista na Fig. 1, possui seis pernas idênticas que ligam a base fixa até a plataforma móvel por juntas universais indicados por U nos pontos B_i e articulações esféricas representadas por S em pontos de A_i , $i = 1, 2, \dots, 6$, respectivamente (ver Fig. 1). Cada perna possui um membro superior e inferior ligados por um conjunto prismático simbolizado por P . A junta prismática é motorizada para estender e retrair a perna. É possível substituir a junta universal por uma junta esférica sem alterar o movimento da plataforma móvel.

Os seis gdl que a plataforma possui, permitem três movimentos lineares e três movimentos angulares. Os movimentos lineares são movimentos longitudinais nos eixos x , y e z . Os movimentos angulares são expressos como ângulos de Euler que diz respeito aos respectivos eixos.

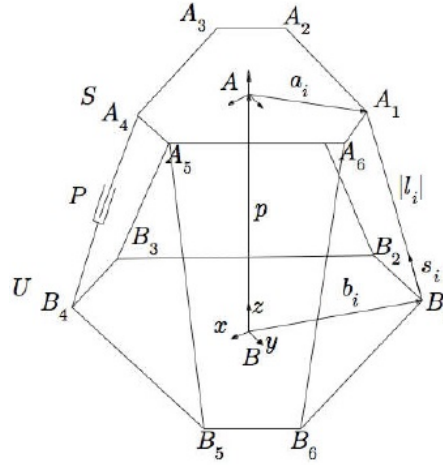


Figura 1: Plataforma de Stewart-Gough

2.1 Cinemática e dinâmica das pernas

A cinemática inversa representa as seis pernas de comprimento $l_i = [l_1, \dots, l_6]^T$ como função da posição p e orientação dos ângulos de Euler θ da plataforma móvel. Assim, $p = [x \ y \ z]^T$ e $\theta = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ resulta em uma matriz de rotação $R = R_x(\alpha) R_y(\beta) R_z(\gamma)$. Dessa forma considerando o vetor em série $\{B\}\{A\}A_iB_i$ (ver Fig. 2.1). A cinemática inversa para cada perna é

$$l_i = Ra_i + p + b_i \quad L_i = ||l_i|| \quad (1)$$

Onde a_i e b_i são vetores que definem a geometria da plataforma móvel e da base fixa, respectivamente. O vetor unitário ao longo de l_i é $s_i = l_i / L_i$. A velocidade no ponto A_i da plataforma móvel é:

$$\dot{l}_i = \omega \times a_i + \dot{p} \quad (2)$$

onde ω é a velocidade angular da plataforma móvel. A velocidade relativa entre a parte superior e inferior da perna $\dot{l}_i = s_i$; similarmente, a velocidade angular das pernas é $\omega_{bi} = s_i \times l_i / L_i$. Portanto, a aceleração no ponto A_i da plataforma móvel é:

$$\ddot{l}_i = \underbrace{\ddot{p} + \alpha \times a_i}_{a_p} + \underbrace{\omega \times (\omega \times a_i)}_{h_1} \quad (3)$$

A aceleração do centro de gravidade das partes inferiores e superiores das pernas, são:

$$a_{di} = \frac{1}{L_i} (s_i \times a_p) \times r_{di} + h_{3i} \quad a_{ui} = (s_i \cdot a_p) \cdot s_i + \frac{1}{L_i} (s_i \times a_p) \times r_{ui} + h_{4i} \quad (4)$$

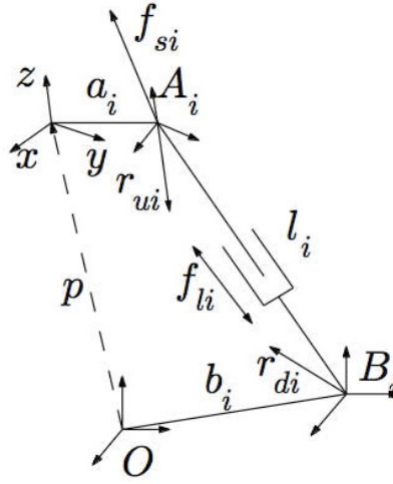


Figura 2: Perna da Plataforma de Stewart-Gough

onde r_{di} e r_{ui} são os centros de gravidade da parte inferior e superior, $h_{3i} = h_{2i} \times r_{di} + \omega(\omega \times r_{di})$ e $h_{4i} = u s_i + h_2 \times r_{ui} + \omega \times (\omega \times r_{ui}) + 2\dot{l}_i \omega$, $h_{2i} = \frac{1}{l_i}(s_i \times h_1 - 2l_i \omega)$. Considerando a análise dinâmica, a equação de Euler é aplicada para o equilíbrio rotacional da perna inteira, assim:

$$m_{di} \cdot r_{di} \times a_{di} - m_{ui} \cdot r_{ui} \times a_{ui} + (m_{di} \cdot r_{di} + m_{ui} \cdot r_{ui}) \times g - (I_{di} + I_{ui}) \cdot \Lambda_{bi} - \omega_b \times (I_d + I_u) \cdot \omega_b + M_{ui} \cdot s_i + l_i \times f_{si} - c_{ui} \omega_{bi} - f_i = 0 \quad (5)$$

onde, Λ_{bi} é a aceleração da perna, f_{si} é a força de restrição da junta esférica que atua na perna, f_i representa o momento da fricção viscosa na i -enésima junta esférica, assim $f_i = c_{si}(\omega_{bi} - \omega_i)$ e f_{li} é a força de entrada na perna i -enésima. Para a parte superior da perna, o equilíbrio translacional é:

$$f_{li} + s_i \cdot f_{si} - c_{pi} \cdot \dot{l}_i - m_{ui} \cdot s_i \cdot g = 0 \quad (6)$$

A equação que expressa f_{si} , resulta em substituições entre as equações demonstradas acima, têm muitos termos que dependem de a_p . Desta forma, para se usar essa expressão na equação dinâmica da plataforma, todos esses termos são agrupados na forma de uma matriz Q (3×3), assim:

$$f_{si} = Q a_p + v - s_i \cdot f_{li} \quad (7)$$

onde,

$$Q = \left[m_{ui} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot s_i \cdot r_{ui}}{L_i} \right) - \frac{m_{di} \cdot r_{di}^2 + m_{ui} \cdot r_{ui}^2}{L_i^2} \right] \cdot s_i \cdot s_i^T + \frac{m_{di} \cdot r_{di}^2 + m_{ui} \cdot r_{ui}^2}{L_i^2} \cdot I - \frac{m_{ui}}{L_i} (s_i \cdot r_{ui}^T + r_{ui} \cdot s_i^T) - \frac{1}{L_i^2} [m_{di} \cdot (s_i \times r_{di}) \cdot (s_i \times r_{ui})^T + m_{ui} \cdot (s_i \times r_{ui}) \cdot (s_i \times r_{ui})^T - \tilde{s}_i \cdot (I_d - I_u) \cdot \tilde{s}_i]$$

Finalmente, depois de algumas substituições de a_p pela expressão na Eq. (2), está equação representa a força de reação do ponto de conexão i -enésima da plataforma (ver Fig. 2.1).

$$f_{si} = Q_i \cdot \ddot{p} - Q_i \cdot a_i \cdot \alpha + v_i - s_i \cdot f_{li} \quad (8)$$

B. Cinemática e dinâmica da plataforma móvel

Aplicando a expressão obtida com a Eq. (8), para as seis pernas ($i = 1, \dots, 6$), a equação dinâmica da plataforma pode ser formulada. Em seguida, a aceleração do centro de gravidade da plataforma é determinada por:

$$a_p = \alpha \times r_{pA} + \omega \times (\omega \times r_{pA}) + \ddot{p} \quad (9)$$

onde, $r_p = R r_{pA}$ e r_{pA} demonstra a distância do centro de gravidade da plataforma até o sistema de referência $\{A\}$. Aplicando a equação de Newton para o equilíbrio translacional e a equação de Euler para o equilíbrio rotacional da plataforma, se obtém respectivamente:

$$m_p \cdot a_p + m_p \cdot g - \sum_{i=1}^6 (f_{si}) = 0 \quad (10)$$

$$m_p \cdot r_{pA} \times a + m_p \cdot r_{pA} \times g - I_p \cdot \alpha - \omega \times I_p \cdot \omega + \sum_{i=1}^6 [a_i \times f_{si}] + \sum_{i=1}^6 f_i = 0 \quad (11)$$

onde m_p é a massa e $I_p = R I_{pA} R^T$ a inércia da plataforma e a carga útil. Por fim, as expressões de a_p e f_{si} são substituídos em equações de Newton e Euler e a equação dinâmica completa é obtida:

$$J \cdot \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \alpha \end{bmatrix} + \eta = H \cdot f_l \quad (12)$$

onde, $J = J_p + \sum_{i=1}^6 J_i$; $\eta = \eta_p + \sum_{i=1}^6 \eta_i$

$$e J_p = \begin{bmatrix} m_p \cdot I & -m_p \cdot \tilde{r}_p \\ m_p \cdot \tilde{R} & I_p + m_p (\|r_p\|^2 \cdot I - r_p \cdot r_p^T) \end{bmatrix}, J_i = \begin{bmatrix} Q_i & -Q_i \\ \tilde{a}_i \cdot Q_i & -\tilde{a}_i \cdot Q_i \cdot \tilde{a}_i \end{bmatrix},$$

$$\eta_p \begin{bmatrix} m_p \cdot [\omega \times (\omega \times r_p) - g] \\ \omega \times I_p \cdot \omega + m_p \cdot R \times [(\omega \cdot r_p) \cdot \omega - g] \end{bmatrix}, \eta_i = \begin{bmatrix} V_i \\ a_i \times V_i - f_{li} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} s_1 & \dots & s_6 \\ a_1 \times s_1 & \dots & a_6 \times s_6 \end{bmatrix},$$

essas matrizes representam a matriz Jacobiana do manipulador, e $f_{li} = [f_{l1} \dots f_{l6}]^T$. As equações da junta dinâmica são obtidas usando a aceleração do deslizamento das juntas prismáticas da perna i -enesima:

$$\begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \alpha \end{bmatrix} = H^T (\ddot{L}_i - u) \quad (13)$$

Finalmente, temos a equação dinâmica da plataforma de Stewart-Gough:

$$H^{-1} J H^{-T} \ddot{L}_i + H^{-1} (\eta - J H^{-T} u) = f_l \quad (14)$$

3. CONTROLE TORQUE COMPUTADO

Para aplicar a técnica de controle linear, é preciso linearizar a Eq. (12) não linear do manipulador. Com $A(L) = H^{-1} J H^{-T}$ e $B(L, \dot{L}) = H^{-1} (\eta - J H^{-T} u)$, a equação dinâmica não linear pode ser considerada, como:

$$f_l = A(L) \ddot{L} + B(L, \dot{L}) \quad (15)$$

Então a dinâmica do manipulador é linearizada utilizando a linearização por realimentação, Craig (2012). Assim $\hat{A}(L)$ e $\hat{B}(L, \dot{L})$ são estimadas de $A(L)$ e $B(L, \dot{L})$, respectivamente. Assumindo que $\hat{A}(L) = A(L)$ e $\hat{B}(L, \dot{L}) = B(L, \dot{L})$ (ver Fig. 3), a dinâmica é reduzida para um modelo linear associado com dois integradores, assim:

$$\ddot{q} = w \quad (16)$$

Sendo o w o novo vetor de controle. Essa equação corresponde ao esquema de controle da dinâmica inversa, onde o modelo da dinâmica direta é transformado em um integrador duplo. Deste modo, as técnicas de controle linear podem ser usadas para projetar o controlador de posição para o rastreamento de uma trajetória.

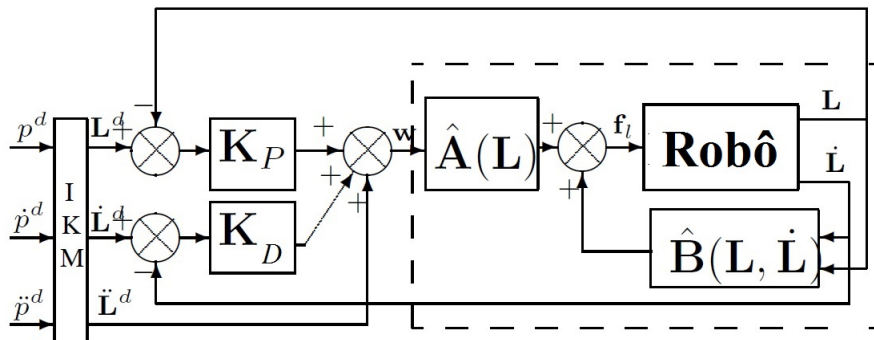


Figura 3: Controle Torque Computado e PD

Vamos assumir que a trajetória é especificada com a posição desejada L^d , velocidade $\dot{L}^d$ e aceleração $\ddot{L}^d$. A lei de controle para o controlador PD é dada por:

$$w = \ddot{L}^d + K_P(L^d - L) + K_D \frac{d}{dt}(L^d - L) \quad (17)$$

onde $K_P = \text{diag}(k_{P_1}, \dots, k_{P_6})$ e $K_D = \text{diag}(k_{D_1}, \dots, k_{D_6})$ são as matrizes diagonais que contém os ganhos do controlador. Os ganhos dos erros são encontrados para se obter o polinômio característico do sistema controlado: $(s^2 + 2\varepsilon\omega_r s + \omega_r^2) = 0$, onde s é a variável de Laplace. Assim, temos que $k_P = \omega_r^2$, $k_D = \xi\omega_r$.

4. REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO

O método de controle ótimo quadrático fornece uma forma sistemática de calcular o ganho de controle de realimentação de estado matriz. No projeto do regulador linear quadrático considera-se uma planta linear e invariante no tempo que é dada pelo sistema descrito pela equação de estados:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (18)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (19)$$

onde A , B , C e D representam as matrizes de estado, $x(t)$ é o vetor dos estados do modelo, $u(t)$ é o vetor das entradas e $y(t)$ são as saídas do sistema genérico (Ogata, 2010).

Assim temos a realimentação dos estados definida por:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (20)$$

sendo K a matriz de realimentação dos estados. Substituindo a Eq. (20) na Eq. (18) temos que a resposta em malha fechada é:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t). \quad (21)$$

Para se obter o ganho ótimo deve se minimizar a função quadrática:

$$J = \int_0^\infty [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (22)$$

onde as matrizes Q e R determinam a importância relativa do erro e do consumo de energia. Com os valores das matrizes Q e R , temos que a matriz de realimentação é representada por

$$K = R^{-1} B^T P, \quad (23)$$

em que $P = P^T \geq 0$ deve satisfazer a Equação Algébrica de Riccati (Ogata, 2010).

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (24)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de avaliar a resposta dinâmica da plataforma de Stewart-Gough foi utilizado o software Matlab/Simulink® na simulação numérica.

As técnicas de controle apresentadas anteriormente foram utilizadas para obter os ganhos dos controladores, para assim, atingir o objetivo de este estudo, que é aplicar e determinar os ganhos do LQR e estabelecer uma avaliação comparativa com o controlador PD em termos da resposta dinâmica do manipulador.

O modelo dinâmico direto da plataforma Stewart-Gough apresentado na Eq. (12) é usado na simulação do manipulador. Para simulação foram utilizados os parâmetros da Tab. 1 obtidos do trabalho de Dasgupta e Mruthyunjaya (1998). Aplicou-se os ruídos gaussianos nos sensores para oara considerar esta perturbação no controle (valor médio: $1 \mu\text{m}$ e desvio de 1.10^{-9}).

O controlador PD é sintonizado para obter uma resposta estável e sem sobrepaso, assim foram selecionados os parâmetros: $\omega_r = 35 \text{ rad/s}$ e $\xi = 1$, Desta forma obtiveram-se os ganhos proporcional e derivativo aplicando as expressões apresentadas anteriormente: $k_P = 1225$ e $k_D = 35$.

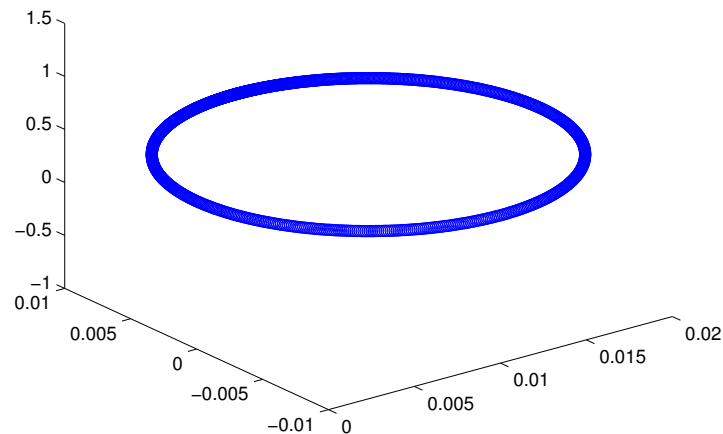
O LQR foi sintonizado de modo a satisfazer características semelhantes as do controlador PD. Baseado no modelo linearizado para cada junta da Eq. (16), foram definidas as matrizes do sistema das Eq. (18) e Eq. (19), assim: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

Tabela 1: **Parâmetros Manipulador (Dasgupta and Mruthyunjaya, 1998)**

Parâmetros	Valores
a_i	0,3 0,0 0,1
	0,3 0,2 0,0
	0,0 0,3 0,0
	-0,2 0,1 -0,1
	-0,15 -0,2 -0,05
	0,15 -0,15 -0,05
b_i	0,6 0,2 0,0
	0,1 0,5 0,1
	-0,3 0,3 0,1
	0,3 -0,4 0,0
	0,2 -0,3 -0,05
	0,5 -0,2 0,0
m_p	40 kg
r_d	3 kg
m_u	1 kg
r_d	$[0,4 \quad 0,14 \quad -0,18]^T m$
r_u	$[-6 \quad 0,08 \quad -0,08]^T m$
r_p	$[0,04 \quad 0,03 \quad -0,06]^T m$
I_d	$\begin{bmatrix} 0,010 & 0,005 & 0,007 \\ 0,005 & 0,002 & 0,003 \\ 0,007 & 0,003 & 0,001 \end{bmatrix}^T Kgm^2$
I_u	$\begin{bmatrix} 0,005 & 0,002 & 0,002 \\ 0,005 & 0,002 & 0,001 \\ 0,002 & 0,001 & 0,003 \end{bmatrix}^T Kgm^2$
I_p	$\begin{bmatrix} 0,05 & 0,003 & 0,004 \\ 0,002 & 0,040 & 0,003 \\ 0,004 & 0,003 & 0,100 \end{bmatrix}^T Kgm^2$

, $B = [0 \quad 1]^T$, $C = [1 \quad 0]$ e $D = [0]$. Para realizar a sintonia do controlador e definir as matrizes de ponderação dos estados e do RLQ devem ser definidas Q e R da Eq. (24), após diversas simulações chegou-se aos valores: $Q = \begin{bmatrix} 160000 & 0 \\ 0 & 253 \end{bmatrix}$ e $R = [0, 1]$. Consequentemente, foram obtidos os ganhos do controlador $k_P = 1264$ e $k_D = 71$.

Na Fig. 4 pode-se observar a trajetória circular de referência no espaço Cartesiano para a plataforma móvel, utilizando esta trajetória são avaliados os controladores LQR e PD.

Figura 4: **Rastreamento da trajetória.**

A Fig. 5 mostra o erro do rastreamento no espaço das juntas para as duas estratégias de controle PD e LQR, respectivamente. Pode-se observar que o erro de rastreamento de ambos controladores apresentam um resultado semelhante. Pelo

fato das duas técnicas de controle que foram utilizadas, gerarem ganhos relativamente próximos que não tiveram uma diferença considerável no resultado da simulação do erro rastreamento do manipulador para a trajetória estabelecida.

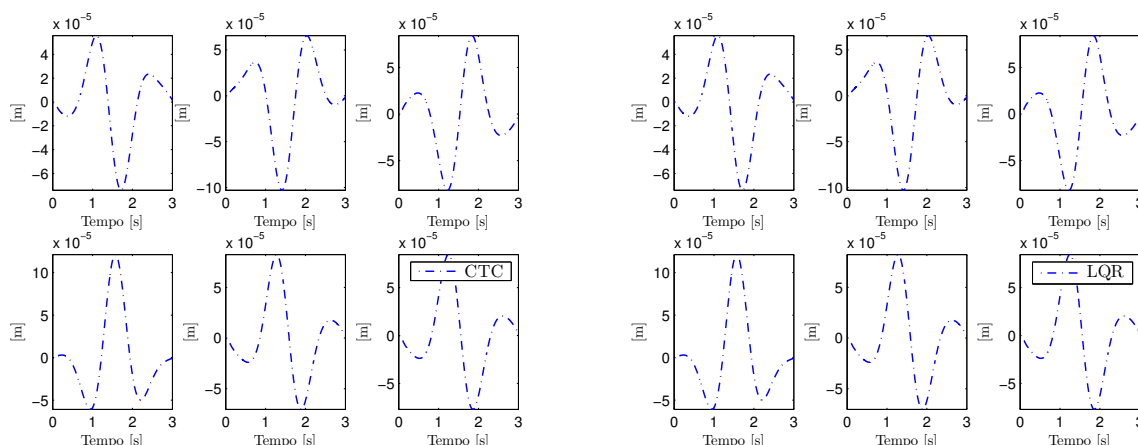


Figura 5: Erro junta para o rastreamento de uma trajetória circular para o controlador PD (esquerda) e o LQR (direita).

A Fig. 6 apresenta o comportamento das forças, em newton, dos seis atuadores através do uso das técnicas de controle PD e LQR para o rastreamento da trajetória estabelecida, que pode ser observada na Fig. 4. Em ambos os casos, os controladores apresentam resultados equivalentes, essas respostas se devem principalmente ao fato de os ganhos obtidos para os dois métodos de controle, PD e LQR, embora satisfatórios, não apresentarem grande efeito para a diferenciação dos resultados.

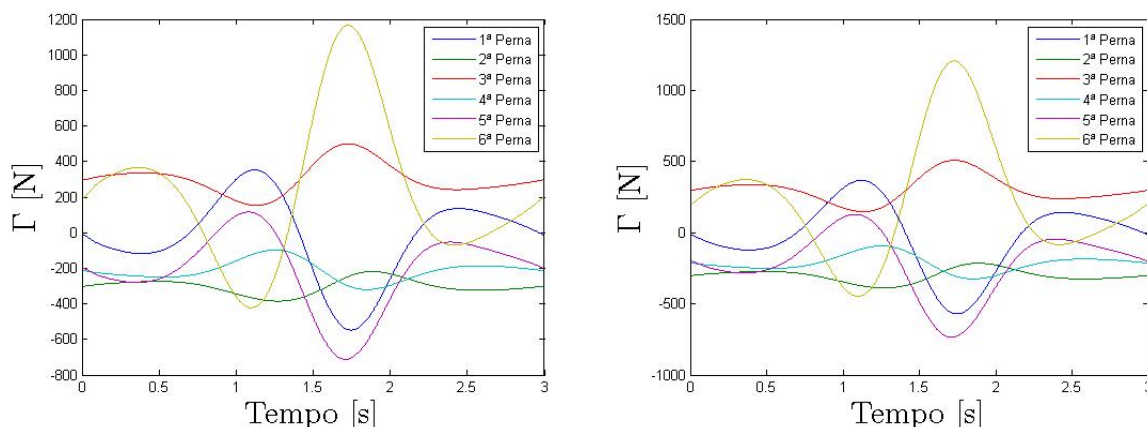


Figura 6: Rastreamento de uma trajetória utilizando os controladores PD e LQR, respectivamente.

Outra simulação que foi realizada é a reação à uma perturbação quando a plataforma móvel encontra-se em uma posição fixa $p = [0 \ 0 \ 0,395m \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e é aplicada uma carga de na direção z . Foi introduzida uma força de 5N na plataforma móvel com uma entrada degrau. Como pode ser visto na Fig. 7 para os dois métodos de controle, onde o gráfico da esquerda representa o PD e o da direita LQR. Consegue se observar que depois de 1,5 segundos é aplicada a força e de acordo com os controles PD e LQR a plataforma móvel é estabilizada novamente para sua posição inicial. Ambos apresentam comportamento semelhantes, porque os ganhos obtidos através do uso das técnicas de controle não impactaram em uma grande diferença no resultado.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a modelagem da Plataforma de Stewart-Gough, tal como as equações dinâmicas e cinemáticas da plataforma, para assim projetar o controlador de posição para o rastreamento das trajetórias.

Os controles ótimos foram aplicados para o rastreamento de posição da plataforma de Stewart-Gough. Para aplicar a lei controle linear, a dinâmica do manipulador paralelo foi linearizada através da realimentação do controlador. Foi utilizado o modelo completo da plataforma de Stewart-Gough para avaliar o desempenho dos controladores. Os resultados indicam que o desempenho dos controladores LQR e PD foram semelhantes, por apresentarem os ganhos do controlador próximos.

Para um trabalho futuro pode se testar outras técnicas para o controle ótimo da plataforma de Stewart-Gough. Ou também aplicar essas técnicas de otimização em outros manipuladores a fim de otimizar os controladores de posição.

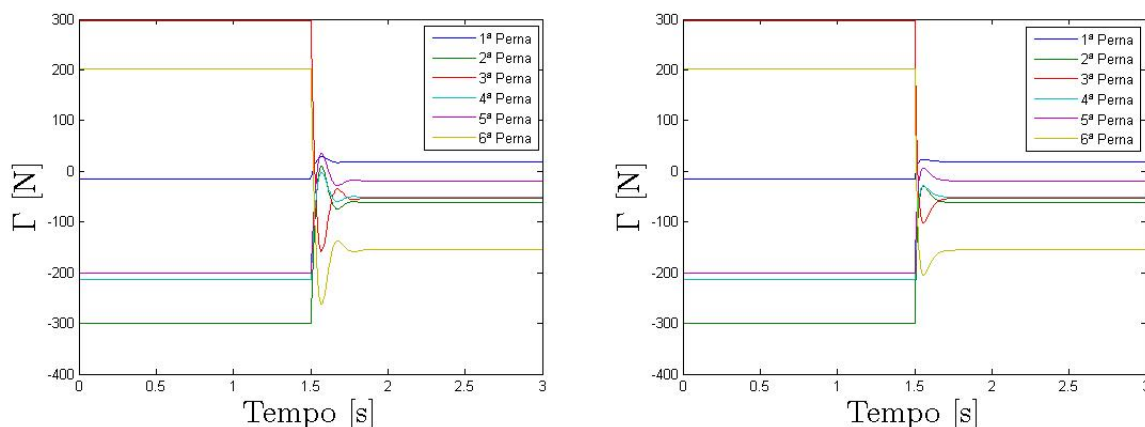


Figura 7: Regulador de uma perturbação (PD e LQR).

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de iniciação científica voluntária e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP) pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Craig, J.J., 2012. *Robótica*. Pearson, São Paulo, 3rd edition.
- Dasgupta, B. and Mruthyunjaya, T.S., 1998. "Closed-form dynamic equations of the general stewart platform through the newton-euler approach". *Mechanism and Machinery Theory*, Vol. 33, No. 7, pp. 993–1012.
- Davliakos, I. and Papadopoulos, E., 2007. "Model-based position tracking control for a 6-dof electrohydraulic stewart platform". *Mediterranean Conference on Control & Automation*, pp. 1–6.
- Ghobakhloo, A., Eghtesad, M. and Azadi, M., 2006. "Position control of a stewart-gough platform using inverse dynamics method with full dynamics". *9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, p. 50–55.
- Lara-Molina, F.A., Koroishi, E.H., Dumur, D. and Steffen, V., 2015. "Stochastic analysis of a 6-dof fully parallel robot under uncertain parameters". In *IFAC-PapersOnLine* 48(19). pp. 214–219.
- Lara-Molina, F.A., Rosário, J.M. and Dumur, D., 2011. "Robust generalized predictive control of stewart-gough platform". In *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*. pp. 1–6.
- Lara-Molina, F.A., 2008. *Ambiente de Simulação de Manipuladores Paralelos: Modelagem, Simulação e Controle de uma Plataforma Stewart*. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil.
- Ogata, K., 2010. *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 5th edition.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MOTION CONTROL OF A COMPLETELY PARALLEL MANIPULATOR USING OPTIMAL CONTROL

Victor Renan Bolzon, victor_bolzon@hotmail.com¹

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

Edson Hideki koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Thiago Murilo Grossi, thiagomgrossi@gmail.com¹

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

¹ Federal Technological University of Paraná

Abstract: This paper aim at apply the optimal control to a completely parallel manipulator of six degrees-of-freedom. The manipulator considered in this contribution is the Stewart-Gough Platform. For the position control was used the Linear Quadratic Regulator (LQR) and the Torque Control Computed (CTC) in order to minimize the tracking trajectory error in the workspace. In addition, a PD controller was implemented in order to compare the performance in terms of tracking accuracy, position errors and the control characteristics with the LQR control. For the implementation of the control was used the software Matlab / Simulink®.

Keywords: Stewart-Gough Plataform, Optimal Control, Linear-quadratic regulator, Computed Torque Control